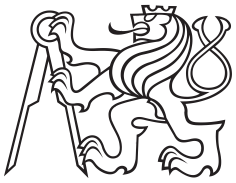
Bakalářská práce



České
vysoké
učení technické
v Praze

F3

Fakulta elektrotechnická
Katedra elektromagnetického pole

Vliv turbulencí na optický bezdrátový spoj s bezpilotním prostředkem

Martin Tóth

Vedoucí: Prof. Ing. Stanislav Zvánovec, Ph.D.
Školitel–specialista: Ing. Jan Bohata, Ph.D.
Obor: Síťové a informační technologie
Studijní program: Komunikace, multimédia a elektronika
Květen 2018

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Tóth** Jméno: **Martin** Osobní číslo: **434735**

Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**

Zadávající katedra/ústav: **Katedra elektromagnetického pole**

Studijní program: **Komunikace, multimédia a elektronika**

Studijní obor: **Síťové a informační technologie**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Vliv turbulencí na optický bezdrátový spoj s bezpilotním prostředkem

Název bakalářské práce anglicky:

Influence of Turbulence on Optical Wireless Link with Unmanned Aerial Vehicle

Pokyny pro vypracování:

Analyzujte vliv atmosféry na optické bezdrátové spoje mezi pozemním segmentem a bezpilotním prostředkem (UAV - Unmanned Aerial Vehicle). Zaměřte se zejména na vliv turbulencí, respektive kolísání refraktivity, s výškou na optické svazky (jejich vychylování) a bitovou chybovost (BER - Bit Error Rate). Sestavte laboratorní spoj a turbulentní komoru a změřte reálné parametry přenosu průchodu více vrstvami turbulencí.

Seznam doporučené literatury:

[1] Bouchet, O.; Sizun, H.; Boisrobert, Ch.; Fornel, F.; Favenec P-N.: Free-Space Optics Propagation and Communication. ISTE Publishing Company, 2010. ISBN: 978-0-470-39441-0.
[2] Uysal, M.; Capsoni, C.; Ghassemlooy, Z.; Udvary, E.: Optical Wireless Communications - An Emerging Technology. Springer, 2016. ISBN: 978-3-319-30201-0.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

prof. Ing. Stanislav Zvánovec, Ph.D., katedra elektromagnetického pole FEL

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) bakalářské práce:

Datum zadání bakalářské práce: **25.09.2017** Termín odevzdání bakalářské práce: **25.05.2018**

Platnost zadání bakalářské práce: **08.01.2019**

prof. Ing. Stanislav Zvánovec, Ph.D. podpis vedoucí(ho) práce	podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry	prof. Ing. Pavel Ripka, CSc. podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Student bere na vědomí, že je povinen vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v bakalářské práci.

. Datum převzetí zadání

Podpis studenta

© ČVUT v Praze, Design: ČVUT v Praze, VIC

Poděkování

Mé poděkování patří celé katedře elektromagnetického pole. Především mému vedoucímu Prof. Ing. Zvánovcovi, Ph. D. za cenné rády a dozor nad vypracováním bakalářské práce. Dále bych chtěl poděkovat Ing. Bohatovi, Ph. D. za rady a pomoc v laboratoři.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem zadanou bakalářskou práci zpracoval sám s přispěním vedoucího práce a konzultanta a používal jsem pouze literaturu v práci uvedenou. Dále prohlašuji, že nemám námitek proti půjčování nebo zveřejňování mé bakalářské práce nebo její části se souhlasem katedry.

V Praze, 25. května 2018

Abstrakt

Tato práce se zabývá vlivem atmosféry na optický bezdrátový spoj mezi pozemním segmentem a bezpilotním prostředkem. V teoretické části jsou popsány vlivy atmosféry a namodelován optický bezdrátový spoj. V druhé části je sestaven měřící spoj a jsou uvedeny výsledky měření. Na konci druhé části jsou výsledky přepočítány na reálný optický bezdrátový spoj. V poslední části je celá práce shrnuta.

Klíčová slova: Bezdrátový optický spoj, Vliv turbulencí, BER

Vedoucí: Prof. Ing. Stanislav Zvánovec, Ph.D.
katedra elektromagnetického pole, FEL

Abstract

This bachelor thesis deals with the influence of the atmosphere on optical wireless link between a ground segment and a unmanned vehicle. The theoretical part contains a description of the effects of the atmosphere and a model of the optical wireless link. The measurement link is drawn up in the second part of the thesis alongside the measurement results. At the end of the second part, these results are then recounted and adjusted to a realistic wireless optical link. The last section consists of a summary of the whole bachelor thesis.

Keywords: Free-space Optics, Influence of Turbulence, BER

Title translation: Influence of Turbulence on Optical Wireless Link with Unmanned Aerial Vehicle

Obsah

1 Úvod 1

2 Teoretická část 3

2.1 Bezdrátové optické spoje 3

2.1.1 Příklady využití FSO 3

2.2 Vliv počasí na spoj 7

2.2.1 Mraky 8

2.2.2 Mlha 8

2.2.3 Déšť 9

2.2.4 Sníh 10

2.2.5 Turbulence 11

2.3 Modelování spoje 13

2.4 Hodnocení kvality spoje 15

2.4.1 Útlum 15

2.4.2 SNR 16

2.4.3 Spektrum signálu 17

2.5 Popis přístrojů 18

2.5.1 BER tester 18

2.5.2 EDFA zesilovač 20

3 Experimentální část 23

3.1 Zapojení soustavy 23

3.2 Analýza signálu 25

3.3 Pilotní test 26

3.4 Měření se sníženým S/N 28

3.5 Měření v tubulentní komoře s proměnným C_n^2 31

3.6 Přepočet turbulencí na reálný 10 km spoj 35

4 Závěr 37

A Literatura 39

Kapitola 1

Úvod

První zmínky o světelných signálech jsou datovány z dob Tróji, kdy na kopcích byly postaveny věže s ohněm, pomocí kterého Peršané posílali signály mezi Persii a Řeckem během války. Od té doby uplynulo spousta století. Opravdu první telekomunikační zařízení se začaly vyvíjet až koncem 18. století ve Francii, kde Claude Chappe vynalezl optický telegraf. Optický telegraf byl instalován po celé Francii, avšak brzo byl nahrazen elektrickým. Na konci 19. století Graham Bell představil svoje první bezdrátové optické zařízení, photophone. Bylo to první zařízení, které k přenosu signálu používalo sluneční paprsky.

V současnosti jsou optické spoje velmi rozšířené. Nejrozšířenější je vláknová optika používána především pro přenos informace na velkou vzdálenost, ale také se dá použít jako senzor. Druhou používanou skupinou jsou bezdrátové optické spoje [1], které se používají hlavně tam, kde by se složitě instalovala optická vlákna. Za poslední skupinu označujeme komunikaci ve viditelném světle.[2] Ta se v současnosti hodně vyvíjí a testuje se spousta nových aplikací.

Oproti metalickým spojům mají optické trasy hned několik výhod - větší šířku pásma, větší přenosové rychlosti, a dokonce menší útlumy. To nám dovoluje provozovat spoje na delší vzdálenost a není potřeba velké množství zesilovačů. Dále odolávají vlivům elektromagnetických signálů a přeslechům. Mají menší rozměry i hmotnost a jsou plně dielektrické.

V této práci se budeme zabývat bezdrátovou optikou, která se používá pro přenos dat na velkou vzdálenost, např. pro komunikaci mezi dvěma budovami nebo s bezpilotním prostředkem. Budeme se zabývat vlivem atmosféry na

optický bezdrátový spoj, především se zaměříme na vliv turbulencí. Nejprve si celý spoj namodelujeme, následně si sestavíme laboratorní spoj v turbulentní komoře. Budeme měřit reálné parametry přenosu průchodu vice vrstvami turbulencí, kdy budeme měřit kolísání refraktivity, bitovou chybovost a zaznamenávat oko rozhodnutí. Následně tyto parametry přepočítáme na reálný 10ti kilometrový spoj.

Kapitola 2

Teoretická část

2.1 Bezdrátové optické spoje

Bezdrátové optické spoje (FSO, - Free-space Optics) je označení pro optickou komunikační technologii, ve které se světlo, ať už viditelné nebo infračervené, šíří bezdrátově volným prostředím.

Za volné prostředí považujeme například vzduch, vakuum, kosmický prostor, atd.

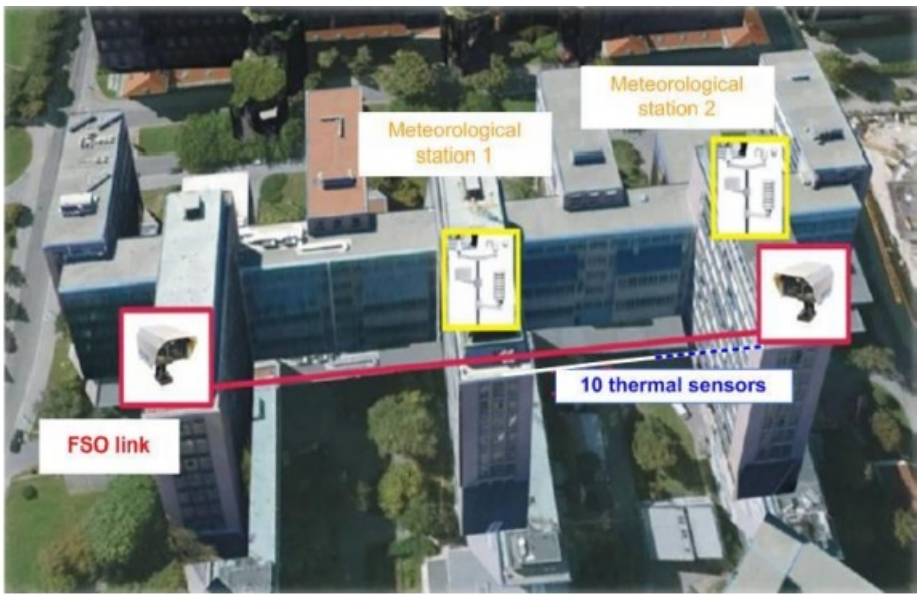
FSO může být provozováno na kilometrové vzdálenosti, jen musí být příma viditelnost mezi vysílačem a přijímačem. V atmosféře je proměnné počasí, které viditelnost, a tím i celý spoj, zhoršuje. Mezi nejčastější vlivy patří déšť, prach, sníh, mlha nebo smog. V nejhorším případě může být útlum tak velký, že to způsobí pád celého systému.

2.1.1 Příklady využití FSO

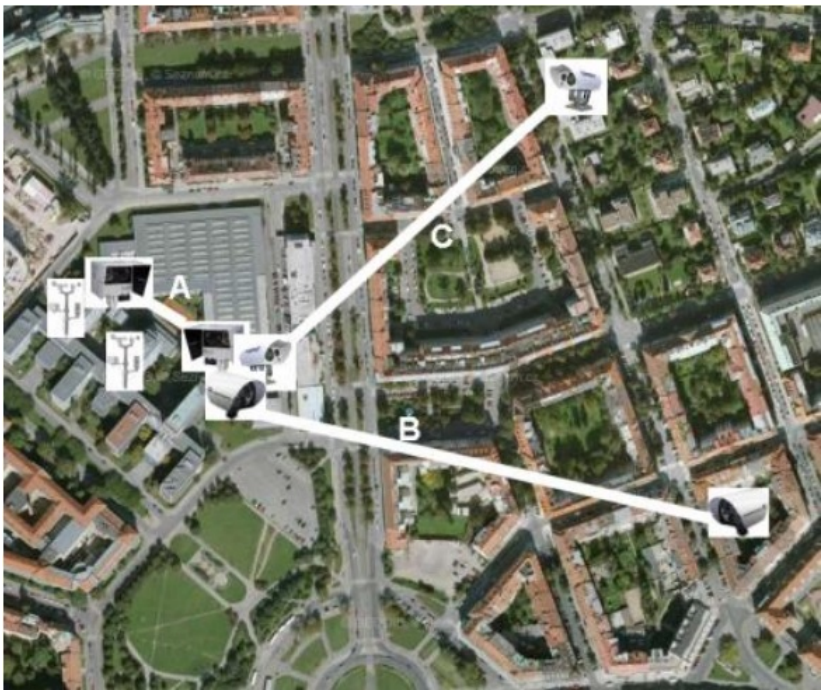
Technologii je výhodné používat tam, kde by fyzické spojení bylo velmi těžce realizovatelné nebo finančně náročné, protože by se musela budovat rozsáhlá infrastruktura vyžadující pozemní práva, plná nových zařízení, optických vláken, metalických kabelů nebo rádiových antén, která potřebují připojení k

elektrické síti. Jelikož existují vzdálené oblasti nebo oblasti s nízkou hustotou zalidnění, kde je pouze malé množství potencionálních zákazníků, je velice nepravděpodobné, že by se investorům investice navrátily, a proto stále zůstává velké procento populace bez připojení k internetu.

V dnešní době se FSO používá k přenosu dat, audia nebo videa, ale také se může používat k měření. Jedno takové měření neustále probíhá i na ČVUT FEL v Praze, viz. obrázek 2.1, kde na střeše mezi dvěma bloky jsou umístěné dvě laserové hlavice, meteorologické stanice WS981 a mezi nimi je 10 teplotních čidel TQS3, které měří teploty v rozsahu od -55C do +125C. Pomocí této sestavy jsme schopni měřit libovolné vlivy počasí. Avšak častěji se používá k přenosu dat. Takový spoj se používá například k datovému propojení dvou nebo více budov, které nejsou stavebně propojené. Můžeme tak velice snadno a rychle připojit budovu k internetu. I takové spojení ČVUT FEL používá, na obrázku 2.2 jsou vyznačeny spoje B a C, které slouží k datovému připojení dvou vysokoškolských kolejí.



Obrázek 2.1: Měřící FSO spoj. [3]



mají

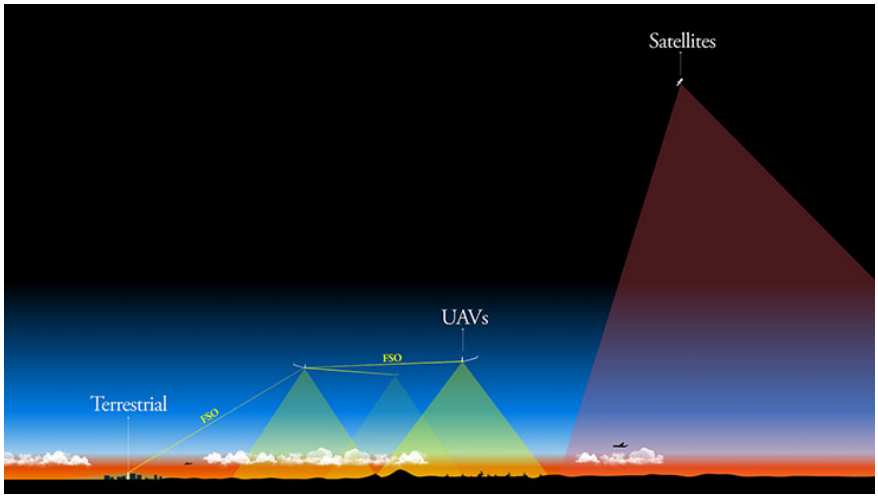
Obrázek 2.2: Datový FSO spoj. [3]

Komunikace s UAV

UAV (z anglického Unmanned Aerial Vehicle) je bezpilotní prostředek, který je buď řízený na dálku pomocí rádiového či optického spojení, nebo může být předprogramovaný a létat samostatně. Používá se k vícero účelům: v armádě k průzkumným i útočným letům, hasiči jej používají k lokalizaci či hašení požárů, policistům pomáhají při prozkoumávání míst, hledání pohřešovaných osob atd.

S novým využitím přišla společnost Facebook, která si dává za cíl rozšířit konektivitu k internetu do všech oblastí. Současně vyvíjí bezpilotní letadla[4], družice, optické systémy a pozemní řešení, aby se celý proces urychlil. Každá technologie může být použita jako stavební blok a dohromady mohou vytvářet celé sítě, které budou finančně méně náročné.

Aquila je nový typ bezpilotního letadla. Je poháněno solárním pohonem a ve vzduchu může pobývat několik měsíců. Aby tohoto mohlo být docíleno, je letoun velký a velmi lehký. Rozpětí křídel má stejně veliké jako Boeing 737, křídla jsou kompletně pokryta solárními panely, které slouží k dobíjení letadla. Tato letadla se pohybují v nadmořské výšce 20 až 25 kilometrů, nad obchodní leteckou dopravou a nad povětrnostními podmínkami.



Obrázek 2.3: Facebook Aquila. [4]

Komunikační zařízení se nachází v trupu letadla. Spojení se zemí a mezi letadly probíhá pomocí FSO, které slouží k ovládání letadla. Letadlo také obsahuje rádiové vysílače, kdy dolů směrem k lidem jsou schopny vytvořit komunikační kanál o poloměru 50 km. Tento signál bude přijímán malými přijímači, které ho budou konvertovat na Wi-Fi nebo LTE.

Mezi největší výhody patří absence budování infrastruktury, možnost přemístění letadel do různých oblastí, kontinuální modernizace a customizace palubní komunikační technologie podle potřeb trhu.

NASA

Americký Národní úřad pro letectví a kosmonautiku (NASA) dlouhá léta využívá pro spojení družic se zemí rádiové technologie, které už však dosahují svých možností, a tak se postupně přechází na novou technologii[5]. NASA si pro novou komunikaci vybrala lasery, tedy FSO technologii. Dosahuje se větších rychlostí, hlavně díky většímu datovému toku, protože prostorem se šíří stejně rychle jako rádiové vlny.

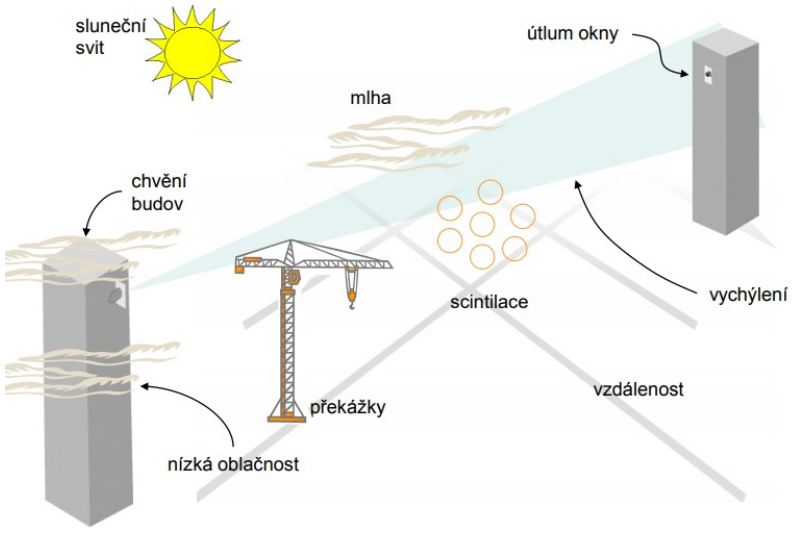
Vlnová délka laserů je až 10 000x kratší než rádiové vlny, paprsek má menší difrakci a tím pádem na přijímací straně budeme mít více optického výkonu. Kromě rychlosti a kratších vlnových délek máme ještě další benefit v podobě bezpečnosti. Všesměrové rádiové vlny se dají snáz odposlouchávat, neboť na Zemi mají podstatně širší stopu než lasery.

Obrázek 2.4: Využití FSO ve vesmíru. [5]

Vědci dokonce pracují s myšlenkou, že by jednoho dne na povrchu Měsíce mohla vzniknout základna či datacentrum, odkud se budou data odesílat, ale také tam budou uchovávána. Rychlé a stabilní připojení bude v tomto případě zcela zásadní.

2.2 Vliv počasí na spoj

Počasí má na spoj negativní účinky. Je velmi proměnlivé a nemůžeme ho nijak ovlivňovat. Na obrázku 2.5 jsou vidět nejčastější problémy u FSO spojů.



Obrázek 2.5: Vliv počasí na FSO. [3]

2.2.1 Mraky

Mraky jsou tvořeny malými částicemi vody, buďto v kapalném nebo pevném stavu, a vznikají kondenzací vlhkosti vody. Průměr jedné částice je přibližně 0,01mm. Přítomnost mraků se vyjadřuje indexem, který udává pokrytou oblohu, a je vyjádřen v desetinách procenta.[6]

Při pohybu paprsku skrz mraky dochází k jeho rozptýlení, které v sobě zahrnuje časovou a frekvenční disperzi a depolarizaci. Útlumy pro různé typy mraků v závislosti na vlnové délce jsou znázorněny v tabulce 2.1.

Typ mraku	Vlnová délka [μm]				
	0,5	1	3	5	10
Cumulus	0,09	0,095	0,1	0,1	0,05
Stratocumulus	0,18	0,18	0,2	0,21	0,12
Nimbostratus	0,5	0,6	0,6	0,65	0,5

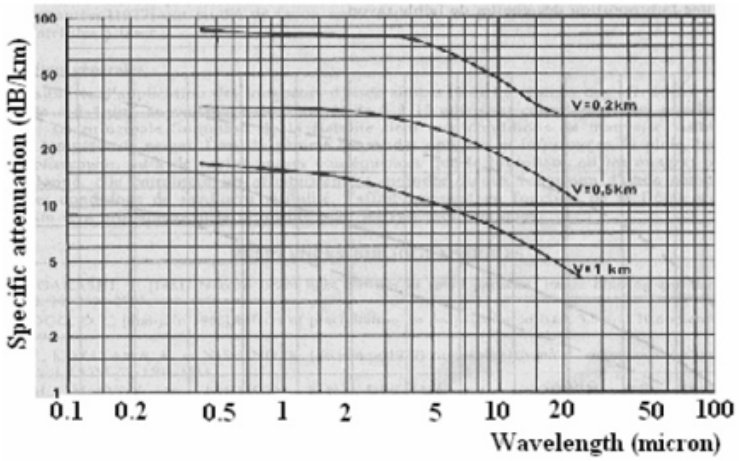
Tabulka 2.1: Hodnota útlumů [dB/km] pro určité typy mraků.[6]

2.2.2 Mlha

Mlha se skládá z vodních kapek, v chladnějších zemích to může být i led, které jsou vázány na vzduch. Kapky jsou tvořeny kondenzací vodní páry obsažené ve vzduchu. Složení a rozložení mlhy se pokaždé velmi liší. Obecně však platí, že má menší obsah vody než mraky. Výskyt je závislý na zeměpisné poloze. [6]

Je charakterizována viditelností, která udává maximální vzdálenost, při které není objekt viditelný pro lidské oko.

Obrázek 2.6 ukazuje závislost útlumu na vlnové délce pro různou viditelnost.



Obrázek 2.6: Závislost útlumu na vlnové délce, při různé viditelnosti. [6]

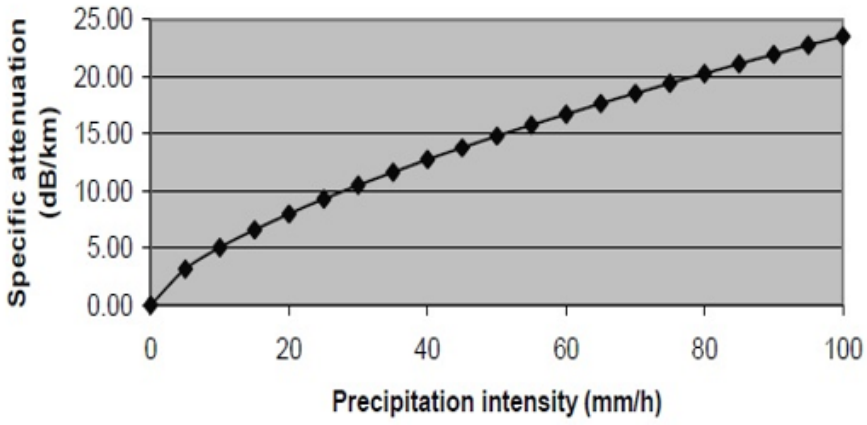
2.2.3 Déšť

Déšť se vytváří z vodní páry obsažené v atmosféře. Skládá se z vodních kapek, jejichž tvar a počet je proměnný. Za déšť jsou obecně považované kuličky s maximálním poloměrem 1 mm.[6]

Útlum je způsoben odrazem a lomem paprsku na dešťových kapkách a je závislý na množství srážek, tvaru kapek a vlastnostech vody, která je přítomna v kapkách.

Základním parametrem pro popis je intenzita srážek, udávaná v mm/h. Měření je prováděno buď přímo na povrchu země nebo nepřímo pomocí meteorologického radaru.

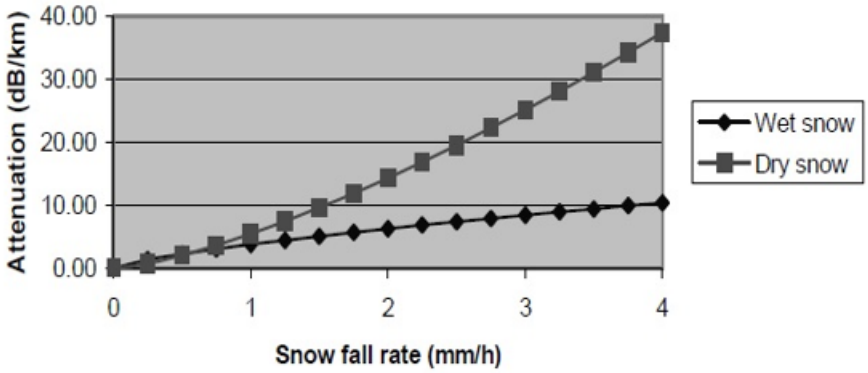
Obrázek 2.7 znázorňuje závislost útlumu na intenzitě srážek.



Obrázek 2.7: Závislost útlumu na intenzitě srážek. [6]

2.2.4 Sníh

Sníh padá ve formě vloček nebo ledových krystalů, v průměru mohou mít až 15 mm. Nemají definovanou podobu, proto jsou transformovány na koule a klasifikovány podle obsahu vody, který je nezbytný k určení vlivů na optický paprsek. Naopak led nemá vliv na útlum vlny. Útlum je závislý na vlhkosti a na intenzitě sněžení. [6]



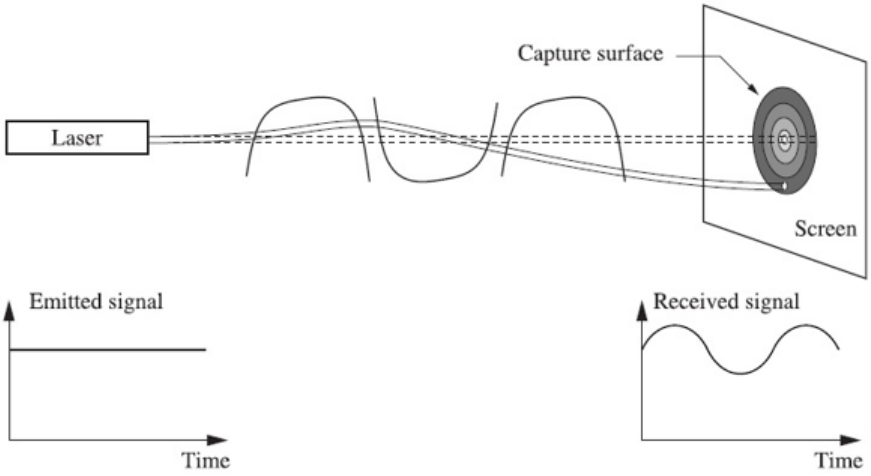
Obrázek 2.8: Závislost útlumu na intenzitě srážek. [6]

Rozlišujeme dva typy sněžení:

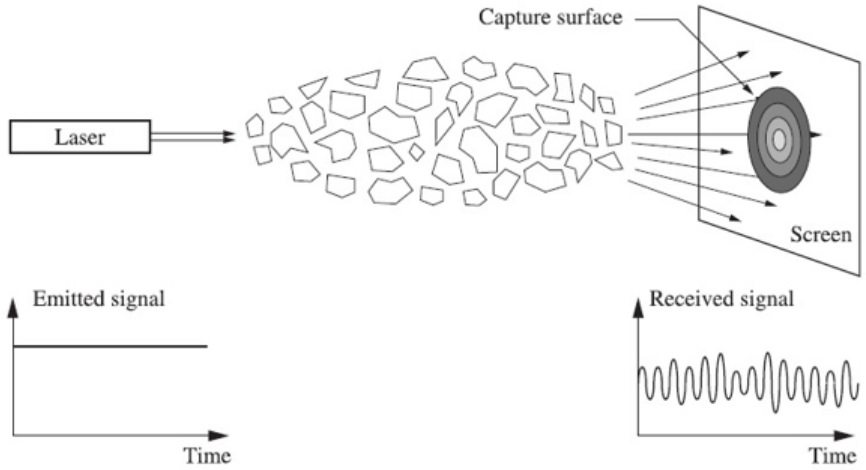
- s nízkou vlhkostí, suchý sníh, útlum může dosahovat až hodnoty 20 dB/km pro viditelné vlny a až 40 dB/km pro infračervenou oblast,
- s vysokou vlhkostí, mokrý sníh, je útlum pouze mezi 4 až 8 dB/km pro viditelné i infračervené vlny.

2.2.5 Turbulence

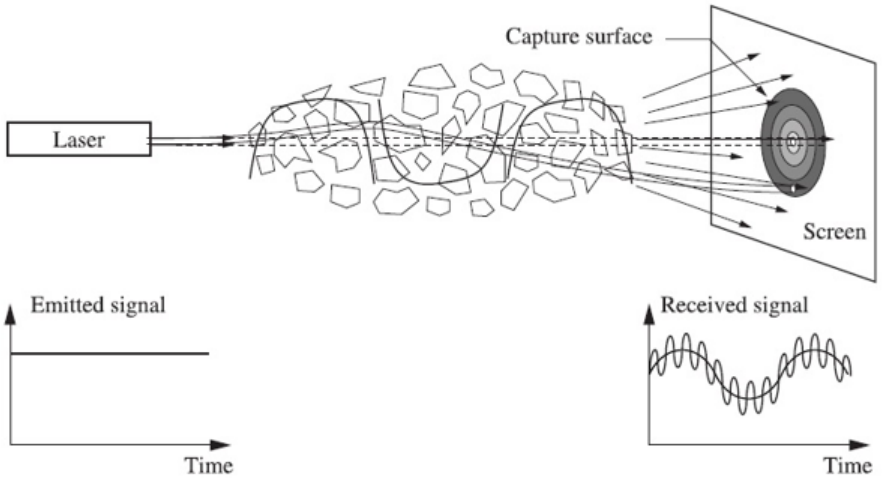
Vlivem teplotních rozdílů, turbulencí, vznikají náhodně rozložené buňky. Jejich velikost je různá, od 10 cm až do 1 km, a liší se v teplotách. Každá buňka má různý index lomu, to způsobuje rozptyl a změnu úhlu dopadu svazku. Přijatý signál rychle kolísá na frekvenci od 0,01 až 200 Hz. Stejně se mění i čelo vlny, což způsobuje zaostření a rozostření paprsku, tzv. scintilace. Amplituda a frekvence scintilací závisí na velikosti buněk v porovnání s průměrem paprsku, viz. následující obrázky. [6]



Obrázek 2.9: Vychýlení paprsku vlivem turbulencí, když jsou buňky větší než průměr paprsku. [6]



Obrázek 2.10: Vychýlení paprsku vlivem turbulencí, když jsou buňky menší než průměr paprsku. [6]



Obrázek 2.11: Působení různých scintilací na paprsek. [6]

Pro vyjádření scintilací musíme znát tzv. strukturní parametr indexu lomu, který vyjadřuje intenzitu turbulencí. Můžeme ho vypočítat podle následujícího vztahu[7]:

$$C_n^2 = (79 * 10^{-6} * \frac{P}{T^2})^2 * C_T^2 \tag{2.1}$$

$$C_T^2 = \frac{(T_1 - T_2)^2}{L_p^{2/3}} \tag{2.2}$$

kde:

P [mbar] je atmosférický tlak
T [K] je průměrná teplota
$T_1 - T_2$ [K] je rozdíl dvou teplot, mezi kterými počítáme turbulence
L_p je délka mezi teplotami

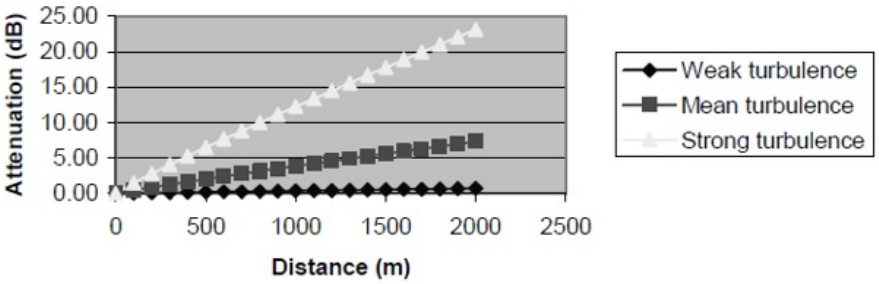
Následně vyjádříme scintilace pomocí vztahu [8]:

$$\sigma_T^2 = 1,23 * k^{7/6} * C_n^2 * L^{11/6} \tag{2.3}$$

kde:

$k = 2\ \pi/\lambda$ je vlnové číslo
λ [m] je vlnová délka vysílaného signálu
L [m] je délka spoje

Útlum je závislý na síle turbulence, použité vlnové délce a délce spoje, na které spoj provozuje. Závislost je zobrazena na obrázku 2.12.



Obrázek 2.12: Závislost útlumu na délce spoje pro 1550 nm. [6]

2.3 Modelování spoje

Před samotným měřením je dobré vědět, jaké výsledky máme očekávat. Teoretické hodnoty nám skvěle poslouží při kontrole měření. Ukážou nám, jestli postupujeme správně, nebo něco měříme špatně. K namodelování FSO spoje nám budou stačit následující vzorce.[1]

Pomocí rovnice (2.4) si vypočítáme intenzitu turbulencí se změnou nadmořské výšky.

$$C_n^2 = 0,00594*(\frac{v_{rms}}{27})^2*(10^{-5}*h)^{10}*e^{-h/1000}+2,7*10^{-16}*e-h/1500+A*e-h/100 \tag{2.4}$$

kde:

C_n^2 je intenzita turbulencí

v_{rms} je průmerná rychlost větru v dané oblasti

h je nadmořská výška

A je prvotní hodnota turbulencí

Dále si z předchozích turbulencí vyjádříme scintilace. Ty jsou závislé na úhlu, pod kterým paprsek vzhledem k povrchu země vysíláme. [1]

$$\sigma_R^2 = 2,25k^{7/6} * sec^{11/6}(90-\varepsilon)\int_{h_0}^{H} C_n^2(h)(h-h_0)^{5/6}dz \tag{2.5}$$

kde:

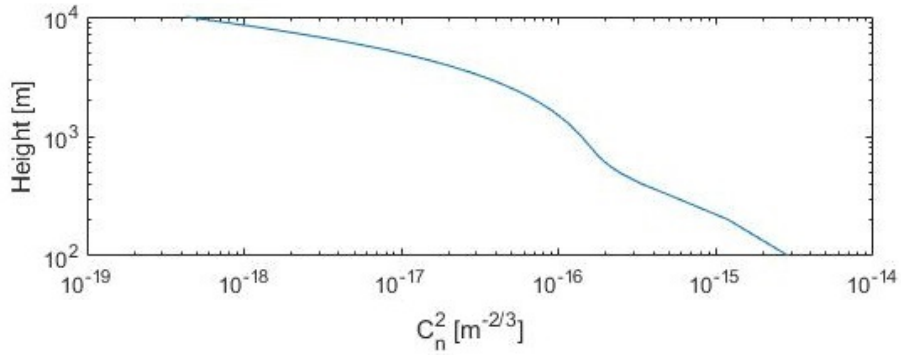
σ_R^2 jsou scintilace pro danou výšku

ε je úhel, pod kterým paprsek vysíláme

H je maximální výška

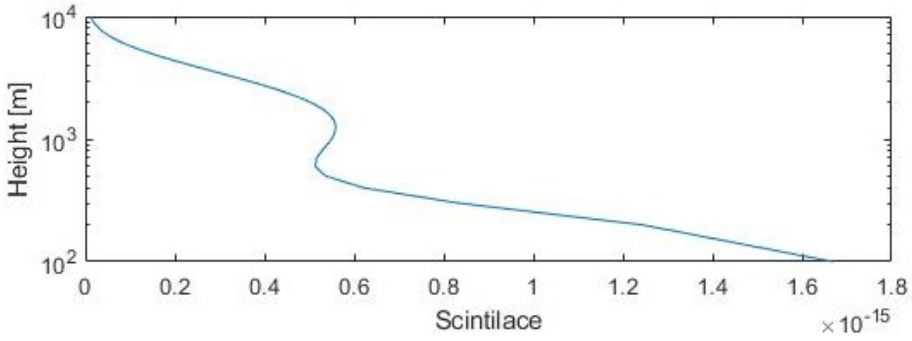
h_0 je výška, ve které se vysílač nachází.

Na obrázku 2.13 je zobrazena závislost turbulencí na nadmořské výšce. Z grafu je patrné, že největší turbulence se nachází v blízkosti povrchu a s rostoucí výškou klesají. Graf je platný pro Českou republiku, protože turbulence jsou závislé na povětrnostních podmínkách. Vycházel jsem z dat Českého hydrometeorologického ústavu, který tyto údaje sleduje již několik let na různých místech ČR.

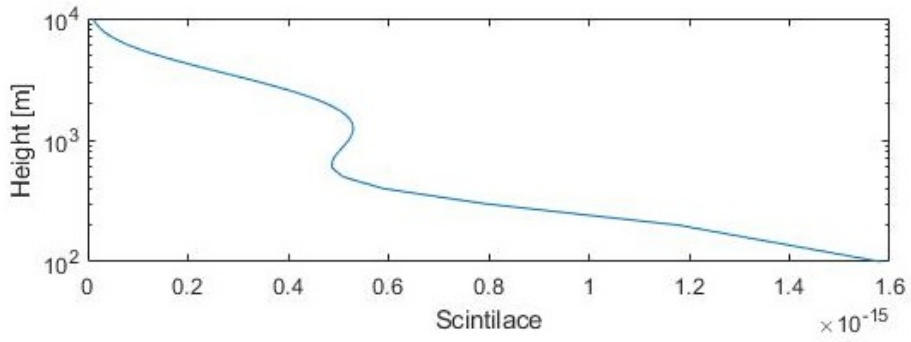


Obrázek 2.13: Závislost refractive indexu na výšce.

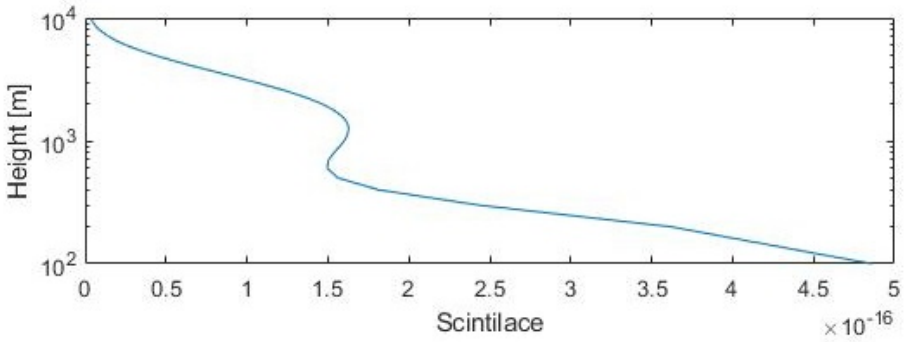
Závislost úhlu je znázorněna na obrázcích 2.14 až 2.16. Z grafů je patrné, že mezi úhly 0^o a 45^o je minimální, zanedbatelný, rozdíl. Oproti tomu pro úhel 90^o jsou scintilace o jeden řád menší. Nejvýhodnější je tedy paprsek vysílat kolmo od Země a tím co nejvíce omezit vliv turbulencí. Ale jelikož se přijímací stanice pohybuje, nemůže tohoto výsledku docílit vždy.



Obrázek 2.14: Závislost scintilací na výšce pro úhel 0^o.



Obrázek 2.15: Závislost scintilací na výšce pro úhel 45^o.



Obrázek 2.16: Závislost scintilací na výšce pro úhel 90^o.

2.4 Hodnocení kvality spoje

2.4.1 Útlum

Útlum je základní a nejdůležitější parametr každého optického spoje. Charakterizuje, kolik energie ze světelného signálu se ztratí při průchodu danou soustavou a vypovídá o kvalitě optické trasy jako celku [9]. Útlum optické trasy lze snadno vypočítat dle rovnice (2.6).

$$L(\lambda) = 10 \log \frac{P_2}{P_1} \, [dB] \tag{2.6}$$

Kde P_2 je výstupní výkon [W] a P_1 je vstupní výkon [W] pří vlnové délce λ.

V praxi se můžeme potkat s měrným útlumem, což je výkon vztažený na jednotku délky (nejčastěji na kilometr) (2.7).

$$\alpha(\lambda) = \frac{L(\lambda)}{l} \, [dB * km^{-1}] \tag{2.7}$$

Kde $L(\lambda)$ je útlum trasy [dB] a l je délka spoje [km]

Útlum může být způsoben řadou příčin. Nejčastější příčinou jsou materiálové ztráty, které vyplývají z vlastností materiálů použitých při výrobě optických vláken.[10] U bezdrátových optický spojů tvoří hlavní přičinu útlumu atmosféra.

2.4.2 SNR

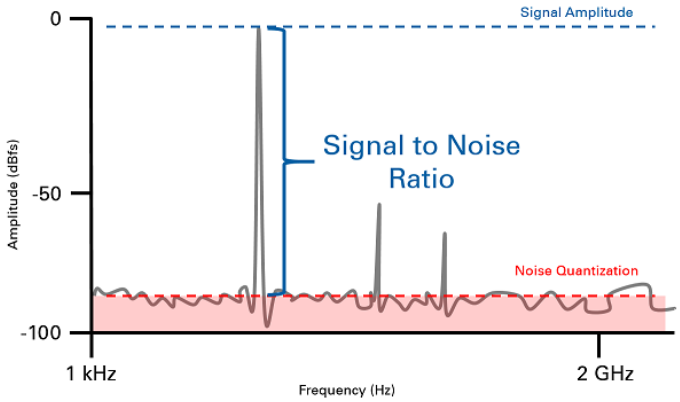
SNR (z anglického Signal-to-noise ratio) porovnává úroveň požadovaného signálu s úrovní šumu [11]. Je definován jako poměr výkonu signálu k výkonu šumu, viz. rovnice (2.8).

$$SNR = \frac{P_{signal}}{P_{sum}} \, [-] \tag{2.8}$$

Kde P je výkon signálu a šumu měřený ve stejném místě přenosového systému.

Pro pohodlnější a rychlejší orientaci a práci se většina parametrů komunikačních systémů vyjadřuje v decibelech [11], tak i SNR můžeme na decibely přepočítat pomocí rovnice (2.9).

$$SNR_{dB} = 10 \log SNR \, [dB] \tag{2.9}$$

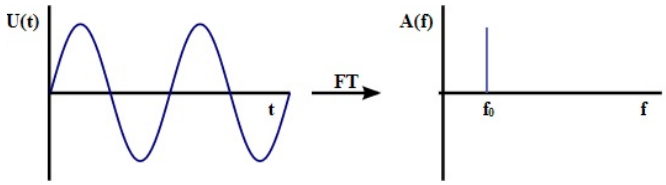


Obrázek 2.17: Ukázka SNR. [12]

Veškerá reálná měření obsahují šum, který zahrnuje jak optický (elektrický) šum, i šum způsobený vnějšími událostmi. Mezi ně patří například vliv větru, vibrace, změna teploty, vlhkost atd. Obvykle můžeme šum snížit na takovou hodnotu, která se dá zanedbat. Občas stačí snížit zesílení zesilovače a parametry spoje se výrazně zlepší. Známe-li charakteristiku šumu, můžeme ho lehce odfiltrovat nebo zpracovat signál, viz. obrázek 2.17. Naopak je-li konstantní nebo pravidelný signál a náhodný šum, měříme SNR v průměru, čímž se šum sníží jako druhá odmocnina průměrného počtu vzorků.

2.4.3 Spektrum signálu

Signál je plně popsán v časové doméně. Avšak v řadě úloh je výhodnější popisovat signál ve frekvenční doméně. Podstatou této reprezentace je vyjádření signálu jako součet goniometrických funkcí, tedy funkcí sinus a cosinus. Grafu, který toto znázorňuje, říkáme spektrum, obrázek 2.18 znázorňuje převod z časové do frekvenční oblasti, a operace, používaná k převodu, je označována jako Fourierova transformace. [13] V další části práce se podíváme, jak vypadá námi vysílaný signál ve spektrální oblasti a popíšeme si jeho základní parametry.



Obrázek 2.18: Transformace signálu z časové do frekvenční domény. [14]

Spektrum signálu je nezávislé na čase. Moduly, koeficienty Fourierovi řady, určují velikost rotujících vektorů, z nichž je signál složen. Jejich fáze poté určují jejich fázový posun.

Fourierova transformace je obousměrný proces, můžeme tedy ze signálu vypočítat jeho spektrum a zároveň ze spektra získáme zpět signál.

Spektrum signálu se vypočítá jako:

$$c_n = \frac{1}{T_0} \int_{T_0} s(t) e^{-jn\omega_0 t} dt. \tag{2.10}$$

kde:

- T_0 je perioda signálu
- $s(t)$ je signál v časové oblasti
- n je index koeficientu
- ω_0 je fázová rychlost

Signál se ze spektra získá jako:

$$s(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} c_n e^{-jn\omega_0 t}. \tag{2.11}$$

2.5 Popis přístrojů

2.5.1 BER tester

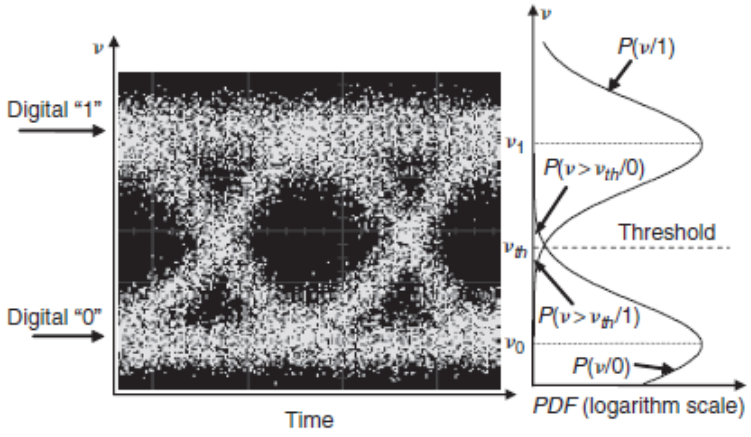
Bitová chybovost (z anglického Bit Error Rate) je základním měřítkem kvality digitálního přenosu. Je to pravděpodobnost chyby digitálních bitů přijímaného

signálu, tedy udává počet bitových chyb za jednotku času. Ovlivňuje ho řada faktorů v celém přenosovém kanálu, jako například Gaussův šum, disperse, problémy se synchronizací, atd. Počítá se jako [15]

$$BER = \frac{Bit_{Error}}{Bit_{Total}} \tag{2.12}$$

kde Bit_{Error} je počet chybně přijatých bitů a Bit_{Total} jsou všechny přijaté bity v určitý časový okamžik.

Pro odhad BER se používá systémová Q funkce, která vztahuje BER k poměru rozdělení mezi digitální stavy a Gaussův šum. Přijímaný signál je zpracováván rozhodovacím obvodem, který zaznamenává úroveň napětí nad referenční hodnotu pro logickou jedničku, prahovou hodnotu a logickou nulu. Oko rozhodnutí se vytváří překrýváním po sobě jdoucími segmenty přijatého signálu. Ukazuje fázový stav vlny (vodorovná osa) a napětí (svislá osa) [15].



Obrázek 2.19: Pravděpodobnost rozdělení funkce oka rozhodnutí. [15]

Obrázek 2.19 zobrazuje pravděpodobnost rozdělení funkce(PDF - z anglického Probability distribution function) oka rozhodnutí, pomocí kterého můžeme odvodit výpočty BER, které je podmíněné pravděpodobností přijmu signálu y, za předpokladu, že vyslaný signál je x, $P(y/x)$, kde x a y může nabývat hodnoty 0 nebo 1. Jelikož vyslaný digitální signál může být 0 nebo 1, poté můžeme definovat $P(y/0)$ nebo $P(y/1)$ jako pravděpodobnost rozdělení funkce přijatého signálu y. Předpokládáme, že pravděpodobnost poslání 0 a 1 jsou $P(0)$ a $P(1)$, rozhodovací úroveň je v_{th}, poté se BER počítá jako [15]

$$BER = P(0)P(v > v_{th}/0) + P(1)P(v < v_{th}/1) \tag{2.13}$$

kde v je přijatá úroveň signálu. Ve většině binárních systémů je pravděpodobnost vyslání 0 a 1 stejná, $P(0) = P(1) = 0,5$.

Bit error rate tester je elektrické zařízení, které nám měří bitovou chybovost. Typicky generuje do přenosového kanálu signál, který na přijímací straně opět

detekuje a porovnává jej. Může se používat v párech, kdy na každé straně trasy máme jedno zařízení, a nebo jednodušší řešení, kdy máme jeden tester na obou koncích.

Pro naše měření budeme používat zařízení VePAL TX300E [16], které může být využíváno k měření různých parametrů. Bitovou chybovost měří do maximální hodnoty $1 * 10^{-12}$, na což během měření nesmíme zapomínat, protože po jejím překročení zařízení ukazuje nulovou chybovost, která však není správná a mohla by negativně ovlivňovat výsledky.

Obrázek 2.20: BER tester. [16]

2.5.2 EDFA zesilovač

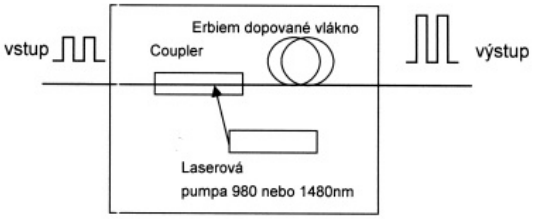
Optovláknové zesilovače byly velice důležitým milníkem v rozvoji optických systému. Hlavní výhodou je schopnost zesilovat optický signál současně na několika vlnových délkách, protože dříve se používaly optoelektrické opakovače, které zesilují pouze jednu vlnovou délku. Používáme tedy pouze jeden zesilovač na trase, a to znamená snížení nákladů při budování nových tras. Zároveň zvýšíme počet vlnových délek, kterými můžeme signál přenášet, což je předpoklad pro zvýšení kapacity trasy [17].

Podle principu zesílení se dělí na zesilovače xDFA(EDFA, PDFA, TDFA, YDFA) používající vlastní vnitřní vlákno dopované určitou látkou a na Ramanovské zesilovače využívající optické vlákno vlastní přenosové trasy.

- EDFA – první optovláknový zesilovač, vyvinut na přelomu 80 a 90 let minulého století. Využívá vlákno dopované erbiem nebo erbiem a yterbiem a zesiluje v C (1530 – 1565nm) a L (1565 – 1625nm) pásmu.
- PDFA – vlákno dopované preseodymem pro zesilování v O pásmu (1260 – 1360nm).

- TDFA – vlákno dopované thuliem pro zesilování v S pásmu (1460 – 1530nm).

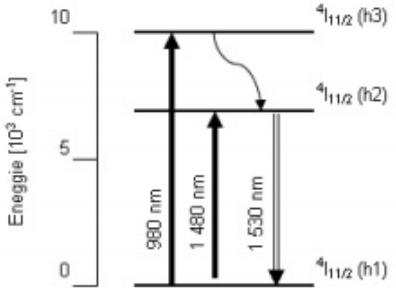
Fyzikální princip EDFA



Obrázek 2.21: Princip EDFA zesilovače. [17]

Princip EDFA zesilovače je zobrazen na obrázku 2.21. Základem zesilovače je vlákno o určité délce dopované ionty erbia Er^{+3}. Vlivem navázaného záření z laserové pumpy (o vlnové délce 980 nm nebo 1480 nm) do speciálního vlákna o délce několika metrů dochází k excitaci atomů dopovaného prvku na vyšší energetické hladiny h3(980 nm) nebo h2(1480 nm), viz. obrázek 2.22. Foton po načerpání na hladinu h3 velmi rychle klesá do metastabilního stavu h2 jako při přímém čerpání. V této rovnovážné hladině foton dokáže setrvat delší dobu. Ve fotonech je dočasně uložena energie získaná z laserové pumpy a přítomností přenášeného signálu je energie uvolňována, dochází ke stimulované emisi záření o shodné vlnové délce a fázi s přenášeným zářením – koherentní záření. [17]

Při použití laserové pumpy 1480 nm dosáhneme vyššího zesílení, ale také většího šumu než-li při použití 980 nm pumpy.



Obrázek 2.22: Energetické hladiny Erbia. [17]

Kapitola 3

Experimentální část

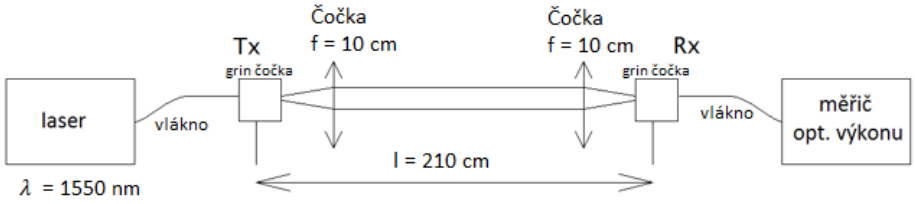
3.1 Zapojení soustavy

Měřící zapojení obsahuje následující komponenty: laser, BER tester, dvě grin čočky, EDFA zesilovač, rozbočovač, oscilátor, optický analyzér, ventilátory a optická vlákna. Budeme používat jednovidová optická vlákna s různými konektory, protože každé zařízení má jiný typ. Jedná se o konektory ST, FC, SC. Dále je potřeba všechny konektory vyčistit, aby na nich nebyla žádná nečistota, která by zapříčinila ztráty výkonu na spoji.

Zařízení	Typové označení
BER tester	VePAL TX300E
Optický zesilovač	Keopsys KPS-BT2-C
Osciloskop	Agilent Infiniium DCA-J
Optycký analyzér	EXFO FTB-500

Tabulka 3.1: Seznam používaných zařízení

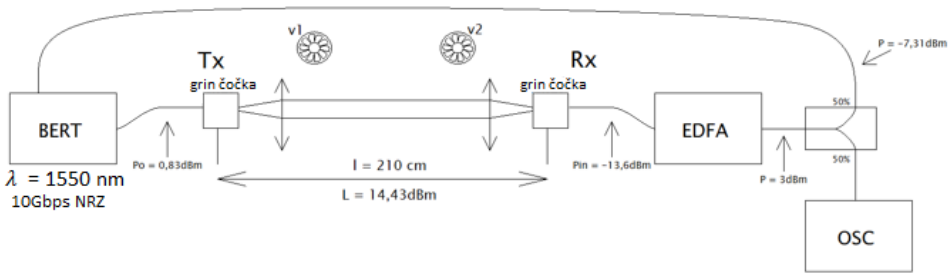
Když máme vše takto připravené, pustíme se do zapojování soustavy. Pro optimální nastavení bezdrátového optického spoje připevníme na jednu stranu optického spoje grin čočku a na její vstup zapojíme optický laser v kontinuálním režimu, který vysílá světlo na vlnové délce 1550 nm. Naproti grin čočce vzdálenosti 210 cm umístíme druhou grin čočku a na vstup připojíme měřič optického výkonu. Mezi grin čočky umístíme dvě čočky spojky s ohniskovou vzdáleností 10 cm, aby se paprsek příliš nerozbíhal, viz obrázek 3.1.



Obrázek 3.1: Zapojení pro nastavení bezdrátového optického spoje.

Když máme sestavu připravenou, musíme na přijímací straně paprsek navázat zpět do vlákna. Zapneme laser a měřič optického výkonu. Postupně natáčíme oběma čočkami až do té doby, než na měřícím přístroji naměříme největší možný optický výkon.

Nyní máme paprsek navázaný zpět do vlákna, laser a měřič optického výkonu můžeme odpojit. Na vysílací grin čočku připojíme BER tester. Na přijímací stranu zapojíme EDFA zesilovač. Na jeho výstup dáme rozbočovač v poměru 1:1. Jeden výstup rozbočovače připojíme zpět do BER testeru a na druhý připojíme osciloskop, na kterém budeme pozorovat, jak se mění oko rozhodnutí a měřit jeho základní charakteristiky. Podél celého spoje umístíme10 teplotních senzorů od sebe vzdálených 20 cm. Připravíme si ventilátory a nasměrujeme je na jednu část spoje, viz. obrázek 3.2

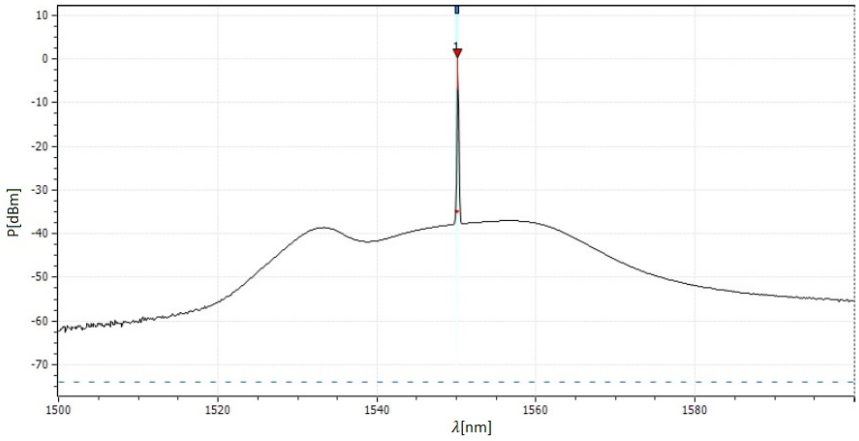


Obrázek 3.2: Finální schéma zapojení.

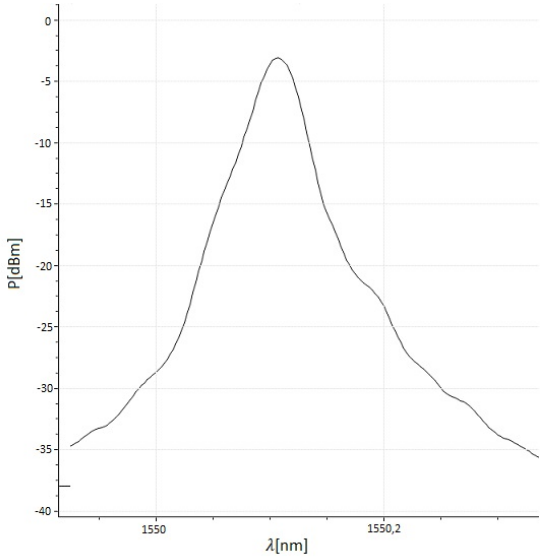
Celé měření bude probíhat cyklicky. Jednu část spoje budeme postupně zahřívat, čímž budeme vytvářet turbulentní prostředí. V určitých okamžicích budeme odečítat teploty z čidel pro výpočet úrovně turbulencí a zaznamenávat oko rozhodnutí s jeho parametry. Nakonec měření vypočítáme strukturní parametr indexu lomu a Rytovu variaci.

3.2 Analýza signálu

Ještě předtím, než se pustíme do samotného měření vlivu turbulencí na optický přenos, se podíváme, jak vypadá náš přijatý signál ve spektrální oblasti. BER tester generuje signál na vlnové délce 1550 nm. Zde tedy očekáváme maximální výkon přijatého signálu. Zároveň laser obecně generuje úzký světelný svazek, který je koherentní a monochromatický.



Obrázek 3.3: Měřené spektrum signálu.



Obrázek 3.4: Peak spektra.

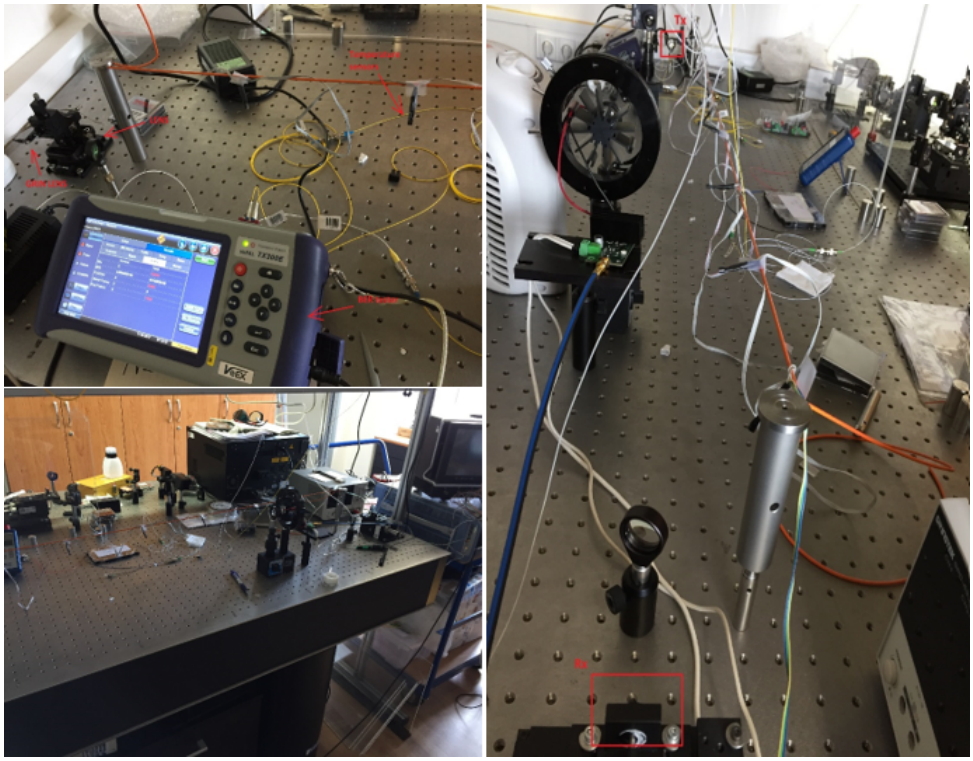
Na obrázku 3.3 je zobrazeno naměřené spektrum signálu. Je zde vidět, že maximální výkon je na vlnové délce 1550,106 nm. Spektrální čára zdroje je zobrazena na obrázku 3.4. Šířka spektrální čáry při poklesu o 3dB je 0,033 nm. Tento rozdíl je u laserového světla vždy, protože neumíme vytvořit světlo pouze o jedné vlnové délce. Na obou stranách od peaku se nachází

velké množství šumu, který je způsoben jak turbulencemi, tak hlavně EDFA zesilovačem, který daný šum generuje. Platí, že čím větší je zesílení, tím větší bude i šum v okolí. Proto je potřeba nastavit zesilovač tak, aby šum nerušil užitečný signál a výsledky nebyly tolik ovlivněny.

Signál přijímáme s výkonem -2,09 dBm a odstup signál-šum je 27,97 dBm.

3.3 Pilotní test

Cílem pilotních testů nebylo získat sofistikované výsledky, ale optimalizovat nastavení přístrojů., osahat si je, naučit se je používat a nastavovat. Bylo důležité zjistit zprovoznit první spoj, z něhož budeme následně vycházet pro další měření. Velký problém zejména dělalo navazování paprsku do přijímače. Celý tento proces je o jemném nastavování vysílací a příjímací grin čočky a trvalo to několik desítek minut. Nakonec se to podařilo a výsledek reálného zapojení je zobrazen na obrázku 3.5



Obrázek 3.5: Merici soustava.

Naměřené hodnoty jsou zobrazeny v tabulce 3.2. Je z nich patrné, že jsme turbulence vytvářeli uprostřed spoje, kde jsme dosahovali maximální teploty až $61,74^oC$.

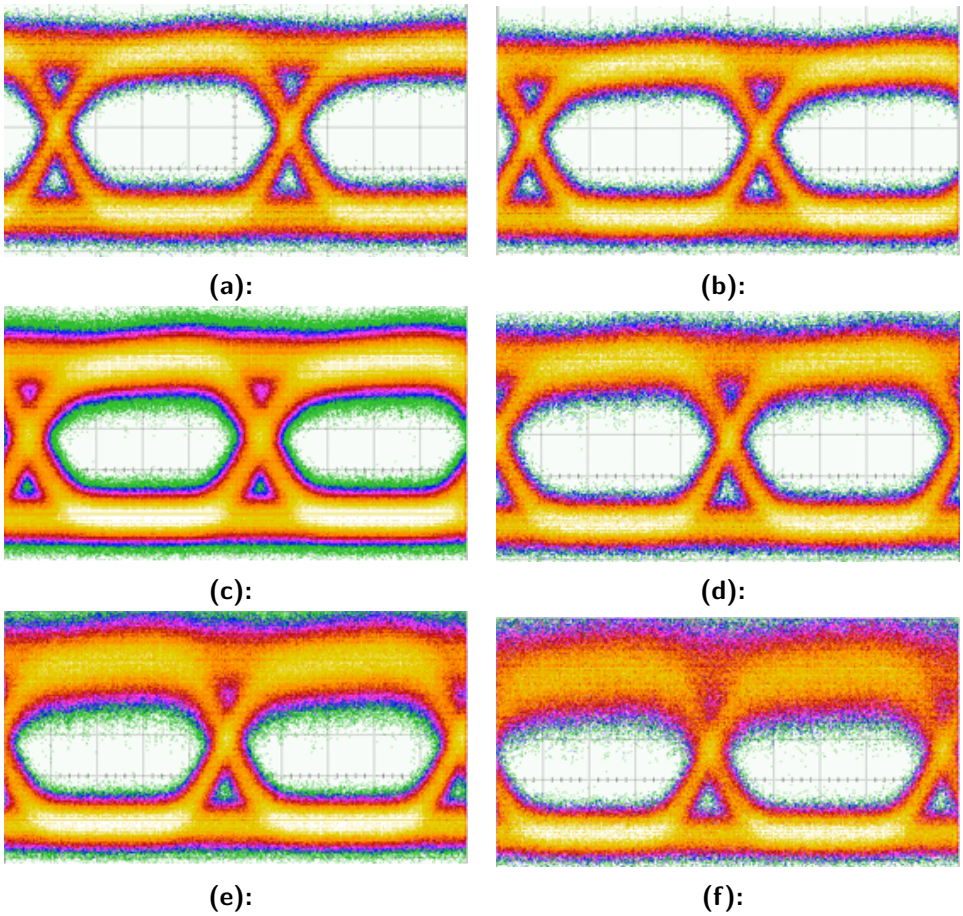
Číslo měření	1	2	3	4	5	6
Teplota 1 $[^oC]$	24,75	27,88	29,70	29,23	29,23	28,59
Teplota 2 $[^oC]$	24,48	28,27	28,20	28,10	28,21	28,62
Teplota 3 $[^oC]$	24,47	33,40	33,61	30,58	29,15	37,45
Teplota 4 $[^oC]$	24,40	35,39	37,08	43,38	50,92	88,21
Teplota 5 $[^oC]$	24,48	36,58	45,10	55,25	61,74	35,66
Teplota 6 $[^oC]$	24,38	37,28	46,35	58,98	45,86	35,13
Teplota 7 $[^oC]$	24,38	27,90	29,88	30,88	31,52	53,82
Teplota 8 $[^oC]$	24,34	26,51	27,47	28,20	28,57	30,89
Teplota 9 $[^oC]$	24,33	26,23	26,96	27,50	27,92	28,26
Teplota 10 $[^oC]$	24,22	25,80	26,56	27,10	27,50	27,69
$C_n^2[m^{-2/3}]$	7,127E-15	6,329E-12	1,796E-11	4,767E-11	4,501E-11	2,266E-10
σ_R^2	1,749e-6	1,553e-3	4,407e-03	1,170e-2	1,104e-2	5,560e-2

Tabulka 3.2: Výsledky měření

Číslo měření	1	2	3	4	5	6
Výška oka [uW]	89	87	83	87	77	63
Šířka oka [ps]	82,25	81,14	78,05	87,00	78,42	75,3
Amplituda [uW]	152,8	153	154	161	162	163
S/N [-]	7,18	6,90	6,55	6,45	5,71	4,98

Tabulka 3.3: Parametry oka rozhodnutí

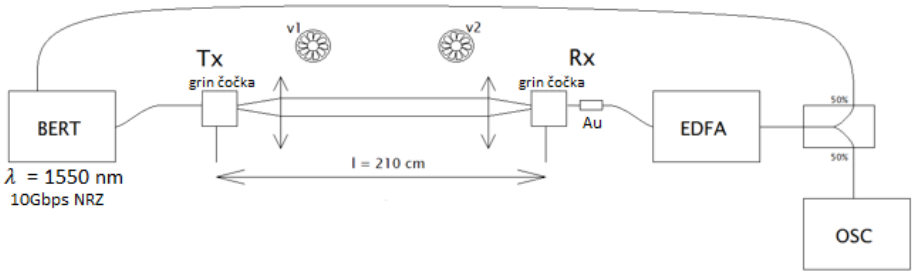
Z naměřených hodnot a z oka rozhodnutí, tabulka 3.3, je patrné, jak se kvalita spoje během celého měření zhoršovala. Maximální turbulence dosahovaly hodnoty 2,266E-10 $m^{-2/3}$, kterých v reálném prostředí není možné dosáhnout. V porovnání s modelem, kde nejvyšší turbulence u povrchu země dosahují hodnoty 1,2E-15 $m^{-2/3}$. Přesto byl spoj velmi spolehlivý. Bitová chybovost byla stále 0. Je to způsobeno hlavně tím, že jsme spoj provozovali na krátkou vzdálenost 210 cm a také tím, že jsme byli mimo rozlišovací schopnost BER testeru. Chyby tedy určitě vznikaly, ale v tak malém množství, že to nemělo žádný vliv na výsledky měření.



Obrázek 3.6: Pilotní test - oko rozhodnutí. **a)** $C_n^2 = 7,127E-15\ m^{-2/3}$ **b)** C_n^2 = 6,329E-12 $m^{-2/3}$ **c)** C_n^2 = 1,796E-11 $m^{-2/3}$ **d)** C_n^2 = 4,767E-11 $m^{-2/3}$ **e)** C_n^2 = 4,501E-11 $m^{-2/3}$ **f)** C_n^2 = 2,266E-10 $m^{-2/3}$

3.4 Měření se sníženým S/N

Z předchozího měření už víme, že i přes veliké turbulence je spoj příliš krátký, spolehlivý a chybuje velmi málo. K dosažení větší chybovosti jsme za přijímací grin čočku umístili útlumový článek o hodnotě 15 dB. Uměle jsme tak snížili výkon přijatého signálu, tedy zhoršili přenosové podmínky trasy. Čím menší S/N se použije, tím chybovost bude růst rychleji, ale taky se může stát, že celý spoj ztratí signál úplně a nebudeme schopni naměřit žádné hodnoty. Schéma zapojení je zobrazeno na obrázku 3.7

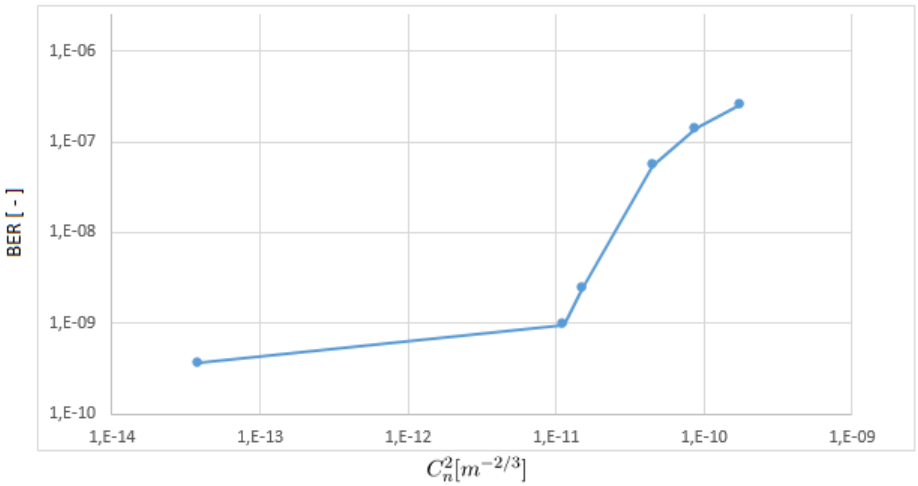


Obrázek 3.7: Schéma zapojení s útlumovým článkem.

Zahřívali jsme prostřední část spoje a vytvářeli přibližně stejně velké turbulence jako u prvního měření. Avšak rozdíl v chybovosti pro snížené S/N již byl patrný. Nyní spoj generuje mnohem více chyb. Výsledky měření jsou zaznamenány v tabulce 3.4. Závislost BER na turbulencích je zobrazena na obrázku 3.8. Závislost je přímo úměrná, se zvyšujícími se turbulencemi roste bitová chybovost spoje exponenciálně.

Číslo měření	1	2	3	4	5	6
Teplota 1 $[^oC]$	25,81	26,63	29,08	30,31	29,02	28,70
Teplota 2 $[^oC]$	25,66	26,43	27,81	28,18	28,25	28,80
Teplota 3 $[^oC]$	26,08	26,80	30,53	28,91	28,91	29,19
Teplota 4 $[^oC]$	26,28	27,32	43,08	43,85	66,28	39,73
Teplota 5 $[^oC]$	26,19	29,05	37,30	47,74	58,05	84,57
Teplota 6 $[^oC]$	25,72	40,00	39,85	57,53	58,10	81,79
Teplota 7 $[^oC]$	28,80	31,65	31,03	31,89	32,72	29,47
Teplota 8 $[^oC]$	25,29	25,97	28,78	28,43	29,03	28,66
Teplota 9 $[^oC]$	25,07	25,81	26,68	27,30	27,71	28,36
Teplota 10 $[^oC]$	24,91	25,68	26,32	26,92	27,29	27,99
$C_n^2[m^{-2/3}]$	3,865e-14	1,133e-11	1,516e-11	4,536e-11	8,837e-11	1,773e-10
σ_R^2	9,483e-6	2,780e-3	3,720e-3	1,113e-2	2,168e-2	4,350e-2
BER [-]	3,6e-10	9,5e-10	2,4e-9	5,4e-8	1,4e-7	2,6e-7

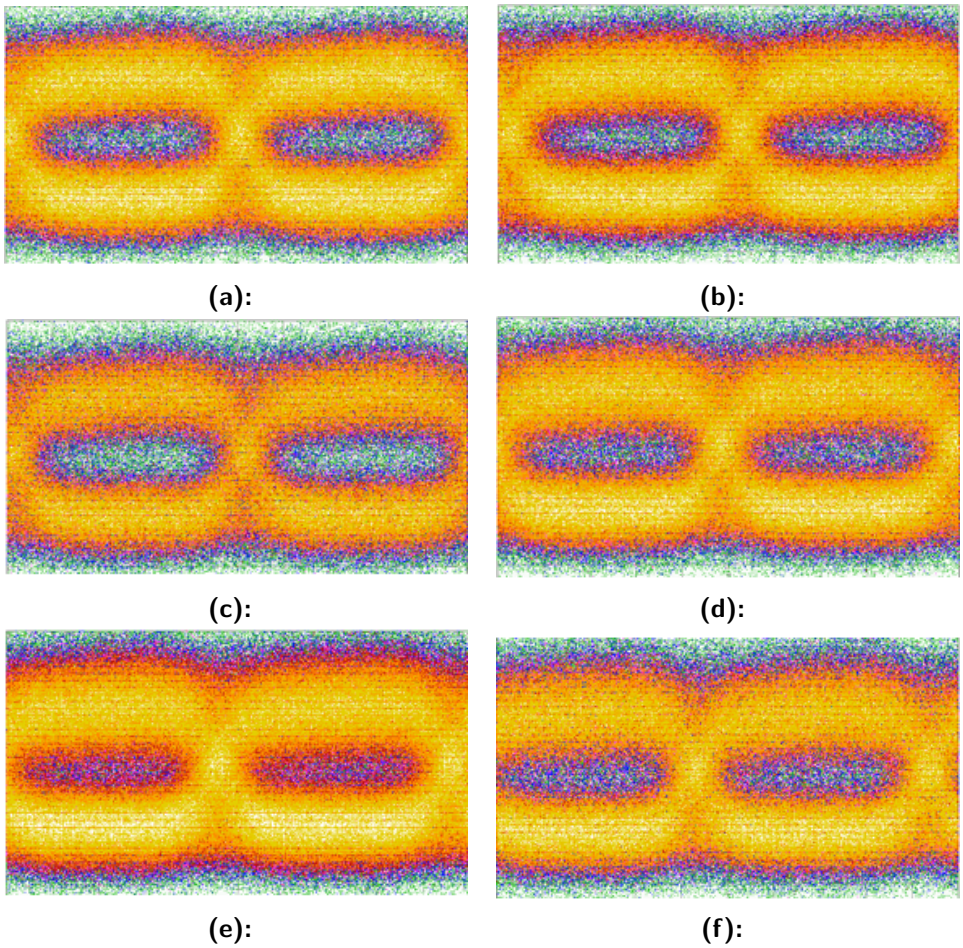
Tabulka 3.4: Výsledky měření.



Obrázek 3.8: Závislost BER na turbulencích.

S rostoucí chybovostí je přímo spojeno zhoršující se oko rozhodnutí, viz. obrázek 3.9. Můžeme v něm vidět velké množství šumu, rozhodovací úrovně jdou špatně poznat a základní parametry dokonce osciloskop ani nedokázal zanalyzovat.

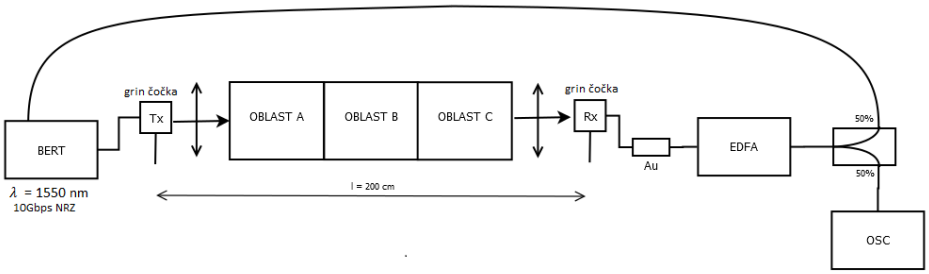
Tímto měřením jsme ověřili závislost bitové chybovosti na turbulencích. Zjistili jsme, že po přidání útlumového článku začne spoj více chybovat a nemusíme tedy provozovat spoj na větší vzdálenost nebo vytvářet ještě větší turbulence kolem spoje.



Obrázek 3.9: Měření se sníženým S/N. **a)** $C_n^2 = 3,865E-14\ m^{-2/3}$ **b)** C_n^2 = 1,133E-11 $m^{-2/3}$ **c)** C_n^2 = 1,516E-11 $m^{-2/3}$ **d)** C_n^2 = 4,536E-11 $m^{-2/3}$ **e)** C_n^2 = 8,837E-11 $m^{-2/3}$ **f)** C_n^2 = 1,773E-10 $m^{-2/3}$

3.5 Měření v tubulentní komoře s proměnným C_n^2

V posledním měření jsme využili znalostí z předešlých dvou měření. Schéma zapojení je zobrazeno na obrázku 3.10. Stejně jako u předchozího měření jsme používali útlumový článek a navíc jsme ještě kolem celého spoje postavili turbulentní komoru. Díky ní můžeme v každé části spoje vytvářet různé turbulence. Během měření jsme spoj rozdělili na tři oblasti, první (A) a druhá část (B) je dlouhá 70 cm obsahuje 7 teplotních senzorů a poslední část (C) je dlouhá 60 cm a má 6 teplotních senzorů. Používali jsme více větráku a zahřívali různé části. V každé oblasti se vytváří různě velké turbulence, čímž se snažíme více přiblížit reálným podmínkám spoje s UAV, kde s výškou se mění turbulence.



Obrázek 3.10: Schéma zapojení s turbulentní komorou a proměnným C_n^2.

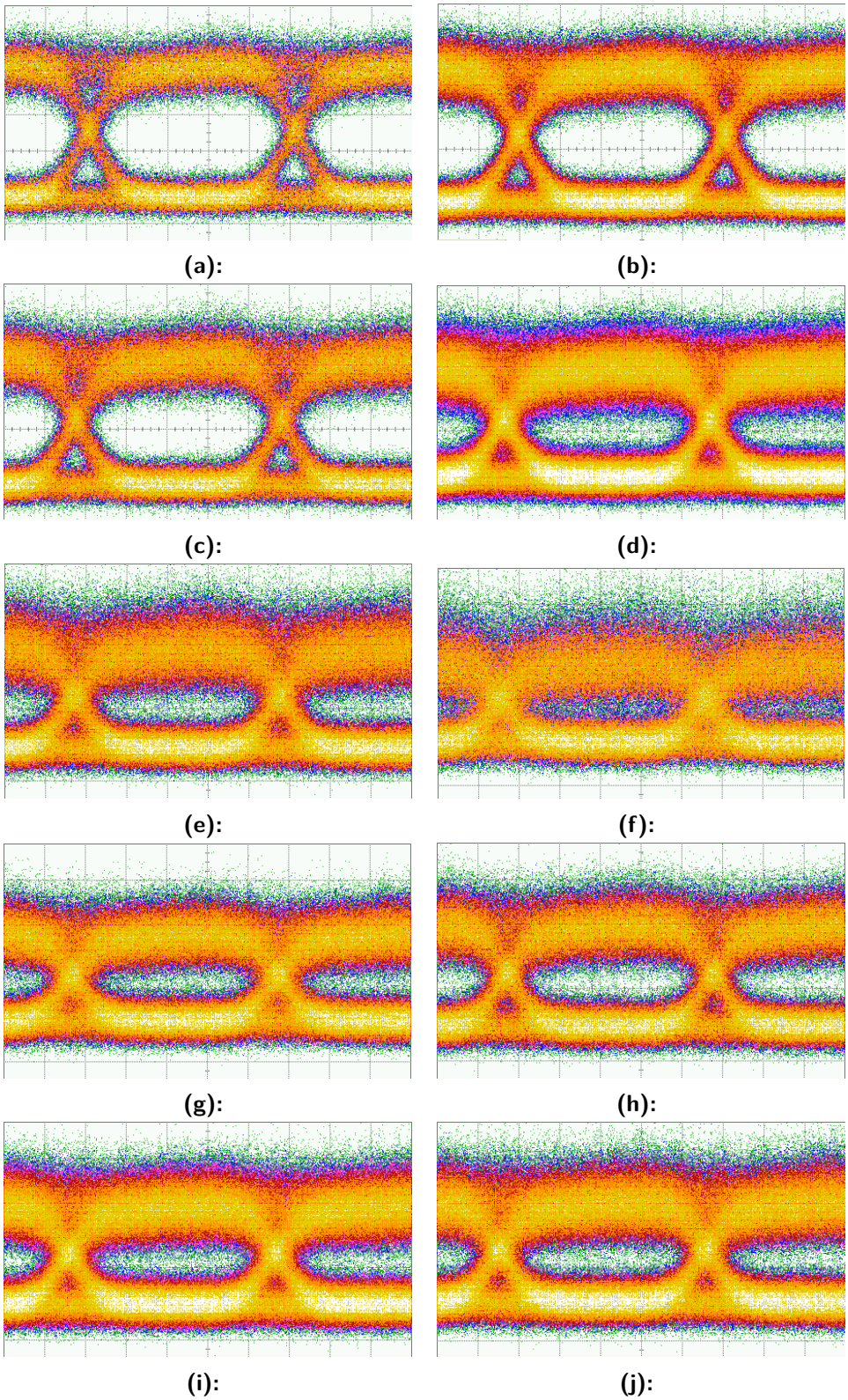
Naměřené hodnoty jsou zaznamenány v tabulce 3.5. Pro každou část jsou turbulence vypočítány samostatně. Na konci tabulky jsou následně vypočítány parametry pro celý spoj. Snažil jsem se zahřívat různé části na různé teploty, aby turbulence byly co nejvíce variabilní a přiblížit se tak realitě. Například zahřívání ABC 2 znamená, že jsem zahříval všechny tři části a bylo to druhé takové měření, viz. tabulka 3.5. Dařilo se mi vytvářet turbulence o velké intenzitě, díky čemuž soustava vykazovala vyšší chybovost.

Během celého měření se kvalita spoje zhoršovala. U oka rozhodnutí se nám dařilo, až na jednu výjimku, zaznamenávat jeho parametry. Ty jsou zaznamenány v tabulce 3.6 a zobrazeny na obrázku 3.11. S rostoucími turbulencemi se zhoršují parametry oka.

Na obrázku 3.12 je následně zobrazena závislost BER na turbulencích. Je z ní patrné, že se jedná o exponenciální závislost a s rostoucími turbulencemi roste chybovost.

Tabulka 3.5: Naměřené výsledky s turbulentní komorou.

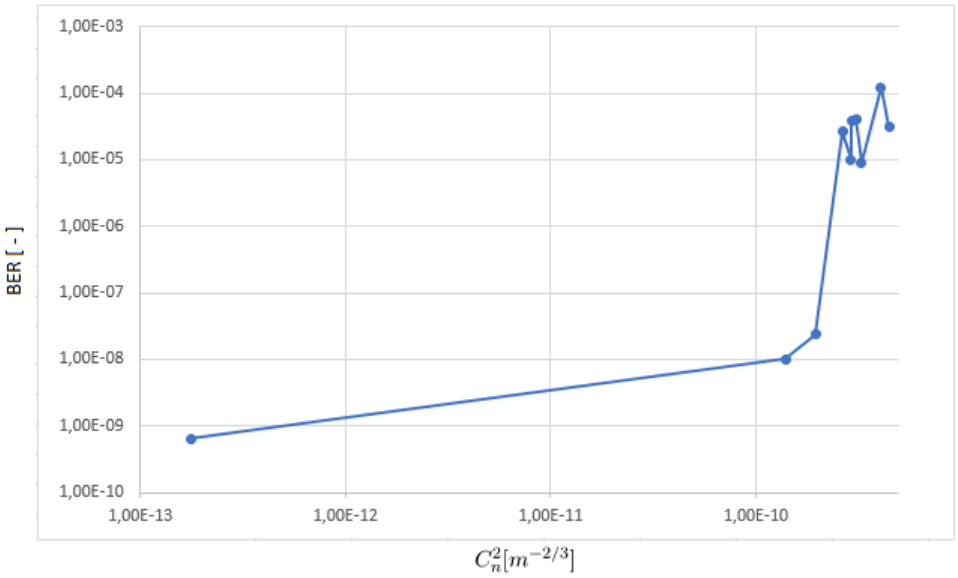
	Zahřívání	Clear chamber	A	AB	AB 2	AC	AC 2	ABC	ABC 2	ABC 3	ABC 4
Oblast A	Teplota 1 $[^oC]$	23,87	25,43	27,99	28,75	26,40	27,73	29,23	30,00	30,03	32,20
	Teplota 2 $[^oC]$	23,93	25,61	49,42	51,10	26,57	40,84	53,58	51,02	54,27	26,25
	Teplota 3 $[^oC]$	24,00	43,33	44,01	46,29	44,07	50,53	44,75	45,52	49,19	53,28
	Teplota 4 $[^oC]$	23,92	38,90	69,82	70,04	38,56	59,52	67,78	70,11	72,38	75,56
	Teplota 5 $[^oC]$	24,16	48,62	58,46	56,21	48,61	66,17	54,83	57,19	60,16	60,47
	Teplota 6 $[^oC]$	23,85	29,25	34,05	43,05	33,65	32,60	34,09	32,09	45,76	43,32
	Teplota 7 $[^oC]$	23,87	25,31	29,98	38,96	27,18	29,06	36,09	34,31	38,37	37,78
	$\mathbf{C_n^2[m^{-2/3}]}$	8,69E-14	4,39E-10	9,24E-10	6,37E-10	3,66E-10	7,50E-10	9,96E-10	8,59E-10	7,05E-10	7,08E-10
Oblast B	Teplota 8 $[^oC]$	24,12	24,99	30,18	29,04	25,97	26,83	36,80	36,74	29,53	30,36
	Teplota 9 $[^oC]$	24,10	24,91	30,61	28,56	26,04	27,20	47,10	40,18	29,36	31,03
	Teplota 10 $[^oC]$	23,82	25,19	29,99	30,30	29,30	34,12	54,98	60,00	34,83	37,54
	Teplota 11 $[^oC]$	23,93	25,45	28,00	40,56	24,15	32,80	40,63	55,66	41,35	40,27
	Teplota 12 $[^oC]$	23,95	25,97	30,20	46,72	33,78	30,31	35,51	41,81	47,75	48,88
	Teplota 13 $[^oC]$	24,28	25,33	29,61	41,28	29,71	30,05	30,98	35,42	43,18	44,08
	Teplota 14 $[^oC]$	24,11	24,90	29,24	44,66	29,75	30,40	31,46	32,52	45,27	46,09
	$\mathbf{C_n^2[m^{-2/3}]}$	1,24E-13	1,00E-12	2,52E-12	1,06E-10	3,04E-11	3,74E-11	2,53E-10	3,21E-10	6,76E-11	7,61E-11
Oblast C	Teplota 15 $[^oC]$	23,92	26,25	29,28	42,30	44,51	45,83	43,09	33,57	42,46	42,50
	Teplota 16 $[^oC]$	24,05	26,09	29,10	37,48	40,45	42,17	43,76	46,06	38,90	37,48
	Teplota 17 $[^oC]$	24,23	25,34	29,93	34,18	42,07	43,70	45,64	52,35	39,10	35,99
	Teplota 18 $[^oC]$	24,66	25,40	31,12	31,74	28,79	29,75	36,81	53,44	44,54	42,30
	Teplota 19 $[^oC]$	25,03	25,55	31,65	31,37	27,46	28,36	28,97	53,97	32,57	46,55
	Teplota 20 $[^oC]$	24,93	25,56	30,85	31,31	27,47	28,24	28,98	49,38	31,13	31,94
	$\mathbf{C_n^2[m^{-2/3}]}$	3,13E-13	6,15E-13	1,18E-23	2,81E-11	1,32E-10	1,38E-06	9,90E-11	1,26E-10	1,29E-10	1,92E-10
Celý spoj	**BER [-]**	6,50E-10	1,00E-08	3,90E-05	2,60E-05	2,40E-08	9,00E-06	3,10E-05	1,20E-04	1,00E-05	4,10E-05
	$\mathbf{C_n^2[m^{-2/3}]}$	1,76E-13	1,40E-10	2,93E-10	2,65E-10	1,95E-10	3,26E-10	4,46E-10	4,06E-10	2,91E-10	3,09E-10
	$\sigma_\mathbf{R}^\mathbf{2}$	3,95E-05	3,14E-02	6,57E-02	5,95E-02	4,38E-02	7,31E-02	1,00E-01	9,11E-02	6,53E-02	6,93E-02



Obrázek 3.11: Měření v tubulentní komoře s proměnným C_n^2.
a) C_n^2 = 1,76E-13 $m^{-2/3}$ **b)** C_n^2 = 1,40E-10 $m^{-2/3}$ **c)** C_n^2 = 2,93E-10 $m^{-2/3}$
d) C_n^2 = 2,65E-10 $m^{-2/3}$ **e)** C_n^2 = 1,95E-10 $m^{-2/3}$ **f)** C_n^2 = 3,26E-10 $m^{-2/3}$
g) C_n^2 = 4,46E-10 $m^{-2/3}$ **h)** C_n^2 = 4,06E-10 $m^{-2/3}$ **i)** C_n^2 = 2,91E-10 $m^{-2/3}$
j) C_n^2 = 3,09E-10 $m^{-2/3}$

Číslo měření	S/N [-]	Amplituda [μW]	Šířka oka [ps]	Výška oka [μW]
1	5,56	311	77.94	143
2	5,07	314	77,58	128
3	4,68	300	76,22	108
4	2,47	210	69,43	10
5	2,94	240	58,58	-5
6	2,26	197	-	-64
7	3,03	206	59,15	2
8	3,25	238	66,43	19
9	3,25	235	66,26	18
10	3,12	227	62,76	1

Tabulka 3.6: Parametry oka rozhodnutí.



Obrázek 3.12: Závislost BER na turbulencích pro celý spoj.

3.6 Přepočet turbulencí na reálný 10 km spoj

V předchozí kapitole jsme používali krátký spoj a okolo něj v turbulentní komoře vytvářely velké turbulence, které za normálních podmínek nemůžou vzniknout. Proto je nyní přepočítáme na spoj o délce 10 km, abychom získali reálné hodnoty turbulencí. Potřebujeme k tomu rovnici (3.1) a naměřené hodnoty scintilací z tabulky 3.5.

Vztah na vyjádření turbulencí [8]:

$$C_n^2 = \frac{\sigma_T^2}{1,23 * k^{7/6} * L^{11/6}} \tag{3.1}$$

kde:

σ_T^2 jsou scintilace spoje

$k = 2\ \pi/\lambda$ je vlnové číslo

λ [m] je vlnová délka vysílaného signálu

L [m] je délka spoje

BER [-]	6,50E-10	1,00E-08	3,90E-05	2,60E-05	2,40E-08	9,00E-06	3,10E-05	1,20E-04	1,00E-05	4,10E-05
σ_R^2	3,95E-05	3,14E-02	6,57E-02	5,95E-02	4,38E-02	7,31E-02	1,00E-01	9,11E-02	6,53E-02	6,93E-02
C_n^2 $[m^{-2/3}]$	3,68E-19	2,92E-16	6,12E-16	5,54E-16	4,08E-16	6,81E-16	9,31E-16	8,48E-16	6,08E-16	6,45E-16

Tabulka 3.7: Hodnoty turbulencí pro 10km spoj.

Přepočítané turbulence se nachází v tabulce 3.7. Z výsledků je patrné, že se intenzita turbulencí snížila o 6 řádů a priblížila se namodelovaným turbulencím. Tímto tedy můžeme bitovou chybovost naměřenou na 2 metrovém optickém spoji považovat za reálnou i při použití 10 kilometrového spoje v reálných atmosférických podmínkách.

Kapitola 4

Závěr

Cílem práce bylo zjistit vliv atmosféry na bezdrátový optický spoj mezi pozemním segmentem a bezpilotním prostředkem. Zaměřili jsme se na vliv turbulencí a zkoumali závislost mezi turbulencemi a bitovou chybovostí.

V teoretické části jsme se seznámili se všemi problémy, které mohou při používání bezdrátové optiky vznikat. Analyzovali jsme vliv nejběžnějších vlivů, jako jsou déšť, sníh, mlha, atd. Následně jsme se zabývali pouze vlivem turbulencí. Z modelu jsme se dozvěděli, že turbulence jsou závislé na nadmořské výšce, největší intenzity, až 1,2E-15 $m^{-2/3}$, dosahují v okolí povrchu Země a s rostoucí nadmořskou výškou klesají. Dále je důležité, pod jakým úhlem optický svazek vzhledem k Zemi vysíláme, kdy k nejmenšímu vychylování dochází při kolmém spoji.

Experimentální část byla rozdělena do tří částí. Pilotní test sloužil k optimalizaci FSO spoje a naměření prvotních hodnot. U tohoto měření se nám vliv turbulencí na spoj projevil jen velmi málo, a to i přesto, že jsme vytvořili velké turbulence, které byly až o 5 řádů větší, než předpokládané turbulence z modelu. Způsobeno to bylo hlavně krátkou vzdáleností spoje a také rozlišovací schopností BER testeru. Zhoršující se podmínky jsme tedy mohli sledovat pouze na oku rozhodnutí, kde se úměrně s rostoucími turbulencemi snižuje rozhodovací úroveň.

Další měření probíhalo se sníženým S/N, kdy jsme do optické trasy, ihned za přijímací grin čočku, přidali útlumový článek o hodnotě 15 dB. Snížili jsme tak přijatý výkon a uměle zhoršili podmínky celé trasy. V závislosti na útlumovém článku, jsme mohli podmínky upravit podle sebe, čím větší útlum,

tím menší výkon přijatého signálu. Spoj nám začal chybovat za podobných turbulencí jako v pilotním testu a na BER testeru jsme mohli začít měřit chybovost spoje. Z grafu vyplývá, že s rostoucími turbulencemi exponenciálně roste chybovost spoje.

Poslední měření probíhalo v turbulentní komoře, pomocí které jsme spoj rozdělili do 3 částí. V každé části jsme vytvářeli různé turbulence a snažili se co nejvíce přiblížit reálnému prostředí. Potvrdilo se nám, že bitová chybovost exponenciálně roste v závislosti na turbulencích. Vhodnější volbou útlumového článku jsme naměřili i parametry rozhodovacího oka. I tady jsme došli k stejnému závěru jako u předchozích měření. Čím větší jsou turbulence, tím se zmenšuje rozhodovací úroveň oka a v okolí oka je mnohem více šumu.

Během všech laboratorních měření jsme vytvářeli příliš velké turbulence, které v atmosféře nemohou vzniknout. Bylo nutné přepočítat laboratorní výsledky na 10 kilometrový spoj. Po přepočítání se intenzita turbulencí shoduje s modelovými turbulencemi, tedy můžeme bitovou chybovost a scintilace brát jako reálnou hodnotu, které bychom při komunikaci mezi pozemním segmentem a bezpilotním prostředkem dosahovali.

Příloha A

Literatura

[1] M. Uysal, C. Capsoni, Z. Ghassemlooy, A. C. Boucouvalas, and E. Udvary, *Optical wireless communications : an emerging technology*. New York, NY: Springer, 2016.

[2] Z. Ghassemlooy, L. N. Alves, S. Zvanovec, and M. A. Khalighi, *Visible Light Communications: Theory and Applications*. CRC Press, 2017.

[3] S. Zvánovec, "Free space optics (fso)," 2016. [Přednáška, Available at `https://moodle.fel.cvut.cz/course/view.php?id=596`].

[4] Y. Maguire, "Building communications networks in the stratosphere," *facebook.com*, 2015.

[5] B. L. Edwards, "Nasa's current activities in free space optical communications," 2017. [Online; accessed 16-May-2018, available at `https://doi.org/10.1117/12.2304175`].

[6] O. Bouchet, *Free-Space Optics: Propagation and Communication*. Newport Beach, CA: ISTE, 2006.

[7] J. Bohata, S. Zvánovec, T. Kořínek, M. M. Abadi, and Z. Ghassemlooy, "Characterization of dual-polarization lte radio over a free-space optical turbulence channel," *Applied optics*, vol. 54, no. 23, 2015.

[8] A. Prokeš, "Modeling of atmospheric turbulence effect on terrestrial fso link," *Radioengineering*, vol. 18, no. 1, pp. 42–47, 2009.

[9] M. Filka, *Optoelektronika pro telekomunikace a informatiku. Vyd. 1.* Brno: Miloslav Filka, 2009.

[10] M. Kucharski and P. Dubský, *Měření přenosových parametrů optických vláken, kabelů a tras.* Praha: Mikrokom, 2000.

[11] Wikipedia contributors, "Signal-to-noise ratio — Wikipedia, the free encyclopedia," 2018. [Online; accessed 28-April-2018, available at `https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Signal-to-noise_ratio&oldid=836824435`].

[12] "Understanding frequency performance specifications," 2017. [Online; accessed 28-April-2018, available at `http://www.ni.com/white-paper/3359/en/`].

[13] "Frekvenční a výkonové spektrum," 2018. [Online; accessed 28-April-2018, available at `https://www.wikiskripta.eu/w/FrekvenC48DnC3AD_a_vC3BDkonovC3A9_spektrum`].

[14] Wikiknihy, "Praktická elektronika/spektrum signálu — wikiknihy: Otevřená sbírka učebnic a knih," 2017. [Online; accessed 28. 04. 2018, available at `https://cs.wikibooks.org/w/index.php?title=PraktickC3A1_elektronika/Spektrum_signC3A1lu&oldid=35330`].

[15] R. Hui and M. O'SULLIVAN, *Fiber optic measurement techniques.* London: Elsevier Academic Press, 2009.

[16] VeEX Inc., "Vepal tx300e," 2012. [Online; accessed 28-April-2018, available at `https://www.veexinc.com/en-us/Download/SpecificationSheet/1570022`].

[17] "Optické zesilovače." [Online; accessed 28-April-2018, available at `http://www.safibra.cz/opticke-zesilovace`].