

Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava

Fakulta elektrotechniky a informatiky

Katedra telekomunikační techniky

Měřicí zařízení pro sledování vlivu vybraných parametrů
atmosféry na optické atmosférické spoje

Measuring device for inspection of selected
atmospherical parameters on free space optical
communications

2011

Bc. Eduard Jakuba

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra telekomunikační techniky

Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Eduard Jakuba**

Studijní program: N2647 Informační a komunikační technologie

Studijní obor: 2601T013 Telekomunikační technika

Téma: Měřicí zařízení pro sledování vlivu vybraných parametrů atmosféry na optické atmosférické spoje
Measuring device for inspection of selected atmospherical parameters on free space optical communications

Zásady pro vypracování:

1. Realizujte testovací optické pojítko na vlnové délce 850 nm pro přenos mezi budovou E kolejí a KrP.
2. Realizujte vyhřívaný reflektor ve stabilním uložení.
3. Provedte měření útlumu atmosféry a jejich změn mezi objekty koleje E a KrP.

Seznam doporučené odborné literatury:

Podle pokynů vedoucího diplomové práce.

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí diplomové práce: **prof. RNDr. Vladimír Vašínek, CSc.**

Datum zadání: 19.11.2010

Datum odevzdání: 06.05.2011

prof. RNDr. Vladimír Vašínek, CSc.
vedoucí katedry



prof. RNDr. Václav Snášel, CSc.
děkan fakulty

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně. Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.

V Ostravě dne: 6. 5. 2011

.....

podpis

Poděkování

Chtěl bych poděkovat vedoucímu své diplomové práce panu prof. RNDr. Vladimíru Vašínkovi, CSc. za odborné vedení mé diplomové práce. Dále bych chtěl poděkovat svému dědovi Ludvíku Horňáčkovi za pomoc při výrobě mechanické konstrukce optických hlavic.

Abstrakt

Diplomová práce se zabývá návrhem testovacího optického pojítka pro dlouhodobé měření útlumu atmosféry a jejich časových změn. Jsou vysvětleny základní mechanismy ovlivňující atmosférický útlum. V praktické části práce je proveden výpočet energetické bilance spoje mezi budovami Krásnopolská a koleje E. Následuje návrh měřicí elektroniky a mechanické konstrukce měřících hlavic. Na závěr práce popisuje měření jednotlivých atmosférických vlivů pomocí diagramu oka a ukázkové měření rozložení optického výkonu pomocí digitálního fotoaparátu.

Klíčová slova

PPRB, optický bezdrátový spoj, diagram oka, atmosféra, výkonová bilance, konstrukce optického spoje, rozložení optického výkonu

Abstract

The thesis deals with a design of a hardware testing free space optics for long-term measurement of atmosphere attenuation and their temporal changes. There are explained the basic mechanisms affecting atmospheric absorption. At practical part of my thesis there is a free space optics attenuation calculate between the building Krasnopolska and campus E. The design of a electronic circuit and a design of mechanical construction free space optics follows. The final part describes measurements of individual atmospheric effects using an eye diagram and sample of measurement optics power distribution using a digital camera.

Key words

PPRB, Free Space optics, eye pattern, atmosphere, FSO attenuation calculate, construction FSO, distribution of optical power

Seznam použitých symbolů a zkratek

APD	Avalanche PhotoDiode – lavinová fotodioda
BER	Bit Error Rate – bitová chybovost
DC/DC	Direct Current/ Direct Current – měnič napětí používaný ve zdrojích proudu
DPS	Deska Plošných Spojů
EMI	Electromagnetic Interference – elektromagnetická interference
ESR	Equivalent Series Resistance – ekvivalentní sériový odpor
FSO	Free Space Optics – technologie přenosu dat volným prostorem
HDB3	High Densiy Bipolar – způsob kódování dat při přenosu
LD	Laser Diode - laserová dioda
LED	Light Emiting Diode – světlo emitující dioda
OOK	ON OFF Keying – způsob kódování dat při přenosu
PIN	struktura fotodiody
PN přechod	přechod ve struktuře polovodičů
PRBS	PseudoRandom Binary Sequence – pseudonáhodná datová sekvence
QRSS	QuasiRandom Signal Source – kvazináhodný signálový zdroj
RAW	formát digitální fotografie
RONJA	Reasonable Optical Near Joint Access – amaterský projekt optického pojítka
RSSI	Remote Signal Strenght Indicator – indikátor intenzity signálu
SNR	Signal to Noise Ratio – odstup signálu od šumu
TTL	Transistor Transistor Logic – druh napěťové logiky
WMO	World Meteorological Organization
XOR	eXclusive OR – logická funkce exkluzivní součet

α_{12}	[dB]	útlum šíření volným prostorem
$\alpha_{1d\acute{e}\acute{s}\acute{t}'}$	[dB]	koeficient útlumu deštěm
$\alpha_{1sn\acute{i}\acute{h}}$	[dB]	koeficient útlumu sněhu
α_{atm}	[dB]	útlum závislý na stavu atmosféry (mlha, déšť)
α_{cel}	[dB]	útlum prostředí mezi vysílačem a přijímačem
$\alpha_{\acute{c}\acute{a}\acute{s}t}$	[dB]	útlum na částicích v atmosféře
α_{RXA}	[dB]	útlum na vysílací čočce
α_{turb}	[dB]	útlum způsobený turbulencemi
α_{TXA}	[dB]	útlum na vysílací čočce
α_{ZAM}	[dB]	útlum na vysílací čočce
α_{ZR}	[dB]	útlum na zrcadle
ϕ_t	[rad]	úhlová rozbíhavost optického svazku
Δ	[dB]	dynamický rozsah přijímače
$\Delta`$	[dB]	záporná hodnota útlumu
τ	[s]	časová konstanta
γ_{TOT}	[dB]	zisk na přijímací čočce
c	[ms ⁻¹]	rychlost světla ve vakuu (299 792 458 m·s ⁻¹)
D_{TXA}	[m]	apertura vysílače [m]
E_g	[eV]	energie zakázaného pásu PN přechodu
f	[Hz]	frekvence záření
h	[J·s ⁻¹]	Planckova konstanta (6,626*10 ³⁴ J·s ⁻¹)
I_{FOTO}	[mA]	proud fotodiodou
M	[dB]	linková rezerva spoje
N_c	[-]	počet přenesených bitů
N_e	[-]	počet chybně přenesených bitů
P_{ORXA}	[dBm]	práh citlivosti přijímače
P_{TXA}	[dBm]	hodnota středního výkonu laserové diody

P_{mRXA}	[dBm]	práh saturace přijímače
$\sim P_{mRXA}$	[dBm]	hodnota středního výkonu na přijímači v ideální atmosféře
P_{RXA}	[dBm]	hodnota středního výkonu ovlivněná atmosférickými vlivy
pdf_{α}	[dBm]	časové rozložení výkonu
P_{mRXA}	[dBm]	střední hodnota přijatého výkonu
P_{mTXA}	[dBm]	střední hodnota vysílaného výkonu
q	[-]	koeficienty modelů meteorologické viditelnosti
t	[s]	doba sběru dat
L_{12}	[m]	vzdálenost vysílače od přijímače
V_m	[m]	meteorologická dohlednost

Obsah

1	Úvod.....	- 1 -
2	Optický bezdrátový spoj	- 2 -
2.1	Základní struktura optického spoje	- 3 -
3	Výkonové úrovně FSO.....	- 6 -
3.1	Stacionární model spoje	- 6 -
3.1.1	Charakteristika atmosféry jako přenosového média	- 8 -
3.1.2	Vliv mlh	- 8 -
3.1.3	Útlum vlivem dešťových srážek	- 9 -
3.1.4	Útlum vlivem sněžení	- 10 -
3.1.5	Turbulence atmosféry.....	- 11 -
3.1.6	Přerušování optického svazku	- 12 -
3.2	Statistický model atmosférického optického spoje	- 13 -
3.2.1	Rozložení přijímaného optického výkonu v čase.....	- 13 -
3.2.2	Rozložení pravděpodobnosti trvání úniků.....	- 15 -
4	Kvalitativní popis přenosového kanálu	- 16 -
4.1	BER.....	- 16 -
4.2	Diagram oka	- 18 -
5	Optoelektronické prvky	- 20 -
5.1	Zdroje optického záření.....	- 20 -
5.2	Detektory optického záření	- 22 -
6	Koncepce testovacího optického pojítka.....	- 23 -
6.1	Výpočet energetické bilance spoje.....	- 25 -

7	Návrh obvodového řešení	- 27 -
7.1	Napájecí zdroj	- 28 -
7.2	Obvod buzení laseru.....	- 30 -
7.3	Fotodetektor	- 31 -
7.4	Návrh plošného spoje.....	- 33 -
8	Návrh mechanické konstrukce	- 35 -
8.1	Hlavice s laserem a detektorem.....	- 35 -
8.2	Hlavice zrcadla.....	- 38 -
9	Simulace atmosférických podmínek v laboratoři.....	- 42 -
9.1	Instalace a zaměření optického pojítka	- 42 -
9.2	Měření diagramu oka v čisté atmosféře	- 43 -
9.3	Testování vlivu vzduchových turbulencí	- 45 -
9.4	Testování vlivu mlhy.....	- 48 -
9.5	Snížení odrazivosti zrcadla	- 52 -
9.6	Vliv překážek	- 53 -
9.7	Pokusné měření rozložení optického výkonu.....	- 54 -
10	Závěr	- 56 -
11	Literatura.....	- 58 -
12	Přílohy.....	- 61 -

1 Úvod

Optické komunikace provází lidstvo již od pradávna. A jedná se o nejstarší způsob dálkové komunikace. V prvopočátcích se jednalo o signální ohně umístěné na vyvýšených místech, které svým zapálením předávaly předem dohodnutou informaci dál. Jednalo se o velmi primitivní komunikaci, kde mohla být přenášena pouze jediná informace. Pokročilejší způsob objevili američtí indiáni, kteří komunikovali pomocí kouřových signálů. Nejvyšší stupněm dokonalosti dosáhl v novověku systém optického telegrafu. Systém byl složen z věží, na kterých byla umístěna pohyblivá ramena. Tento vynález se udržel při životě až do vynálezu drátového telegrafu. První komunikaci v podobě tak jak je známe dnes – tedy přenos informace pomocí zacílených světelných paprsků provedl Alexander Graham Bell v roce 1880, tedy 16 let před prvním rádiovým přenosem. Jeho vynález se jmenoval photophone a využíval slunečního světla pro přenos lidského hlasu na vzdálenost desítek metrů. Vynález ale ustoupil do pozadí díky uskutečnění rádiového přenosu v roce 1896 Guglielmo Marconim.

Optické bezdrátové komunikace se začínají prodírat do popředí až v posledních desetiletích v souvislosti s objevem výkonnějších optických zdrojů a detektorů. Tyto optické přenosy mají spoustu výhod. V dnešní době, kdy je silně zarušené rádiové spektrum, jsou tyto spoje odolné proti rušení z jiných rádiových a optických zdrojů a není potřeba tyto spoje licencovat u žádné autority jako je například Český telekomunikační úřad. Jelikož se ale jedná o atmosférické přenosové prostředí, neprobíhá komunikace po homogenním přenosovém médiu, ale po proměnlivém médiu. Atmosféra se z pohledu optických komunikací jeví jako velmi nestabilní prostředí s neustále měnícími parametry, které mají přímo kritický vliv na kvalitu optických komunikací.

Tato práce se zabývá popisem jednotlivých jevů, jež mají největší vliv na optické komunikace a konstrukcí měřicího optického spoje pro sledování kvalitativních parametrů atmosféry v průběhu času. Závěr práce poté ukazuje simulaci atmosférických vlivů v laboratorních podmínkách.

2 Optický bezdrátový spoj

Optický bezdrátový spoj, anglicky Free Space Optics (FSO) je spoj, který jako přenosové médium využívá volný prostor (vzduch, popř. vakuum) a pracuje v rozsahu vlnových délek optického záření – 1mm až 10nm. Z tohoto širokého rozsahu vlnových délek se z důvodu optimální absorpce atmosférou využívá pouze oblast viditelného a blízkého infračerveného záření.

Základní strukturu přenosového kanálu tvoří vysílač, přijímač a přenosové médium. Princip je takový: vysílač pomocí zdroje záření (laserová nebo LED dioda) vyšle signál modulovaný na nosné vlně optického záření a přijímač ji optoelektronickým prvkem zpracuje. Nejčastěji se používá červeného světla (625nm až 760nm) nebo blízkého infračerveného světla (760nm až 1400nm). Červené světlo se používá nejčastěji u amatérských konstrukcí - RONJA [1] z důvodu levných zdrojů optického záření a také díky snadnějšímu zaměření světelného svazku. Naopak infračerveného přenosu se využívá u profesionálních zařízení.

FSO má své výhody i nevýhody

Výhody FSO

- Spoje jsou nelicencované – není třeba povolení.
- Vysoká bezpečnost dat – díky úzkému svazku paprsků je obtížné signál odposlouchávat. Pro odposlech je nutné vstoupit do trajektorie paprsku, čímž dojde k jeho přerušení, nebo poklesu výkonu a to lze snadno detekovat na straně přijímače.
- Odolnost proti rušení – paprsky mají malý rozptyl, takže nedochází k rušení od jiných vysílačů.
- Přenosové rychlosti – nyní se pohybují do $2,5\text{Gbit}\cdot\text{s}^{-1}$.
- Rychlá montáž a demontáž – mohou se použít jako dočasné řešení než dojde k vybudování kabelové trasy.

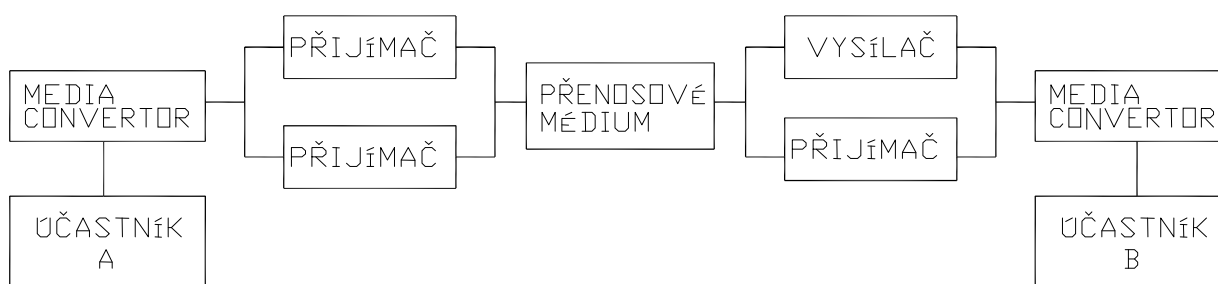
Nevýhody FSO

- Nevhodné pro velké vzdálenosti – Největší efektivita je pro spoje do jednoho km. Amatérské řešení použité pro přenos hlasu však dosahují i na vzdálenost desítek kilometrů [2].
- Nutná přímá viditelnost – mezi přijímačem a vysílačem musí být přímá viditelnost.

- Menší spolehlivost – větší závislost na atmosférických jevech (mlha, sníh atd.) než u rádiových přenosů. Kritické spoje tedy musejí být zálohovány například rádiovým spojem.

2.1 Základní struktura optického spoje

Základní blokové schéma optického spoje je uvedeno na obrázku 1.



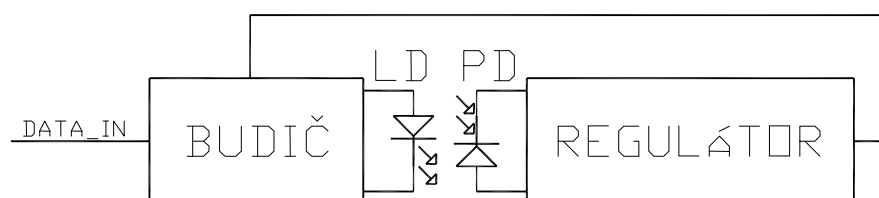
Obrázek 1 Blokové schéma optického spoje

Media konvertor

Media konvertor je převodník mezi zdrojem dat a vysílačem nebo přijímačem FSO. Převádí víceúrovňovou logiku (ethernet, HDB3) na dvoustavovou, která je optimální pro přenos volným prostorem. Generuje také udržovací pulzy, pokud se nepřijímají žádné data.

Vysílač

Vysílač je zařízení, které převede binární signál z media konvertoru na světelný tok. Základní blokové schéma vysílače je na obrázku 2.

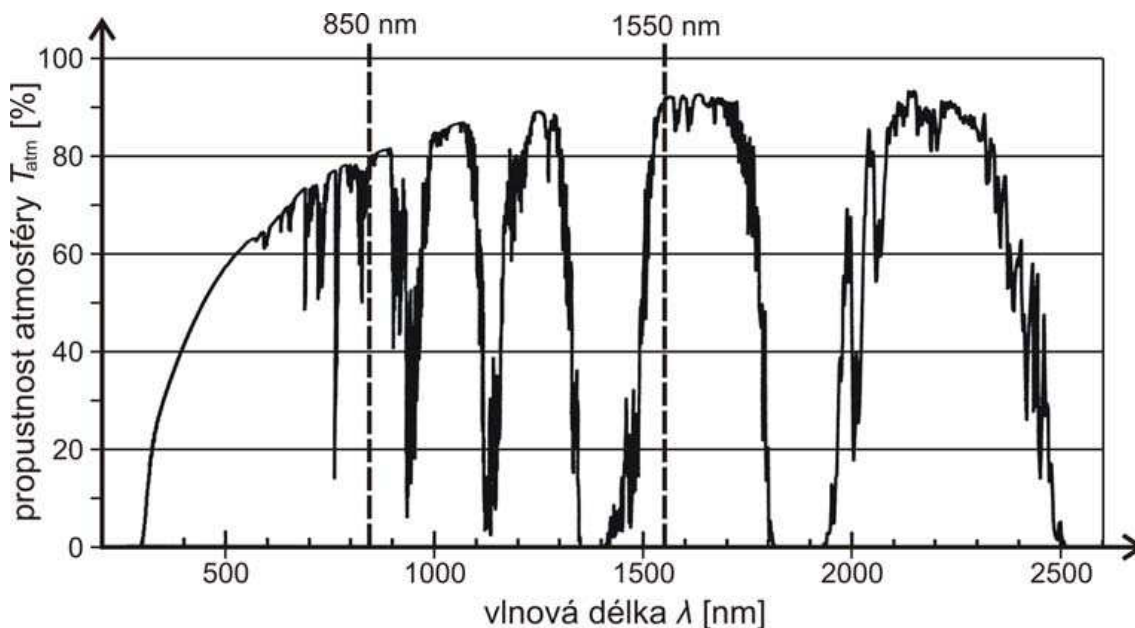


Obrázek 2 Blokové schéma vysílače s laserovou diodou

Budič zesiluje vstupní signál pro úroveň regulátoru, na jehož výstupu je u místěn optoelektrický prvek. Světelný tok snímán fotodiodou, která je zavedena jako zpětná vazba zpět do regulátoru. Tím zajistíme konstantní optický tok při změnách okolní teploty a stárnutí optoelektrického prvku. Jako zdroj světla se používají LED nebo laserové diody.

Přenosové médium

Přenosové médium je prostředí, kterým prochází informace. Nejčastěji je to vzduch, ale jsou testovány i spoje mezi družicemi ve vesmíru [3]. V této práci budeme uvažovat pouze šíření v atmosféře. Nečistoty obsažené ve vzduchu (prach, mlha, sníh, déšť) rozptylují či utlumují světelný paprsek a tím zvyšují hodnotu útlumu a snižují maximální dosah optického spoje. Obrázek 3 ukazuje útlum atmosféry pro viditelné a blízké infračervené světlo. [4]

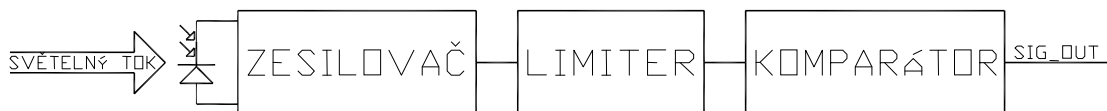


Obrázek 3 Propustnost atmosféry ve viditelném a blízkém infračerveném spektru

Nejdůležitější parametry pro útlum atmosféry je relativní vlhkost a teplota. S těmito parametry souvisí pojem viditelnost. Viditelnost známá jako meteorologická vizuální viditelnost je definována WMO jako [5]: největší vzdálenost, pro rozlišení objektu o kontrastu 5% proti pozadí při vlnové délce 550nm na níž má lidské oko nejvyšší citlivost. Dnes se převážně měří objektivně pomocí přístrojů, které vyhodnocují množství světla rozptýleného na částicích.

Přijímač

Přijímač převádí světelnou energii na energii elektrickou. Základní blokové schéma je na obrázku 4.



Obrázek 4 Blokové schéma přijímače

Světelný tok dopadá na fotodetektor, který energii fotonů převádí na elektrický proud. Tento proud je ale velmi malý (řádově desítky μA), takže jej musíme zesílit v zesilovači. Limiter slouží ke stabilizování výstupní hodnoty napětí. Průběžně mění své zesílení a tím je celý přenosový řetězec schopen pracovat při různém útlumu atmosféry. Abychom získali signál s definovanými napěťovými stavy log 1 a log 0, je vřazen komparátor. Komparátor porovnává napětí na vstupu s referenční hodnotou. Pokud bude napětí na vstupu vyšší než na referenčním vstupu, vyhodnotí jej jako log 1 a naopak.

3 Výkonové úrovně FSO

Model optického bezdrátového spoje se skládá ze dvou částí [6]:

- stacionární model – zisk vysílače a přijímače,
- statistický model – aktuální atmosférické podmínky přenosového kanálu v místě instalace.

3.1 Stacionární model spoje

Tento model popisuje energetickou bilanci a návrh FSO.

Je vyjádřen rovnicí:

$$P_{mRXA} = P_{mTXA} - \alpha_{cel} \quad (1)$$

Kde:

P_{mRXA}	střední hodnota přijatého výkonu [dBm]
P_{mTXA}	střední hodnota vysílaného výkonu [dBm]
α_{cel}	útlum prostředí mezi vysílačem a přijímačem [dB]

Útlum prostředí se skládá z mnoha dílčích útlumů. Základní rozdělení je na útlum šířením volným prostorem, který je závislý na vzdálenosti vysílače a přijímače a útlum způsobený atmosférickými jevy.

$$\alpha_{cel} = \alpha_{12} + \alpha_{atm} \quad (2)$$

Kde:

α_{12}	útlum šíření volným prostorem [dB]
α_{atm}	útlum závislý na stavu atmosféry (mlha, déšť) [dB]

Laserový svazek se blíží ideálnímu Gaussovskému svazku. Útlum šíření volným prostorem je zapsán jako:

$$\alpha_{12} = 20 \cdot \log \left(\frac{D_{TXA}}{\varphi_t L_{12}} \right) \quad (3)$$

Kde:

D_{TXA}	apertura vysílače [m]
φ_t	úhlová rozbíhavost optického svazku [rad]

L_{12} vzdálenost vysílače od přijímače [m]

Útlum atmosféry α_{atm} je rozepsán jako:

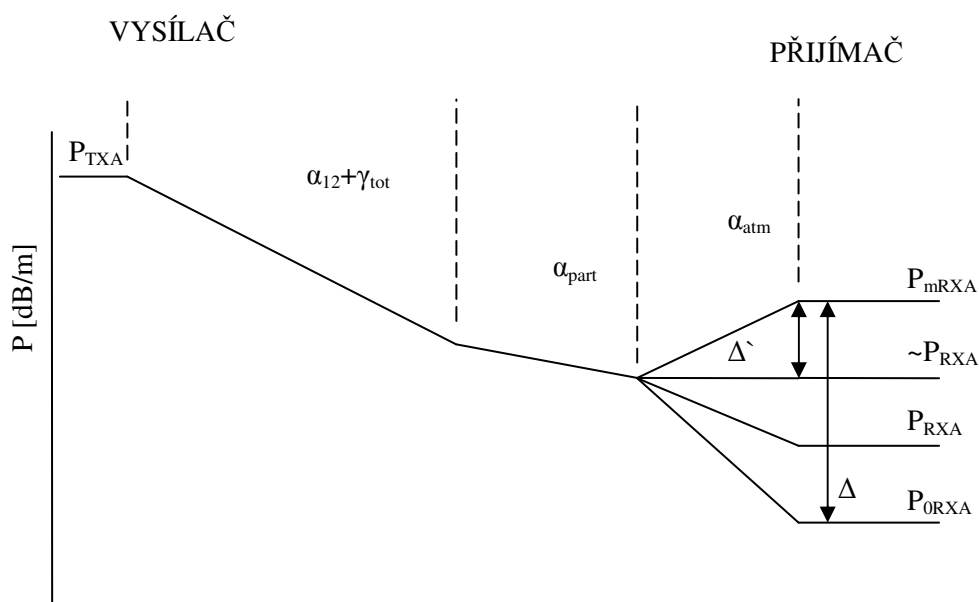
$$\alpha_{atm} = \alpha_{část} + \alpha_{turb} \quad (4)$$

Kde:

$\alpha_{část}$ útlum na částicích v atmosféře [dB]

α_{turb} útlum způsobený turbulencemi [dB]

Schéma průběhu výkonu od vysílače k přijímači ukazuje obrázek 5 [4].



Obrázek 5 Průběh útlumu na optickém spoji

Kde:

P_{TXA} hodnota středního výkonu laserové diody

P_{mRXA} práh saturace přijímače

$\sim P_{mRXA}$ hodnota středního výkonu na přijímači pro ideální čistou atmosféru

P_{RXA} hodnota středního výkonu ovlivněná atmosférickými vlivy

P_{ORXA} práh citlivosti přijímače

Δ dynamický rozsah přijímače

Δ' maximální záporná hodnota útlumu (vzniká skládáním interferencí při turbulencích)

3.1.1 Charakteristika atmosféry jako přenosového média

V atmosféře se projevují tyto hlavní jevy:

- absorpce optického výkonu – vliv rozptylu a absorpce na molekulách plynů a aerosolů,
- fluktuace optické intenzity – vliv turbulence atmosféry (vítr), působení deště a sněhu,
- náhodné přerušení svazku – letící pták.

3.1.2 Vliv mlh

Mlha má největší vliv na útlum atmosférického spoje. Pro její popis se používají matematické modely podle Kruse a Kima. Základní vzorec (5) popisující útlum lze nalézt v [7].

$$\alpha_{cast} = \frac{3,91}{V_m} \cdot \left(\frac{\lambda}{550 \cdot 10^{-9}} \right)^{-q} \quad (5)$$

Kde:

V_m meteorologická dohlednost

q koeficienty modelů dle Kruse a Kim ukazuje Tabulka 1.

Koeficient Kim	Koeficient Kruse	Hodnota viditelnosti
1,6	1,6	$V > 50$ km
1,3	1,3	$50 \text{ km} > V > 6$ km
$0,16V + 0,34$	$0,558V^{\frac{1}{3}}$	$6 \text{ km} > V > 1$ km
$V - 0,5$	$0,558V^{\frac{1}{3}}$	$1 \text{ km} > V > 0,5$ km
0	$0,558V^{\frac{1}{3}}$	$V < 0,5$ km

Tabulka 1 Koeficienty modelu dle Kruse a Kima

Pro přepočítání útlumu na 1km použijeme vztah podle [4].

$$\alpha_{mlha} = 0,23 \cdot \alpha_{cast} \quad (6)$$

Tabulka 4 nám ukazuje orientační přehled hodnot útlumů pro oba modely při 850nm

V [km]	α_{mlha} [dB/km]		Stav atmosféry
	Kim	Kruse	
0,05 < 0,5	400 – 41	375 – 29	Silná mlha
0,5 – 1	41 – 16	29 – 16	Střední mlha
1 – 6	16 – 2	16 – 2	Slabá mlha
6 – 50	2 – 0,7	2 – 0,7	Opar
> 50	0,7	0,7	Čistá atmosféra

Tabulka 2 Přehled útlumů atmosféry v závislosti na meteorologické viditelnosti

Oba atmosférické modely se pro velké dohlednosti shodují. Pro nízkou dohlednost vychází větší útlum dle Kima. Tento model byl publikován později a je zpřesněním modelu Kruse. Z uvedené tabulky vyplývá, že vliv mlh je přímo kritický pro funkci FSO.

3.1.3 Útlum vlivem dešťových srážek

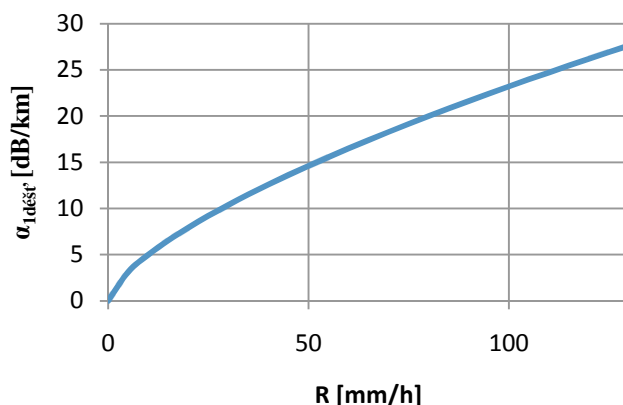
Jde o jeden z faktorů ovlivňujících funkci FSO. Podle [7] je koeficient útlumu $\alpha_{1dešt}$ při hustotě deště R v mm/h roven:

$$\alpha_{1dešt} = 1,076R^{\frac{2}{3}} \quad (7)$$

Kde:

$\alpha_{1dešt}$ koeficient útlumu deštěm [dB/km]

Vztah (7) je zobrazen na obrázku 6.



Obrázek 6 Graf závislosti útlumu na intenzitě dešťových srážek

Útlum způsobený deštěm není tak kritický jako u rádiových spojů, ale přesto s ním musíme počítat při návrhu optického spoje.

3.1.4 Útlum vlivem sněžení

Koeficient útlumu sněžení α_{1snih} je popsán vzorcem (8) [7]

$$\alpha_{1snih} = a \cdot S^b \quad (8)$$

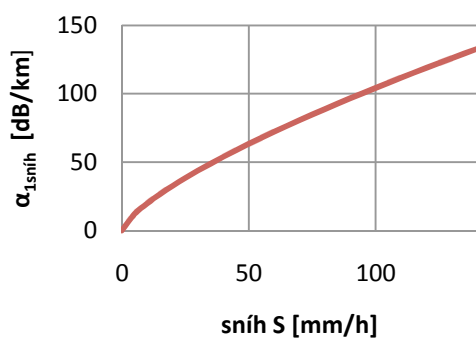
Kde:

- α_{1snih} koeficient útlumu sněhu [dB/km]
- S intenzita sněhových srážek [mm/h]
- a, b koeficienty závislé na charakteru sněhu. Jsou zobrazeny v tabulce 3.

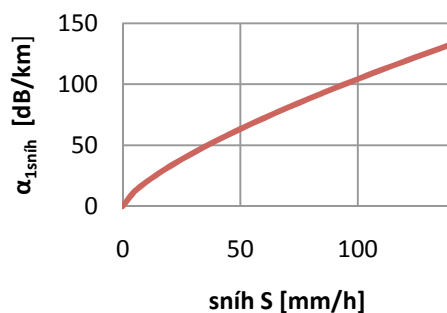
typ sněhu	a	b
suchý sníh	$5,42 \cdot 10^{-4} \lambda + 5,4958776$	1,38
mokrý sníh	$1,023 \cdot 10^{-5} \lambda + 3,7855466$	0,72

Tabulka 3 Koeficienty a, b pro různé druhy sněhu

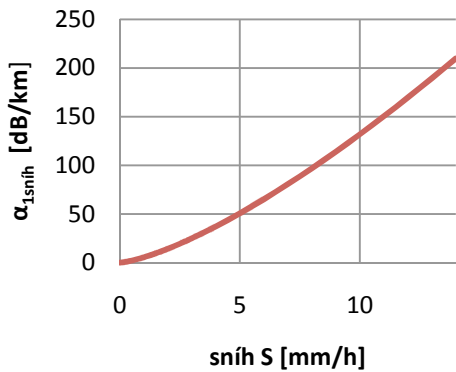
Obrázky 7 a 8 ukazují útlum mokrého sněhu při vlnové délce 850nm a 1550nm. Situaci pro suchý sníh ukazují obrázky 9 a 10.



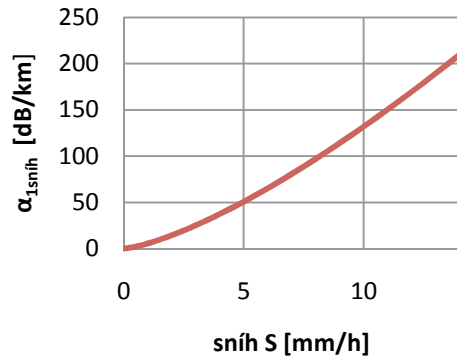
Obrázek 7 Útlum mokrého sněhu pro $\lambda = 850\text{nm}$



Obrázek 8 Útlum mokrého sněhu pro $\lambda = 155\text{ nm}$



Obrázek 9 Útlum suchého sněhu pro $\lambda = 850\text{nm}$



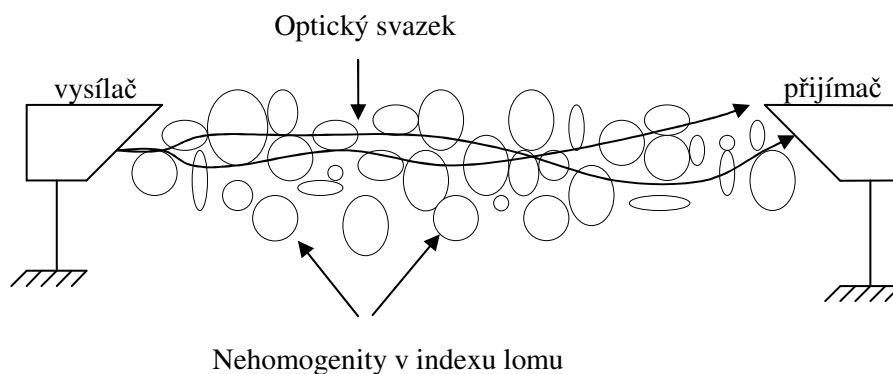
Obrázek 10 Útlum suchého sněhu pro $\lambda = 1550\text{nm}$

Porovnáním obrázků lze usoudit, že závislost vlnové délky při sněžení je bezvýznamná. Pro útlum spoje se projevuje daleko více suchý sníh než mokřý.

3.1.5 Turbulence atmosféry

Na optický spoj má vliv i rychlost proudění vzduchu. V blízkosti překážek vznikají turbulence. Turbulence jsou větrné víry velikosti od milimetrů po stovky metrů s rozdílnou teplotou a tlakem, a tudíž i rozdílným indexem lomu. Díky tomu dochází k odklánění části optického svazku a kolísání optického výkonu na přijímači.

Turbulence jsou náhodný proces, a proto se popisují statistickými metodami [8]. Ukázka změny šíření optického svazku na turbulencích je na obrázku 11.



Obrázek 11 Vliv turbulencí na šíření optického svazku

Turbulence mohou změnit směr šíření optického svazku a v tomto důsledku dochází ke kolísání optické intenzity v přijímači. Mikroturbulence mohou nastat i při bezvětří. V letních měsících při přímém svitu slunce dochází nad úrovní terénu k silnému ohřevu vzduchu a tím vzniku turbulencí. Tento jev je znám jako „tetení vzduchu“.

Útlum α_{turb} lze empiricky vyjádřit pomocí modelu turbulentní atmosféry vycházející ze vztahu (9) [7]

$$\alpha_{turb} = 2 \sqrt{23,17 \cdot \left(\frac{2\pi}{\lambda}\right)^{\frac{7}{6}} \cdot C_n^2 \cdot L^{\frac{11}{6}}} \quad (9)$$

Kde:

C_n^2 strukturální parametr indexu lomu [7].

Vliv turbulence na útlum pro vlnové délky 850nm a 1550nm shrnuje tabulka 4 [4].

C_n^2 [m ^{-2/3}]	Míra turbulence	α_{turb} [dB/km]	
		850 nm	1550 nm
10^{-16}	Klidná atmosféra	0,55	0,39
10^{-15}	Mírná turbulence	1,74	1,22
10^{-14}	Střední turbulence	5,5	3,9

Tabulka 4 Vliv turbulencí na útlum

3.1.6 Přerušování optického svazku

Spoje v městských lokalitách se zelení čelí také problémům s prolétajícími ptáky, kteří mohou optický svazek přerušit. Na obrázku 12 je zachycen průlet ptáka přes testovací spoj ATMO 155 [4]. Průměrná doba přesušení je v řádu jednotek až desítek milisekund, kdy dochází ke zvýšení chybovosti spoje.



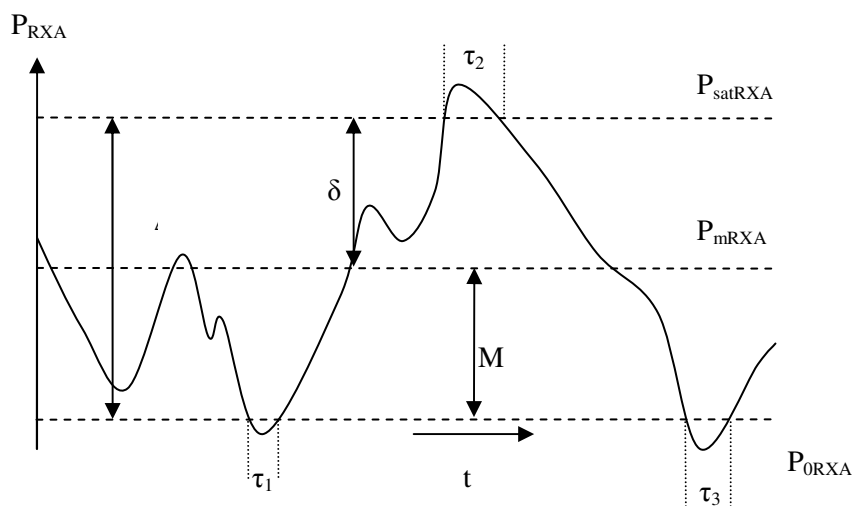
Obrázek 12 Přelétající pták přes paprsek atmosférického spoje

3.2 Statistický model atmosférického optického spoje

Reálný optický spoj ukazuje, že přijímaný optický signál nabývá různých hodnot v závislosti na útlumu atmosféry, jehož hlavní mechanismy byly popsány v předchozích kapitolách. Tyto parametry se ale v čase mění a k jejich popsání a ohodnocení v časové rovině používáme takzvaný statistický model atmosféry.

3.2.1 Rozložení přijímaného optického výkonu v čase

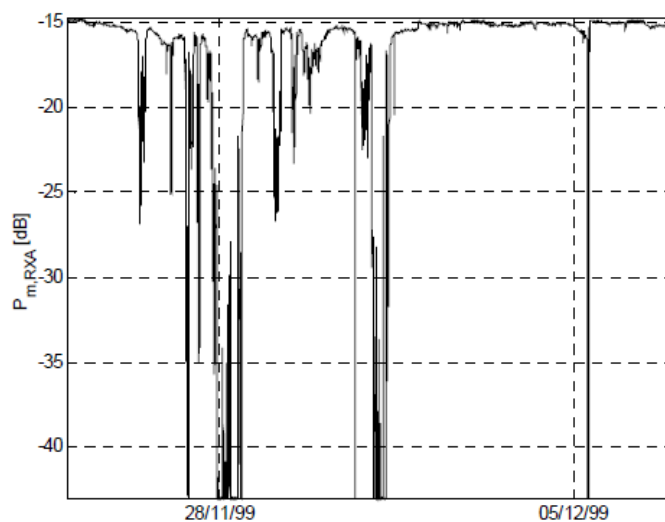
Na obrázku 13 je ukázán průběh přijatého optického výkonu v čase [6].



Obrázek 13 Časový průběh optického výkonu na apertuře přijímače

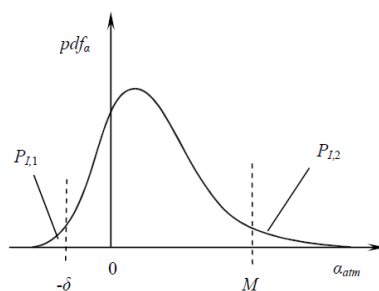
Časové úseky τ_1 a τ_3 jsou časové úseky, kdy hodnota přijímaného optického výkonu klesla pod úroveň citlivosti přijímače P_{0RXA} . Při τ_2 došlo k saturaci při překročení hodnoty optického výkonu P_{satRXA} . P_{mRXA} je hodnota středního výkonu za časový interval. Δ je dynamický rozsah přijímače. M je linková rezerva spoje a δ je maximální záporná hodnota útlumu, která může vzniknout při skládání interferencí při turbulencích.

Na obrázku 14 je ukázka průběhu útlumů v čase na spoji instalovaném na VUT Brno na vzdálenost $L_{12} = 750\text{m}$ [6].



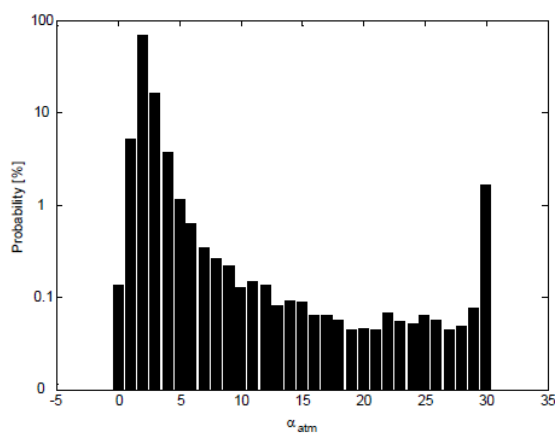
Obrázek 14 Naměřené úrovně výkonu na spoji ATMO 155

Statistika útlumu odpovídá náhodnému útlumu α_{atm} . Hustota rozložení funkce pdf_a na obrázku 15 odpovídá přijatému optickému výkonu [6].



Obrázek 15 Statistické rozložení výkonu

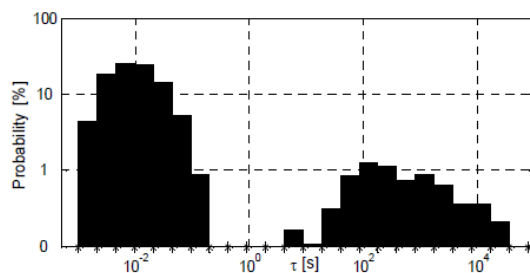
Obrázek 16 zobrazuje experimentální ověření pdf_a [6]



Obrázek 16 Experimentální ověření rozložení výkonu pdf_a

3.2.2 Rozložení pravděpodobnosti trvání úniků

Úniky můžeme rozdělit na dlouhodobé úniky (desítky sekund a více) a krátkodobé úniky (trvání do několika sekund). Dlouhodobé úniky jsou způsobeny převážně rozptylem na částicích. Krátkodobé úniky způsobuje především prolétající ptactvo a turbulence. Rozložení úniků ilustruje obrázek 17 [6].



Obrázek 17 Časové rozložení úniků

4 Kvalitativní popis přenosového kanálu

Pro určení kvality přenosového kanálu FSO se zpravidla používají 2 metody – BER test a diagram oka.

4.1 BER

Bit Error Rate, česky bitová chybovost. Je dána jako poměr mezi chybně přijatými bity a celkovým počtem přenesených bitů v komunikačním kanálu za určitý časový úsek.

$$\text{BER} = \frac{N_e}{N_c} \cdot t \quad (10)$$

Kde:

N_e	počet chybně přenesených bitů
N_c	počet přenesených bitů
t	doba sběru dat

Je několik způsobů jak měřit chybovost [9]:

- první způsob: definuje počet period hodinového signálu, po které bude probíhat měření. Tento postup je nezávislý na přenosové rychlosti a dá se jednoduše realizovat pomocí čítačů,
- druhý způsob: definuje čas, po který bude měření probíhat. K výpočtu podílu chyb a přenesených dat je použit mikroprocesor,
- třetí způsob: definuje minimální počet nasbíraných chyb, které nám dovolí přesné statistické zpracování. U systému s nízkou chybovostí může tato metoda vést k neúnosně dlouhé době, po kterou nasbíráme požadovaný počet chybných bitů. Například přenosový kanál o rychlosti 100Mbit/s s chybovostí 10-12 nasbírá 100 chyb za 3 měsíce [9].

K testování se nejčastěji používají následující testovací sekvence [12]:

- PRBS – pseudonáhodná datová sekvence o délce $2^n - 1$,
- QRSS – kvazináhodný signálový zdroj – generuje všechny posloupnosti 20 bitového slova. Z této sekvence jsou ale odebrána slova s posloupností log 0 delší než 14 bit. Je použito 1 048 575 kombinací,
- střídání log 0 a log 1 – datová sekvence střídající log 0 a log 1,

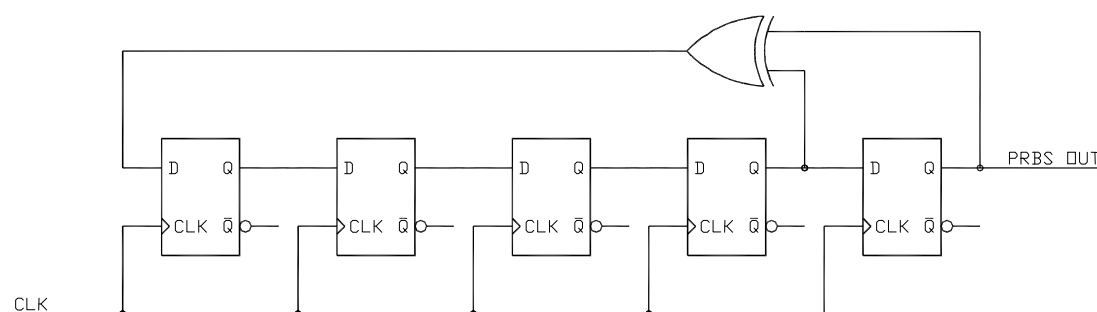
- trvalá log 1 – v kanálu je přenášena trvale vysoká logická úroveň. Tato sekvence se používá pro testování výkonových parametrů v přenosovém kanálu (stabilita, zesílení atd.),
- trvalá log 0 – sekvence přenášející pouze nízkou úroveň. Je vhodná k měření šumu v přenosovém kanálu.

K testování se používá nejčastěji pseudonáhodná datová posloupnost, jež je popsána v doporučení ITU-T O.151 [10]

Přenosová rychlost (kbit·s ⁻¹)	Délka sekvence	Generující polynom
1544	$2^{15}-1$	$X_{15}+X_{14}+1=0$
2048	$2^{15}-1$	$X_{15}+X_{14}+1=0$
6312	$2^{15}-1, 2^{20}-1$	$X_{15}+X_{14}+1=0, X_{20}-X_3-1=0$
8448	$2^{15}-1$	$X_{15}+X_{14}+1=0$
32064	$2^{15}-1, 2^{20}-1$	$X_{15}+X_{14}+1=0, X_{20}-X_3-1=0$
139264	$2^{23}-1$	$X_{23}+X_{18}+1=0$

Tabulka 5 Základní testovací sekvence

Generátor pseudonáhodné sekvence je tvz. Lineární zpětnovazebný posuvný registr. Je tvořen posuvnými registry v sériovém zapojení, jehož některé členy jsou zapojeny do zpětnovazebního XOR hradla. Blokové schéma řetězce $X^5+X^4+1=0$ je na obrázku 18.



Obrázek 18 Blokové schéma lineárního zpětnovazebného posuvného registru

Detekce chyb

Na jeden vstup hradla XOR je přiváděn signál, který prošel přenosovým kanálem a je porovnávám s referenčním vzorem přivedeným na druhý vstup hradla. Při výskytu rozdílu mezi přijatým a referenčním bitem je generována log 1 značící výskyt chyby. V tomto případě mají výhodu standardizované testovací sekvence, protože na vstupu testovaného kanálu máme pouze generátor PRBS. Na výstupu z kanálu si měřič bitové chybovosti podle vlastního vzoru generuje

novou referenční pseudonáhodnou sekvenci, takže dojde k eliminaci chyb při přenosu referenčního signálu.

Analýza chyb

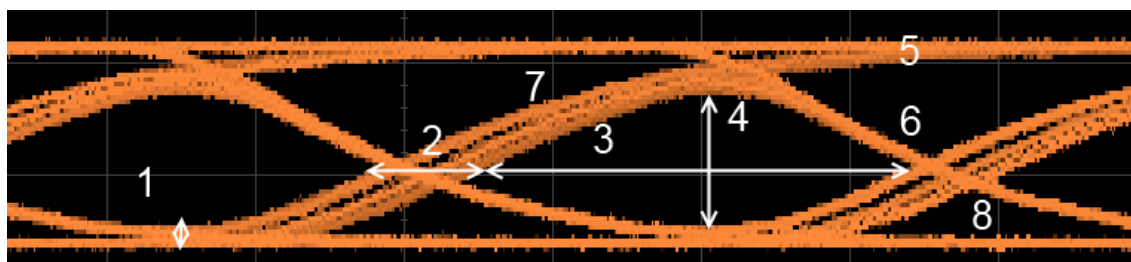
Doporučení G. 821 [9] klasifikuje následující popis chybových úseků:

klasifikace	popis
Zhoršené minuty (degraded minutes) - DM	Minutové intervaly s BER horší než 10^{-6}
Více-chybové sekundy (severaly errored seconds) - SES	Sekundové úseky s BER horší než 10^{-3}
Chybové sekundy (errored seconds) - ES	Sekundové úseky kde se vyskytla alespoň jedna chyba

Tabulka 6 Chybové úseky dle G.821

4.2 Diagram oka

Anglicky eye pattern je základní měření používané v telekomunikacích. Je zobrazován na obrazovce osciloskopu, kde se opakovaně překreslují průběhy signálů, které jsou synchronizovány externím hodinovým signálem o stejné frekvenci, jako je přenosová rychlost. Stopa na obrazovce poté vypadá jako oko s hladinami v log 1 a log 0 v případě dvoustavových systémů nebo několik ok a hladin v případě vícecestavových systémů. Příklad dvoustavového diagramu oka je na obrázku 19.



Obrázek 19 Diagram oka dvoustavového systému

Význam jednotlivých popisek:

- 1 odstup signálu od šumu SNR
- 2 jitter
- 3 otevření oka v časové oblasti
- 4 rozkmit signálu (velikost amplitudy)

5	úroveň log 1
6	doba sestupné hrany
7	doba náběžné hrany
8	úroveň log 0

Přenosový řetězec je kvalitnější, čím více je oko rozevřené (nedochází k chybnému vyhodnocení úrovní), a čím menší je časové kolísání zpoždění signálu – jitter (nedochází k intersymbolové interferenci). S otevřením oka souvisí i odstup signálu od šumu.

Q-faktor

Vyjadřuje kvalitu přenášeného signálu a dá se vyčíst z diagramu oka. Zahrnuje zhoršení jako je šum, jitter atp. Výpočet Q- faktoru uvádí vzorec (11) [11].

$$Q = \frac{I_1 - I_0}{\sigma_1 - \sigma_0} \quad (11)$$

Kde:

I_1	úroveň signálu v log 1
I_2	úroveň signálu v log 0
σ_1	směrodatná odchylka v log 1
σ_0	směrodatná odchylka v log 0

5 Optoelektronické prvky

5.1 Zdroje optického záření

Zdroje optického záření jsou zařízení emitující světelné záření. Pro naše potřeby probereme pouze LED a laserové diody.

Základní princip emise fotonů spočívá v přechodu elektronu na vyšší energetickou hladinu v důsledku dodání energie z vnějšku (teplota, elektrický proud). Protože jsou tyto dráhy méně stabilní, elektrony sestupují na nižší energetické hladiny a překonávají tzv. zakázaný pás, což je oblast, ve které se elektrony nemohou vyskytovat. Přebytečná energie se vyzáří pomocí fotonů. Vlnová délka světla odpovídá energii nutnou pro překonání zakázaného pásu.

$$\lambda = \frac{h \cdot c}{E_g} \quad (12)$$

Kde:

c	rychlost světla (299 792 458 m·s ⁻¹)
h	Planckova konstanta (6,626*10 ³⁴ J·s)
E _g	energie zakázaného pásu

Energie vyzářeného fotonu se vypočítá ze vztahu:

$$E = f * h \quad (13)$$

Kde:

f	frekvence záření
h	Planckova konstanta (6,626*10 ³⁴ J·s)

LED diody

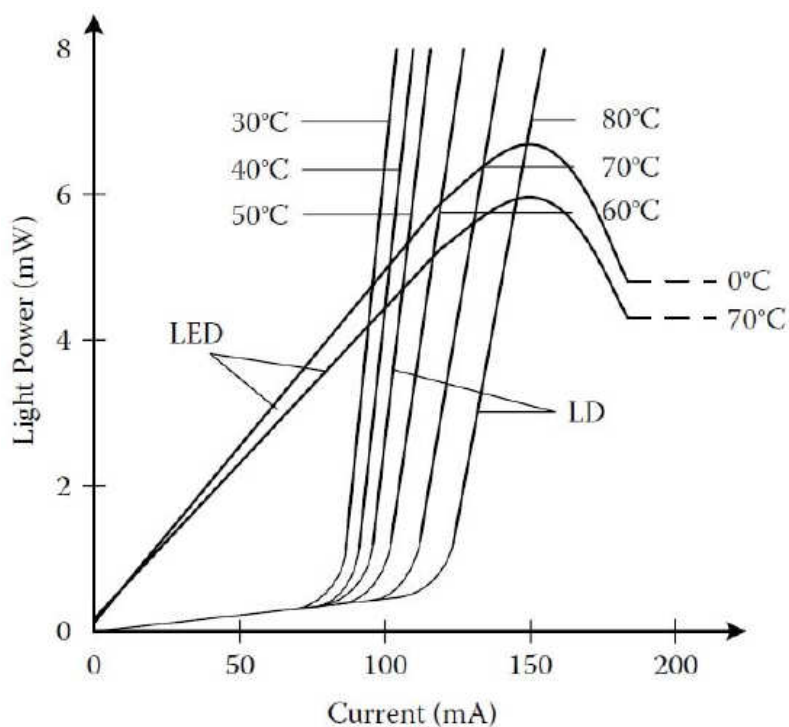
U LED diod vzniká světlo na PN přechodu rekombinací elektronů a děr. Aby se elektrony a díry mohli pohybovat, musí být napětí zdroje vyšší než napětí vyprázdněné oblasti.

Mezní frekvence LED je někde kolem 200MHz a šířka spektrální čáry je až 100nm, proto se nehodí na dálkové vysokorychlostní komunikace.

Laserové diody

Laserové diody využívají tzv. stimulované emise. To znamená, že vyzáření světla probíhá na základě vnějšího stimulu. Na začátku jsou všechny elektrony ve vyšších energetických hladinách. Je emitován náhodný foton, který pro excitované elektrony představuje stimulující popud pro sestoupení na nižší energetické hladiny a tím pádem generování dalších fotonů. Nový foton má identické vlastnosti jako foton stimulující (frekvence, fáze). Laserové diody mají velmi malou šířku spektrální čáry maximálně v jednotkách nm. Šířka pásma je v jednotkách GHz.

Nevýhodou je, že jejich výstupní výkon je silně závislý na okolní teplotě. PI charakteristiky LED a LD jsou na obrázku 20 [26].



Obrázek 20 Teplotní PI charakteristiky LED a LD

5.2 Detektory optického záření

Základní úkol fotodetektoru je přeměna světla na elektrický proud. Uplatňují se zde dva jevy - vnější a vnitřní fotoefekt.

Vnější fotoefekt: využívá se fotonásobičů a fotonek. Tyto součástky jsou velmi objemné a vyžadují velké pracovní napětí (stovky voltů), a proto se v telekomunikacích nepoužívají.

Vnitřní fotoefekt: Celý děj probíhá uvnitř krystalu polovodiče, proto je nevýhodou absorpce fotonů materiálem polovodiče. Naopak velkou výhodou rychlost rekombinace nosičů náboje. V telekomunikacích jsou preferovány prvky založené na tomto jevu.

PN fotodioda

Je konstruována stejně jako polovodičová dioda. Světlo dopadá na PN přechod diody. Má velkou kapacitu PN přechodu a nízkou rychlost.

PIN fotodioda

Je zde rozšířena vyprázdněná oblast přidáním další oblasti I, která je několikrát větší než oblasti P a N. Díky tomu mají tyto diody nižší kapacitu a je zde rychlejší pohyb nosičů náboje.

Je konstruována tak, aby světlo dopadalo čelně na diodu. Druhá strana diody může sloužit k odražení světla zpět do diody a zvýšení citlivosti.

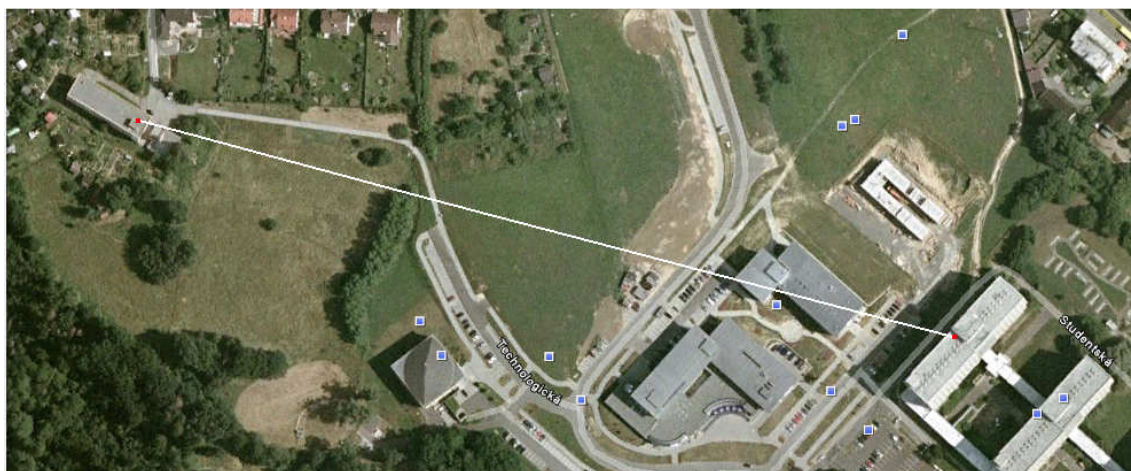
Lavinová dioda APD

Struktura je stejná jako u PIN diody, jen je zvýšeno závěrné napětí na desítky až stovky voltů. Díky tomu je dosaženo kvantové účinnosti vyšší než 1. Dopadající foton vytvoří pár elektron – díra, který je urychlen na takovou rychlost, že při kolizi s krystalickou mřížkou vznikne další pár elektron-díra. Tomuto jevu je říká lavinový jev. Výhodou této diody je její vysoká citlivost. Nevýhodou je velký šum.

6 Koncepce testovacího optického pojítka

Úkolem této práce bylo navrhnout testovací optické pojítka pracující na vlnové délce 850nm, které bude měřit změny útlumu atmosféry. Výstupem z pojítka bude napětí úměrné přijatému optickému výkonu. K dlouhodobému bude využito automatického A/D převodníku firmy Papouch [13]. Pojítka se bude skládat z hlavice s vysílačem a přijímačem a hlavice s reflektorem.

Hlavice vysílače a přijímače bude nainstalovaná na střeše budovy Krásnopolská a hlavice reflektoru tvořená jakostním zrcadlem bude umístěna na střeše kolejní budovy E. Celková vzdálenost mezi budovami je 440m, takže dráha laserového svazku bude 880m. Situaci umístění ilustruje obrázek 21.



Obrázek 21 Ilustrace instalace optického pojítka

Hlavici vysílače a přijímače tvoří generátor obdélníkového signálu, budič laserové diody, laserová dioda pracující v pásmu 850nm a fotodetektor.

Fotografie finálního mechanického provedení hlavice je na obrázku 22.



Obrázek 22 Konstrukce hlavičky detektoru a laseru

Na hlavičce reflektoru je použito zrcadlo firmy Thorlabs [25] o průměru 75mm se zpětným odrazem lepším než 99%. Aby na zrcadle nekondenzovala vzdušná vlhkost, je trvale vyhříváno.

Hlavička je na obrázku 23.



Obrázek 23 Hlavička reflektoru

Po dohodě s vedoucím diplomové práce bylo upuštěno od testování na střeše budovy Krásnopolské a kolejí E, protože časové nároky na realizaci elektrické a mechanické části pojítek byly velké. Proto se rozhodlo testovat funkčnost a vliv atmosférických jevů pouze uvnitř budovy Krásnopolská.

6.1 Výpočet energetické bilance spoje

Pro co největší měřicí rozsah potřebujeme znát maximální možný výkon dopadající na čip fotodiody. Zesílení zesilovačů musí být navrženo tak, aby napětí vstupující do převodníku bylo rovno maximálnímu napětí při nulovém útlumu atmosféry. Tím se docílí nejširšího dynamického rozsahu.

Útlum šířením

$$\alpha_{12} = 20 \cdot \log \left(\frac{D_{TXA}}{\phi_t \cdot L_{12}} \right) = 20 \cdot \log \left(\frac{6 \cdot 10^{-3}}{1 \cdot 10^{-3} \cdot 880} \right) = 43,2 \text{ dB} \quad (14)$$

Útlum na vysílací čočce a krycím skle

$$\alpha_{TXA} = 0,7 \text{ dB}$$

Útlum nedokonalým odrazem zrcadla

$$\alpha_{ZR} = 0,1 \text{ dB}$$

Útlum na přijímací čočce a krycím skle

$$\alpha_{RXA} = 0,7 \text{ dB}$$

Útlum nedokonalým zaměřením

$$\alpha_{ZAM} = 1 \text{ dB}$$

Útlum šířením v atmosféře

$$\alpha_{\text{část}} = 0,5 \text{ dB} \cdot \text{km}^{-1} \cdot 0,88 \text{ km} = 0,44 \text{ dB} \quad (15)$$

Zisk na přijímací čočce

$$\gamma_{TOT} = 20 \cdot \log\left(\frac{D_{RXA}}{D_{TXA}}\right) = 20 \cdot \log\left(\frac{120}{5}\right) = 27,6 \text{ dB} \quad (16)$$

Celkový útlum šíření

$$\begin{aligned} \alpha_{CEL} &= \alpha_{12} + \alpha_{TXA} + \alpha_{ZR} + \alpha_{RXA} + \alpha_{ZAM} + \alpha_{PART} - \gamma_{TOT} \\ &= 43,2 + 0,7 + 0,1 + 0,7 + 1 + 0,44 - 27,6 = 18,54 \text{ dB} \end{aligned} \quad (17)$$

Výkonová úroveň laserové diody – 15mW

$$P_{TXA} = 10 \cdot \log\left(\frac{15}{1}\right) = 11,7 \text{ dBm} \quad (18)$$

Optický výkon v dBm dopadající na fotodiodu při čisté atmosféře

$$P_{RXA} = P_{TXA} - \alpha_{CEL} = 11,7 - 18,54 = -6,84 \text{ dBm} \quad (19)$$

což odpovídá výkonu 0,2 mW

Kvantová účinnost fotodiody BPX61 při 850nm je 0,62 A/W; proud fotodiodou je tedy

$$I_{FOTO} = P_{RXA} \cdot 0,62 = 0,2 \cdot 0,62 = 0,12 \text{ mA} \quad (20)$$

Potřebné zesílení na transimpedančním zesilovači pro dosažení saturace ($\pm 5V$)

$$A_u = 20 \cdot \log\left(\frac{U_{sat}}{I_{FOTO}}\right) = 20 \cdot \log\left(\frac{10V}{0,12mA}\right) = 98,4 \text{ dB} \quad (21)$$

Pokud budeme uvažovat šum zesilovače 5mV; dynamický rozsah přijímače určíme

$$M = 20 \cdot \log\left(\frac{U_{SAT}}{U_N}\right) = 20 \cdot \log\left(\frac{10}{5 \cdot 10^{-3}}\right) = 66 \text{ dB} \quad (22)$$

jedná se o rozsah v napěťové oblasti. V optické části bude dynamický rozsah 33 dB.

7 Návrh obvodového řešení

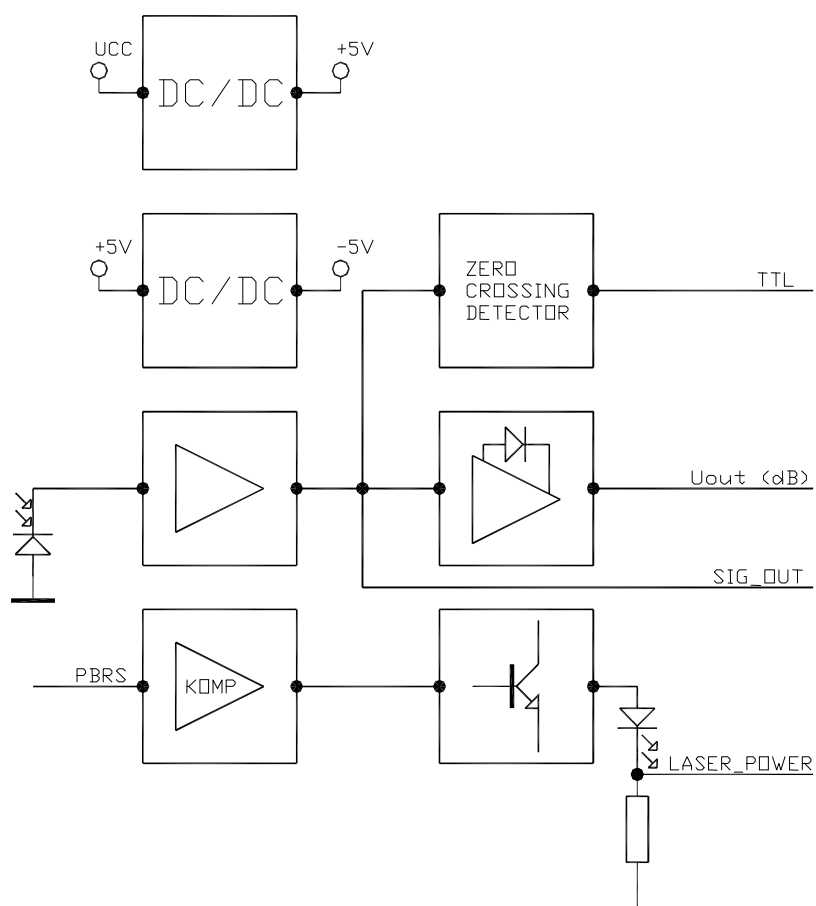
Cílem práce bylo navrhnout a otestovat řešení laserového modulátoru a fotodetektoru pro měření výkonové úrovně dopadající na fotodiodu.

Celá elektrická konstrukce se skládá z několika funkčních celků osazených na jedné DPS, jejichž blokové schéma je na obrázku 24..

Napájecí zdroj – sloužící ke konvertování vstupního napětí 6 – 20V na symetrických $\pm 5V$ potřebných pro chod celého zařízení.

Obvod laseru – složí k modulování laserového paprsku pomocí OOK modulace.

Obvod detektoru – slouží k příjmu, tvarování impulzů na TTL logiku a vyhodnocení výkonové úrovně laseru dopadající na fotodetektor.

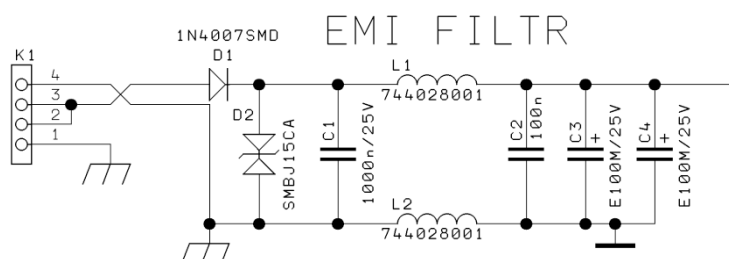


Obrázek 24 Blokové schéma fotodetektoru a laserového modulátoru

7.1 Napájecí zdroj

Obvody laseru a detektoru pracují s napětím $\pm 5V$. Vstupní napětí může být v rozsahu 6 – 20V, ale pro správnou funkci obvodu musíme toto napětí konvertovat pomocí spínaného zdroje LM22674 na +5V a výsledné napětí invertovat pomocí obvodu ICL7660 na -5V. Schéma je uvedeno na obrázku 25.

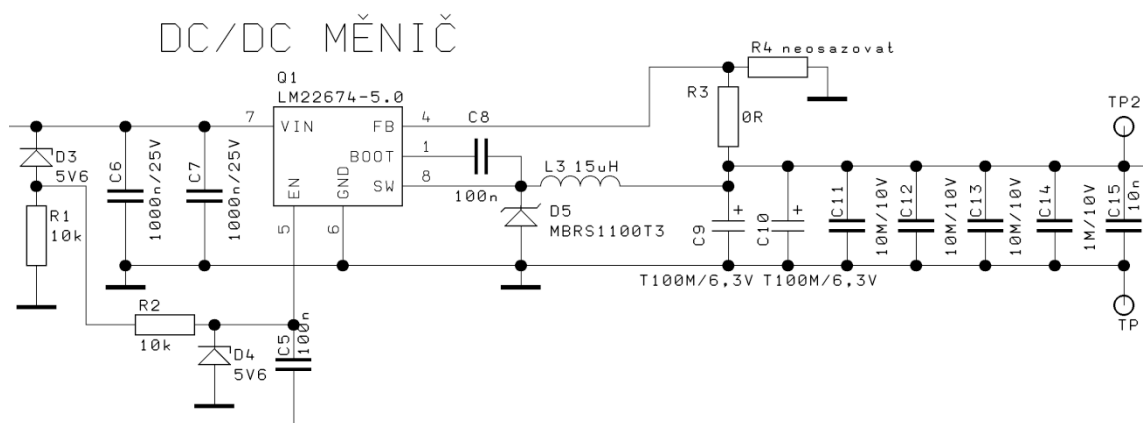
Vstupní EMI filtr



Obrázek 25 EMI filtr

Dioda D1 slouží jako ochrana k přepólování napájecího napětí, tranzistor D2 slouží k ochraně před vyšším napětím a napětíovým špičkám. Následuje LC obvod C1, L1, L2, C2 sloužící jako napájecí filtr. Kondenzátory C3, C4 jsou hlavní zásobárny energie celého obvodu.

Spínaný zdroj +5V

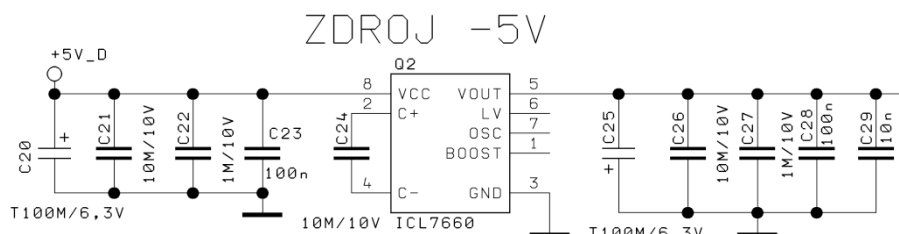


Obrázek 26 DC/DC měnič

Základ obvodu tvoří monolitický snižující měnič LM22674. Zenerovy diody D3, D4 slouží k sepnutí obvodu měniče, pouze pokud překročí napájecí napětí 5,6V. Obvod je dále zapojen

dle doporučeného zapojení výrobce [14]. Kondenzátory C9 až C15 slouží k filtrování napájecího napětí. Kondenzátory C10 až C15 jsou keramické kondenzátory. Tyto kondenzátory se vyznačují velmi nízkým sériovým odporem (ESR) pro snížení zvlnění výstupního napětí.

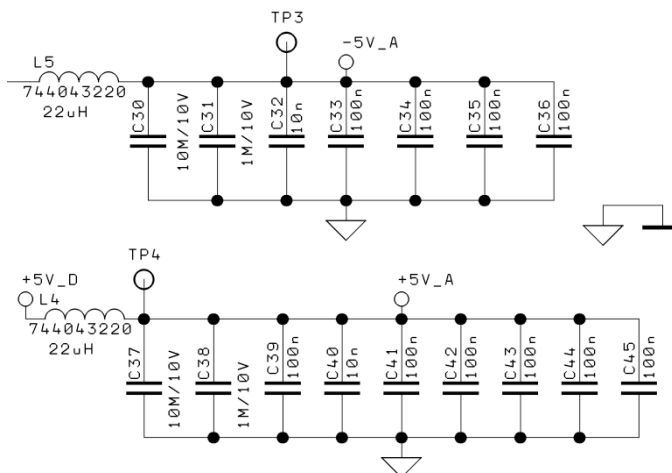
Invertor +5V na -5V



Obrázek 27 Invertor

Obvod ICL7660 [15] slouží k vytváření záporného napětí. Jde o spínaný kondenzátorový invertor, který napětí na vstupu pomocí kondenzátoru C24 invertuje na záporné napětí stejné velikosti. Ve zdroji jsou použity nízkoimpedanční tantalové a keramické kondenzátory.

Filtry analogové části



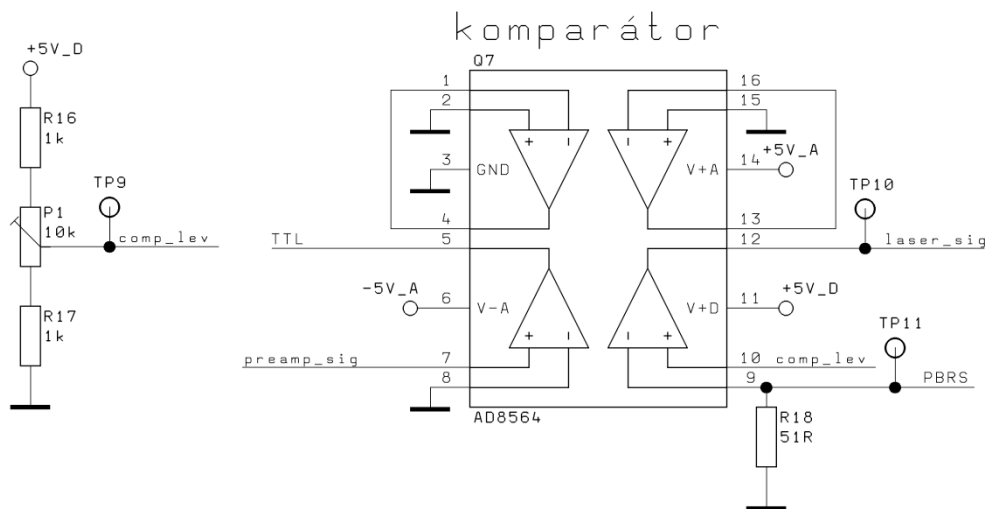
Obrázek 28 Filtry analogové části

Abychom zabránili šumu šířícího se po napájecím napájení z digitálních částí obvodu, je napájení analogových obvodů filtrováno pomocí dalších LC filtrů. Tím také snížíme zvlnění napájecího napětí z DC/DC měničů. Jsou použity keramické kondenzátory, protože mají nejnižší sériovou impedanci ze všech druhů kondenzátorů.

7.2 Obvod buzení laseru

Na vstup obvodu můžeme přivést libovolný signál s dvojjúrovňovou logikou. Obvod se skládá z několika částí.

Komparátor

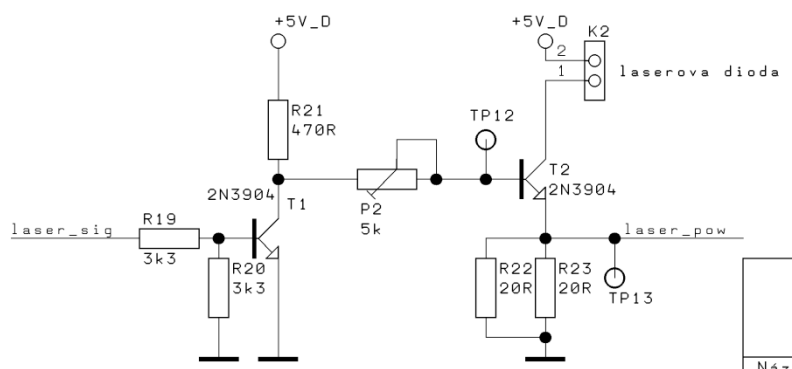


Obrázek 29 Komparátor

Obvod AD8564 [16] je čtyřnásobný komparátor. Jeden komparátor slouží k převodu vstupní dvoustavové logiky na TTL logiku potřebnou pro budič laseru. Úroveň klopení můžeme nastavit pomocí potenciometru P1. Druhý komparátor je zapojen jako detektor průchodu nulou. Vstupuje do něj signál se střední hodnotou amplitudy rovnou 0V. Pokud bude vstupní napětí větší než 0V, na výstupu komparátoru bude napětí odpovídající digitálnímu napájecímu napětí +5V_D. Pokud bude napětí menší než 0V, na výstupu komparátoru bude 0V. Tímto způsobem získáme z napětí na vstupu signál v TTL logice.

Budič laseru

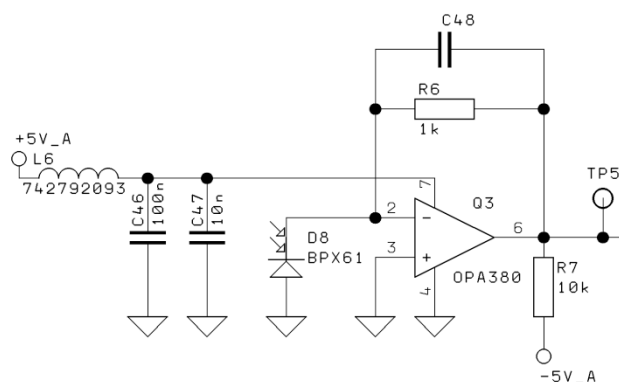
Tranzistor T1 slouží k spínání proudového zdroje tvořeného tranzistorem T2, jež reguluje proud laserovou diodou. Pro co nejrychlejší spínání tranzistorů jsou voleny vysoké proudy. Potenciometrem P2 nastavíme proud báze T2. Tím regulujeme proud laserovou diodou. Přibližný proud tekoucí laserovou diodou můžeme měřit na rezistorech R22 a R23. Proud laserovou diodou přibližně odpovídá poměru 10mA/100mV



Obrázek 30 Budič laseru

7.3 Fotodetektor

Transimpedanční zesilovač



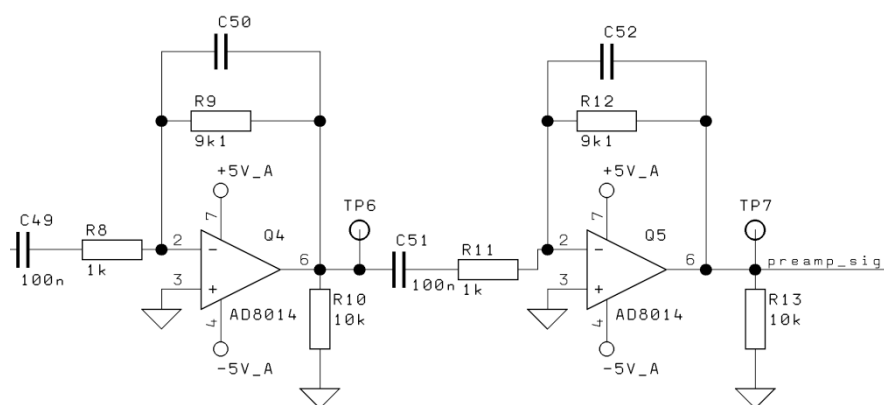
Obrázek 31 Transimpedanční zesilovač

Slouží k vyhodnocení přijatého optického výkonu fotodiodou a jeho převodu na elektrický signál a zesílení.

Jde o nejkritičtější obvod celého zapojení. Jelikož proud fotodiodou je velice malý (řadově μA), musíme dbát na pečlivý návrh napájecího napětí transimpedančního zesilovače, protože jakýkoliv šum z napájecí větve se nám nasuperponuje i do výstupního signálu. To samé se týká i pečlivého layoutu plošného spoje, kdy musíme zamezit dlouhým spojům mezi jednotlivými součástkami, což by vedlo k nežádoucím parazitním kapacitám a indukčnostem. To ve svém důsledku ovlivňuje šířku pásma a odstup signálu od šumu, které s takovým obvodem dosáhneme.

Základem obvodu je operační zesilovač OPA380 [17], který je přímo optimalizován pro použití jako transimpedanční zesilovač. Napájení operačního zesilovače se ještě místně vyfiltruje pomocí L6 a C46, C47 jež tvoří dolnoprostupní filtr potlačující šum na napájecím napětí. Rezistorem R6 je zvolen převodní poměr proud-napětí na 1000 – tzn., pokud fotodiodou poteče proud 10 μ A, výstupní napětí bude 10mV. Kondenzátor C48 omezuje šířku pásma. Popsání funkce transimpedančního zesilovače je v [19].

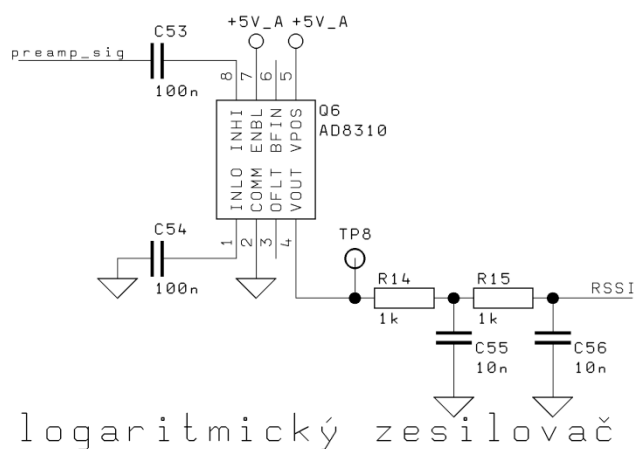
Napět'ový zesilovač



Obrázek 32 Napět'ový zesilovač

Jedná se o dvojici rychlých operačních zesilovačů AD8014 [18] zapojených v invertujícím zapojení. Každý stupeň má zesílení přibližně 10. Každý stupeň je zatížen odporem 10k Ω , protože se při testování vyskytly problémy, pokud nebyly výstupy zatíženy.

Logaritmický zesilovač



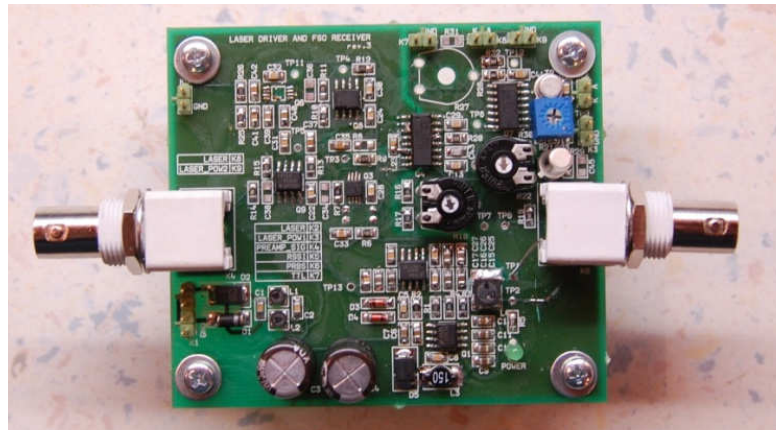
Obrázek 33 Logaritmický zesilovač

Pro odečítání střední hodnoty výstupního napětí přímo v dB, je zařazen ještě obvod AD8310 [20] sloužící jako logaritmický zesilovač. Napětí na vodiči RSSI přibližně odpovídá proudu fotodiódou dle vztahu (23):

$$P_{IN} = 10 \cdot \log(2083 \cdot U_{RSSI}) - 52 \quad (23)$$

7.4 Návrh plošného spoje

Elektronika je navržena na oboustranném plošném spoji o rozměrech 81x71mm. K návrhu byl použit český návrhový systém Formica 4.40. Layout DPS je uveden v příloze č III. Fotografie DPS elektroniky je na obrázku 34.



Obrázek 34 DPS elektroniky

Ukázka z měření pomocí diagramu oka při přenosové rychlosti $5\text{Mbit}\cdot\text{s}^{-1}$ je na obrázku 35. Žlutý průběh je napětí na výstupu zesilovače fotodetektoru. Oranžový průběh je proud laserovou diodou.



Obrázek 35 Diagram oka při $5\text{Mbit}\cdot\text{s}^{-1}$

Diagram oka se začal překrývat při 8MHz. Má elektronika by tedy byla použitelná do přenosových rychlostí okolo $8\text{Mbit}\cdot\text{s}^{-1}$. Šum výstupního signálu při nulovém výkonu dopadající na fotodiodu byl 5mV.

8 Návrh mechanické konstrukce

Hlavice musí splňovat několik požadavků:

- chránit vnitřní elektroniku před povětrnostními vlivy,
- být dostatečně robustní, aby se při poryvech větru nepohybovala,
- umožnit zaměření v horizontální a vertikální rovině.

Z důvodu obsáhlosti výkresové dokumentace, jsou kompletní výkresy přiloženy pouze v elektronické podobě CD v adresáři: /mechanicka_konstrukce/ V papírové příloze jsou pouze výkresy sestav.

8.1 Hlavice s laserem a detektorem

(Dále v textu je popisována pouze jako hlavice detektoru). V hlavici detektoru je umístěna veškerá elektronika laserového modulátoru, laser a detektor s elektronikou. Hlavice detektoru je členěna do tří celků:

- natáčecí kloub pro natáčení celé hlavice ve dvou osách,
- mechanikou pro upevnění elektricko-optické části s detektorem, laserem a přijímací čočkou,
- krytem chránící elektroniku před povětrnostními vlivy.

Natáčecí kloub

Tato část slouží k upevnění celé hlavice pojitka ke zdi a natáčení hlavice v rozsahu $\pm 80^\circ$ ve vertikální a horizontální rovině. Základ tvoří ocelová konzole z plechu síly 4mm, která se upevňuje do zdi pomocí čtyř kotev M10. Díl je zobrazen na obrázku 36 a výkrese č. 1-001.



Obrázek 36 Konzole připevnění hlavice detektoru

Na tuto konzolu je přišroubován otočný kloub pro natáčení hlavice, viz obrázek 37 a výkresy č. 1-002, 1-003.



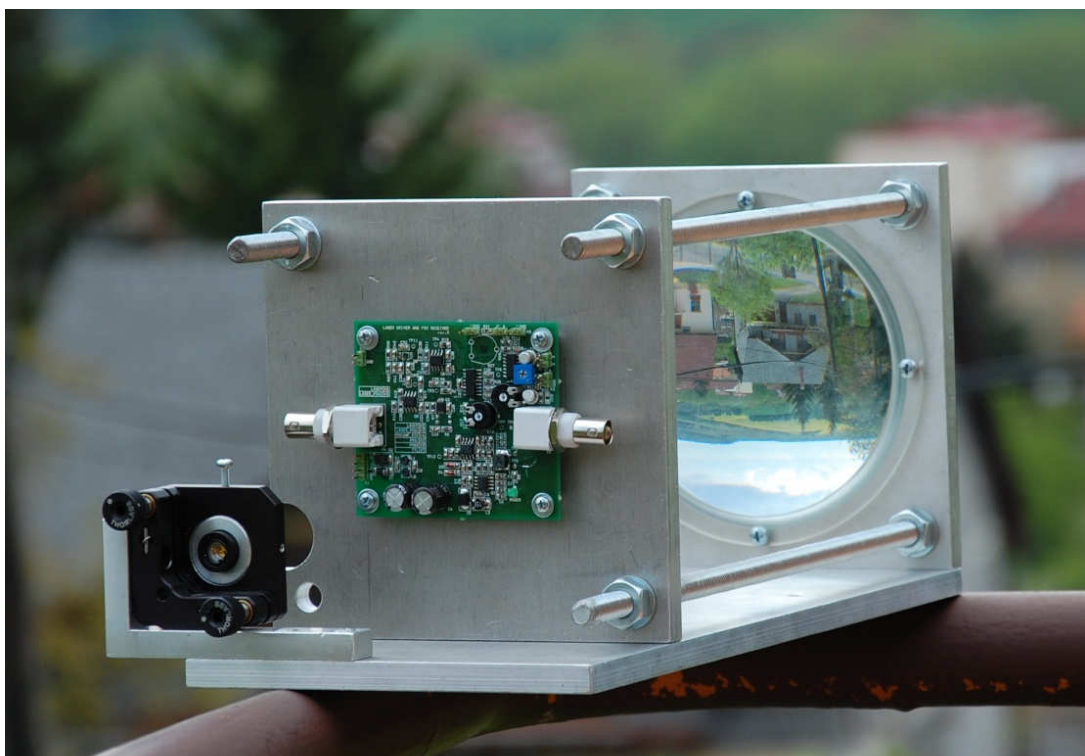
Obrázek 37 Natáčecí kloub detektoru

Mechanika pro upevnění elektro-optické části

V této sestavě je umístěna kompletní elektro-optická část. Základnu tvoří duralová deska – díl A-008, ke které je upevněn „kinematic mount“ Thorlabs KT100T [23] pro jemné dostavení osy laserového paprsku s osou přijímací čočky. V přední části základny je připevněná duralová

deska – díl A-010 sloužící pro upevnění přijímací čočky. Elektronika detektoru je umístěna na desce A-011, která je přišroubována pomocí čtveřice závitových tyčí k desce s čočkou.

Deska s fotodetektorem se dá pomocí závitových tyčí dostavit do ohniska čočky. Sestavu ilustruje obrázek 38 a výkres 1-003.



Obrázek 38 Mechanika elektro-optické části

Povětrnostní kryt

Pro ochranu před povětrnostními vlivy slouží kryt z hliníkového plechu – sestava je na výkrese č 1-004. V tomto krytu je umístěna mechanika elektro-optické části. K tomuto krytu je připevněna sluneční clona A-014.

Kompletní sestava hlavice je na obrázku 39 a výkrese č. 1-005.



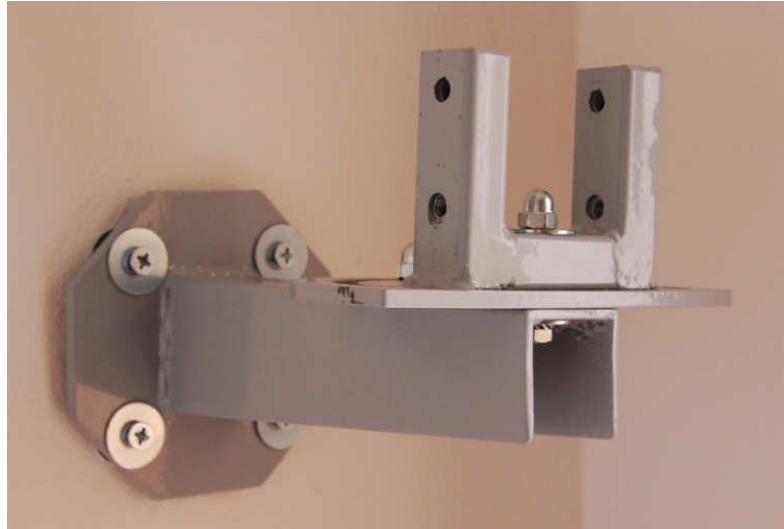
Obrázek 39 Hlavice laseru a detektoru

8.2 Hlavice zrcadla

Hlavice je konstruována podobně jako hlavice laseru a detektoru. Obsahuje kloub pro natáčení ve dvou osách, deska se zrcadlem a kryt chránící zrcadlo před povětrnostními vlivy.

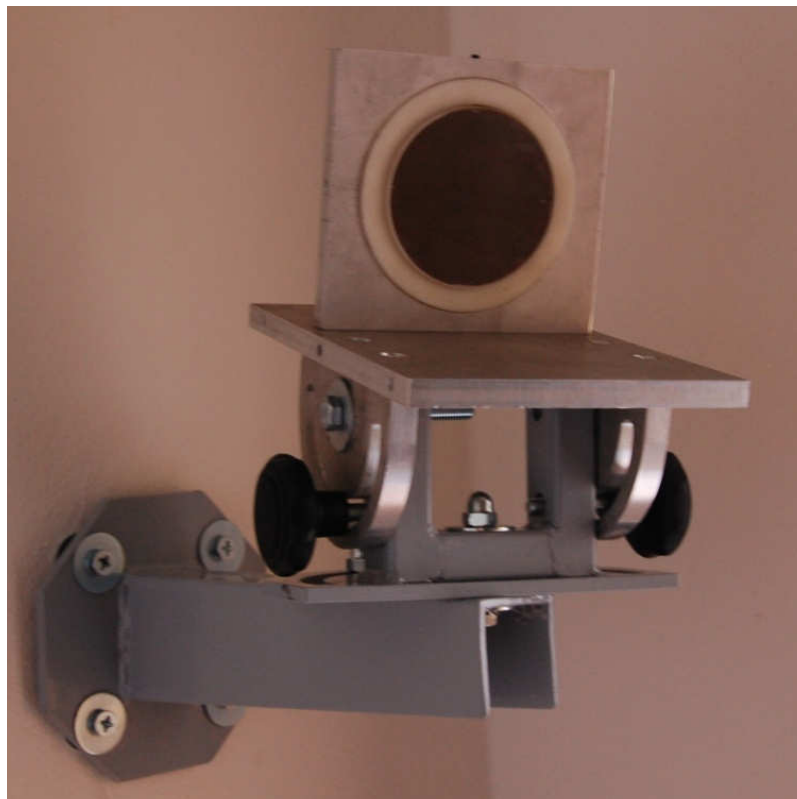
Natáčecí kloub

Tato část slouží k upevnění hlavice zrcadla ke zdi a natáčení v rozsahu $\pm 80^\circ$ ve vertikální a horizontální rovině. Základ tvoří ocelová konzole z plechu tloušťky 4mm, která se upevňuje do zdi pomocí čtyř kotev M8. Na tuto konzoli je přišroubován otočný kloub pro natáčení v horizontální rovině. Situaci ilustruje obrázek 40 a výkresy č. 1-006, 1-007.



Obrázek 40 Konzola zrcadla

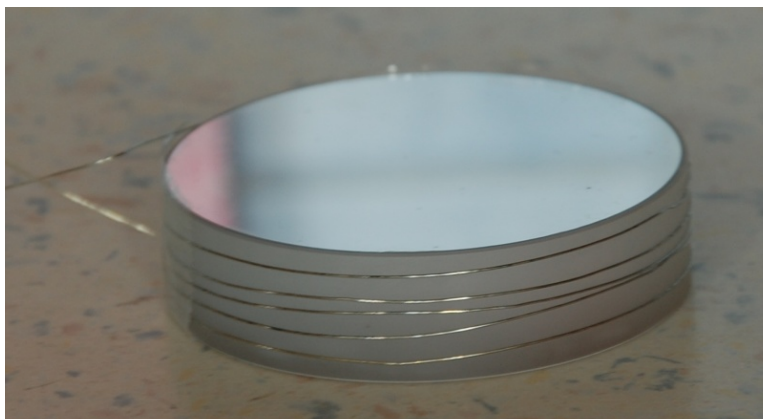
K tomuto dílu je přišroubován kloub pro natáčení ve vertikální rovině a deska zrcadla. Situaci ilustruje výkres 1-009 a obrázek 41.



Obrázek 41 Hlavice zrcadla

Zrcadlo

Na zrcadle je po obvodu namotán topný drát, který je přilepen k zrcadlu. Viz obrázek 42. Zrcadlo je umístěno v polyethylenové objímce – díl B-008 jež je vložena do hliníkové desky B-007. Situaci ilustruje obrázek 43.



Obrázek 42 Vyhřívání zrcadla



Obrázek 43 Namontované zrcadlo v objímce

Hliníková deska B-007 je přišroubována do základny B-005.

Povětrnostní kryt

Povětrnostní kryt – díl č. B-011 je přišroubován k základně se zrcadlem. Celou sestavu ilustruje výkres 1-009 a obrázek 44.



Obrázek 44 Sestava hlavice zrcadla

9 Simulace atmosférických podmínek v laboratoři

Pro ověření zda mají opravdu vliv na útlum laserového svazku atmosférické jevy popsané v kapitole 2, bylo uskutečněno několik laboratorních pokusů. Celková dráha svazku při tomto experimentu byla 76m. Měření se uskutečnilo na chodbě druhého patra budovy Krásnopolská.

Jelikož katedra nedisponuje měřicími přístroji, které by přesně ověřily vliv jednotlivých atmosférických jevů na šíření laserového svazku, nelze z výsledků mé práce přesně určit míru vlivu jednotlivých jevů na útlum laserového svazku.

Měření probíhalo v době, kdy nebyl k dispozici transimpedanční zesilovač OPA380 do mnou navrhnuté elektroniky, takže jako fotodetektor byl použit sériově vyráběný fotodetektor Thorlabs PDA36A [22]. Měření se mělo provádět na vlnové délce 850nm, ale z důvodu bezpečnosti, po dohodě s vedoucím diplomové práce, bylo použito viditelného světla laserové diody RLT6715MG o vlnové délce 650nm [21]. Naměřené výsledky jsou téměř shodné jako při použití infračerveného laseru.

Použité měřicí přístroje:

generátor pseudonáhodné sekvence:	Stanford research system CG635
osciloskop:	Rohde & Schwarz RTM1054
zdroj:	Diametral P230R51D
jednoplýnkový elektrický vaříč:	Sencor 1,5kW
výrobník mlhy:	Antari Alpha F-80z fog machine
fotodetektor:	Thorlabs PDA36A
laserová dioda:	RLT6715MG

9.1 Instalace a zaměření optického pojítka

Na jednu stranu chodby byla nainstalována hlavice s laserem a fotodetektorem a na druhou stranu byla umístěna hlavice reflektoru.

Obě hlavice jsem k sobě přibližně namířil. Na hlavici se zrcadlem jsem umístil červený laser, který měl průměr stopy dopadající na čočku fotodetektoru přibližně 20cm. Pomocí této stopy jsem zaměřil hlavici fotodetektoru rovnoběžným směrem se zaměřovacím laserem tak, aby

laserový paprsek dopadal na střed duralové plotny s umístěným fotodetektozem. Pomocí ustavovacích šroubů jsem duralovou plotnu zaostřil do ohniska přijímací čočky. Odstranil jsem zaměřovací laser a vysílací laser jsem mikrošrouby zaměřil na plochu zrcadla. Poté jsem zrcadlem namířil zpět na přijímací čočku fotodetektoru. Postup jsem musel několikrát opakovat, protože i drobné nepřesnosti v zaměření dokázaly laserový svazek vychýlit mimo přijímací čočku.

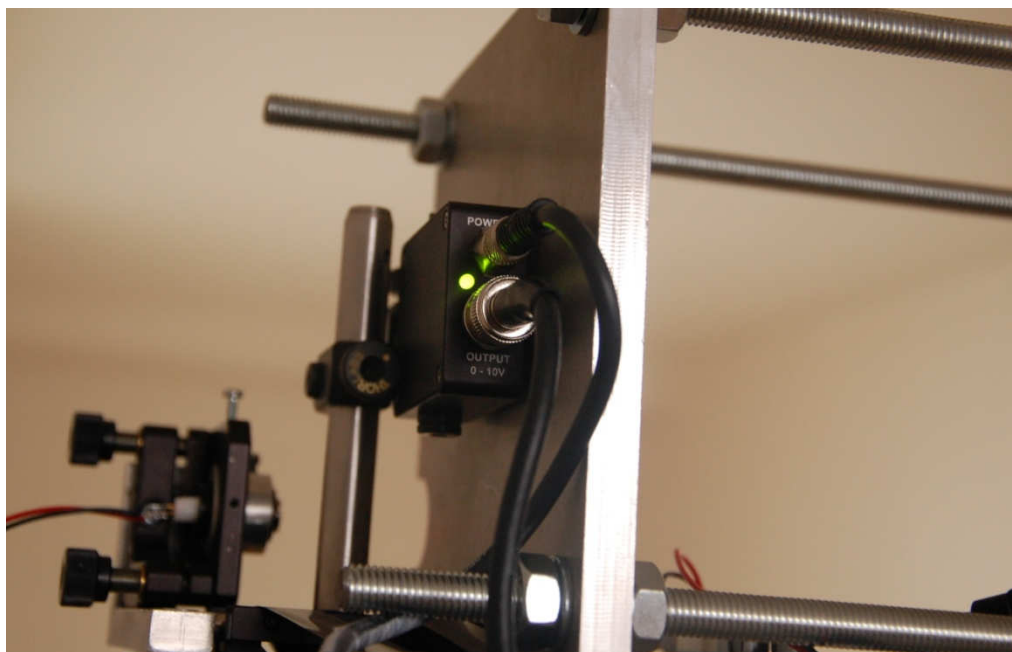
9.2 Měření diagramu oka v čisté atmosféře

Šlo o testovací měření, kterým jsem ověřil otevření diagramu oka při různých přenosových rychlostech a celkový útlum optického spoje. Schéma měřicího stanoviště je na obrázku 45.

Připevnění fotodetektoru Thorlabs PDA36A je na obrázku 46.



Obrázek 45 Měřicí pracoviště



Obrázek 46 Upevnění fotodetektoru Thorlabs PDA36A

Naměřené hodnoty:

výkon laseru	$P_{\text{out}} = 1,9\text{mW}$
dopadající výkon na fotodetektor	$P_{\text{in}} = 0,57\text{mW}$
útlum spoje	$A_u = 5,22\text{dB}$
délka spoje	$L_{12} = 76\text{m}$



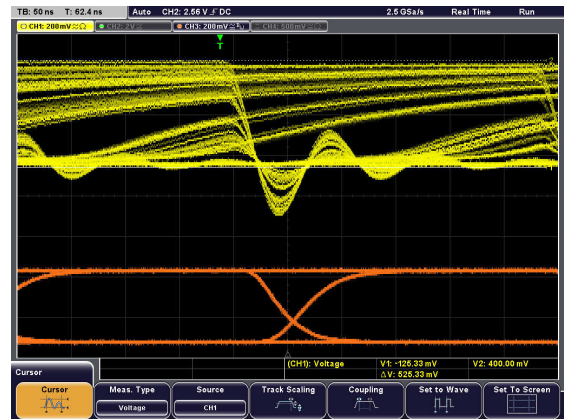
Obrázek 47 Diagram oka při rychlosti $0,5\text{Mbit}\cdot\text{s}^{-1}$



Obrázek 48 Diagram oka při rychlosti $1\text{Mbit}\cdot\text{s}^{-1}$



Obrázek 49 Diagram oka při rychlosti $3\text{Mbit}\cdot\text{s}^{-1}$



Obrázek 50 Diagram oka při rychlosti $4\text{Mbit}\cdot\text{s}^{-1}$

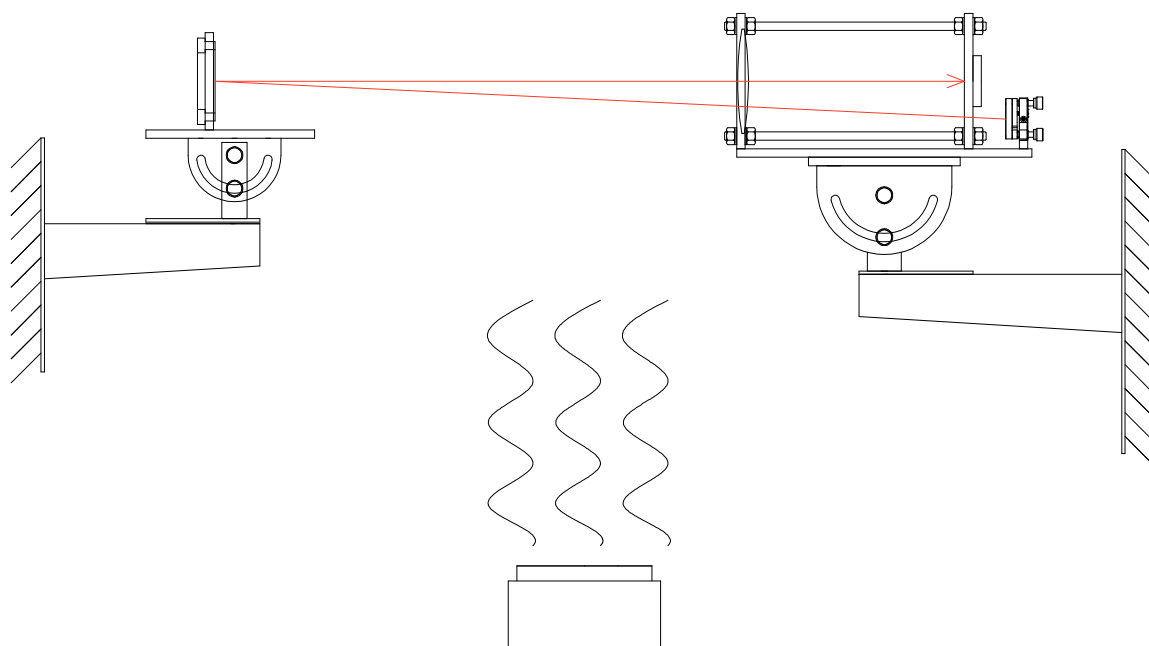
Žlutý diagram oka značí napětí na fotodetektoru. Oranžový diagram oka je průběh proudu laserovou diodou.

Vertikální rozlišení je $200\text{mV}/\text{dílek}$.

Z důvodu podkmitů v detektoru při sestupu z log 1 do log 0, které zmenšilo otevření oka a narůstající jitter bylo zvoleno měření na přenosové rychlosti $1\text{Mbit}\cdot\text{s}^{-1}$.

9.3 Testování vlivu vzduchových turbulencí

K tomuto testu sloužil elektrický jednoplotýnkový vaříč o výkonu $1,5\text{kW}$ umístěný ve vzdálenostech 100cm, 60cm, 30cm a 10cm pod optickým svazkem, jak ukazuje obrázek 51.



Obrázek 51 Schéma měření vlivu větrných turbulencí

Naměřené hodnoty:

výkon laseru	$P_{out} = 1,9\text{mW}$
dopadající výkon na fotodetektor	$P_{in} = 0,57\text{mW}$
útlum spoje	$A_u = 5,22\text{dB}$
délka spoje	$L_{12} = 76\text{m}$



Obrázek 52 Diagram oka při rychlosti $1\text{Mbit}\cdot\text{s}^{-1}$ bez vzduchových turbulencí



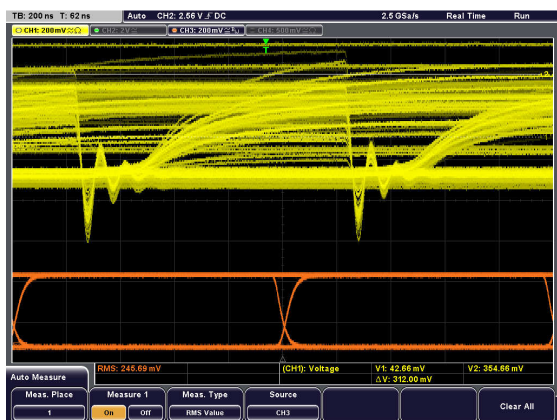
Obrázek 53 Plotýnkový vaříč umístěný 100cm pod laserovým svazkem



Obrázek 54 Plotýnkový vaříč umístěný 60cm pod laserovým svazkem



Obrázek 55 Plotýnkový vaříč umístěný 30cm pod laserovým svazkem



Obrázek 56 Plotýnkový vaříč umístěný 10cm pod laserovým svazkem

Žlutý diagram oka značí napětí na fotodetektoru. Oranžový diagram oka je průběh proudu laserovou diodou.

Vertikální rozlišení je 200mV/dílek.

Vzdálenost od vaříče	Kolísání výkonu
bez vaříče	0,6dB
100cm	1,3dB
60cm	3dB
30cm	4dB
10cm	9dB

Tabulka 7 Naměřené kolísání výkonu vlivem větrných turbulencí

Jak je patrné z tabulky 7, 100 cm pod vaříčem začalo docházet ke slabému kolísání přijatého optického výkonu. Když jsem vaříč přibližoval k optickému svazku, kolísání začalo být silnější.

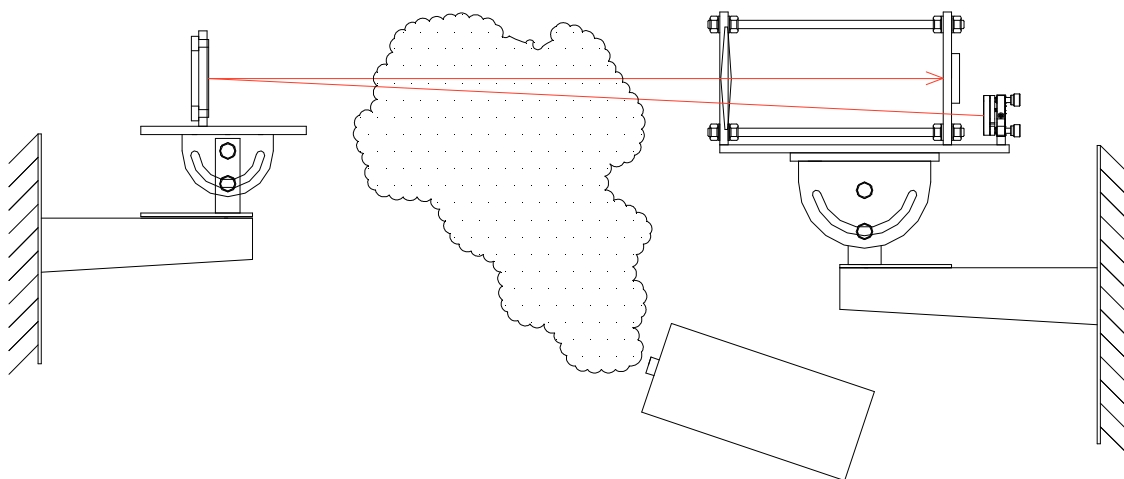
Největší vliv mělo umístění vaříče 10cm pod laserový svazek. V tomto případě docházelo k silnému kolísání optického výkonu a k rozmazání celého diagramu oka Komparátor převádějící analogový signál na TTL logiku měl úroveň klopení ve střední hodnotě signálu s časovou konstantou 100ms. V tomto případě by tedy docházelo k nesprávnému vyhodnocení logických úrovní a silné chybovosti spoje. Protože jsem neměl k dispozici žádný tester bitové chybovosti, mohu o tomto problému pouze spekulovat. Jev se silně se projevuje pouze na krátké vzdálenosti od tepelných zdrojů.

V praxi jsou hlavice standardně instalovány na střeách budov vzdálených ve stovkách metrů. V letních měsících dochází k ohřevu vzduchu nad střechami budov a tím vzniku mikroturbulencí. Platí, že čím blíže jsou tyto turbulence optickému zdroji a čím delší je dráha svazku, tím více mají vliv na kolísání optického výkonu.

Jev může nastat i při silném větru, u kterého vznikají větrné turbulence v blízkosti překážek.

9.4 Testování vlivu mlhy

Mlha byla vyráběna pomocí glycerinového výrobku mlhy. Tento jev byl obtížně měřitelný, protože se mlha nerozptýlila rovnoměrně v celém měřicím prostoru. Měření bylo provedeno pomocí fotodetektoru Thorlabs PDA36A nastaveného na zesílení 10dB. Pro měření byla zvolena přenosová rychlost $5\text{Mbit}\cdot\text{s}^{-1}$. Na obrázku 58 je ukázka rozptylu svazku v mlze.



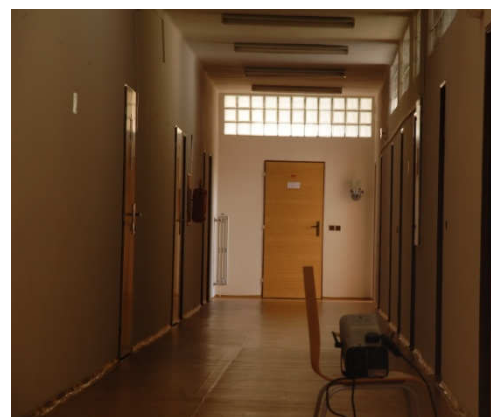
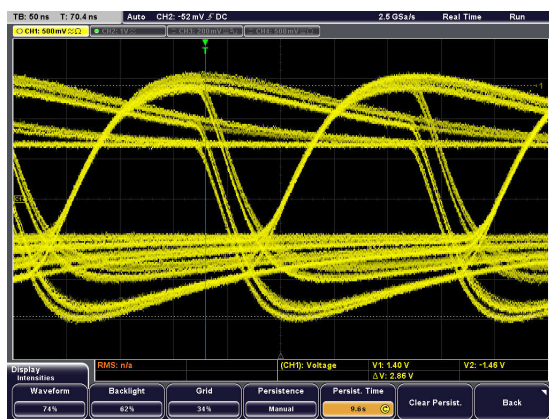
Obrázek 57 Schéma měření vlivu mlhy



Obrázek 58 Ukázka rozptylu laserového svazku v mlze

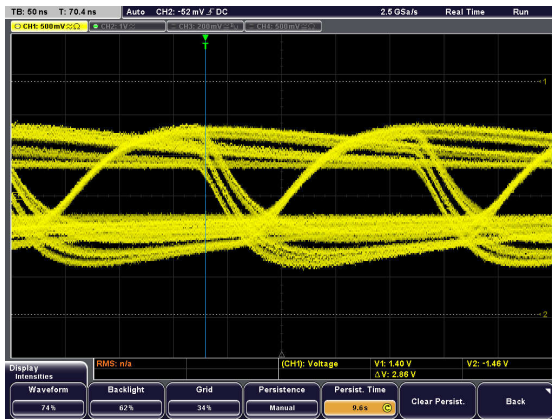
Naměřené hodnoty pro čistou atmosféru:

výkon laseru	$P_{\text{out}} = 3\text{mW}$
dopadající výkon na fotodetektor	$P_{\text{in}} = 1,3\text{mW}$
útlum spoje	$A_u = 3,63\text{dB}$
délka spoje	$L_{12} = 76\text{ m}$



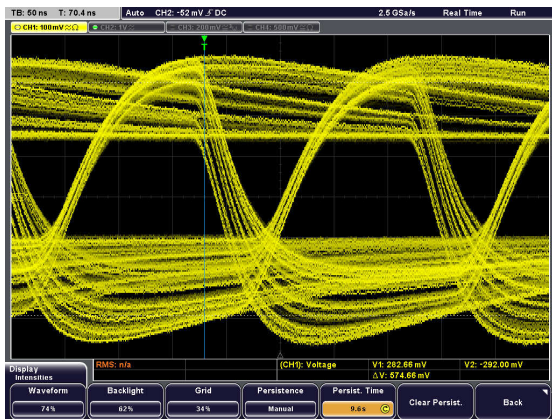
Obrázek 59 Referenční měření pro čistou atmosféru

Obrázek 59 ukazuje referenční měření čistou atmosférou. Vertikální rozlišení je 500mV/dílek. Celkový útlum optického spoje $\alpha_{\text{cel}}=3,63\text{dB}$ je dán především špatným zaměřením spoje. Odhad meteorologické viditelnosti je větší než 5km.



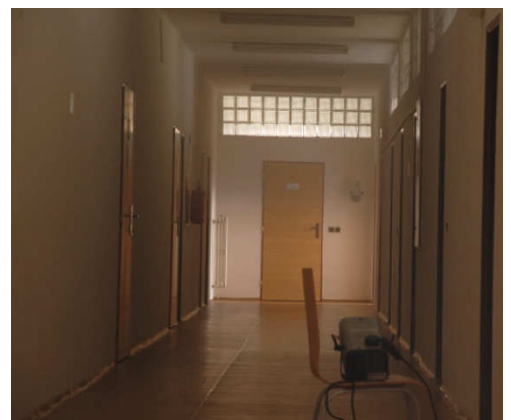
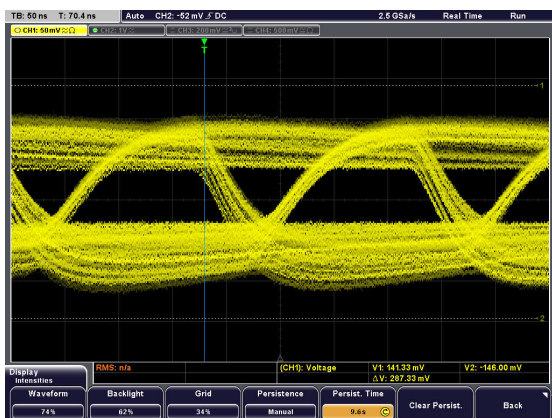
Obrázek 60 Měření pro meteorologickou viditelnost 5km

Obrázek 60 ilustruje útlum atmosféry $\alpha_{\text{atm}}=6,7\text{dB}$. Vertikální rozlišení je 500mV/dílek. Odhad meteorologické viditelnosti je 5km.



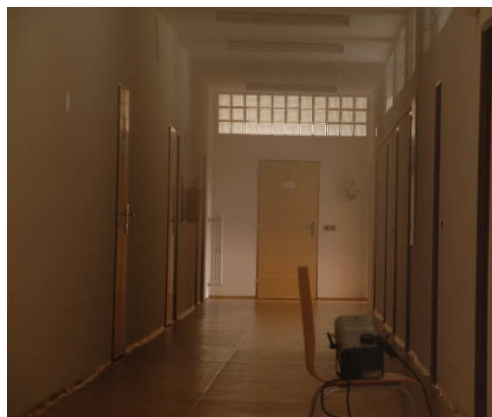
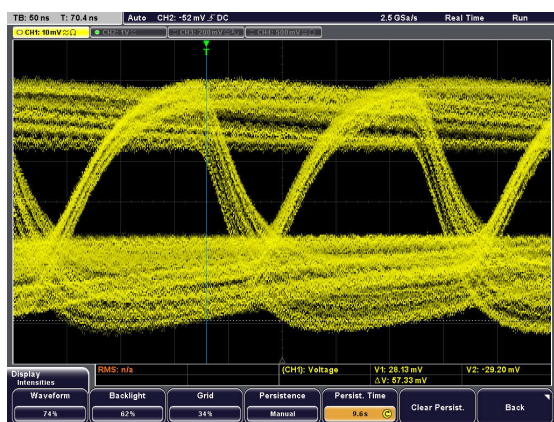
Obrázek 61 Měření pro meteorologickou viditelnost 2km

Obrázek 61 ilustruje útlum atmosféry $\alpha_{\text{atm}}=14\text{dB}$. Vertikální rozlišení je 100mV/dílek. Odhad meteorologické viditelnosti je 2km.



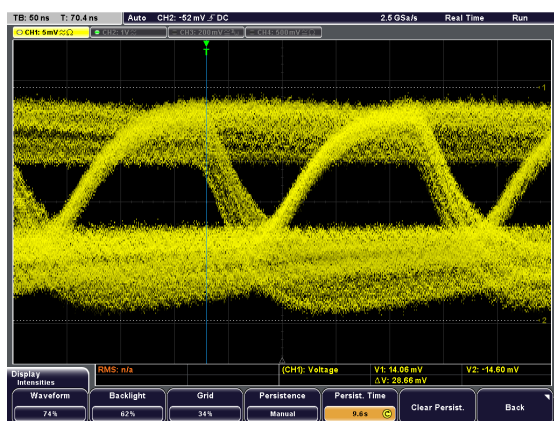
Obrázek 62 Měření pro meteorologickou viditelnost 1km

Obrázek 62 ilustruje útlum atmosféry $\alpha_{\text{atm}}=25\text{dB}$. Vertikální rozlišení je $50\text{mV}/\text{dílek}$. Odhad meteorologické viditelnosti je 1km .



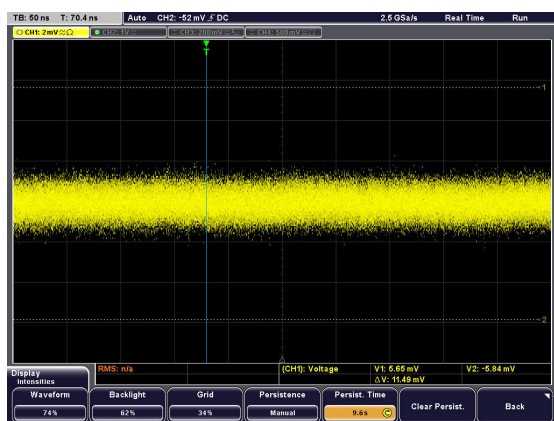
Obrázek 63 Měření pro meteorologickou viditelnost 500m

Obrázek 63 ilustruje útlum atmosféry $\alpha_{\text{atm}}=35\text{dB}$. Vertikální rozlišení je $10\text{mV}/\text{dílek}$. Odhad meteorologické viditelnosti: je 500m .



Obrázek 64 Měření pro meteorologickou viditelnost 200m

Obrázek 64 ilustruje útlum atmosféry $\alpha_{\text{atm}}=41\text{dB}$. Vertikální rozlišení je $5\text{mV}/\text{dílek}$. Odhad meteorologické viditelnosti je 200m .



Obrázek 65 Měření pro meteorologickou viditelnost menší než 100m

Obrázek 65 ilustruje útlum atmosféry $\alpha_{\text{atm}} > 60\text{dB}$. Vertikální rozlišení je 2mV/dílek. Odhad meteorologické viditelnosti je menší než 100m.

Při tomto testování docházelo ke kolísání optického výkonu. Ne však v takové míře jako při větrných turbulencích, pravděpodobně by bitová chybovost spoje byla malá. Pouze při silném zamlžení, kdy už je malý odstup signálu od šumu by docházelo ke zvýšení chybovosti až k výpadku spojení.

Podařilo se nasimulovat útlum atmosféry v rozsahu cca 84dB/km - 750dB/km. Jak je vidět z obrázků, i slabé zamlžení způsobí silné výkonové ztráty a silnější mlha dokonce způsobí výpadek spojení i na vzdálenosti 76m.

9.5 Snížení odrazivosti zrcadla

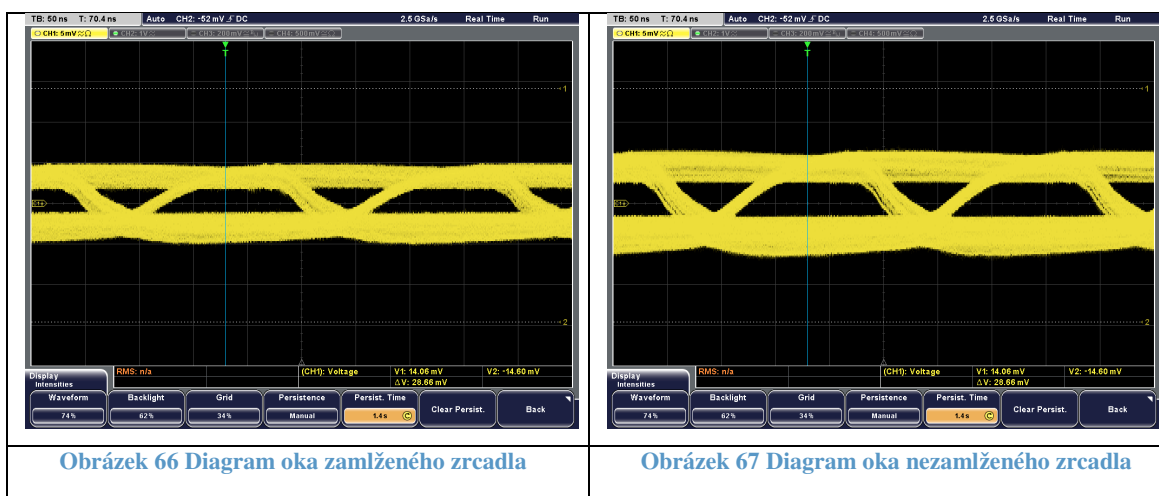
Pokud se nebude odrazné zrcadlo vyhřívat, může při prudkých změnách teploty nebo vlhkosti začít na zrcadle kondenzovat vzdušná vlhkost. Jev nastává například v letních měsících, kdy je v noci studený vzduch a po rozbřesku se prudce oteplí. Zrcadlo se nestihne ohřát a začne na něm kondenzovat vzdušná vlhkost.

Aby se zrcadlo zamlžilo, muselo být nejprve ochlazeno v lednici. Než se podařilo celou soustavu opět zaměřit, zrcadlo se aklimatizovalo na teplotu okolí a nebylo zamlženo. Proto toto měření bylo realizováno pouze na vzdálenost 2m na stole v laboratoři, kdy není tak obtížné

svazek zaměřit. Obrázek 66 představuje zamlžené zrcadlo. Obrázek 67 představuje zrcadlo, které se aklimatizovalo na teplotu v laboratoři.

Naměřené hodnoty:

výkon laseru	$P_{\text{out}} = 0,2\text{mW}$
dopadající výkon na fotodetektor	$P_{\text{in}} = 0,11\text{mW}$
útlum spoje	$A_u = 2,6\text{dB}$
délka spoje	$L_{12} = 4\text{m}$



Zamlžení nemělo vliv na jitter signálu, ani na kolísání výkonu. Projevilo se pouze útlumem, který byl 2,6dB

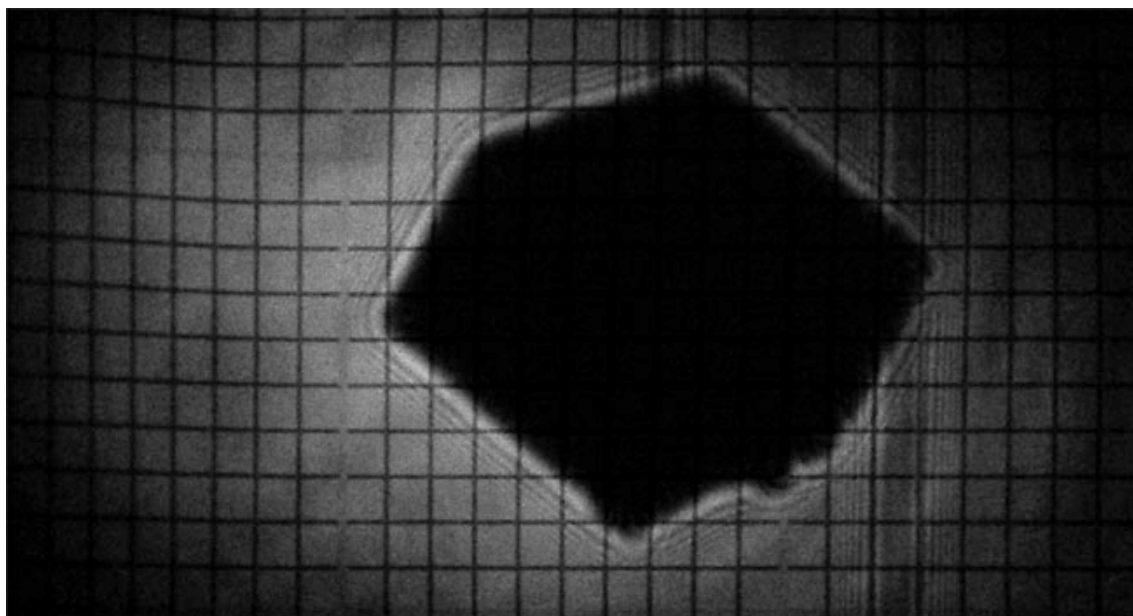
9.6 Vliv překážek

Jelikož se optické spoje instalují na přímou viditelnost, kdy nejsou v dráze svazku žádné trvalé překážky, jediné překážky, které mohou vniknout do dráhy optického svazku, jsou pouze letící ptáci a poletující listí. V minimální míře například poletující polyethylenové sáčky.

Měření přineslo tyto výsledky: čím je překážka větší a čím je blíže optickému vysílači, tím přímo úměrně klesá optický výkon dopadající na aperturu přijímače. Obvykle dojde k úplnému přerušení optického svazku.

Za ukázkou stojí fotografie stínu překážky umístěné v dráze laserového svazku, zobrazená na obrázku 68. Můžeme na ní pozorovat difrakční proužky vznikající na hranách překážky. Jedná

se o několik proužků, které kopírují v přesných odstupech překážku. Tento jev je patrný právě díky monochromatickému světlu generujícího laserem.



Obrázek 68 Ukázka difrakce na překážce

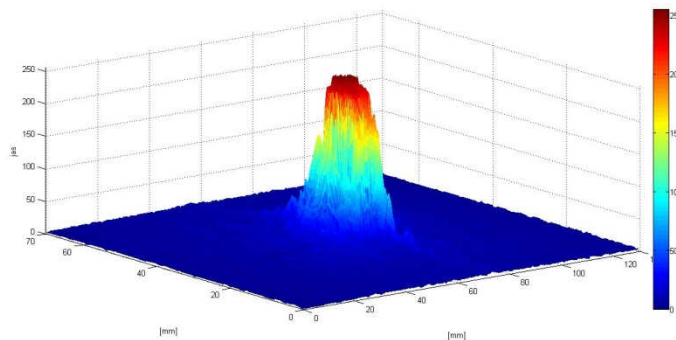
9.7 Pokusné měření rozložení optického výkonu

K tomuto měření mne dovedl zájem o fotografii a pokus, zda by se dalo pomocí digitálního fotoaparátu měřit rozložení optického výkonu v prostoru.

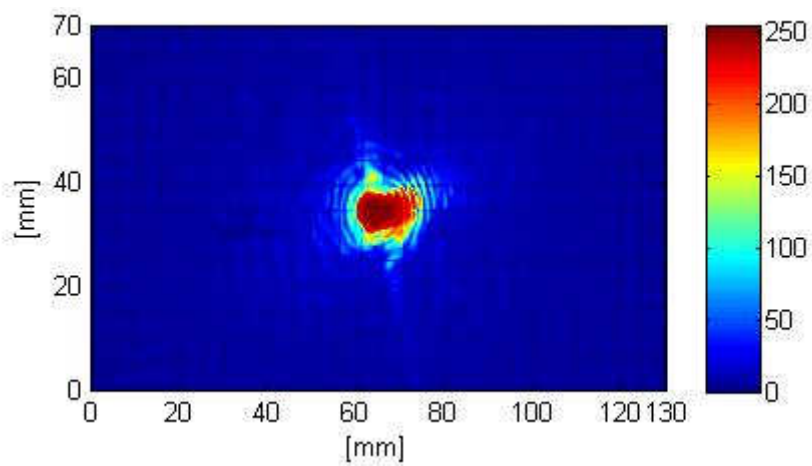
Bylo měřeno rozložení optického výkonu laserového svazku v závislosti na vzdálenosti od zdroje běžně dostupným fotoaparátem (zrcadlovka Nikon D40). Svazek byl fotografován na tabuli s rastrem, do formátu surových dat RAW. Poté byly jednotlivé snímky pomocí programu Photoshop upraveny na shodnou expozici, upravena perspektiva, aby byly všechny snímky stejné, odstraněn modrý a zelený kanál a převedení červeného kanálu na jasovou bitmapu. Konečné zpracování bylo provedeno v programu Matlab. Obrázek 69 ukazuje 3D graf rozložení optického výkonu laserového svazku s rozbíhavostí 1mrad po 10ti metrech. Obrázek 70 ukazuje plošné rozložení výkonu. Další grafy jsou k dispozici na příloženém CD v adresáři /fotografie_rozlozeni_opticke_intenzity/.

Jedná se pouze o ukázkové měření, které nebylo v zadání práce, a proto jej dále nerozvádím.

V průběhu zpracování měření jsem narazil na práci RNDr. Jana Hollana [24] který se již touto metodou zabýval.



Obrázek 69 3D graf rozložení optického výkonu po 10m šíření prostorem



Obrázek 70 Plošný graf rozložení optického výkonu po 10m šíření prostorem

10 Závěr

Tato práce se primárně zabývá konstrukcí měřicího optického pojítka po mechanické a elektrické stránce a poté měření na tomto pojítku.

Kapitola 1 a 2 uvádí čtenáře do problematiky optických bezdrátových spojů.

Kapitola 3 je podrobně rozebírá model atmosféry pro optické spoje. Je rozdělena na dvě části. První část popisuje stacionární model atmosféry, tedy útlum šíření vlnným prostorem a vliv jednotlivých atmosférických jevů na útlum spoje. Druhá část popisuje statický model spoje, který popisuje útlum šíření optického svazku v závislosti na čase a vliv útlumu na kvalitu optického spoje.

Kapitola 4 pojednává o měřících metodách vyhodnocujících kvalitativní parametry optických spojů. Jedná se o metodu měření bitové chybovosti a měření pomocí diagramu oka.

Kapitola 5 uvádí do zdrojů a detektorů optického záření.

Kapitola 6 probírá koncept optického pojítka, které bude umístěno mezi kolejní budovou E a budovou na Krásnopolské. Uvádí vypočítanou energetickou bilanci tohoto spoje.

Kapitola 7 popisuje návrh elektroniky pro měřicí pojítka. Návrh je zásadní pro správnou funkci optického spoje, protože proud fotodiodou je pouze v řádu desítek μA . Musí se proto pečlivě navrhout celý napájecí řetězec, aby se udělal co nejvyšší odstup signálu od šumu. Mnou navržená elektronika je použitelná pouze do několika MHz. Cílem práce bylo navrhout měřicí pojítka, kde takové rychlosti plně dostačují. Pro řádově vyšší rychlosti by se musel použít naprosto jiný návrh. Spousta předních výrobců integrovaných obvodů (Maxim IC, Analog Devices) produkují integrované obvody pro optické přenosy. Tyto obvody jsou primárně určeny pro optické komunikace v optických vláknech, ale je možné nasadit je i do atmosférických přenosů.

Kapitola 8 se zabývá mechanickou konstrukcí optických hlavic. Vytvořil jsem jednu hlavici s kompletní elektronikou laserového vysílače a detektoru. Druhá hlavice obsahuje pouze odrazné zrcadlo. Pečlivý návrh konstrukce je kritický pro správnou funkci optického spoje. Protože se jedná o komunikace pracující na velké vzdálenosti, jakékoliv nepřesnosti při výrobě mohou způsobit nemožnost zaměření hlavic proti sobě. Jako obtížné se ukázalo i zaměření hlavic na vzdálenost 76 metrů. V příštích verzích by bylo potřebné, aby šly hlavice polohovat přesně pomocí mikrošroubů.

Kapitola 9 se zabývá simulací a měřením atmosféry v laboratorních podmínkách, protože po dohodě s vedoucím diplomové práce bylo upuštěno od měření na střeších budov Krásnopolská a koleje E. Podařilo se nasimulovat větrné turbulence, mlhu a zamlžení zrcadla. Jako ukázkové

měření byl studován vliv překážek a měřeno rozložení optického svazku. Z důvodu absence měřících přístrojů, které by přesně změřily simulované jevy, se jedná pouze o informační měření. I tak jsem zjistil, že mlha je pro optické komunikace naprosto kritický parametr. Jako překvapující byla simulace větrných turbulencí, kdy se podařilo úplně rozkmitat stopu laserového svazku.

Problematika konstrukce optického pojítka je velmi rozsáhlá a není v silách jednoho člověka v rámci jedné diplomové práce navrhnout přesnou a stabilní mechaniku optických hlavic a citlivou elektroniku pracujících za vysokých přenosových rychlostí. Jako nejlepší by bylo řešení, kdyby mechaniku hlavic navrhl člověk se strojírenským vzděláním, který by se věnoval veškerým konstrukčním problémům. Druhý člověk by soustředil pouze na návrh elektroniky.

Práce byla velmi zajímavá. Byl bych rád, kdyby na mou práci v budoucnu někdo navázal a podařilo se mu pojítka umístit do reálných atmosférických podmínek, kde by mohlo být plně funkční.

11 Literatura

- [1] *RONJA : Reasonable Optical Near Joint Access* [online]. 1998 [cit. 2011-04-27]. Dostupné z WWW: <<http://ronja.twibright.com/>>.
- [2] *Optical QSO across Yucca Valley* [online]. 2008 [cit. 2011-04-27]. Dostupné z WWW: <http://www.modulatedlight.org/eos/Yucca_valley_optical1.html />.
- [3] *A world first: Data transmission between European satellites using laser light* [online]. 2001 [cit. 2011-04-27]. Dostupné z WWW: <http://www.esa.int/esaCP/ESASGBZ84UC_index_0.html>.
- [4] KVÍČALA, R. *CHYBOVOST A DOSTUPNOST ATMOSFÉRICKÝCH OPTICKÝCH SPOJŮ*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2009. 103 s. Vedoucí dizertační práce prof. Ing. Otakar Wilfert, CSc.
- [5] *WMO GUIDE TO METEOROLOGICAL INSTRUMENTS AND METHODS OF OBSERVATION*. Seventh edition. Geneva : World Meteorological Organization (WMO), 2008. Measurement of visibility, s. 1.9-3. ISBN 978-92-63-10008.
- [6] HLAVÁČ, D., WILFERT, O. *AVAILABILITY OF FREE-SPACE LINK*. In: Sborník příspěvků konference Elektrotechnika a informatika 2002. ZCU Plzeň, 2002, s. 83 – 168.
- [7] SHEIKH MUHAMMAD,S.-KÖHLDORFER,P.-LEITGEB,E.: *CHANNEL MODELING FOR TERRESTRIAL FREE SPACE OPTICAL LINKS*. In: Proc. of 2005 7th Transparent Optical Networks, 2005, pp. 407- 410 Vol. 1. ISBN: 0-7803-9236-1.
- [8] ANDREWS, L., PHILLIPS, R., HOPEN, C. *LASER BEAM SCINTILLATION WITH APPLICATIONS*. Washington: Spie Press, 2001.
- [9] Doc. Ing. Jan Žídek, CSC. *Skripta do předmětu Měření v telekomunikační technice*. Ostrava: VŠB-TU Ostrava, 2008. Přístroje na měření chybovosti

- [10] ITU-T O.151. *Error performance measuring equipment operating at primary rate and above*. Geneva : ITU-T, 1992. 5 s.
- [11] TEJKAL, Vladimír, et al. *DVOUSTAVOVÉ MODULAČNÍ FORMÁTY V OPTICKÝCH PŘÍSTUPOVÝCH SÍTÍCH. OPTICS AND OPTOELECTRONIC*. 12/2010, 8, 4, s. 96-101. ISSN 1804-311.
- [12] Bit error rate. In *Wikipedia : the free encyclopedia* [online]. St. Petersburg (Florida) : Wikipedia Foundation, 15:51, 25 February 2002, last modified on 07:42, 27 March 2011 [cit. 2011-04-27]. Dostupné z WWW: <http://en.wikipedia.org/wiki/Bit_error_rate>.
- [13] *Www.papouch.com* [online]. Praha : Papouch s.r.o., 2006 [cit. 2011-04-23]. *AD4RS MEŘICÍ PŘEVODNÍK S RS232 A RS485*. Dostupné z WWW: <<http://www.papouch.com/cz/shop/product/ad4rs-merici-prevodnik-s-rs232-a-rs485/>>.
- [14] datasheet k obvodu *LM22674*. National Semiconductor, 2010. 14 s. Dostupné z WWW: <<http://www.national.com/ds/LM/LM22674.pdf>>.
- [15] datasheet k obvodu *ICL7660*. Intersil Corporation, 1999. 11s. Dostupné z WWW: <<http://www.intersil.com/data/fn/fn3072.pdf>>.
- [16] datasheet k obvodu *AD8564*. Analog Devices, 2007. 12s. Dostupné z WWW: <http://www.analog.com/static/imported-files/data_sheets/AD8564.pdf>.
- [17] datasheet k obvodu *OPA380*. Texas Instruments, 2007. 22s. Dostupné z WWW: <<http://focus.ti.com/lit/ds/symlink/opa380.pdf>>.
- [18] datasheet k obvodu *AD8014*. Analog Devices, 2007. 11s. Dostupné z WWW: <http://www.analog.com/static/imported-files/data_sheets/AD8014.pdf>.
- [19] WESTERMAN, David. *EE times* [online]. 8/8/2007 [cit. 2011-05-01]. Understand and apply the transimpedance amplifier. Dostupné z WWW: <<http://www.eetimes.com/design/analog-design/4009969/Understand-and-apply-the-transimpedance-amplifier-Part-1-of-2->>.

- [20] datasheet k obvodu *AD8310*. Analog Devices, 2001. 24s. Dostupné z WWW: <http://www.analog.com/static/imported-files/data_sheets/AD8310.pdf>.
- [21] datasheet laserové diody *RLT6715MG*. Roithner LaserTechnik, 2010. 1s. Dostupné z WWW: <http://www.roithner-laser.com/datasheets/ld_div/rlt6715mg.pdf>.
- [22] Produktový katalog firmy THORLABS 2011, s 1288-1289, fotodetektor *PDA36A*. Dostupné z WWW: <<http://www.thorlabs.com/catalogpages/v20/1289.pdf>>.
- [23] Produktový katalog firmy THORLABS 2011, s 220, kinematic mount *KM100T*. Dostupné z WWW: <<http://www.thorlabs.de/catalogpages/v20/220.pdf>>.
- [24] Hollan, Jan. *RGB radiometrie digitálními fotoaparáty*. In *Workshop NDT 2006*. Brno : Brno University of Technology, 2006. od s. 31-37, 7 s. ISBN 80-7204-487-7.
- [25] Produktový katalog firmy THORLABS 2011, s 680, PF30-03-P01 - Ø3" Protected Silver Mirror. Dostupné z WWW: <<http://www.thorlabs.de/catalogpages/v20/680.pdf>>.
- [26] MARŠÁLEK, Leoš. *Optická vlákna* [online]. verze 2.1.3. [s.l.] : [s.n.], 2006, 2006 [cit. 2011-04-23]. Dostupné z WWW: <<http://goro.czweb.org/download/interest/vlakna.pdf>>

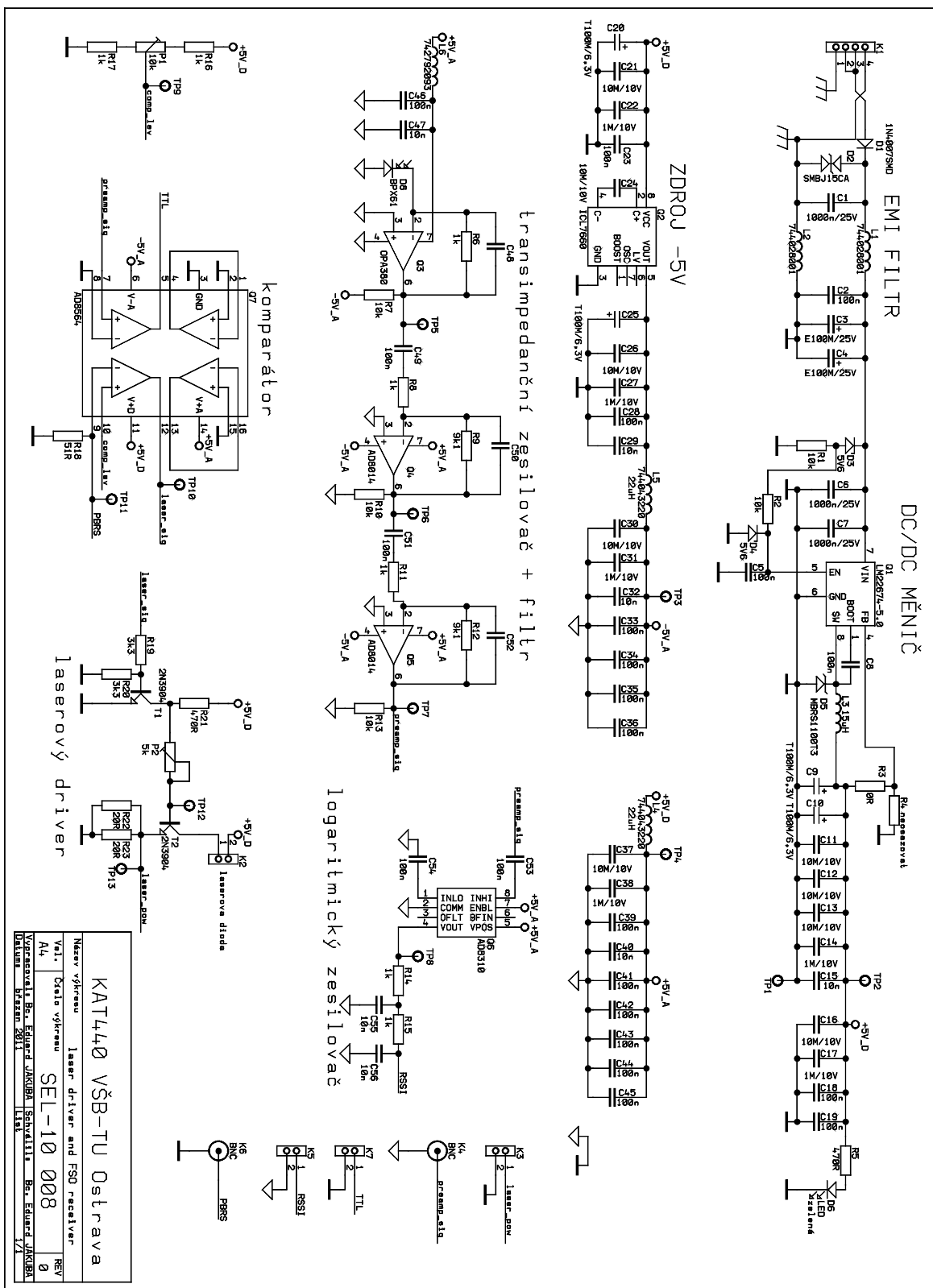
12 Přílohy

- I. Adresářová struktura přiloženého CD
- II. Schéma elektroniky detektoru a laseru
- III. Podklady pro výrobu elektroniky
- IV. Rozpiska součástí elektroniky
- V. Rozpiska materiálu hlavice detektoru
- VI. Rozpiska materiálu hlavice reflektoru
- VII. Výkresy sestav mechaniky hlavic

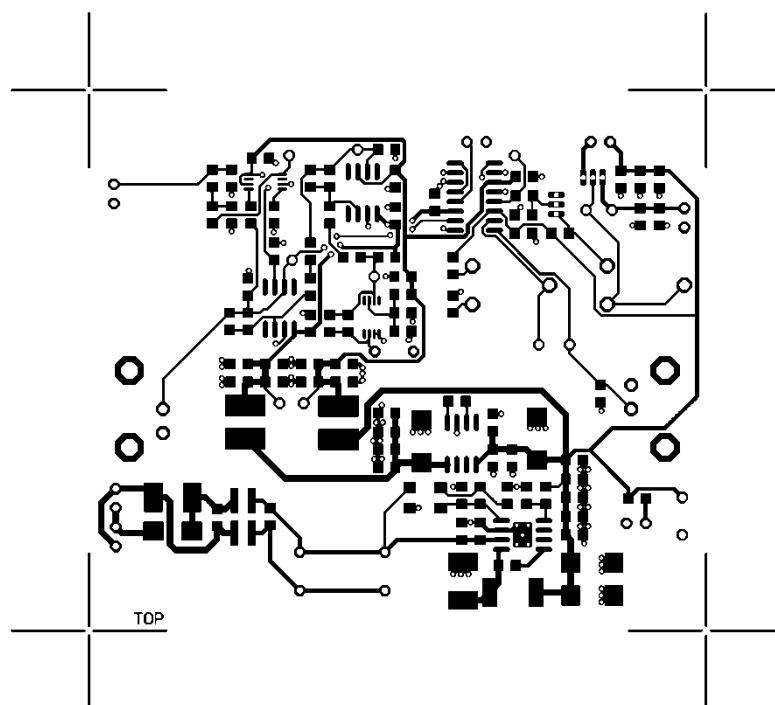
I. Adresářová struktura přiloženého CD

<i>/fotografie_hlavic/</i>	fotografie vyrobených hlavíc
<i>/fotografie_rozlozeni_opticke_intenzity/</i>	fotografie rozložení optické intenzity pořízené digitálním fotoaparátem – navazuje na kapitulu 9.7
<i>/mechanicka_konstrukce/</i>	výkresová dokumentace hlavíc ve formátu Autocad 2007 *.dwg a jednotlivé výkresy ve formátu *.pdf
<i>/scheme/</i>	elektrická schémata a layout desek vytvořené v programu Formica 4.4.

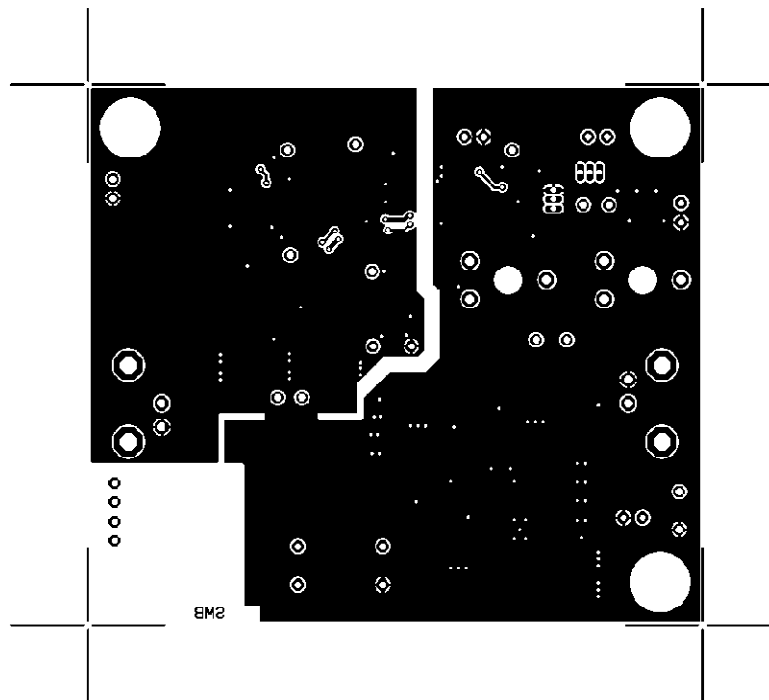
II. Schéma elektroniky detektoru a laseru



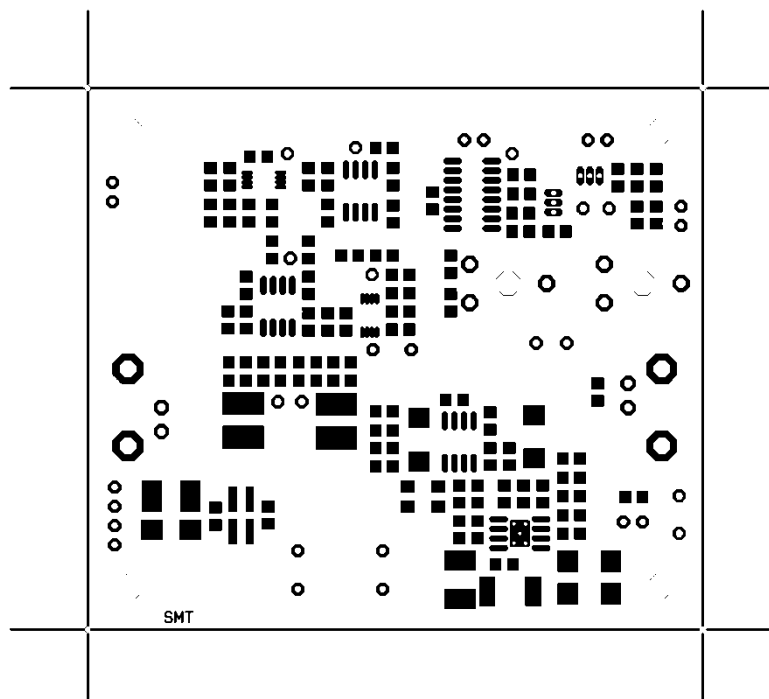
III. Podklady pro výrobu elektroniky



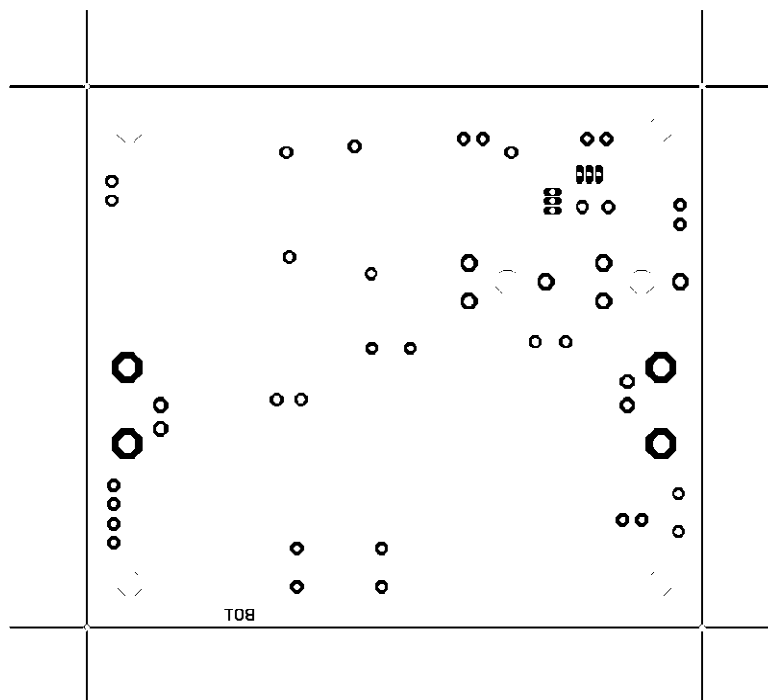
Vrstva mědi TOP 1:1



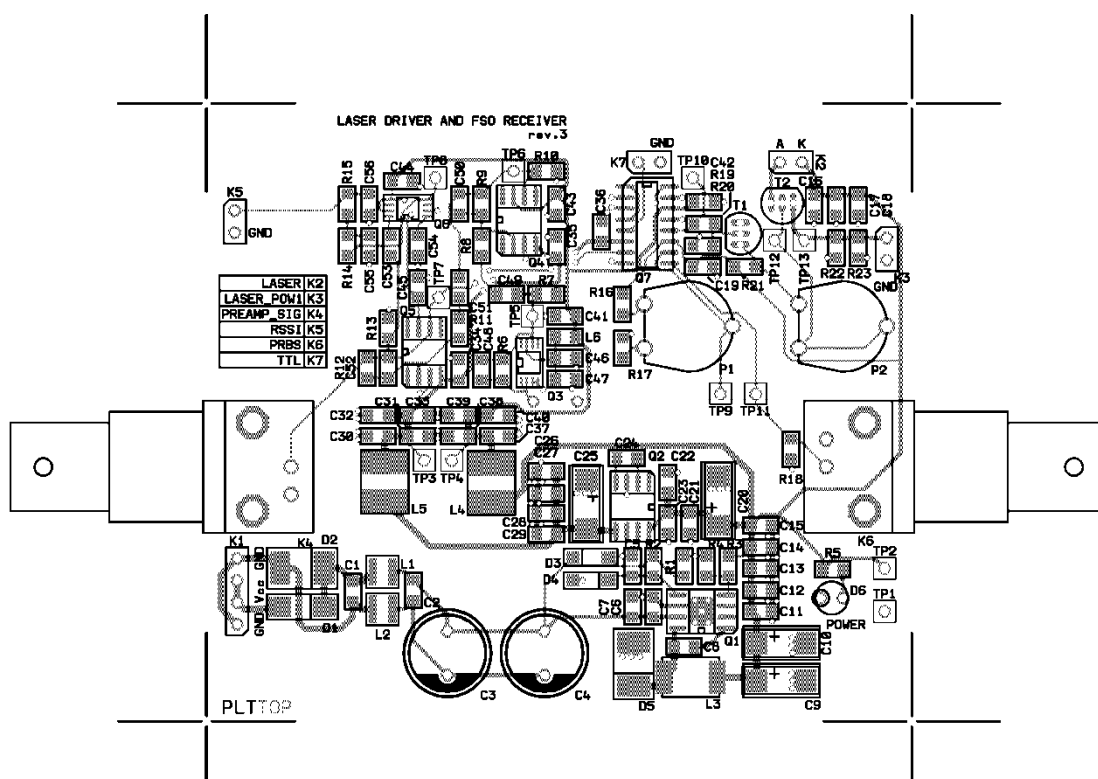
Vrstva mědi BOT 1:1



Nepájivá maska TOP 1:1



Nepájivá maska BOT 1:1



Osazovací plán měřítko není dodrženo

IV. Rozpiska součástek elektroniky

reference	kusů	hodnota	pouzdro	poznámka
Rezistory				
R1:R2:R7:R10:R13	5	10k	R0805	
R3	1	0R	R0805	
R4	1		R0805	neosazovat
R5:R21	2	470R	R0805	
R6:R8:R11:R14:R15:R16:R17	7	1k	R0805	
R9:R12	2	9k1	R0805	
R18	1	51R	R0805	
R19:R20	2	3k3	R0805	
R22:R23	2	20R	R0805	
Potenciometry				
P1	1	10k	PT10V	
P2	1	5k	PT10V	
Kondenzátory				
C1:C6:C7	3	1000n/25V	C0805	Keramický kondenzátor
C2:C5:C8:C18:C19:C23:C28:C33:C34:C35:C36:C39:C41:C42:C43:C44:C45:C46:C49:C51:C53:C54	22	100n	C0805	Keramický kondenzátor
C3:C4	2	1000M/25V	CE_RM5/D10	Elektrolytický LowESR
C9:C10:C20:C25	4	T100M/6,3V	CTC	Tantalový kondenzátor
C11:C12:C13:C16:C21:C24:C26:C30:C37	9	10M/10V	C0805	Keramický kondenzátor
C14:C17:C22:C27:C31:C38	6	1M/10V	C0805	Keramický kondenzátor
C15:C29:C32:C40:C47:C55:C56	7	10n	C0805	Keramický kondenzátor
C48	1	4p7	C0805	Keramický kondenzátor
C50:C52	2	400p	C0805	Keramický kondenzátor
Indukčnosti				
L1:L2	2	744028001		Wuerth Electronic
L3	1	DI16-15		Indukčnost Ferrocore
L4:L5	2	744043220		Wuerth Electronic
L6	1	742792093		Wuerth Electronic

Diody				
D1	1	1N4007SMD	SM1	
D2	1	SMBJ15CA	SMB	
D3:D4	2	5V6	SOD80	Zenerova dioda
D5	1	MBRS1100T3	SMB	
D6	1	zelená	LED3MM	LED dioda
D8	1	BPX61		fotodioda
Tranzistory				
T1:T2	2	2N3904	TO-92	
IO				
Q1	1	LM22674-5.0	SO8	
Q2	1	ICL7660	SO8	
Q3	1	OPA380	MSOP8	
Q4:Q5	2	AD8014	SO8	
Q6	1	AD8310	MSOP8	
Q7	1	AD8564	SO16	
Konektory				
K1	1		S1G4	Kolíková lišta RM 2.54 4piny
K2:K3:K5:K7	4		S1G2	Kolíková lišta RM 2.54 2 piny
K4:K6	2	BNC	BNC- Z50RW	BNC do DPS 90° zahnutý

V. Rozpiska materiálu hlavice detektoru

Číslo dílu	kusů	poznámka
Mechanické díly		
A-001	1	
A-002	1	
A-003	1	
A-004	2	
A-005	2	
A-006	2	
A-007	2	
A-008	1	
A-009	1	
A-010	1	
A-011	1	
A-012	1	
A-013	1	
A-014	1	
A-015	1	
A-016	1	
A-017	8	
A-018	1	
A-019	1	
A-020	8	
Spojovací materiál		
M10x50 šestihranná hlava	5	
M8x20 šestihranná hlava	7	
M5x15 zápustná hlava	19	
M4x10 kulatá hlava	2	
M4x5 kulatá hlava	4	
M10x20 šestihranná hlava	1	
M6x5 šestihranná hlava	16	
Závitová tyč M10x300	4	
Matice M10	14	
Podložka M10	28	
Pérová Podložka M10	6	

VI. Rozpiska materiálu hlavice zrcadla

Číslo dílu	kusů	poznámka
Mechanické díly		
B-001	1	
B-002	1	
B-003	2	
B-004	1	
B-005	1	
B-006	2	
B-007	1	
B-008	1	
B-009	2	
B-010	2	
B-011	1	
Spojovací materiál		
M10x50 šestihranná hlava	3	
M10x30 šestihranná hlava	2	
M5x15 zápustná hlava	15	
M4x10 šestihranná hlava	8	
M3x10 závitový červík	8	
Matice M10	14	
Podložka M10	28	
Pérová Podložka M10	6	