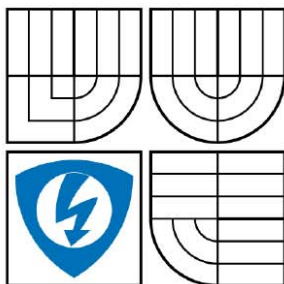


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV RADIOELEKTRONIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF RADIO ELECTRONICS

CHYBOVOST A DOSTUPNOST ATMOSFÉRICKÝCH OPTICKÝCH SPOJŮ

BIT ERROR RATE AND AVAILABILITY OF THE ATMOSPHERIC OPTICAL LINKS

DIZERTAČNÍ PRÁCE
DOCTORAL THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Ing. RADEK KVÍČALA

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

prof. Ing. OTAKAR WILFERT, CSc.

BRNO 2009

Abstrakt

Tato disertační práce se zabývá metodou určení dostupnosti optických bezkabelových spojů. Pro odhad procenta nedostupnosti optického bezkabelového spoje musíme znát statistiku rozložení útlumů atmosféry. V práci je prezentováno měření žádané statistiky útlumu atmosféry speciálně vyvinutým měřicím spojem. Měření bylo provedeno na dvou různých vlnových délkách. Prezentovaná statistika umožní odhadnout již při návrhu spoje jeho vhodnost pro použití ve vybrané lokalitě. V práci je uvedeno porovnání s již známými modely atmosféry pro určování útlumů z jiných veličin, například meteorologické viditelnosti. Další část práce se zabývá podmínkami pro stanovení chybovosti vysokorychlostních komunikačních spojů. V práci je prezentován vzorek měření chybovosti vyvinutým testerem chybovosti.

Klíčová slova

Optický bezkabelový spoj, laserové komunikace, bitová chybovost spoje, dostupnost spoje, pravděpodobnost přerušení spoje, doba přerušení spoje, BER tester, meteorologická viditelnost, útlum atmosféry

Abstract

This dissertation deals with the problematic of the free space optical link availability determination. For the presumption of the free space optical link unavailability we have to know statistical distribution of the atmospheric attenuations. In this work is also presented the measurement of these atmospheric attenuations with the specially designed optical link. Measurement is using switching of the two separate transmitters with wavelengths of 830 nm and 1550 nm. Presented statistic distribution let us determine the suitability of the link in the chosen locality during its design. Comparison of our measurement with other models like model based on the meteorological visibility is also presented. The last part of this work is focused on the preconditions for the hi-speed network bit error rate determination. Sample of the bit error rate measurement obtained by our designed bit error rate tester is attached.

Keywords

Free space optics, laser communication, bit error rate of optical link, availability of link, time interval of link unavailability, BER tester, meteorological visibility, atmospheric attenuation, RSSI

Prohlášení

Prohlašuji, že svou disertační práci na téma „Chybovost a dostupnost atmosférických optických spojů“ jsem vypracoval samostatně pod vedením školitele a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené disertační práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této disertační práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení §152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

V Brně dne 29. 9. 2009

_____ *autor práce*

Bibliografická citace

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.

Seznam symbolů použitých v práci

B	šířka frekvenčního pásma využitá ke komunikaci
b_i	celkový počet chyb v i -té sekundě
BER	bitová chybovost
$c(t)$	elektrický signál na výstupu detektoru
C_n^2	strukturní parametr indexu lomu
\tilde{C}_n^2	strukturní parametr indexu lomu při „čisté“ atmosféře
CNR	odstup úrovně nosné od šumu
D_n	strukturní funkce indexu lomu
D_{RXA}	průměr přijímací čočky
D_{TXA}	průměr vysílací (Gaussovy čočky)
e	elementární náboj
f_{PN}	hustota pravděpodobnosti fluktuací přijímaného výkonu
G_{PD}	zisk fotodiody
L_0	pomocná délka
L_{12}	vzdálenost mezi vysílačem a přijímačem
l_{min}	minimální rozměr vzdušných vírů
L_{max}	maximální rozměr vzdušných vírů
M	linková rezerva spoje
M_1	normovaná rezerva spoje
M_s	systemová rezerva spoje
$n(t)$	index lomu v daném bodě a čase
n_e	počet chybně přijatých bitů
$n_{e,pack}$	počet paketů obsahujících alespoň jeden chybný bit
n_j	počet bloků mimo synchronizaci
$n_{j,celk}$	celkový počet bloků
N_{AMP}	šum zesilovače
N_B	počet celkově přijatých bitů
N_{DET}	šum fotodetektoru
N_{pack}	celkový počet přenesených paketů
N_{S1}	výstřelový šum
$p(t)$	detekovaný okamžitý optický výkon
q	parametr popisující atmosféru podle modelu Kruse/Kima

pdf_P	hustota pravděpodobnosti úrovně optického výkonu
pdf_α	hustota pravděpodobnosti rozložení útlumů
pdf_τ	hustota pravděpodobnosti trvání úniků
$P_{0,RXA}$	citlivost přijímače
$P_{b,dlouhý}$	pravděpodobnost chyby za dlouhý časový úsek
$P_{b,krátký}$	pravděpodobnost chyby za krátký časový úsek
P_{ef}	pravděpodobnost bezchybné funkce spoje
P_{BIN}	binomické rozložení pravděpodobnosti
P_I	pravděpodobnost nedostupnosti spoje
$P_{I,\delta}$	pravděpodobnost, že dopadající výkon překročí saturaci přijímače
$P_{I,M}$	pravděpodobnost, že dopadající výkon poklesne pod citlivost přijímače
$P_{m,RXA}$	střední výkon na přijímací apertuře
$\tilde{P}_{m,RXA}$	hodnota výkonu na apertuře přijímače, bez vlivu atmosféry
$P_{m,TXA}$	střední výkon na vysílací apertuře
P_{nj}	procento bloků mimo synchronizaci
P_{POISS}	Poissonovo rozložení pravděpodobnosti
$P_{sat,RXA}$	výkon saturující přijímač
$\langle P_{m,RXA} \rangle$	střední hodnota přijímaného opt. výkonu za interval několika bitových period
P_{un}	pravděpodobnost nedostupnosti spoje
PER	paketová chybovost
R	hustota deště
$R(z)$	poloměr křivosti vlnoplochy ve vzdálenosti z od zdroje
S	počet spadných milimetrů sněhu za hodinu
t	čas
t_{ef}	počet bezchybných vteřin
t_{meas}	potřebná doba měření
$t_{meas,MIN}$	potřebná doba měření pro stanovení BER (minimální hranice)
$t_{meas,MAX}$	potřebná doba měření pro stanovení BER (maximální hranice)
t_{un}	doba nedostupnosti spoje
T	teplota
T_{ab}	redukovaná doba přerušení spoje v daném rozsahu časových intervalů
T_{atm}	propustnost atmosféry
T_I	doba trvání přerušení spoje

T_{celk}	celková doba monitorovaného období na spoji
v_i	přenosová bitová rychlost
V_M	meteorologická viditelnost
w_{TXA}	pološířka svazku v rovině vysílací apertury
y_d	rozhodovací úroveň
$y_{d,\text{opt}}$	optimální rozhodovací úroveň
Δ	dynamický rozsah přijímače
α_{12}	útlum šířením svazku
$\alpha_{1,\text{atm}}$	koeficient útlumu atmosféry
α_{advekce}	koeficient útlumu advekční mlhou
$\alpha_{1,\text{část}}$	rozptyl na částicích
$\alpha_{1,\text{dešť}}$	koeficient útlumu deštěm
$\alpha_{1,\text{snih}}$	koeficient útlumu vyvolaný sněžením
α_{atm}	celkový útlum vyvolaný vlivy atmosféry
$\tilde{\alpha}_{\text{atm}}$	útlum atmosféry pozorovaný při „čisté“ atmosféře
$\alpha_e(\lambda, z)$	koeficient extinkce
$\alpha_{e,\text{část}}$	Mieův rozptyl na částicích
α_{konvekce}	koeficient útlumu konvekční mlhou
α_{sys}	celkový systémový útlum na spoji
α_{turb}	útlum vyvolaný turbulencí v atmosféře
$\alpha_{\Sigma,r}$	útlum vzniklý v přijímacím systému
$\alpha_{\Sigma,t}$	útlum vzniklý ve vysílacím systému
δ	doplněk systémové rezervy spoje do saturace
λ	vlnová délka záření
γ_{tot}	celkový zisk na optických soustavách
ϕ	úhlová šířka svazku (kraj – kraj)
τ_{turb}	časový interval působení turbulence
τ	čas trvání úniku na spoji
μ	pravděpodobnost chybného přenosu jednoho bitu
μ_0 / μ_1	střední úrovně v log. 0/log. 1
σ_1^2	variace optické intenzity
$\sigma_{1,\text{rel}}^2$	relativní variance optické intenzity
$\sigma_{\text{P,rel}}^2$	variace přijímaného optického výkonu

ρ_c poloměr koherence svazku

Seznam zkratk použitých v práci

ATMO	testovací atmosférický optický spoj
ČMI	Český meteorologický institut
BERT	tester bitové chybovosti
DPS	deska plošného spoje
FD	fotodioda
FSOL	Free Space Optical Link (v překladu OBS)
ICAO	International Civil Aviation Organization
log.0, log.1	označení logických úrovní nízké a vysoké
LD	laserová dioda
LSFR	soustava posuvných registrů se zpětnovazebními odbočkami
NSES	bezchybné sekundy
OBS	optický bezkabelový spoj
OOK	klíčování vypnuto/zapnuto (ON-OFF Keying)
PRBS	pseudonáhodná bitová posloupnost
RS232	komunikační rozhraní sériové linky
RX	přijímací optická hlavice
RXA	apertura optického přijímače
TX	vysílací optická hlavice
TXA	apertura optického vysílače
SES	silně chybové sekundy
UFA	Ústav fyziky atmosféry
WMO	World Meteorological Organization

Obsah

1 Úvod	2
1.1 Energetická bilance optického bezkabelového spoje – stacionární model	3
1.2 Charakteristika atmosférického přenosového prostředí	5
1.2.1 Útlum atmosféry	6
1.2.2 Útlum vlivem dešťových srážek	7
1.2.3 Útlum způsobený sněžením	7
1.2.4 Turbulence atmosféry	8
1.2.5 Modelování fluktuace optického výkonu	11
1.2.6 Meteorologická viditelnost	12
1.2.7 Přerušování laserového svazku	15
1.3 Statistický model atmosférického optického spoje	16
1.3.1 Rozložení hustoty pravděpodobnosti náhodného útlumu	16
1.3.2 Rozložení hustoty pravděpodobnosti dob trvání úniků	17
1.3.3 Pravděpodobnost přerušení spoje s danou dobou trvání	18
1.4 Cíle disertační práce	20
2 Tester chybovosti BER	21
2.1 Definice bitové chybovosti	21
2.2 Určení doby měření pro stanovení BER	21
2.3 Vztah mezi BER a CNR	24
2.3.1 Grafické vyjádření vztahu pro odhad BER	27
2.4 Realizace testeru chybovosti	28
2.4.1 Naměřená data bitové chybovosti	33
3 Měřicí optický spoj	37
3.1 Návrh měřicího spoje ATMO TL - 01	37
3.1.1 Realizace měřicího spoje ATMO TL - 01	38
3.2 Návrh duálního měřicího spoje ATMO TL - 02_DUAL	40
3.2.1 Koncepce jednotlivých bloků	40
4 Experimentálně stanovená data útlumu atmosféry	45
4.1 Útlum atmosféry určený z meteorologické viditelnosti	45
4.2 Útlum atmosféry stanovený z RSSI	48
4.3 Porovnání koeficientů útlumu stanovených pomocí meteorologické viditelnosti a pomocí RSSI	50
4.4 Pravděpodobnost přerušení spoje	52
4.5 Porovnání útlumu atmosféry pro záření o dvou různých vlnových délkách	54
5 Komplexní model OBS	59
6 Závěr	62
7 Přílohy	67
7.1 Energetická bilance duplexního OBS ATMO_TL - 01 provedená v prostředí MathCad	68
7.2 Energetická bilance duálního, simplexního OBS ATMO_TL - 02_DUAL provedená v prostředí MathCad	73

7.3	Elektronické bloky ATMO TL-02_DUAL, desky plošných spojů, osazovací plány	83
7.4	Finální konstrukce ATMO TL-02_DUAL	89

1 Úvod

Moderní doba žádá stále větší přenosové rychlosti budovaných a projektovaných komunikačních spojů. Důvodem je velké rozšíření počítačových sítí a systémů GSM za poslední roky. Tento trend s sebou přináší požadavky na větší šířku pásma komunikačních kanálů, ale také současně na spolehlivost spojů. Pásmo používané pro radiové spoje je již velkou měrou zaplněné. Přidělování stávajících volných radiových kanálů tedy musí být koordinováno úřadem ČTÚ.

Velký pokrok na poli technologie výroby optických prvků nám umožnil vyrobit prvky použitelné pro konstrukci optických spojů. Tyto spoje mohou být provozovány jako optické kabelové spoje (obdoba metalických sítí), případně jako optické spoje bezkabelové (OBS). V anglické literatuře se pro OBS používá termín „Free Space Optical Link“ (FSOL). Zpočátku mohly být OBS považovány za konkurenci spojů radiových. Zkušenosti však ukazují, že tyto spoje slouží jako vhodný vzájemný doplněk díky svým specifickým vlastnostem. Spoje radiové a optické se provozují „paralelně“ (tzv. Hybridní spoje) a dle vybraného kritéria, kterým může být například bitová chybovost, se vybere automaticky spoj v tu chvíli vhodnější. Nelze opomenout ani optické spoje provozované v kosmickém programu.

OBS jsou nasazovány do prostředí s velkým elektromagnetickým rušením v radiové části spektra, případně jako záloha spojů radiových. Funkce zálohy je možno použít díky podstatně menší citlivosti optických spojů na jevy omezující funkčnost spojů radiových.

Výhody optických bezkabelových spojů:

- Vysoká prostorová selektivita vylučující interferenci s jinými spoji a podstatně snižující pravděpodobnost odposlechu. Speciálně se kódováním zabývá optická kryptografie využívající jednofotonových přenosů.
- Vysoká přenosová rychlost umožňující začlenění OBS do jakéhokoliv typu sítě.
- Absence legislativních překážek pro vybudování spoje, jelikož tyto spoje neleží v působnosti ČTÚ.

OBS využívají jako přenosové médium pro šíření optického svazku atmosféru. Atmosféra je součástí troposféry, což s sebou přináší specifické problémy. Snahou návrhářů a konstruktérů těchto spojů je, co nejvíce analyzovat rušivé vlivy atmosféry, snížit jejich vliv a zvýšit tak spolehlivost OBS.

Disertační práce se zabývá vlastnostmi atmosféry pro šíření optických svazků, jejich rozborem a vhodným matematickým popisem. Na základě tohoto rozboru bude možné stanovit limitní parametry OBS. Znalost omezujícího vlivu atmosféry na kvalitativní parametry spoje je důležitá jak při návrhu, tak při ohodnocení dostupnosti OBS. V závěru práce je podán komplexní model spoje jako syntéza stacionárního modelu (modelujícího energetickou bilanci OBS) a statistického modelu (modelujícího vybranou lokalitu umístění spoje). Pomocí komplexního spoje lze pro konkrétní spoj a pro vybranou lokalitu stanovit dostupnost OBS.

V experimentální části disertační práce je uveden návrh a realizace duálního spoje pro monitorování přenosových vlastností atmosféry a rozhraní pro měření statistických parametrů atmosféry ve vybrané lokalitě.

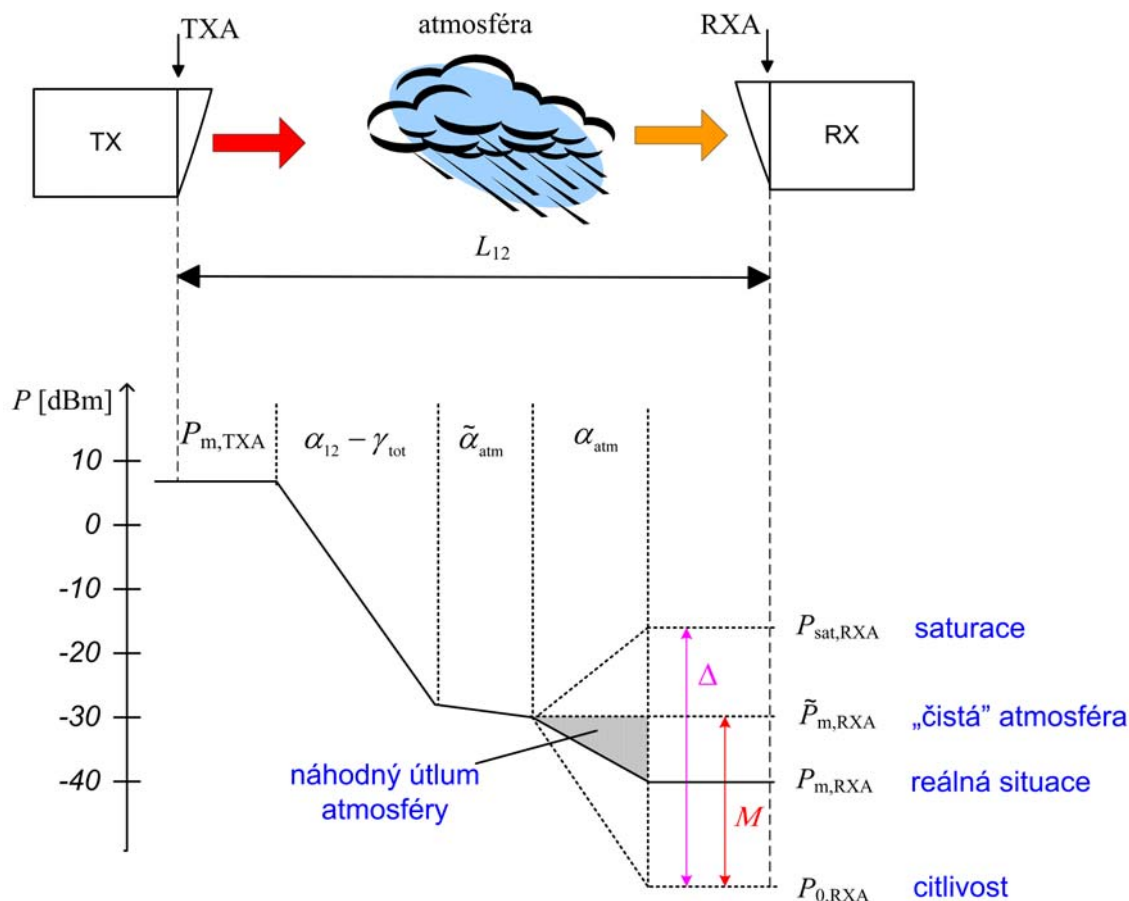
1.1 Energetická bilance optického bezkabelového spoje – stacionární model

Při návrhu a energetické bilanci OBS spoje se používá model, který je tvořen výkonovou bilanční rovnicí a výkonovým úrovněm diagramem. Veličiny použité v tomto modelu vystupují jako střední hodnoty vzhledem k použité modulaci.

S přihlédnutím k základnímu uspořádání spoje znázorněném na Obr. 1.1 lze sestavit výkonovou bilanční rovnici v decibellové míře ve tvaru

$$P_{m,RXA} = P_{m,TXA} - \alpha_{12} + \gamma_{tot} - \tilde{\alpha}_{atm} - \alpha_{atm}, \quad (1.1)$$

kde $P_{m,TXA}$ je střední výkon na apertuře vysílače, $P_{m,RXA}$ je střední výkon na apertuře přijímače, α_{12} značí útlum šířením svazku, $\tilde{\alpha}_{atm}$ je útlum pozorovaný při „čisté“ atmosféře, α_{atm} je celkový útlum vyvolaný vlivy atmosféry, γ_{tot} značí celkový zisk optických soustav. Grafické znázornění vztahu (1.1) formou výkonového úrovněm diagramu je uvedeno na Obr. 1.1.



Obr. 1.1. Výkonové poměry podél trasy optického spoje

TX/RX je označení vysílací/přijímací hlavice, $P_{0,RXA}$ je citlivost přijímače, $P_{sat,RXA}$ je výkon saturující přijímač, Δ značí dynamický rozsah přijímače, M je linková rezerva spoje, L_{12} je vzdálenost mezi vysílačem a přijímačem. $\tilde{P}_{m,RXA}$ značí hodnotu výkonu na RXA, pokud by se neuplatnil útlum vlivem atmosféry.

Základní parametry svazku jsou: pološířka svazku v rovině vysílací apertury w_{TXA} , poloměr křivosti vlnoplochy $R(z)$ ve vzdálenosti z od zdroje, úhlová šířka svazku (kraj – kraj) ϕ , délka vlny λ a D_{TXA} je průměr vysílací (Gaussovy čočky). Při modelování spoje se předpokládá, že signál je přenášen kruhově symetrickým Gaussovským svazkem vyzařovaným Gaussovou čočkou ($D_{\text{TXA}} = 2 w_{\text{TXA}}$).

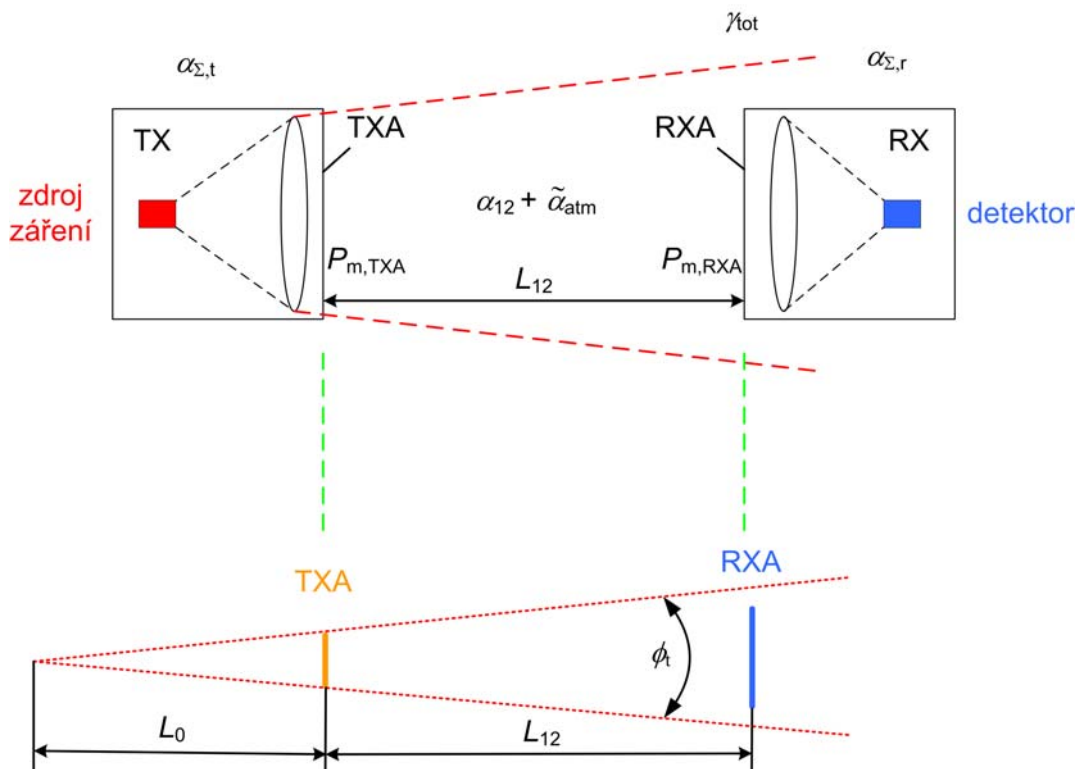
Při energetické bilanci spoje se předpokládá „čistá“ homogenní a stacionární atmosféra s koeficientem útlumu rozptylem na částicích $\tilde{\alpha}_{1,\text{část}} \approx 0,5 \text{ dB/km}$ a strukturálním parametrem indexu lomu $\tilde{C}_n^2 = 10^{-14} \text{ m}^{-2/3}$. Nazvěme atmosféru s těmito parametry jako standardní. Celkový systémový útlum na spoji α_{sys} se při podrobné analýze dělí na útlum vzniklý ve vysílacím systému $\alpha_{\Sigma,t}$, útlum šířením α_{12} , útlum vzniklý v přijímacím systému $\alpha_{\Sigma,r}$ a minimální útlum vyvolaný standardní atmosférou $\tilde{\alpha}_{\text{atm}}$. Útlum vyvolaný atmosférickými jevy α_{atm} je odlišný tím, že jeho hodnota se mění v závislosti na stavu atmosféry. V decibelové míře pak platí

$$\alpha_{\text{sys}} = \alpha_{\Sigma,t} + \alpha_{12} + \alpha_{\Sigma,r} + \tilde{\alpha}_{\text{atm}}. \quad (1.2)$$

Útlum šířením α_{12} je určen poměrem optických intenzit na ose svazku v místě přijímače a vysílače. Divergentní Gaussovský svazek lze ve vzdálené zóně záření aproximovat kulovou vlnou, pro útlum šířením lze pak odvodit vztah

$$\alpha_{12} = \left| 20 \log \frac{L_0}{L_0 + L_{12}} \right|, \quad (1.3)$$

kde L_0 je takzvaná pomocná délka, která řeší problém šíření Gaussova svazku pro malé L_{12} . K vyjádření L_0 je třeba znát průměr vysílací optické soustavy D_{TXA} a plošnou úhlovou šířku vysílaného svazku ϕ . (viz Obr. 1.2).



Obr. 1.2. Znázornění významu pomocné délky L_0

Význam pomocné délky L_0 spočívá v určení vzdálenosti virtuálního bodového optického zdroje s předpokladem, že velikost D_{TXA} je rovna právě šířce svazku $2w_{\text{TXA}}$ v rovině apertury TXA. Pro pomocnou délku platí

$$L_0 \approx \frac{D_{\text{TXA}}}{\phi_t}. \quad (1.4)$$

Po dosazení vztahu (1.4) do vztahu (1.3) je možné pro útlum šířením psát výraz

$$\alpha_{12} = \left| 20 \log \frac{D_{\text{TXA}}}{D_{\text{TXA}} + \phi_t L_{12}} \right| \approx \left| 20 \log \frac{D_{\text{TXA}}}{\phi_t L_{12}} \right|. \quad (1.5)$$

1.2 Charakteristika atmosférického přenosového prostředí

Hlavní jevy projevující se v atmosféře lze rozdělit následujícím způsobem:

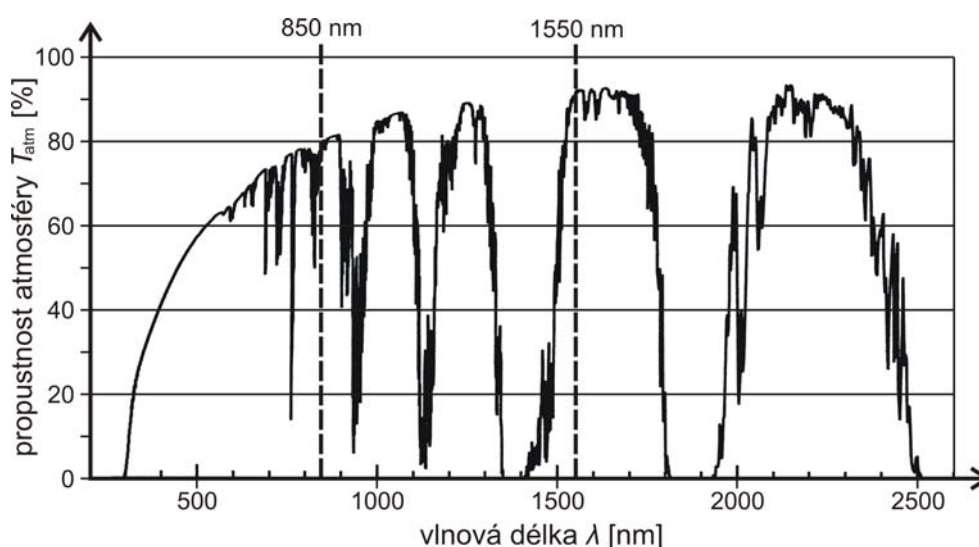
- **extinkce optické intenzity** vlivem rozptylu a absorpce na molekulách plynů a aerosolech,
- **fluktuace optické intenzity** vlivem turbulence atmosféry v důsledku působení deště či sněhu a vlivem deformace tvaru svazku,
- rušivý vliv **přerušování svazku** např. letícím ptákem.

1.2.1 Útlum atmosféry

Vlastnosti atmosféry, ve které se světelný paprsek šíří, podstatně ovlivňují kvalitu přenosu. Atmosféra je obecně nestacionární a nehomogenní prostředí. Působením větru a teplotních změn se index lomu atmosféry náhodně mění v závislosti na poloze a času. Působením aerosolů vzniká náhodný dodatečný útlum. Za přítomnosti ptáků a hmyzu v ovzduší může nastat i přerušení svazku.

Při šíření světelného paprsku atmosférou dochází k útlumu a fluktuacím optické intenzity. Pro vyjádření útlumu se používá koeficient útlumu atmosféry $\alpha_{1,\text{atm}}$, který je obecně závislý na prostorových souřadnicích, času a délce optické vlny svazku. Fluktuace optické intenzity se ohodnocuje variancí σ_I^2 , která závisí na délce vlny λ , vzdálenosti hlavic L_{12} a také na míře turbulence (kvalifikujeme strukturním parametrem indexu lomu C_n^2).

Na Obr. 1.3 je zobrazena závislost propustnosti čisté atmosféry na použité vlnové délce. Závislost byla měřena v úrovni mořské hladiny při délce trasy 1 km a šířce spektrální čáry 1,5 nm. Útlum na jednotlivých spektrálních složkách vzniká v důsledku působení absorpce na molekulách plynů.



Obr. 1.3. Propustnost „čisté“ atmosféry [11]

Za předpokladu homogenní a stacionární atmosféry je propustnost atmosféry T_{atm} možno matematicky popsat pomocí Beerova zákona

$$T_{\text{atm}}(L_{12}) = e^{-\int_{L_{12}} \alpha_c(\lambda, z) d\lambda dz} = e^{-L_{12} \int_{\Delta\lambda} \alpha_c(\lambda) d\lambda}, \quad (1.6)$$

kde $\alpha_c(\lambda, z)$ je koeficient extinkce.

Pro homogenní stacionární atmosféru a při použití dostatečně úzké spektrální čáry optického záření je možno vztah (1.6) psát ve tvaru

$$T_{\text{atm}}(L_{12}) = e^{-\alpha_c \cdot L_{12}}. \quad (1.7)$$

Koeficient extinkce má aditivní charakter a platí

$$\alpha_e = \sum_i \alpha_{e,i}, \quad (1.8)$$

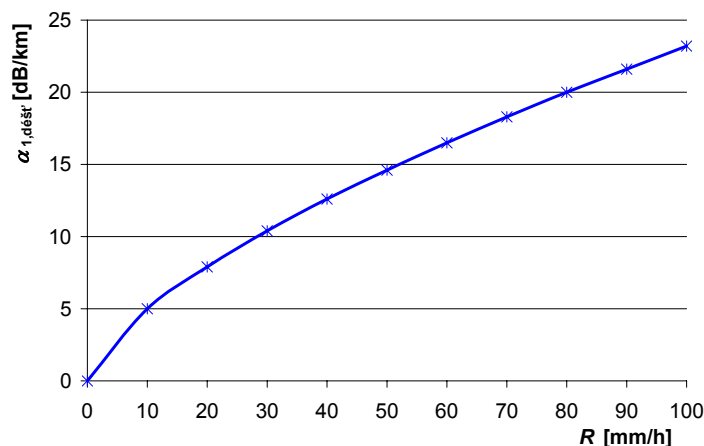
kde $\alpha_{e,i}$ je složka koeficientu extinkce odpovídající určitému jevu. Z tohoto vztahu vycházejí úvahy pro vyjádření jednotlivých útlumů.

1.2.2 Útlum vlivem dešťových srážek

Dešťové srážky jsou jedním z faktorů ovlivňujícím funkci OBS. Hustota deště R je dána počtem spadených milimetrů srážek za hodinu. Podle [33] pro koeficient útlumu deště $\alpha_{1,\text{dešť}}$ platí

$$\alpha_{1,\text{dešť}} = 1,076R^{\frac{2}{3}}. \quad (1.9)$$

Vztah (1.9) je zobrazen graficky na Obr. 1.4.



Obr. 1.4. Koeficient útlumu deště

I když vliv deště na OBS není tak kritický, jako u mikrovlnných spojů, útlum deštěm není v optické části spektra zcela zanedbatelný.

1.2.3 Útlum způsobený sněžením

Koeficient útlumu odpovídající sněžení $\alpha_{1,\text{snih}}$ je možno popsat matematicky [32]

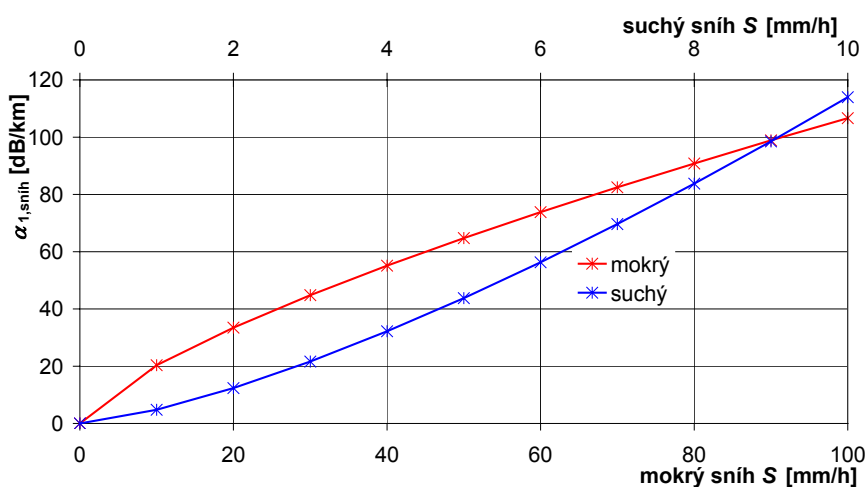
$$\alpha_{1,\text{snih}} = a \cdot S^b, \quad (1.10)$$

kde veličina S značí, analogicky veličině R u dešťových srážek, hodnotu spadených milimetrů sněhu za hodinu. Koeficienty a, b odpovídají charakteru sněhových částic. Pro suchý sníh (prašan) jsou koeficienty a, b dány rovnicí (1.11). Pro sníh těžký (mokrý) jsou koeficienty dány rovnicí (1.12)

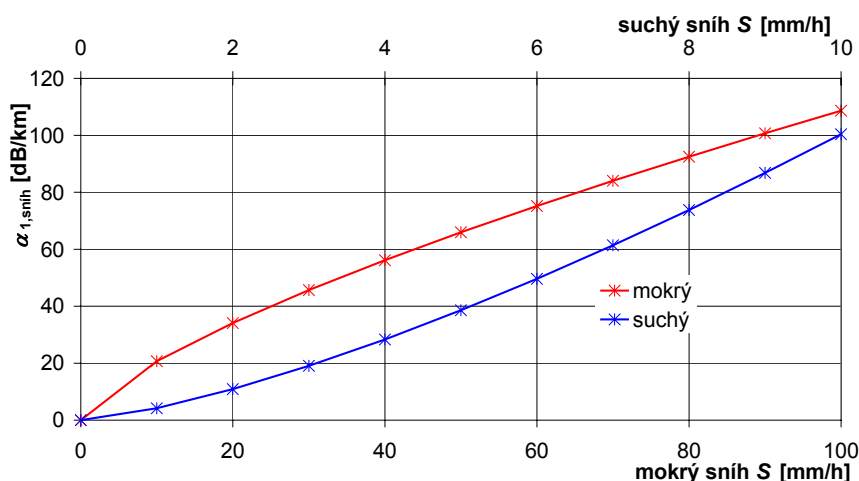
$$a = 5,42 \cdot 10^4 \lambda + 5,4958776; \quad b = 1,38, \quad (1.11)$$

$$a = 1,023 \cdot 10^5 \lambda + 3,7855466; \quad b = 0,72. \quad (1.12)$$

Na Obr. 1.5 je graficky zobrazena charakteristika koeficientu útlumu pro zmíněné druhy sněhových srážek a vlnovou délku 850 nm. Závislost útlumu sněhových srážek pro vlnovou délku 1550 nm je zobrazena na Obr. 1.6.



Obr. 1.5. Koeficient útlumu sněhu pro $\lambda = 850$ nm



Obr. 1.6. Koeficient útlumu sněhu pro $\lambda = 1550$ nm

Porovnáním Obr. 1.5 a Obr. 1.6 můžeme usoudit, že rozdíl koeficientů útlumu pro zobrazené vlnové délky je nevýznamný.

1.2.4 Turbulence atmosféry

Nejen přítomnost aerosolů ovlivňuje útlum působící na spoj. I za jasného dne můžeme za určitých podmínek pozorovat fluktuace přijímaného optického výkonu, jejichž důsledkem je útlum. Fluktuace výkonu jsou v tomto případě převážně způsobeny turbulencí atmosféry. V atmosféře se vytváří oblasti s různou teplotou, různým tlakem, a proto i s různým indexem lomu. Rozměry nehomogenit indexu lomu jsou v rozsahu řádově od milimetrů až po stovky metrů.

Turbulence je náhodný proces, a proto se pro jejich popis používá statistických metod. Základní veličinou popisující turbulentní atmosféru je strukturní funkce indexu lomu D_n , která je dána výrazem [4]

$$D_n = \langle [n(A,t) - n(B,t)]^2 \rangle, \quad (1.13)$$

kde n je index lomu v daném bodě (A nebo B) v čase t . Symbolem $\langle \rangle$ je myšleno středování v čase.

Strukturní funkce indexu lomu je v případě Kolmogorova modelu dána vztahem

$$D_n = C_n^2 r^{\frac{2}{3}}, \quad l_{\min} \ll r \ll L_{\max}, \quad (1.14)$$

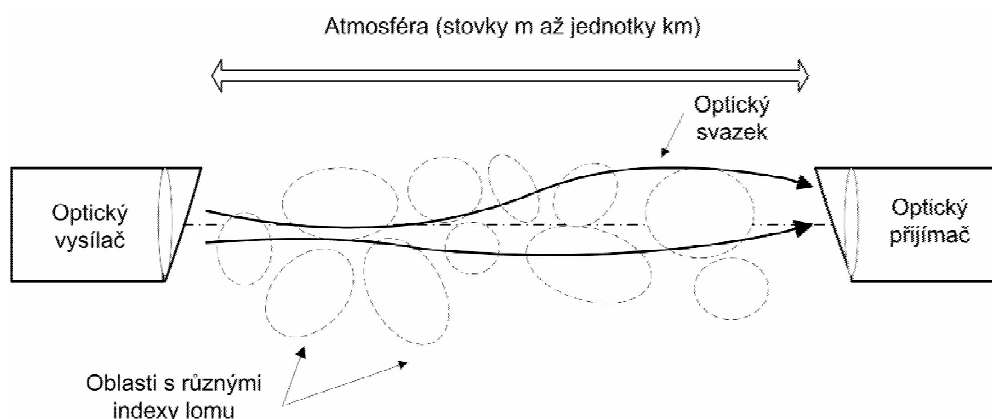
kde r je vzdálenost mezi body A a B , C_n^2 je strukturní parametr indexu lomu. Vztah (1.14) je platný v rozsahu ohraničeném minimálním a maximálním rozměrem turbulentních vírů l_{\min} a L_{\max} .

Pomocí strukturního parametru indexu lomu C_n^2 je možné ohodnotit míru turbulencí a také určit relativní varianci optické intenzity $\sigma_{i,\text{rel}}^2$ v místě příjmu [4]

$$\sigma_{i,\text{rel}}^2 = KC_n^2 \left(\frac{2\pi}{\lambda} \right)^6 L_{12}^{\frac{11}{6}}, \quad (1.15)$$

K je konstanta, která je rovna 1,23 pro rovinnou vlnu a 0,5 pro sférickou vlnu.

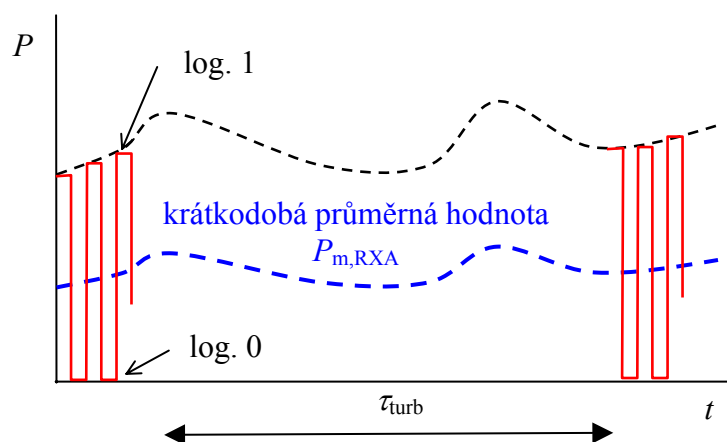
Různé velikosti nehomogenit v atmosféře mají různý vliv na optický svazek procházející atmosférou [10]. Změna směru šíření optického svazku, vlivem různých velikostí nehomogenit, je patrná na Obr. 1.7.



Obr. 1.7. Vliv turbulentních oblastí na směr šíření svazku

Z tohoto obrázku je vidět, že turbulence mohou způsobit změnu směru šíření paprsku, jejichž důsledkem jsou fluktuace optické intenzity v místě přijímače. Tento obrázek je pouze ilustrativním příkladem možného vlivu turbulencí na optický svazek. Změna směru šíření optické vlny není vlivem jediným. Pokud svazek prochází oblastí, kde jsou turbulentní víry mnohem menší než průměr optického svazku, dochází k lokálnímu fázovému posuvu v těchto oblastech, a tím k scintilacím a deformaci svazku, který se projevuje skvrnkovou strukturou. V souladu se změnou přijímané optické intenzity na apertuře přijímače se bude měnit i dopadající optický výkon na fotodiodu. Při datovém přenosu s intervalem trvání jednoho symbolu ($\log. 1$ nebo $\log. 0$) mnohem menším, než je časový interval působení turbulence τ_{turb} , bude

turbulencemi modulovaná amplituda přijímaných bitů. Takový jev je znázorněn na Obr. 1.8.



Obr. 1.8. Vliv turbulence na amplitudu přenášených dat

Časový projev turbulence atmosféry na přijímaný optický výkon se projevuje v trvání jednotek milisekund. Tento jev tedy můžeme pokládat za rychle se měnící ve srovnání se změnami útlumu vznikajícími na částicích, ale pomalu se měnící vzhledem k přenosové rychlosti. Projevovat se bude zvláště za jasných dnů, při působení přímého slunečního svitu (nám známé jako tzv. „tetelení“ vzduchu). Útlum, který odpovídá turbulencím v atmosféře α_{turb} , lze vyjádřit přibližně pomocí empirických poznatků. Na základě modelu turbulentní atmosféry je možno, pro odhad útlumu vyvolaného pouze turbulencí, použít vztah [32]

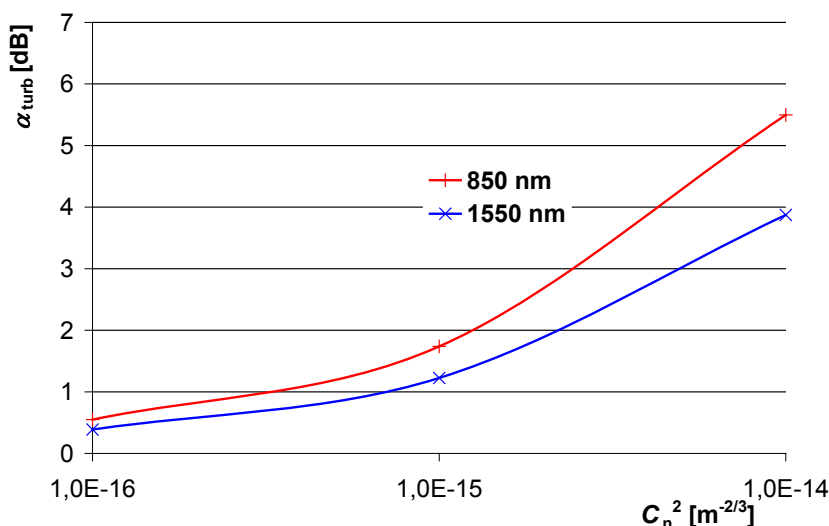
$$\alpha_{\text{turb}} = 2 \sqrt{23,17 \cdot \left(\frac{2\pi}{\lambda}\right)^7 \cdot C_n^2 \cdot L_{12}^{\frac{11}{6}}} \quad (1.16)$$

Hodnoty útlumů vlivem turbulence pro komunikační okna 850 nm a 1550 nm jsou podle vztahu (1.16) uvedeny v Tab. 1.1.

Tab. 1.1. Útlum turbulencí, kulová vlna, $\lambda_1 = 850$ nm, $\lambda_2 = 1550$ nm, $L_{12} = 1000$ m

C_n^2 [m ^{-2/3}]	míra turbulence	α_{turb} [dB]		$\sigma_{\text{I,rel}}^2$ ($\lambda = 850$ nm)	
		$\lambda = 850$ nm	$\lambda = 1550$ nm	kulová vlna	rovinná vlna
10^{-16}	klidná atmosféra	0,55	0,39	$1,6 \cdot 10^{-3}$	$4 \cdot 10^{-3}$
10^{-15}	mírná	1,74	1,22	$1,6 \cdot 10^{-2}$	$4 \cdot 10^{-2}$
10^{-14}	střední	5,5	3,9	$1,6 \cdot 10^{-1}$	$4 \cdot 10^{-1}$

Na Obr. 1.9 je znázorněna graficky závislost útlumu na strukturálním parametru indexu lomu pro spoj délky $L_{12} = 1000$ m.



Obr. 1.9. Útlum vlivem turbulencí ($L_{12} = 1$ km)

Z Tab 1.1 a Obr 1.9 bychom mohli usuzovat na výhodnost použití vyšších vlnových délek pro lepší vlastnosti vzhledem k útlumu vlivem turbulence. Je však uvedeno [7], že vztah (1.16) platí pouze pro malé hodnoty variace přijímaného optického výkonu, tedy pro malé projevy turbulencí. Pro vysoké hodnoty turbulencí by vztah (1.16) byl modifikován do tvaru

$$\alpha_{\text{turb}} = \sqrt{1 + k \cdot (\sigma_{\text{I,rel}}^2)^{-2/5}}, \quad (1.17)$$

kde k je konstanta.

Můžeme usoudit ze vztahu (1.17), že pro malé turbulence ($\sigma_{\text{I,rel}}^2 < 1$) budou projevy méně patrné na vlnových délkách v komunikačním okně 1550 nm. Pro velké turbulence ($\sigma_{\text{I,rel}}^2 > 1$) je vhodnější použít vlnových délek v okolí 850 nm.

1.2.5 Modelování fluktuace optického výkonu

Krátkodobá střední hodnota optického výkonu $P_{\text{m,RXA}}$ fluktuuje náhodně v závislosti na turbulenci. Předpokládejme, že útlum na částicích je konstantní. Normovaný přijímaný výkon je možno vyjádřit ve tvaru

$$P_{\text{N}} = \frac{P_{\text{m,RXA}}}{\langle P_{\text{m,RXA}} \rangle}, \quad (1.18)$$

kde střední hodnota $\langle P_{\text{m,RXA}} \rangle$ je vyjádřena za časový interval větší, než doba trvání průměrné turbulentní periody. Relativní varianci optického výkonu $\sigma_{\text{P,rel}}^2$ pak můžeme psát ve tvaru

$$\sigma_{\text{P,rel}}^2 = \frac{\langle P_{\text{m,RXA}}^2 \rangle - \langle P_{\text{m,RXA}} \rangle^2}{\langle P_{\text{m,RXA}} \rangle^2} = \langle P_{\text{N}}^2 \rangle - 1. \quad (1.19)$$

Veličina $\sigma_{\text{P,rel}}^2$ je nepřímo úměrná průměru přijímací apertury D_{RXA} , neboť se uplatňuje vliv průměrování.

Atmosférická turbulence snižuje prostorovou koherenci svazku. Větší plocha přijímací apertury zvětší počet nekorelovaných příspěvků na fotodetektoru. Tento jev závisí na průměru přijímací apertury D_{RXA} a na poloměru koherence svazku ρ_C [4]. Pro velmi malou plochu přijímací apertury je hodnota variace přijímaného optického výkonu $\sigma_{P,rel}^2$ úměrná hodnotě $\sigma_{I,rel}^2$ definované vztahem (1.15). Pro větší plochu přijímací apertury RXA však hodnota $\sigma_{P,rel}^2$ vlivem středování nenarůstá přímo úměrně varianci optické intenzity $\sigma_{I,rel}^2$.

Za předpokladu slabých turbulencí a relativně malého průměru přijímací apertury ($D_{RXA} < 5 \rho_C$) je normovaný střední výkon P_N dán log-normálním rozložením [4]

$$f_{P_N,slabá}(P_N) = \frac{1}{P_N \sigma_{P,rel} \sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{\left[\ln P_N + \frac{1}{2} \sigma_{P,rel}^2\right]^2}{2\sigma_{P,rel}^2}\right), \quad (1.20)$$

kde $f_{P_N,slabá}$ je hustota pravděpodobnosti fluktuace optického výkonu při působení slabých turbulencí.

Pro mírnou a silnou turbulenci je výhodné použít Gamma – Gamma distribuční funkci $\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)$. Její parametry α a β je možno získat teoreticky i experimentálně. Přijímaný optický výkon je vyjádřen jako $p = xy$, kde x a y popisují příslušné atmosférické vlivy. Gamma – Gamma distribuční funkce je pak dána

$$f_{P_N,silná}(p) = \frac{2(\alpha\beta)^{(\alpha+\beta)/2}}{\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)} p^{\frac{\alpha+\beta}{2}-1} K_{\alpha-\beta}(2\sqrt{\alpha\beta p}), \quad p > 0, \quad (1.21)$$

kde $K_{\alpha-\beta}$ je modifikovaná Besselova funkce, Γ je gamma funkce a parametry α, β jsou efektivní čísla popisující víry turbulentního prostředí [36]. Pro apertury splňující podmínku $D_{RXA} \gg \rho_C$ je distribuční funkce přibližně Gaussovská [37].

1.2.6 Meteorologická viditelnost

Děšť a sněžení ovlivňují, stejně jako mlha, meteorologickou viditelnost V_M [km], někdy též značenou jako dohlednost. Meteorologická viditelnost V_M [km] je definovaná jako délka trasy v atmosféře, při níž poklesne propustnost atmosféry na hodnotu $T_{atm} = 0,05 = 5\%$. Hodnota 5% je nejmenší hodnota propustnosti atmosféry pro rozlišení černobílého objektu za dne, vztaženo k vlnové délce 550 nm (zde má lidské oko nejvyšší citlivost). Hodnota byla stanovena WMO (World Meteorological Organization) a ICAO (International Civil Aviation Organization). Mezi meteorologickou viditelností V_M a koeficientem extinkce α_e platí definiční vztah

$$e^{-\alpha_e V_M} = 0,05. \quad (1.22)$$

Vyjádřením koeficientu extinkce z (1.22) získáme

$$\alpha_e = \frac{3,91}{V_M}. \quad (1.23)$$

Hlavní jev uplatňující se v atmosférických komunikačních oknech je Mieův rozptyl na částicích $\alpha_{e,\text{část}}$. Mieův rozptyl je závislý na vlnové délce světla. Pro koeficient extinkce odpovídající Mieovu rozptylu platí empirický vztah [31]

$$\alpha_{e,\text{část}}(\lambda) \approx \frac{3,91}{V_M} \left(\frac{\lambda}{550 \cdot 10^{-9}} \right)^{-q}, \quad (1.24)$$

kde parametr q je podle modelu Kruse a Kima [2] vyjádřen následující tabulkou:

Tab. 1.2. Hodnoty parametru q

q		hodnota viditelnosti
KIM model	KRUSE model	
1,6	1,6	$V_M > 50$ km
1,3	1,3	$6 \text{ km} < V_M < 50$ km
$0,16 V_M + 0,34$	$0,585 V_M^{1/3}$	$1 \text{ km} < V_M < 6$ km
$V_M - 0,5$		$0,5 \text{ km} < V_M < 1$ km
0		$V_M < 0,5$ km

Pro vyjádření útlumu v dB měřítku, lze použít vztah

$$e^{-\alpha_{e,\text{část}} \cdot L_{12}} = 10^{-\frac{\alpha_{1,\text{část}}}{10} L_{12}}, \quad (1.25)$$

kde koeficientem extinkce $\alpha_{e,\text{část}}$ je uveden v $[\text{km}^{-1}]$ a koeficientem útlumu $\alpha_{1,\text{část}}$ v $[\text{dB}/\text{km}]$. Úpravou vztahu (1.25) dostaneme

$$\alpha_{e,\text{část}} = 0,23 \alpha_{1,\text{část}}. \quad (1.26)$$

V Tab. 1.3 je dle vztahů (1.24) a (1.26) vyjádřen koeficient útlumu atmosféry na částicích v závislosti na meteorologické viditelnosti, uvažována $\lambda = 850$ nm. Částicemi se rozumí relativně velké částice (aerosoly), jejichž lineární rozměr je mnohem větší, než vlnová délka záření.

Tab. 1.3. Přehled číselných hodnot V_M a $\alpha_{1,\text{část}}$ při různých stavech atmosféry

V_M [km]	$\alpha_{1,\text{část}}$ [dB.km ⁻¹]		stav atmosféry
	Kim model	Kruse model	
$0,05 < 0,5$	26 až 260	21,3 až 237,4	silná mlha
0,5 až 1	10,5 až 26	10,2 až 21,3	střední mlha
1,0 až 6	1,23 až 10,5	1,36 až 10,2	slabá mlha nebo silný déšť
6 až 50	0,13 až 1,23	0,13 až 1,23	opar
více než 50	0,13	0,13	čistá

Kromě modelu Kima a Kruse se používá model Al Naboulsi. Model Al Naboulsi je navržen pouze pro rozsah meteorologické viditelnosti od 50 m do 1000 m a dovoluje

spočítat koeficient útlumu atmosféry pro vlnové délky v rozmezí 690 nm až 1550 nm [1]. Model počítá se dvěma typy mlh – advekční a konvekční mlhou.

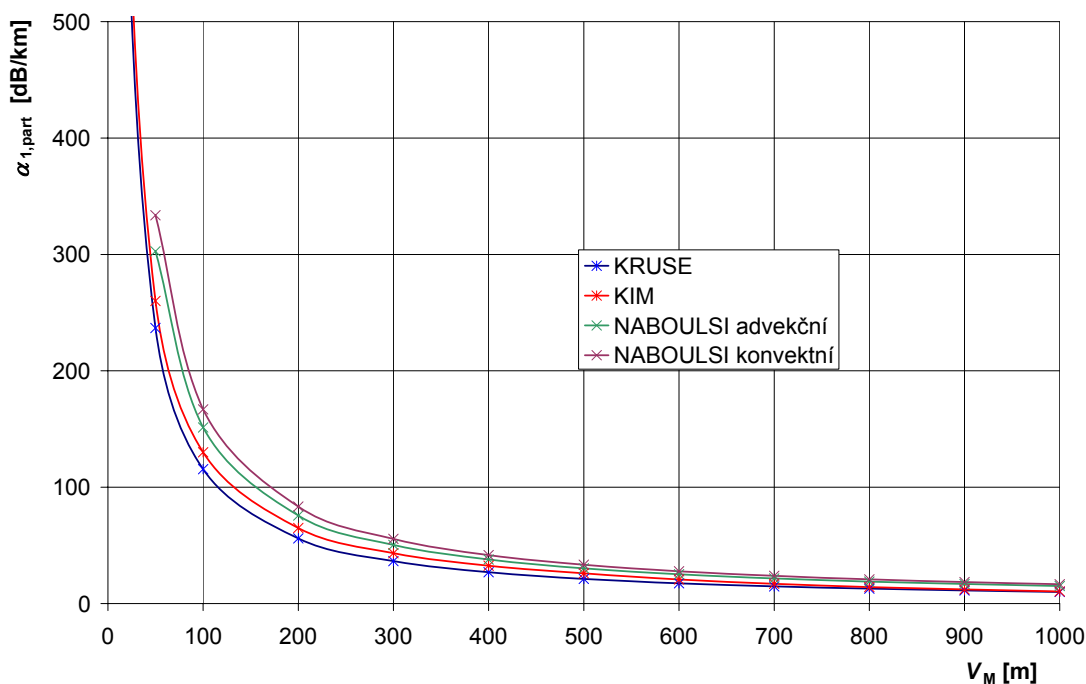
Advekční mlha vzniká v případě, kdy teplý vlhký vzduch proudí přes studenou vrstvu. Vzduch je při kontaktu se studenou vrstvou zchlazen pod hodnotu rosného bodu, což způsobuje kondenzaci vody. Tento jev je častější na jaře, kdy teplá vrstva vzduchu přechází přes ještě o dost chladnější oblasti (např. zasněžené). Koeficient útlumu takovéto mlhy je dán vztahem

$$\alpha_{\text{advekce}} = \frac{11,478 \cdot 10^4 \cdot \lambda + 3,8367}{0,23 \cdot V_M} \quad (1.27)$$

Konvekční mlha se tvoří chladnutím vzduchu v noci za příznivých podmínek (velmi nízká rychlost větru, vysoká vlhkost prostředí, jasná obloha). Mlha se vytváří při kontaktu vzduchu s vrstvou, která se ochladí uvolněním tepla naakumulovaného přes den. Následně dojde k poklesu teploty pod hodnotu rosného bodu, což způsobí kondenzaci aerosolů. Výsledkem jsou formace podobné mrakům v přízemní výšce. Tento typ mlhy je pozorovatelný především v údolích. Koeficient útlumu takto vzniklé mlhy je roven

$$\alpha_{\text{konvekce}} = \frac{18,126 \cdot 10^{10} \lambda^2 + 3,8367 \cdot 10^6 \lambda + 0,13709}{0,23 \cdot V_M} \quad (1.28)$$

Na Obr. 1.10 je zobrazeno porovnání koeficientů útlumů atmosféry pro jednotlivé modely atmosféry určených z meteorologické viditelnosti.



Obr. 1.10. Porovnání koeficientů útlumů atmosféry pro jednotlivé modely atmosféry ($\lambda = 850 \text{ nm}$)

Je patrné, že model Kima a Kruse se pro velké hodnoty meteorologické viditelnosti prakticky shodují. Pro nízké hodnoty V_M je model dle Kima přísnější a ukazuje na vyšší hodnoty útlumu. Kimův model byl publikován později a je zpřesněnou formulí modelu Kruse. Navíc model publikovaný Kimem ukazuje při nízkých hodnotách viditelnosti na spektrální nezávislost útlumu na částicích - exponent zlomku zohledňujícího vlnovou délku nabývá nuly viz Tab. 1.2 a (1.24). Uvedené dva modely jsou v publikacích porovnávány hodnotami změřenými [1], [2]. Al. Naboulsi model je pouze teoretický a v literatuře se s tímto modelem příliš často nesetkáváme. Problémem tohoto modelu je, že autor porovnává hodnoty útlumů počítané pro různou hodnotu viditelnosti 2 %, resp. 5 %. V této práci je upřednostňován model dle Kima.

Velká hodnota koeficientu útlumu při nízkých hodnotách viditelnosti (podle všech zmíněných modelů) ukazuje, že zvláště při výskytu mlhy bude přijímaný optický výkon značně tlumen. Časový úsek nástupu deště nebo mlhy je řádu jednotek až desítek minut. Tento jev je tedy možné pokládat za pomalu se měnící v čase vzhledem k bitové rychlosti i vzhledem k periodě turbulence. Četnost výše zmíněných poruch bude samozřejmě ovlivněna zeměpisnými souřadnicemi, případně lokalitou, ve které je spoj provozován. Lze konstatovat, že nejvyšší pravděpodobnost výskytu mlh je v podzimních a zimních měsících roku (viz Tab. 1.4).

Tab. 1.4. Výskyt mlh, zdroj vojenské letiště Přerov, rok 2008

Měsíc	leden	září	únor	listopad	prosinec
Průměrný výskyt mlhy (dnů v měsíci)	10,86	10,62	9,14	8,07	7,29

1.2.7 Přerušování laserového svazku

Spoje, provozované v příměstských lokalitách s částí zeleně, čelí problémům s výskytem ptáků, kteří mohou svazek svým pohybem rušit. Na Obr. 1.11 je zachycen průlet ptáka svazkem testovacího optického spoje ATMO 155, komunikujícího na vlnové délce 850 nm a pracujícího na vzdálenost 750 m s přenosovou rychlostí 155 Mbps.



Obr. 1.11. Přerušování svazku způsobené průletem ptáka optickým svazkem

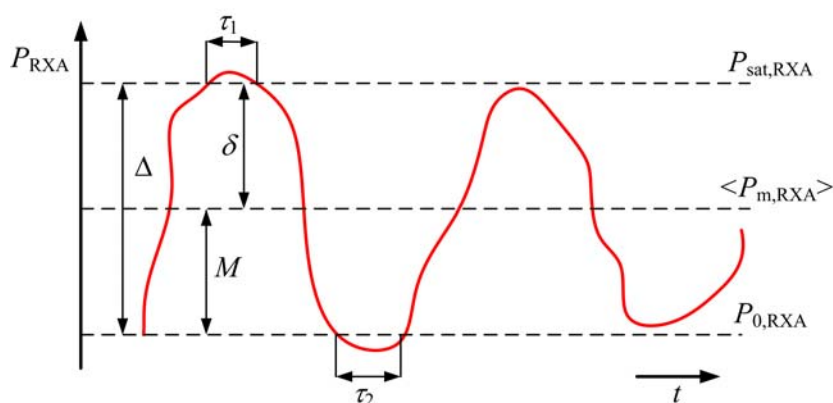
Průměrná doba přerušování svazku je v tomto případě jednotky až desítky milisekund. Zmiňovaný jev vyvolává zvýšení bitové chybovosti spoje.

1.3 Statistický model atmosférického optického spoje

Reálný atmosférický optický spoj ve svém provozu ukazuje, že přijímaný optický výkon na apertuře přijímače nabývá náhodných hodnot v závislosti na útlumu atmosféry. V předešlých kapitolách byly zmíněny hlavní mechanismy vzniku útlumů v atmosféře. Statistický model je nástrojem, jak tyto náhodné změny parametrů atmosféry, navíc s časově proměnným intervalem působení, popsat a ohodnotit.

1.3.1 Rozložení hustoty pravděpodobnosti náhodného útlumu

Na Obr. 1.12 je znázorněn průběh přijímaného optického výkonu, z obrázku jsou patrné úniky provázející přijímaný optický signál.



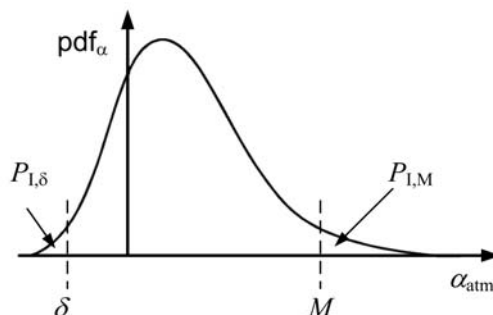
Obr. 1.12. Průběh přijímaného optického výkonu s úniky

Časové úseky τ_1, τ_2 značí časové úseky, kdy hodnota přijímaného optického výkonu klesne pod úroveň citlivosti přijímače $P_{0,RXA}$ nebo převyšuje hodnotu saturačního výkonu $P_{sat,RXA}$. Veličina $\langle P_{m,RXA} \rangle$ značí střední hodnotu přijímaného optického výkonu za interval několika bitových period.

Útlum v atmosféře můžeme rozdělit na konstantní útlum v „čisté“ atmosféře $\tilde{\alpha}_{atm}$ a časově proměnný přídavný útlum α_{atm} vyvolaný působením reálné atmosféry. Nejvyšší kladná hodnota α_{atm} , která neovlivní funkčnost spoje je rovna hodnotě M (linková rezerva spoje viz Obr. 1.1). Vlivem turbulence může dojít i ke konstruktivní interferenci, maximální záporná hodnota útlumu neovlivňující spoj je rovna δ . Hodnota δ je doplňkem systémove rezervy spoje do saturace a můžeme ho matematicky zapsat jako

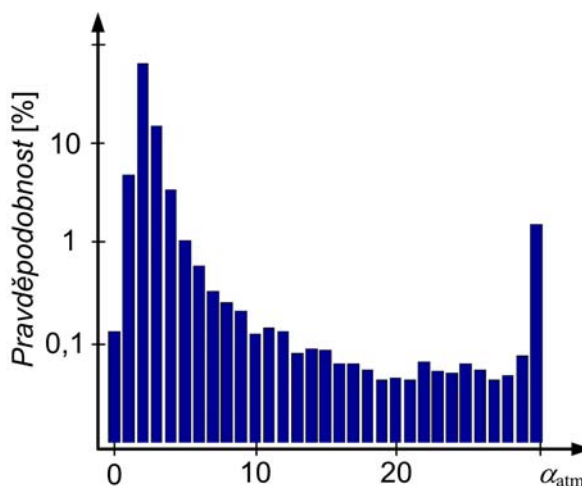
$$\delta = \Delta - M \quad (1.29)$$

Statistika přijatého výkonu odpovídá statistice náhodných útlumů v atmosféře α_{atm} . Charakter rozložení hustoty pravděpodobnosti náhodného útlumu tedy odpovídá charakteru hustoty pravděpodobnosti přijatého výkonu. Teoretický průběh hustoty pravděpodobnosti pdf_{α} je ukázán na Obr. 1.13.



Obr. 1.13. Hustota pravděpodobnosti pdf_α

Obr. 1.14 zobrazuje experimentálně stanovený průběh pravděpodobnosti útlumu vyvolaného atmosférou.



Obr. 1.14. Experimentálně stanovený průběh útlumu atmosféry při $L_{12} = 1$ km [19]

1.3.2 Rozložení hustoty pravděpodobnosti dob trvání úniků

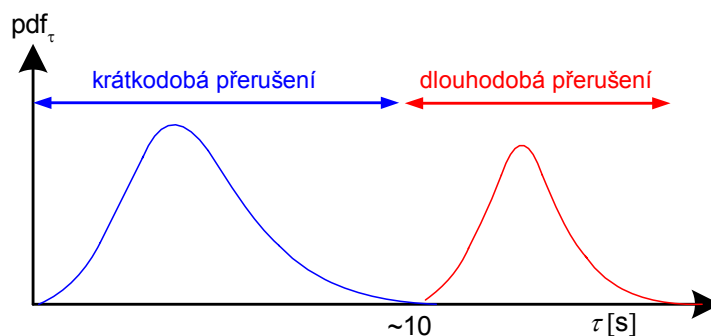
K přerušení spoje dochází, když přijímaný výkon vybočí z oblasti dynamiky přijímače. Tato událost nastane s pravděpodobností

$$P_I = P_{I,\delta} + P_{I,M} = 1 - \int_{\delta}^M pdf_\alpha(\alpha_j) d\alpha_j. \quad (1.30)$$

Interval $P_{I,\delta}$ odpovídá stavu, kdy přijatý výkon překročil hranici saturace a $P_{I,M}$ odpovídá stavu, kdy je přijatý optický výkon menší, než citlivost přijímače.

Doby úniků mohou být časově dosti odlišné. Reakce na dobu přerušení bude tedy také rozdílná, zatímco krátkodobé úniky budou pouze zvyšovat chybovost, dlouhodobé budou zvyšovat dobu nedostupnosti spoje.

Je tedy nutné zjistit, jak vypadá časové rozložení dob úniků. Odhad rozložení hustoty pravděpodobnosti časových dob úniků pdf_τ je prezentován na Obr. 1.15.



Obr. 1.15. Teoretický tvar hustoty pravděpodobnosti trvání úniků

Krátkodobá přerušení nabývají doby zhruba do jednotek sekund, jsou způsobeny turbulencemi a přeletem ptáků svazkem (viz kap. 1.2.4 a 1.2.5). Dlouhodobá přerušení nabývají dob desítek sekund a více, jsou převážně způsobena rozptylem na částicích (kap. 1.2.2 a 1.2.3).

1.3.3 Pravděpodobnost přerušení spoje s danou dobou trvání

Pokud hodnota α_{atm} překročí některou z mezních hodnot (a přijímaný výkon vybočí z dynamiky spoje), nastává přerušení spoje. Pravděpodobnost takové situace je rovna

$$P_1 = \frac{T_1}{T_{\text{celk}}}, \quad (1.31)$$

kde T_1 je doba trvání přerušení a T_{celk} je celková doba monitorovaného období. Celková doba nedostupnosti spoje je dána součtem jednotlivých intervalů přerušení

$$T_1 = \sum_j n_j \tau_j, \quad (1.32)$$

kde n_j je počet přerušení po dobu trvání $\left\langle \tau_j - \frac{\Delta\tau}{2}; \tau_j + \frac{\Delta\tau}{2} \right\rangle$. Přičemž $\Delta\tau$ značí třídní interval. Je-li N celkový počet přerušení spoje a P_j pravděpodobnost třídy, lze počet přerušení spoje n_j vyjádřit vztahem

$$n_j = NP_j, \quad (1.33)$$

pro celkovou nedostupnost spoje lze tedy psát

$$T_1 = N \sum_j P_j \tau_j = N \bar{\tau}, \quad (1.34)$$

kde $\sum_j P_j \tau_j$ vyjadřuje celkovou střední dobu přerušení spoje $\bar{\tau}$.

Redukovaná doba přerušení T_{ab} způsobená přerušováním spoje v daném rozsahu časových intervalů $\tau_j \in \langle \tau_a; \tau_b \rangle$ se vyjádří vztahem

$$T_{\text{ab}} = N \sum_a^b P_j \tau_j = N \bar{\tau}_{\text{ab}}. \quad (1.35)$$

Pak lze tedy redukovanou dobu nedostupnosti vyjádřit

$$T_{ab} = T_1 \frac{\bar{\tau}_{ab}}{\bar{\tau}}. \quad (1.36)$$

Je možno od diskrétních hodnot přejít ke spojitým ($\Delta\tau \rightarrow d\tau$) a vyjádřit pravděpodobnost nedostupnosti spoje vyvolanou určitou hloubkou úniku s definovanou dobou trvání jako [15]

$$P_{1,ab} = \left[1 - \int_{\delta}^M pdf_{\alpha}(\alpha_j) d\alpha_j \right] \frac{\int_{\tau_a}^{\tau_b} \tau_j pdf_{\tau}(\tau_j) d\tau_j}{\int_0^{\tau_a} \tau_j pdf_{\tau}(\tau_j) d\tau_j} \approx \frac{T_{ab}}{T_{celk}}. \quad (1.37)$$

Je však třeba znát hustotu pravděpodobnosti náhodného útlumu pdf_{α} a hustotu pravděpodobnosti přerušení pdf_{τ} s určitou délkou trvání τ .

1.4 Cíle disertační práce

Hlavním cílem disertační práce je vypracování nových podkladů pro návrh a ohodnocení kvality přenosu optických bezkabelových spojů. Optickým bezkabelovým spojem je myšlen optický spoj, který přenáší optický signál v atmosféře pomocí jednoho nebo více optických svazků. Spoj je navrhovaný pro přenos velkého objemu dat s vysokou spolehlivostí a bezpečností přenosu.

K návrhu spoje patří energetická bilance založená na výkonové bilanční rovnici, která zahrnuje základní parametry samotného spoje a umožňuje stanovit výkonovou rezervu spoje. Kromě deterministického přístupu v návrhu spoje je nutné zvažovat také statistický charakter atmosféry ve zvolené lokalitě umístění spoje. Experimentální výzkum náhodného útlumu atmosféry vyvolaný aerosoly a turbulencí je součástí cílů disertační práce.

Dílčí cíle disertace jsou shrnuty do následujících bodů:

- Analýza atmosférických jevů a modelování vlivu atmosféry na optický svazek. Pozornost věnovat zejména vlivu částic a turbulence na útlum optického svazku.
- Experimentální výzkum působení útlumu atmosféry na chybovost spoje. Stanovení minimální doby měření chybovosti přenosu.
- Vývoj zařízení pro monitorování chybovosti optických bezkabelových spojů. Vyřešení problému archivace velkého objemu dat.
- Vývoj speciálních zařízení pro měření útlumu atmosféry v různých spektrálních oknech. Porovnání vlivu atmosféry na útlum spoje v komunikačních spektrálních oblastech 850 nm a 1550 nm.
- Syntéza změřených statistických charakteristik parametrů atmosféry a stanovení pravděpodobnosti překročení útlumu atmosféry ve vybraných lokalitách.
- Aplikace komplexního modelu spoje pro určení dostupnosti.

2 Tester chybovosti BER

Pro měření kvality přenosu, archivaci dat a vyhodnocení výsledků měření bylo třeba vyvinout a sestavit měřicí prostředky. Jedním ze základních prostředků pro daný účel je měřič bitové chybovosti. Měřič bitové chybovosti je osazen na speciálním optickém bezkabelovém spoji, kde se za jeho pomoci detekuje bitová chybovost spoje. Jak bylo ukázáno na Obr. 1.8, můžeme pomocí chybovosti vyhodnocovat rychlé úniky signálu na optickém spoji.

2.1 Definice bitové chybovosti

K hlavním parametrům popisujícím kvalitu datového spoje patří bitová chybovost *BER* (z anglického Bit Error Rate). Definice bitové chybovosti *BER* (dále v textu značeno zkráceně jako chybovost) je následující [5]

$$BER \approx \frac{n_e}{N_B}, \quad (2.1)$$

kde n_e udává počet chybně přijatých bitů a N_B je počet celkově přijatých bitů ve stejném intervalu.

Pomocí veličiny *BER* je možno vzájemně porovnávat kvalitu různých systémů určených k přenosu dat. Hodnota chybovosti poskytuje informaci, pomocí které jsme schopni optimalizovat přenosovou trasu z hlediska použitých kódovacích technik, vhodných pro danou hodnotu bitové chybovosti. O problematice technické realizace testeru chybovosti bude pojednáno dále.

2.2 Určení doby měření pro stanovení BER

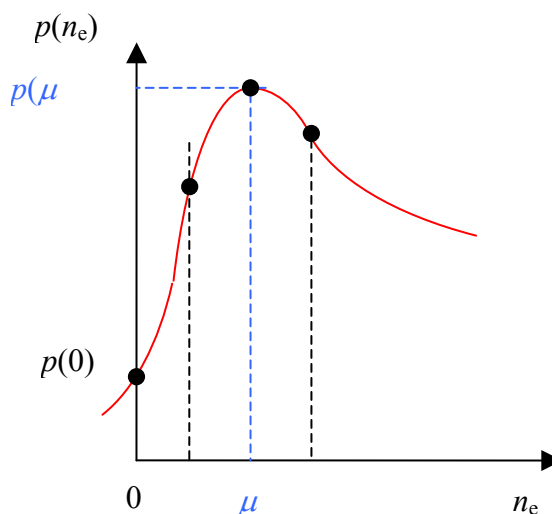
Jak je patrné ze vztahu pro určení chybovosti (2.1), je nutné znát celkový počet přenesených bitů N_B . Tento počet je možné určit trvalým sledováním počtu přenášených bitů. Je důležité si uvědomit, že např. $BER = 10^{-12}$ (někdy též značeno *BER*-12) odpovídá jednomu chybně přenesenému bitu připadajícímu na 10^{12} bitů přenesených celkově. Při rychlosti komunikace 155 Mbps dojde k jedné chybě v přenosu průměrně jednou za 6450 s a při datové rychlosti 2048 kbps dokonce jednou za 500 000 s (tedy za cca 138 hodin). Pro přesné stanovení chybovosti je nutné měření provádět opakovaně - a jak je patrné z předchozího - takové měření je časově velmi náročné. Při porovnávání přijatých bitů s bity referenčními mohou nastat dva stavy: stav, kdy se shoduje přijatý bit s referenčním, nebo stav, kdy se přijatý bit neshoduje s bitem referenčním. Měření chybovosti odpovídá svým charakterem binomickému rozdělení pravděpodobnosti P_{BIN} dle následujícího vztahu

$$P_{BIN}(n_e, N_B, BER) = \frac{N_B!}{(N_B - n_e)!} \cdot BER^{n_e} \cdot (1 - BER)^{N_B - n_e}. \quad (2.2)$$

Hodnota proměnné P_{BIN} vyjadřuje pravděpodobnost výskytu určitého počtu chyb n_e v celkovém počtu přenesených bitů N_B pro danou chybovost BER . V případech, kdy je chybovost relativně nízká ($<10^{-4}$), je možno použít jednodušší Poissonovo rozložení, neboť počet správně přenesených bitů je dostatečně vysoký. V takovém případě Poissonovo rozložení s dostatečnou přesností aproximuje rozložení binomické. Použití Poissonova rozložení odstraňuje nutnost vyčíslvat faktoriál z celkového počtu přenesených bitů N_B . Poissonovo rozložení můžeme vyjádřit pomocí vztahu

$$P_{\text{POISS}}(n_e, \mu) = e^{-\mu} \cdot \frac{1}{n_e!} \cdot \mu^{n_e}. \quad (2.3)$$

Na Obr. 2.1. je znázorněna grafická podoba vztahu (2.3).



Obr. 2.1. Poissonovo rozložení

Význam pravděpodobnosti P_{POISS} je stejný jako P_{BIN} a pro vysoké hodnoty přenesených bitů je hodnota u obou rozdělení stejná. K vyjádření pravděpodobnosti výskytu definovaného počtu chyb pomocí Poissonova rozdělení jsme museli zavést parametr μ , který vyjadřuje pravděpodobnost chybného přenosu jednoho bitu. Parametr μ je možno definovat následovně

$$\mu = BER \cdot N_B. \quad (2.4)$$

Za pomocí vztahů (2.3), (2.4) a dané hodnoty BER jsme schopni určit pravděpodobnost, s jakou v celkovém počtu bitů N_B bude přeneseno právě n_e chybných bitů. Je také možné určit počet celkově přenesených bitů N_B , abychom určili hodnotu BER s žádanou přesností. Zvolíme si tedy hodnotu požadované pravděpodobnosti P_{REQ} , se kterou lze počet přijatých bitů považovat za dostačující. Z takového zadání vzniknou dvě krajní hodnoty.

Minimální hodnota

$$\sum_0^{n_e} P_{\text{POISS}}(n_e, \mu_{\text{MIN}}) = P_{\text{PEQ}} \quad (2.5)$$

a maximální hodnota

$$\sum_0^{n_e} P_{\text{POISS}}(n_e, \mu_{\text{MAX}}) = (1 - P_{\text{PEQ}}). \quad (2.6)$$

Za předpokladu, že budeme uvažovat pouze výskyt jednoho chybně přeneseného bitu $n_e = 1$, a budeme požadovat přesnost určení chybovosti $P_{\text{POISS}}(n_e, \mu) = 0,99$, lze odvodit pomocí numerických metod minimální a maximální hodnoty parametru μ . Pro známou hodnotu BER jsme navíc schopni dle (2.4) určit i počty přenesených bitů N_B . Pro uvedené požadavky jsou hodnoty $\mu_{\text{MIN}} = 0,1486$ a $\mu_{\text{MAX}} = 6,6384$. Nezbývá než z celkového počtu bitů a přenosové bitové rychlosti v_i určit potřebnou dobu měření t_{meas} podle následujícího vztahu

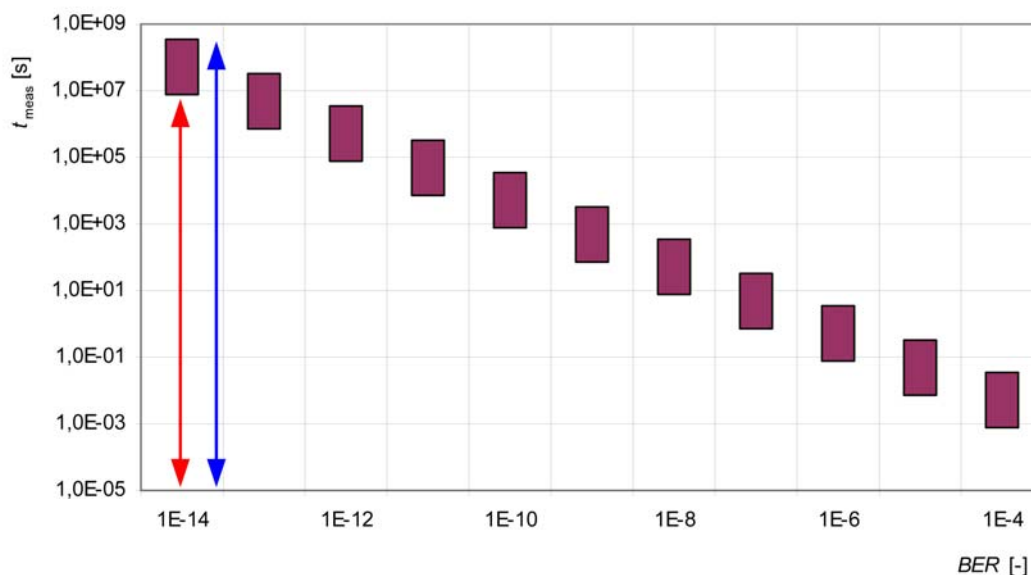
$$t_{\text{meas}} = \frac{N_B}{v_i}, \quad (2.7)$$

kde v_i je přenosová rychlost v bps (bitů za sekundu). Stanovené počty bitů a vypočtené doby měření jsou shrnuty v Tab. 2.1.

Tab. 2.1. Doby měření pro $v_i = 2,048$ Mbps a BER v rozsahu 10^{-4} až 10^{-14}

BER [-]	N_B [bitů]		t_{meas} [s]		t_{meas} [d hh:mm:ss]	
	min	max	min	max	min	max
10^{-14}	$1,49 \cdot 10^{13}$	$6,64 \cdot 10^{14}$	$7,28 \cdot 10^6$	$3,24 \cdot 10^8$	84d 06:13:20	3750d
10^{-13}	$1,49 \cdot 10^{12}$	$6,64 \cdot 10^{13}$	$7,28 \cdot 10^5$	$3,24 \cdot 10^7$	8d 10:13:20	375d 00:00:00
10^{-12}	$1,49 \cdot 10^{11}$	$6,64 \cdot 10^{12}$	$7,28 \cdot 10^4$	$3,24 \cdot 10^6$	0d 20:13:20	37d 12:00:00
10^{-11}	$1,49 \cdot 10^{10}$	$6,64 \cdot 10^{11}$	$7,28 \cdot 10^3$	$3,24 \cdot 10^5$	0d 02:01:20	3d 18:00:00
10^{-10}	$1,49 \cdot 10^9$	$6,64 \cdot 10^{10}$	$7,28 \cdot 10^2$	$3,24 \cdot 10^4$	0d 00:12:08	0d 09:00:00
10^{-9}	$1,49 \cdot 10^8$	$6,64 \cdot 10^9$	$7,28 \cdot 10^1$	$3,24 \cdot 10^3$	0d 00:01:13	0d 00:54:00
10^{-8}	$1,49 \cdot 10^7$	$6,64 \cdot 10^8$	7,28	$3,24 \cdot 10^2$	0d 00:00:07	0d 00:05:24
10^{-7}	$1,49 \cdot 10^6$	$6,64 \cdot 10^7$	$7,28 \cdot 10^{-1}$	$3,24 \cdot 10^1$	0d 00:00:01	0d 00:00:32
10^{-6}	$1,49 \cdot 10^5$	$6,64 \cdot 10^6$	$7,28 \cdot 10^{-2}$	3,24	0d 00:00:00	0d 00:00:03
10^{-5}	$1,49 \cdot 10^4$	$6,64 \cdot 10^5$	$7,28 \cdot 10^{-3}$	$3,24 \cdot 10^{-1}$	0d 00:00:00	0d 00:00:00
10^{-4}	$1,49 \cdot 10^3$	$6,64 \cdot 10^4$	$7,28 \cdot 10^{-4}$	$3,24 \cdot 10^{-2}$	0d 00:00:00	0d 00:00:00

Na Obr. 2.2 je zobrazen interval měření nutný ke spolehlivému stanovení zvolené hodnoty BER (uvažována je přenosová rychlost $v_i = 2,048$ Mbps).

Obr. 2.2. Doby měření pro stanovení chybovosti BER

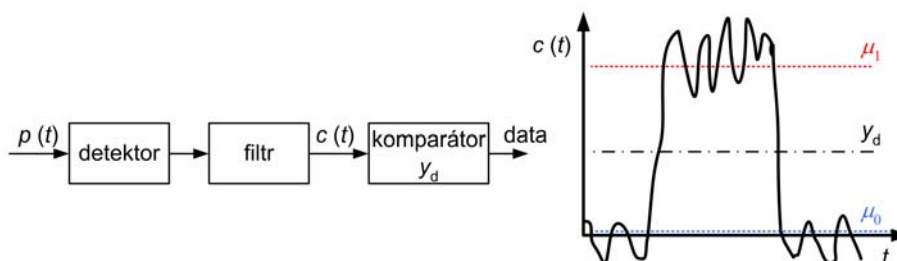
Některé přenosové sítě používají pro přenos informací pakety. Paket je blok bitů předepsané délky definované použitým typem sítě. Výskyt jedné chyby vyvolá bez použití korekčních technik znehodnocení celého paketu. Z hlediska chybovosti tedy dochází ke ztrátě většího počtu bitů. Na druhé straně může dojít ke shluku chyb v jednom paketu, a více paketů navzdory celkově většímu počtu chyb být znehodnoceno nemusí. Z tohoto důvodu není možné určit z chybovosti bitové chybovost paketovou. Chybovost paketová je definována obdobně jako chybovost bitová

$$PER \approx \frac{n_{e,pack}}{N_{pack}}, \quad (2.8)$$

kde $n_{e,pack}$ udává počet paketů obsahujících alespoň jeden chybný paket a N_{pack} je celkový počet přenesených paketů.

2.3 Vztah mezi BER a CNR

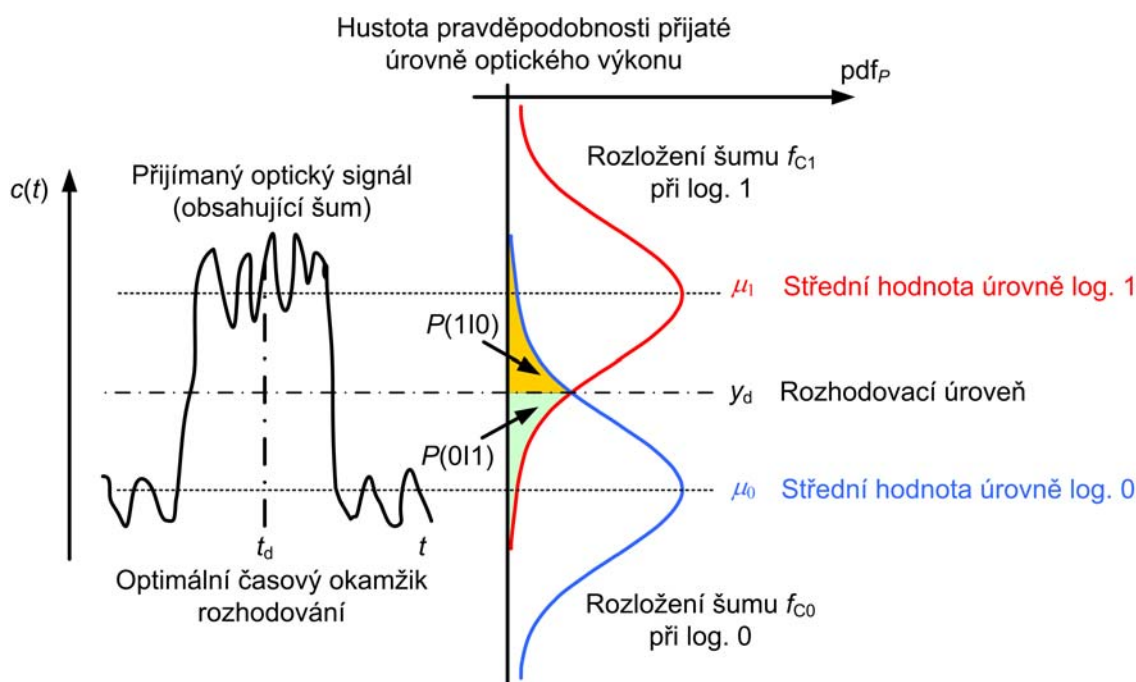
Definice bitové chybovosti BER (2.1) předpokládá znalost n_e a N_B . Pro stanovení BER je třeba znalosti počtu vyslaných a přijatých dat (bitů). Z časových důvodů je vhodné najít jiný způsob predikce výsledné chybovosti, než zdlouhavé monitorování spoje. Je snahou bitovou chybovost určit např. na základě znalosti základních veličin měřitelných na spoji (např. CNR – z anglického carrier to noise ratio). Myšlenka je následující. Předpokládá se použití modulační techniky OOK (On – Off klíčování) a přijímací řetězec viz Obr. 2.3.



Obr. 2.3. Model OOK přijímače

Veličina $p(t)$ značí detekovaný okamžitý optický výkon, $c(t)$ značí elektrický signál na výstupu detektoru, μ_0/μ_1 jsou střední úrovně v jednotlivých logických stavech $\log 0/\log 1$, y_d je hodnota rozhodovací úrovně.

Základní komponenty jsou optický detektor, filtr a ideální komparátor s rozhodovací úrovní y_d . Reálný přijímač navíc obsahuje zesilovač. Úrovní signálu $\log 1$ odpovídá střední hodnota μ_1 , úrovní signálu $\log 0$ odpovídá střední hodnota μ_0 . Rozložení pravděpodobnosti úrovně přijatého signálu je naznačeno na Obr. 2.4.



Obr. 2.4. Přijímaný optický signál a rozložení šumu

Parametry pdf_p je hustota pravděpodobnosti přijaté úrovně optického výkonu. $P(1|0)$ a $P(0|1)$ značí pravděpodobnost vyhodnocení $\log 1$, pokud byl vyslán vysílačem signál $\log 0$ a opačně.

Pokud budeme uvažovat reálný přijímač, musíme úvahy doplnit o šumy vznikající při procesu detekce. Budeme uvažovat, pro zjednodušení, nulovou hodnotu přijímaného optického výkonu při $\log 0$. Celkové úrovně proudů na detektoru můžeme popsat tedy těmito vztahy:

$$\text{log 1:} \quad c_1 = \mu_1 + N_1, \quad (2.9)$$

$$\text{log 0:} \quad c_0 = \mu_0 + N_0 = N_0, \quad (2.10)$$

kde c_0 , c_1 značí skutečné úrovně signálu log 0 a log 1 včetně šumových příspěvků N_0 a N_1 detektoru v jednotlivých logických stavech.

Protože šum fotodiody závisí na procházejícím proudu, celkový šum přijímače závisí na hodnotě přijímaného signálu. Celkový šum můžeme vyjádřit pomocí variancí (středních kvadratických hodnot)

$$\text{log 0:} \quad \langle N_0^2 \rangle = \langle N_{\text{DET}}^2 \rangle + \langle N_{\text{AMP}}^2 \rangle, \quad (2.11)$$

$$\text{log 1:} \quad \langle N_1^2 \rangle = \langle N_0^2 \rangle + \langle N_{\text{SI}}^2 \rangle, \quad (2.12)$$

kde N_{DET} vyjadřuje šum fotodetektoru zahrnující proud za tmy a záření pozadí, N_{AMP} vyjadřuje šum zesilovače. Výstřelový šum N_{SI} nastává pouze při příjmu log 1. Výstřelový šum je možno popsat

$$\langle N_{\text{SI}}^2 \rangle = 2G_{\text{PD}}FeB\mu_1 = k\mu_1, \quad (2.13)$$

kde G_{PD} je zisk fotodiody ($G_{\text{PD}} = 1$ pro PIN), F je faktor zvýšení šumu, B je šířka frekvenčního pásma použitá ke komunikaci a e je elementární náboj. Výstřelový šum je popsán Poissonovým zákonem. Pro velké počty elektronů připadajících na bit může být s dostatečnou přesností aproximován Gaussovou křivkou. Předpokládejme stejnou pravděpodobnost vyslání log 1 i log 0. Pravděpodobnost chyby (chybovost) za krátký časový úsek je

$$P_{\text{b,krátký}}(\mu_1) = \frac{1}{2}P(c_0 > y_d) + \frac{1}{2}P(c_1 < y_d) = \frac{1}{2} \int_{y_d}^{\infty} f_{C_0}(c_0)dc + \frac{1}{2} \int_{-\infty}^{y_d} f_{C_1}(c_1)dc, \quad (2.14)$$

kde f_{C_0} a f_{C_1} jsou hustoty pravděpodobnosti (pdf) c_0 , resp. c_1 . Protože f_{C_1} je funkcí μ_1 , bitová chybovost závisí také na hodnotě přijímaného optického signálu μ_1 .

Hodnota přijímaného signálu μ_1 se mění v důsledku náhodných atmosférických jevů. Pomocí vztahu (2.14) je možno vyjádřit pravděpodobnost chyby za relativně dlouhý časový interval

$$P_{\text{b,dlouhý}} = \langle P_{\text{b,krátký}} \rangle = \int_0^{\infty} P_{\text{b,krátký}}(\mu) f_{\text{PN}}(\mu) d\mu, \quad (2.15)$$

kde f_{PN} je pdf_P přijímaného výkonu odpovídající turbulencím, jak bylo deklarováno vztahy (1.20) a (1.21). Pokud uvážíme Gaussovo rozložení přijatého optického výkonu, můžeme vztah (2.14) po úpravě psát ve tvaru

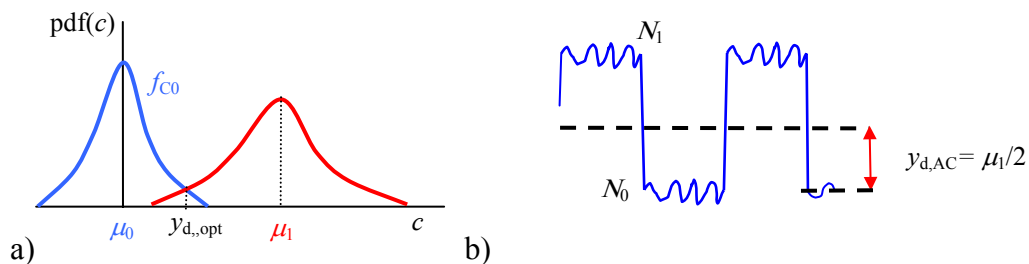
$$P_{\text{b,krátký}}(\mu_1) = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left(-\frac{y_d}{\sqrt{\langle N_0^2 \rangle}} \right) + \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left(\frac{y_d - \mu_1}{\sqrt{\langle N_1^2 \rangle}} \right). \quad (2.16)$$

Je možno vyjádřit podmínku, kdy chybovost BER bude minimální ve tvaru

$$f_{C_0}(y_{\text{d,opt}}) = f_{C_1}(y_{\text{d,opt}}). \quad (2.17)$$

Vztah (2.17) říká, že optimální rozhodovací úroveň je závislá na úrovni přijímaného signálu μ_1 . Vztah (2.17) vede na velmi složitou závislost rozhodovací úrovně na úrovních signálu v jednotlivých logických stavech. V praxi se používá AC vazba, která se kvalitativně příliš neliší od ideálního řízení. Hodnotu rozhodovací úrovně tedy můžeme vyjádřit následovně

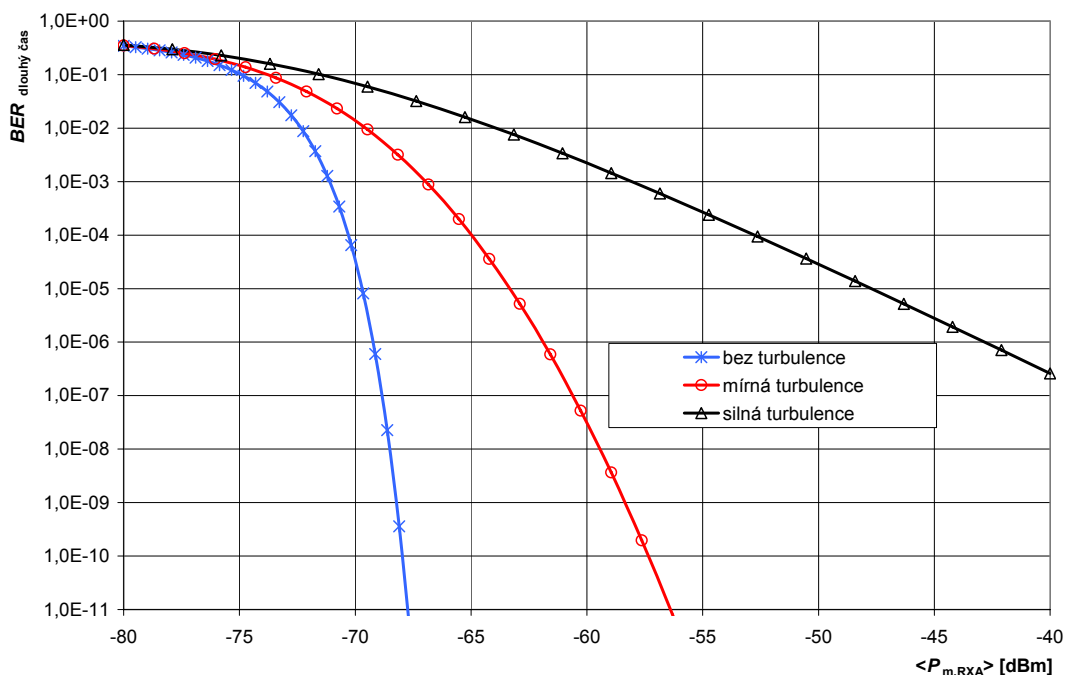
$$y_{d,AC} = \frac{\mu_1}{2}. \quad (2.18)$$



Obr. 2.5. Nastavení rozhodovací úrovně (a), střídavá vazba detektoru (b)

2.3.1 Grafické vyjádření vztahu pro odhad BER

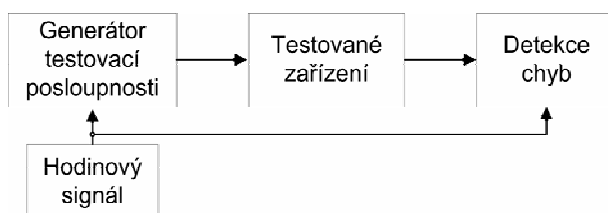
Je uvažována modulace OOK. Ze vztahu (2.16) je možno graficky vyjádřit závislost bitové chybovosti spoje na střední hodnotě přijímaného optického výkonu $\langle P_{m,RXA} \rangle$. Bez turbulentní atmosféry ($P_{b,dlouhý} = P_{b,krátký}$) dostaneme dobře známou křivku pro OOK modulaci [11]. Pro turbulentní atmosféru je však zmíněná křivka odlišná. Závislosti na Obr. 2.6 jsou vztaženy k parametrům: Si PIN fotodioda (proudová citlivost 0,95 A/W) výkon ekvivalentní šumu $NEP = -76$ dBm, šířka pásma přenosu $B = 10$ MHz, $\lambda = 850$ nm, AC vazba. Uvažovány jsou stavy bez turbulence, se slabou turbulencí ($\sigma_p^2 = 0,3$) s lognormálním modelem a se silnou turbulencí ($\sigma_p^2 = 1,05$) s gamma – gamma modelem.

Obr. 2.6. Závislost BER na $\langle P_{m,RXA} \rangle$

2.4 Realizace testeru chybovosti

Měření chybovosti je možno realizovat dvěma způsoby [6]. První způsob, *In-service testing*, je prováděn souběžně s využíváním spoje pro standardní přenos informací. Testovací posloupnosti se vyhradí jeden dílčí kanál (např. 64 kbps), tímto kanálem se přenáší testovací posloupnost dat. Vlastnosti BER nad tímto kanálem můžeme považovat za zastoupení všech dalších kanálů provozovaných ve stejném systému. Je také možnost porovnávat paritní bit. Např. systém SONET/SDH tento bit standardně obsahuje, potom není nutné vyčleňovat další speciální kanál pro testovací posloupnost. Bitová chybovost je určována z užitečných dat. Tento způsob zjišťování chybovosti nám za provozu může poskytovat varování o problémech.

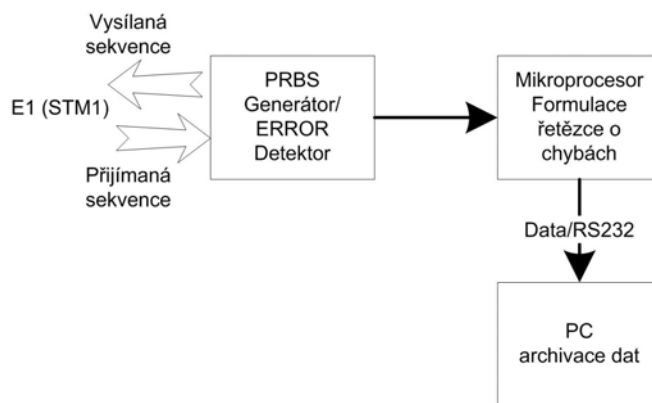
Druhý způsob je *Out-of-service testing*. Spojem přenášíme pouze testovací posloupnost. Tento způsob měření je využíván spíše pro výzkumné a vědecké účely. Zařízení pracující na tomto principu jsou známa pod označením BER tester nebo BERT. Blokové uspořádání BERT je zobrazeno na Obr. 2.7.



Obr. 2.7. Základní schéma BERT

Zařízení BERT obsahuje dvě hlavní sekce: generátor testovací posloupnosti a detektor chyb. Generátor posloupnosti generuje posloupnost bitů dané délky s určenou

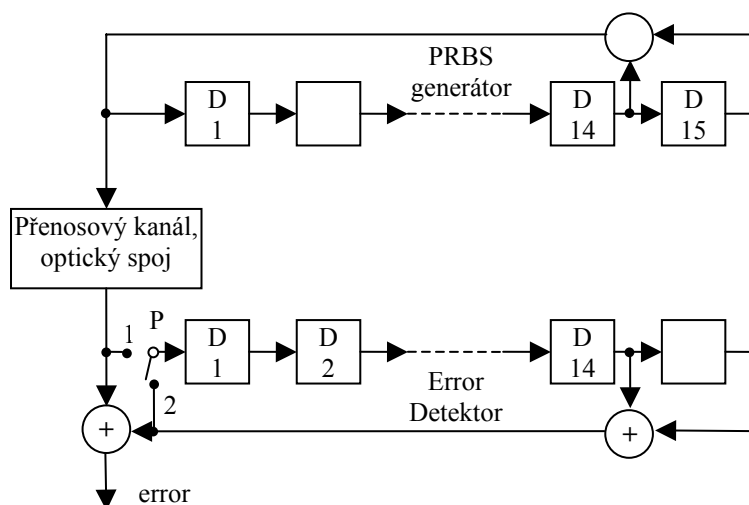
datovou rychlostí. Posloupnost bitů je přenášena komunikačním spojem - tedy testovaným systémem a přijímána jako vstupní data detektorem chyb. Detektor chyb obsahuje vlastní generátor posloupnosti (identický s generátorem testovací posloupnosti) a komparátor, který srovnává každý přijatý bit. Vždy, když dojde k neshodě, je zaprotokolována chyba. Bitová chybovost je závislá na synchronizaci přijímače. Vyvinutý tester (Obr. 2.8) používá stejnou metodu obnovy taktu (stejnou číповou sadu) jako datová rozhraní komerčně dostupných spojů.



Obr. 2.8. Funkční schéma BERT

Tento tester byl navrhnut a zkonstruován pro měření bitové chybovosti systémů s E1 rozhraním. Generátor PRBS (Pseudo Random Bit Sequence) generuje pseudonáhodnou posloupnost dat. Datová rychlost v_i je 2,048Mbps. ERROR detektor se synchronizuje na přijímanou posloupnost nezávisle na použité délce pseudonáhodné posloupnosti. Po přijetí určitého počtu shodných bitů je přijímač označen za synchronizovaný, a je možno začít monitorovat přijímanou chybovost. Pokud je v určité délce datové posloupnosti zaznamenáno více než zvolený počet chybně přijatých bitů, označí se přijímač za nesynchronizovaný a proces synchronizace začíná znovu.

PRBS může být generováno jednoduše pomocí soustavy posuvných registrů se zpětnovazebními odbočkami LFSR (z angl. Linear Feedback Shift Register). Na Obr. 2.9 je ukázáno základní uspořádání PRBS BER testeru.



Obr. 2.9. PRBS generátor a error detektor (zobrazena varianta $2^{15}-1$ sekvence)

Typ generované posloupnosti je definován odbočkami registrů. Strukturu LFSR popisujeme polynomem (2.20). Použitý polynom generující PRBS minimální délky 2^n-1 je v souladu s doporučením ITU-T O.151. Doporučení O.151 je určeno pro testování vysokorychlostních spojů

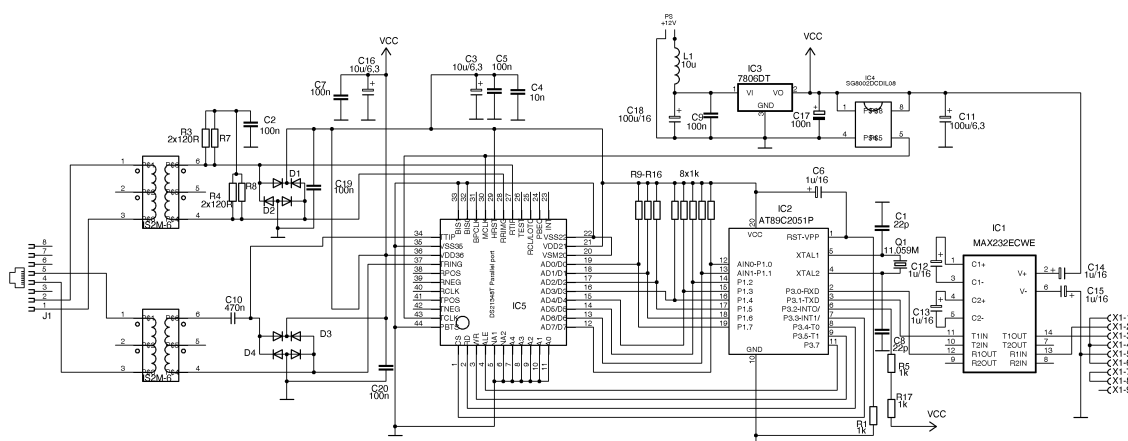
$$2^{15}-1: f_7(x) = 1 + x + x^{15}, 2^{23}-1: f_{23}(x) = 1 + x^5 + x^{23}. \quad (2.20)$$

Můžeme vidět, že PRBS generátor je snadno „přeprogramovatelný“ na jinou sekvenci změnou LFSR odboček. Error detektor obsahuje totožný posuvný registr. Jsou možné dva operační módy:

Samo-synchronizující kontrola (after Westcott) – přepínač P v poloze 1. Detekce chyb je založena na principu násobení reciprokným polynomem. Posuvný registr je postupně plněn přicházející posloupností bitů. Výstup členu XOR negeneruje nový stav registru jako ve smyčce generátoru, ale místo toho porovnává přichází bity. Pokud zde nastane neshoda, pak je označena chyba. V případě chybného bitu je výstup inkrementován o 3. Existuje zde však možnost vzájemného zrušení několikanásobné chyby.

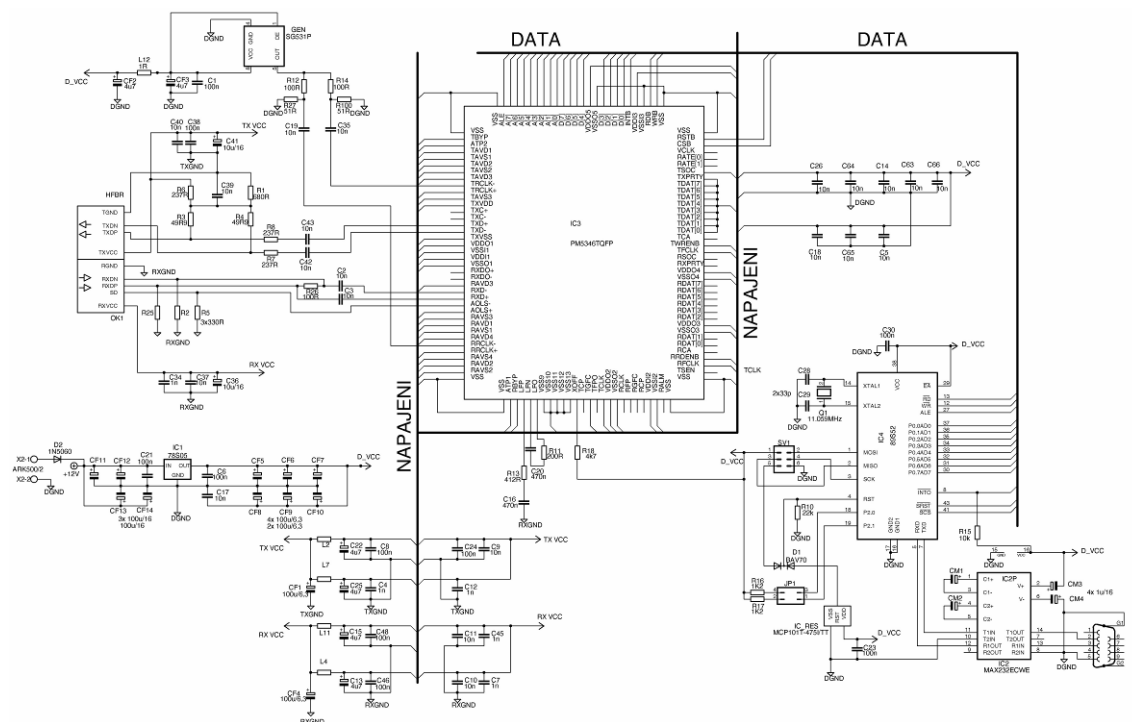
Volně běžící kontrola. Nejdřív je error detektor synchronizován přivedením posloupnosti na vstup LFSR. Pokud je úspěšně detekován dostatečně dlouhý úsek bez chyb, error detektor je přepnut do autonomního módu (přepínač P v poloze 2). Proces synchronizace vyžaduje nízkou hodnotu chybovosti *BER*. Error detektor následně informuje o bitových chybách korektně, dokud je udržena synchronizace.

Informace o chybně přijatých bitech je postoupena mikroprocesoru pro zapsání do řetězce hlášení chyb. Každou sekundu je pak z mikroprocesoru řetězec přenesen po rozhraní RS232 do počítače, kde jsou informace o chybovosti archivovány. Na stejném principu je založen i BERT pro rozhraní STM - 1. Jeho schéma je uvedeno na Obr 2.11.



Obr. 2.10. Konstrukce BERT 2,048 Mbps, E1 rozhraní

Jádro testeru E1 tvoří IC5 nakonfigurován do hardwarového módu [29]. Data z IC5 jsou zapracovávána za pomoci IC2, poskládána do slova a následně pomocí IC1 přenášena do počítače. V počítači jsou data archivována ve formě, jež bude popsána dále. Vstupní obvody tvoří dva miniaturní transformátory, které mají za úkol galvanicky oddělit jednotlivé větve a vhodně transformovat napěťové úrovně.



Obr. 2.11. Konstrukce BERT 155 Mbps, STM - 1 rozhraní

Jádro BERT pro rozhraní STM - 1 je tvořeno IC3, podrobnosti jsou uvedeny v [30]. Vstupní obvody tvoří optočlen OK1, IC4 a IC2 slouží k formulaci přenášeného slova a transportu do počítače.

Časový interval nedostupnosti spoje začíná zaznamenáním 10 silně chybových sekund po sobě jdoucích. Silně chybové sekundy se značí SES (Severely Errored Seconds). Těchto prvních silně chybových 10 s se již počítá jako čas nedostupnosti spoje. Nová perioda dostupnosti začíná 10 bezchybnými sekundami. Bezchybné sekundy se značí NSES (Non-SES). Těchto 10 NSES sekund se započítává do intervalu dostupnosti spoje. Silně chybová sekunda je časový interval 1 s, kdy *BER* překročí danou hodnotu. Chybová sekunda ES (Errored Second) je interval 1 s, kdy nastane jedna nebo více chyb [27]. Celkový čas nedostupnosti t_{un} je sumou dílčích intervalů, kdy spoj nebyl dostupný v průběhu sledovaného intervalu. *BER* za vybraný časový interval následně můžeme stanovit dle vzorce

$$BER = \frac{\sum_{i \in \{UN\}} b_i}{v_i \cdot (N - t_{un})}, \quad (2.21)$$

kde b_i je celkový počet chyb v i -té sekundě a $\{UN\}$ je soubor sekund, kdy spoj byl nedostupný. Hodnota přenosové rychlosti v_i pro spoj s rozhraním E1 je $2,048 \cdot 10^6$ bps. Parametr N je zvolený počet sekund, pro který *BER* vyhodnocujeme. Aby byla stanovena hodnota *BER* vypovídajícím způsobem, musí být splněna podmínka uvedená v kap. 2.2 ($N > t_{meas}$).

Řetězec o hlášení chyb má pro oba typy testerů (E1 i STM - 1) stejnou strukturu.

Ukázka struktury textového řetězce:

EeeeePppppBbbbbbb<CR><LF>,

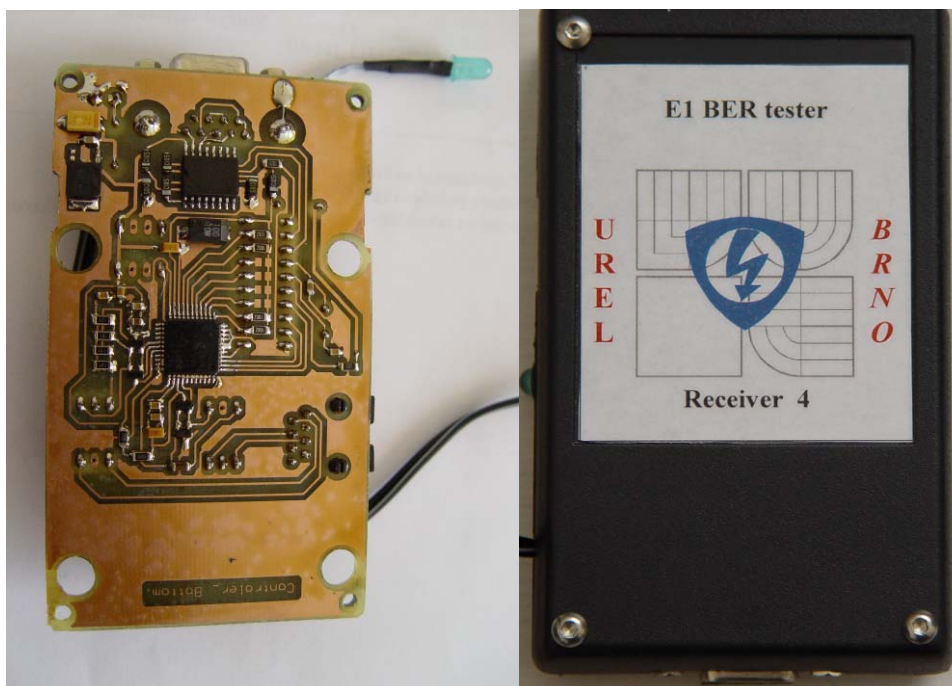
kde:

eeee desítkové číslo udávající počet bloků s alespoň jednou chybou během jedné sekundy (blok představuje při E1 úsek 1ms, tj. 2048 bitů)

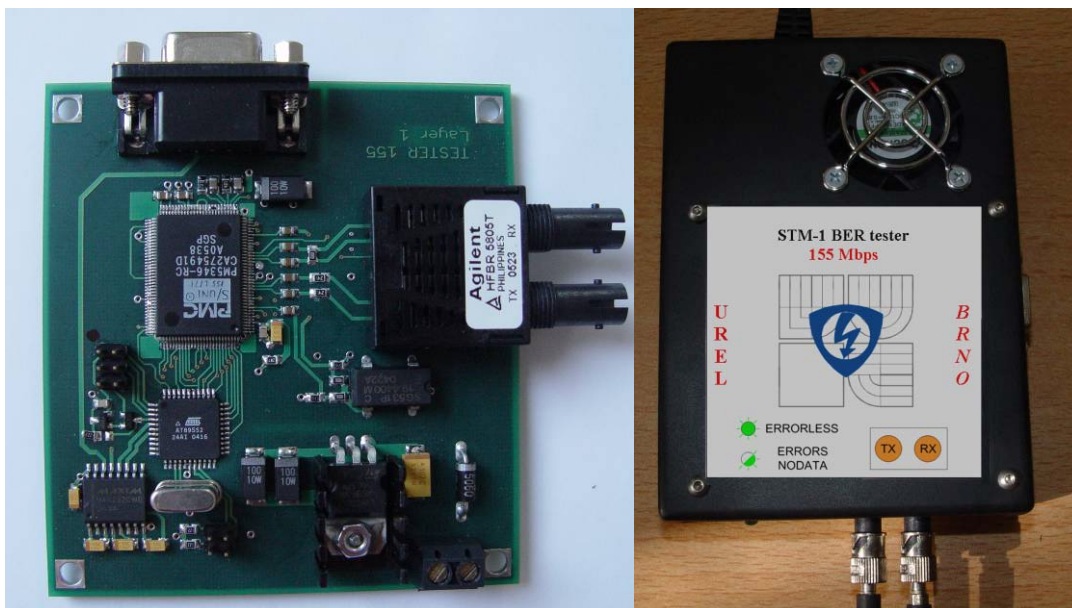
pppp desítkové číslo udává počet milisekundových úseků, kdy přijímač není v synchronizaci (výpadek signálu)

bbbbbb šestnáctkové číslo udává celkový počet chybných bitů během jedné sekundy

Bitová chybovost se měří pouze v případě, kdy je přijímač v synchronizaci. Součet *eeee* + *pppp* může být maximálně 1000. V případě že *eeee* > 0 a současně *pppp* > 0, tak počet chybných bloků *eeee* i bitů se vztahuje k úseku (1000 - *pppp*) milisekund.



Obr. 2.12. Realizace testeru BER E1/T1



Obr. 2.13. Realizace testeru BER STM - 1

2.4.1 Naměřená data bitové chybovosti

Data jsou měřena na optickém spoji provozovaném mezi UFA (Ústav fyziky atmosféry) a ČMI (Český meteorologický institut, lokalita Praha 4). Pro měření dat slouží BERT s rozhraním E1. Jedná se o optický spoj s LED (4x) vysílacím elementem a přijímací PIN fotodiodou. Parametry spoje jsou stručně shrnuty v Tab. 2.2.

Tab. 2.2. Parametry optického spoje firmy CBL

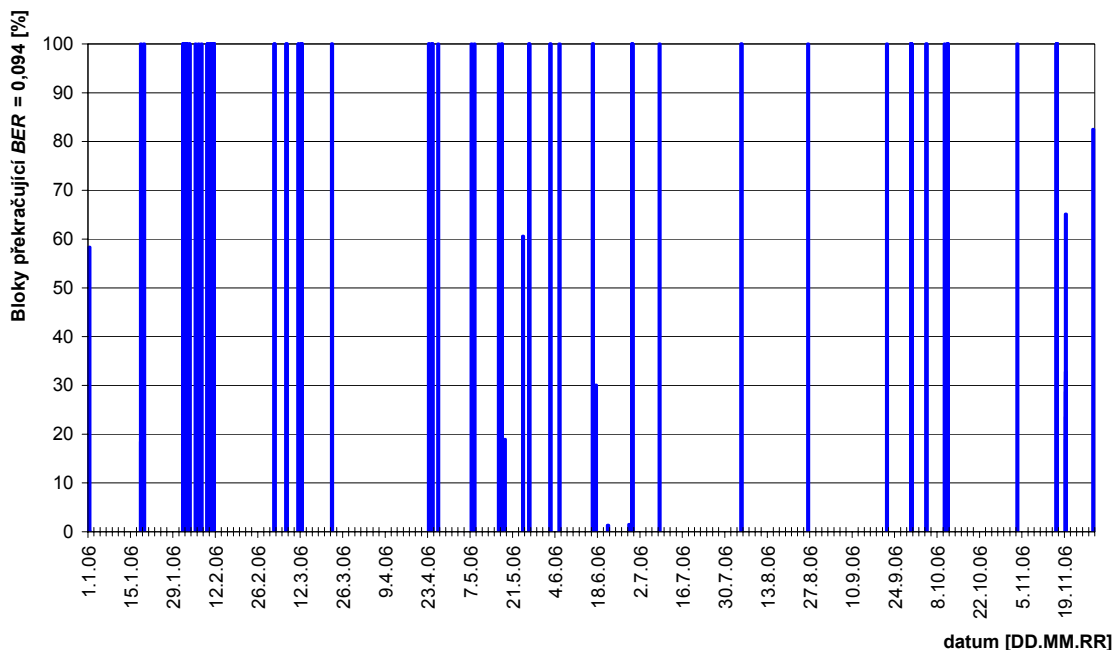
Technická data CBL LaserLink 4E1/800	
λ	850 nm
$P_{m, TXA}$	4x10 mW
$P_{0, RXA}$	-45 dBm @ BER -6
Úhlová šířka svazku ϕ_t	< 10 mrad
D_{RXA}	průměr 257 mm
D_{TXA}	průměr 4 x 60 mm
Dynamický rozsah Δ	48 dB
L_{12}	850 m
Rezerva spoje M při $L_{12} = 850$ m	20 dB
Minimální viditelnost při $L_{12} = 800$ m	470 m

Příklad zaznamenaného řetězce o přijatých chybách:

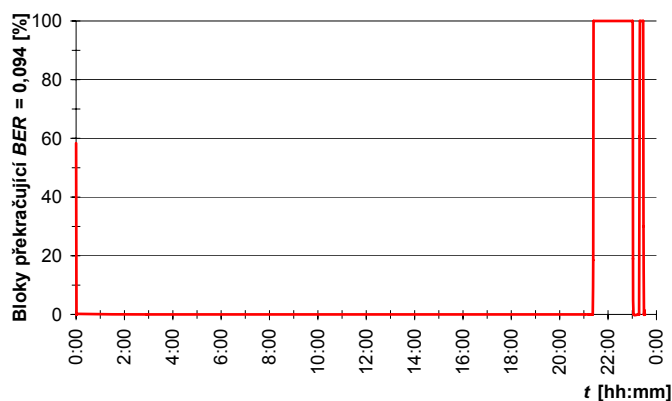
2006 11 03 03 03 54 E0097P0000B000070

Uvedený řádek je ze dne 3. 11. 2006, čas zaznamenání chyb 3:03:54. Spoj pro tuto sekundu vykazoval 97 milisekundových bloků obsahujících alespoň jeden chybný bit, spoj byl celou dobu v synchronizaci, a celkový počet chybných bitů dosáhl 112. Pro zpracování zaznamenaných dat byl napsán krátký skript, který umožňuje vhodné formátování změřených dat a následné prezentování formou grafů.

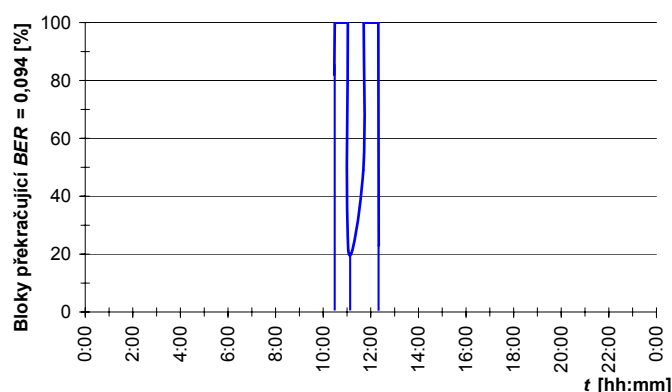
Pro následné grafické vyhodnocení je brána v úvahu doba integrace 60 sekund, tedy $60 \cdot 10^3$ bloků (doba trvání jednoho bloku 1 ms). Data na Obr. 2.14 znázorňují procentuální počet bloků v minutových intervalech, kdy je spoj prohlášen za nedostupný v období 1. 1. 2006 až 31. 11. 2006, kdy nastalo rozpadnutí synchronizace (chybovost vzrostla nad hodnotu 0,094). Pro větší názornost je ukázána identická veličina v kratším časovém úseku. Procentuální počet bloků, kdy hodnota *BER* vzrostla nad hodnotu 0,094 dne 1. 1. 2006 viz Obr. 2.15, následně pro 16. 6. 2006 viz Obr. 2.16.



Obr. 2.14. Procento bloků *BER* > 0,094 od 1. 1. 2006 do 30. 11. 2006

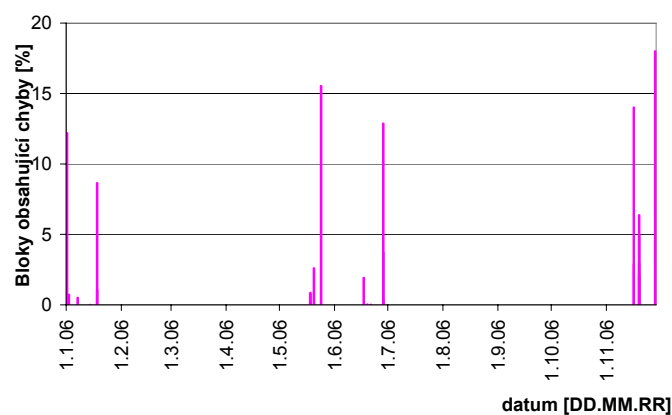


Obr. 2.15. Procento bloků $BER > 0,094$ dne 1. 1. 2006



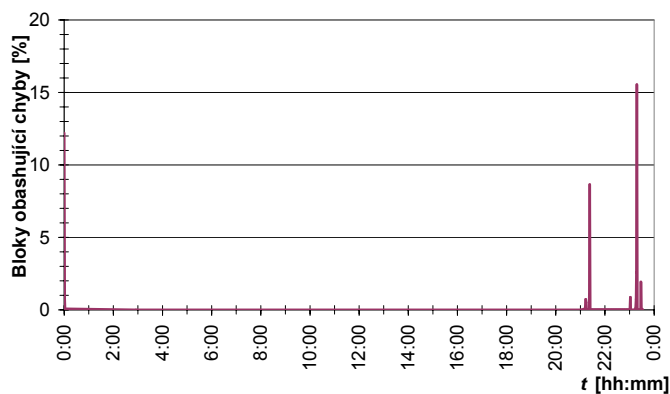
Obr. 2.16. Procento bloků $BER > 0,094$ dne 16. 6. 2006

Z naměřených údajů je rovněž možno stanovit procentuální počet bloků délky 2048 bitů obsahujících alespoň jeden chybný bit (za dobu 60 s). Předpokladem je, že jsou data přenášena spojem synchronizována (bitová chybovost nabývá hodnoty menší než 0,094 po dobu minimálně 10 s). Graf bloků obsahujících alespoň jeden chybný bit (procentuálně za dobu 60 s) za období 1. 1. 2006 až 30. 11. 2006 je zobrazen na Obr. 2.17.



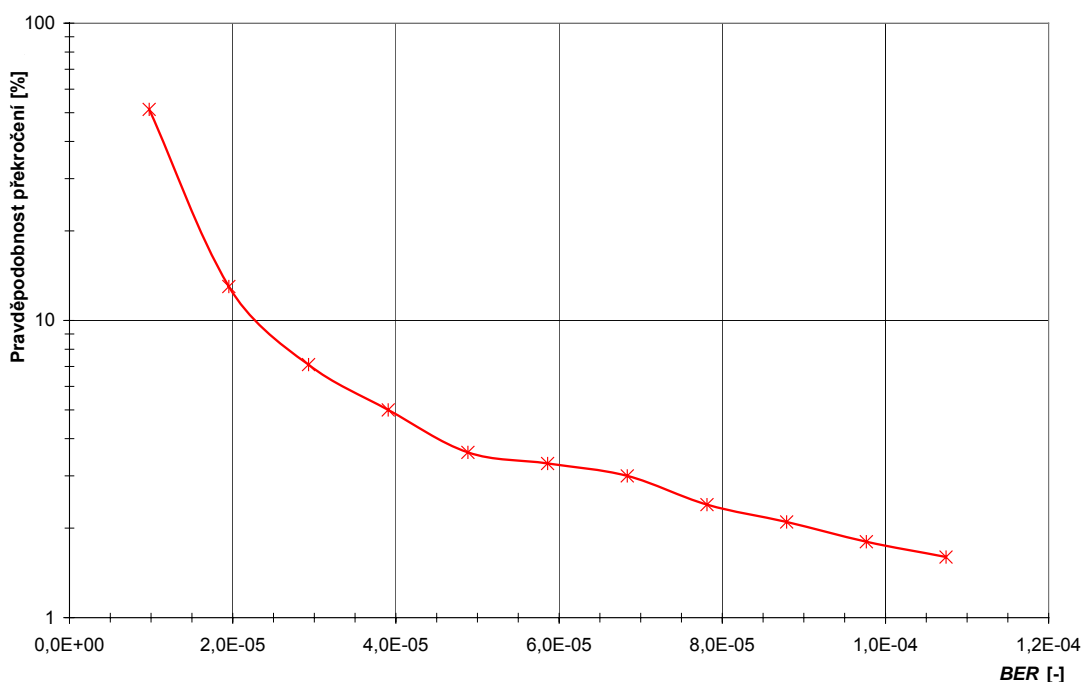
Obr. 2.17. Procento bloků obsahujících alespoň jeden chybný bit

Obr. 2.18 zobrazuje stav, kdy data přenášená spojem jsou v synchronizaci a přitom spoj vykazuje nenulovou hodnotu chybovosti. Tento průběh je ze dne 1. 1. 2006, tedy je možno v porovnání s Obr. 2.15 pozorovat měnící se hodnotu chybovosti, než se spoj prohlásí za nedostupný.



Obr. 2.18. Procento bloků obsahujících alespoň jeden chybný bit dne 1. 1. 2006

Z naměřených dat je možno určit, s jakou pravděpodobností bude překročena zvolená hodnota chybovosti optického spoje, případně s jakou pravděpodobností bude spoj nedostupný. Taková statistika může být užitečná například pro stanovení nutné redundance dat ke korekci vzniklých chyb. Vyhodnocená závislost je na Obr. 2.19.



Obr. 2.19. Pravděpodobnost překročení hodnoty chybovosti

Z grafu je patrné, že nízká hodnota chybovosti nastává s větší pravděpodobností. Je však nutno si uvědomit, že statistika se vyhodnocuje pro $BER < 0,094$. Pokud $BER > 0,094$ (dojde k rozpadu synchronizace), spoj je prohlášen za nedostupný.

Dílčí části této kapitoly byly publikovány [8], [33], [34], [35].

3 Měřicí optický spoj

K posouzení vhodnosti modelů atmosféry uvedených v kap. 1.2.6 je třeba hodnoty útlumů určené z meteorologické viditelnosti V_M porovnat s útlumy skutečnými, působícími na spoj. Pro určení hodnoty atmosférického útlumu ze střední velikosti hodnoty přijímaného optického výkonu bylo nutno vyvinout a realizovat speciální spoj pro monitorování hodnoty RSSI (Received Signal Strength Indication). Dostupné komerční datové optické spoje neumožňují monitorování úrovně přijímaného optického výkonu, neumožňují uživatelské nastavení vysílaného optického výkonu, divergenci svazku, nebo nedisponují přijatelným dynamickým rozsahem přijímače atd. Vyvíjený měřicí spoj, popsáný v následující části, umožňuje zmíněné parametry měnit a přizpůsobit tak spoj podmínkám umístění na vybraném monitorovacím místě. Měření hodnoty útlumu atmosféry bude probíhat ve stejné lokalitě, jako monitorování V_M .

V této kapitole bude podrobněji rozebrána problematika návrhu testovacího OBS. Bude demonstrována nejen vlastní metodika návrhu OBS, ale následně i realizace spoje pro měření úrovně přijímaného optického výkonu. Účelem konstrukce zařízení je vytvořit podmínky pro sledování a zaznamenávání parametrů potřebných pro stanovení statistických vlastností atmosféry.

3.1 Návrh měřicího spoje ATMO TL - 01

Jedná se o plně duplexní digitální testovací optický spoj pracující v pásmu NIR (Near Infra Red). Na tomto testovacím spoji bude probíhat monitorování statistiky přijatého optického výkonu (pomocí RSSI), z jehož hodnoty je možno určit náhodný útlum atmosféry. Tento spoj je navíc možno vybavit BERT pro monitorování bitové chybovosti spoje BER . Spoj pracuje s datovou rychlostí $v_i = 155$ Mbps.

Parametry prvků optického spoje jsou stručně shrnuty v tab.3.1.

Tab. 3.1. Parametry testovacího spoje ATMO TL-01

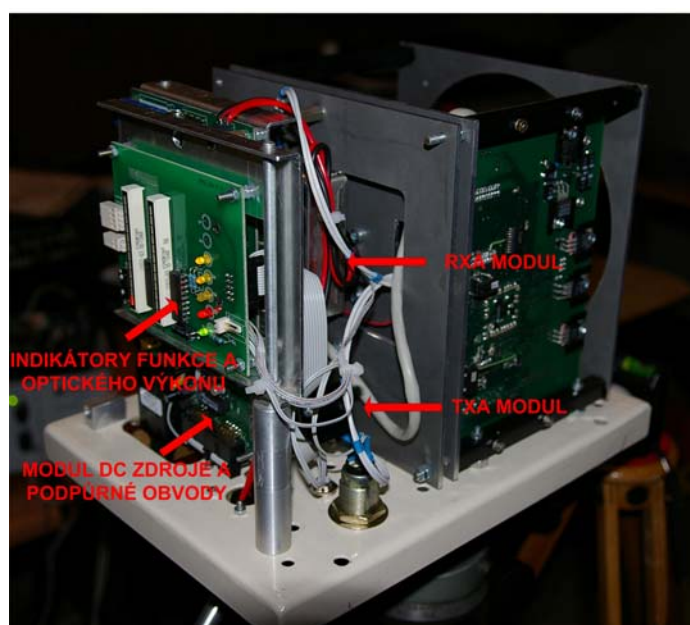
Technická data ATMO TL-01	
Délka vlny λ	830 nm
Střední výkon vysílače $P_{m, TXA}$	10 mW
Průměr vysílací apertury D_{TXA}	60 mm
úhlová šířka svazku ϕ_t	8 mrad
Průměr přijímací apertury D_{RXA}	150 mm
Fotodioda APD	$S_{FD} = 0,2 \text{ mm}^2$
Citlivost přijímače $P_{0, RXA}$	-45 dBm @ BER -6
Dynamický rozsah Δ	20 dB
Délka spoje L_{12}	800 m

Energetická bilance spoje ATMO TL - 01 je uvedena v příloze. Podrobněji jsou zde popsány parametry použité pro návrh. Energetickou bilanci spoje lze považovat za stacionární model spoje.

3.1.1 Realizace měřicího spoje ATMO TL - 01

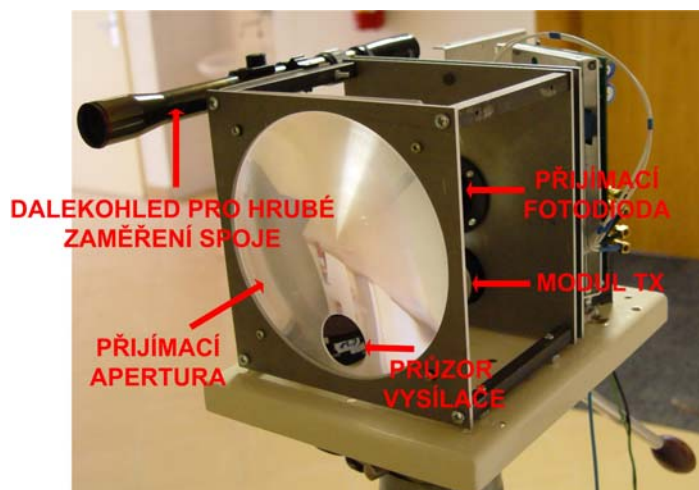
Měřicí spoj ATMO TL - 01 byl realizován na základě spočtené energetické bilance. Spojem je přenášena pseudonáhodná bitová posloupnost (PRBS) s datovou rychlostí $v_i = 155$ Mbps. Duplexní optická hlavice je napájena externě (12V AC, 24 VA). Z přijímače je vyveden signál RSSI pro monitorování úrovně přijímaného optického výkonu. Hodnota napětí RSSI je vzorkována (s vzorkovací periodou 15 minut) a zaznamenávána. Dále je možno osadit BERT s rozhraním STM - 1.

Na Obr. 3.1 je patrné uspořádání jednotlivých elektronických bloků uvnitř optické hlavice.



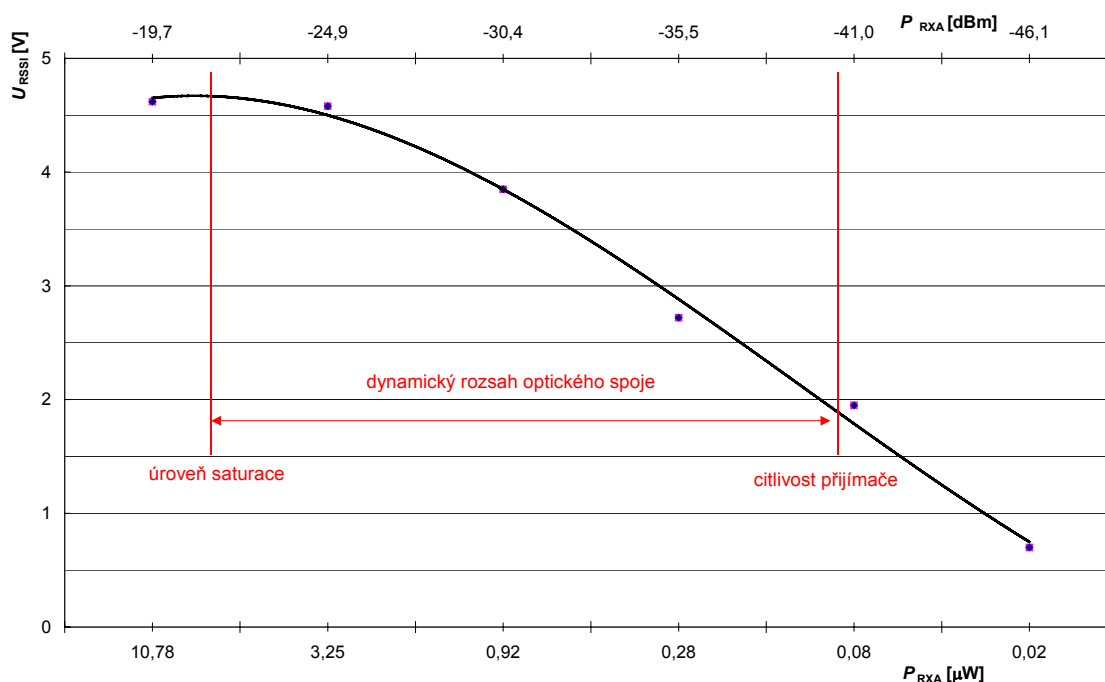
Obr. 3.1. Elektronické bloky optické hlavice ATMO TL - 01

Na Obr. 3.2 je znázorněno uspořádání optické části hlavice.



Obr. 3.2. Optická apertura optické hlavičky ATMO TL - 01

Pro realizovaný spoj byla změřena závislost hodnoty napětí RSSI na hodnotě optického výkonu dopadajícího na RXA (viz Obr. 3.3). Z křivky dynamiky je možno určit citlivost přijímače a hodnotu optického výkonu, kdy dochází k saturaci. Citlivost odpovídá hodnotě dopadajícího optického výkonu -40 dBm, saturace nastává při příjmu optického výkonu hodnoty -21 dBm. Je možno odhadnout dynamický rozsah spoje 19 dB (v optické oblasti). V oblasti elektrických veličin dynamický rozsah nabývá dvojnásobné hodnoty [21].



Obr. 3.3. Změřená závislost napětí RSSI na optickém výkonu dopadajícím na aperturu RXA ATMO TL - 01

Testovací spoj ATMO TL – 01 umožňuje monitorovat úroveň přijímaného optického výkonu. Na tomto spoji jsme schopni testovat pomocí BERT STM - 1 hodnotu bitové

chybovosti BER . Porovnání dat o bitové chybovosti a přijímaném výkonu na jednom spoji umožňuje sestavit křivku závislosti BER na CNR pro daný spoj (viz kap. 2.3.1).

Závislost útlumu atmosféry je však podle modelů uvedených v kap. 1.2 spektrálně závislá. Z dat získaných pomocí spoje ATMO TL – 01 nejsme schopni ověřit vhodnost použití jiných vlnových délek pro komunikaci ve volné atmosféře. Pro takové srovnání je nutno realizovat OBS pracující za stejných podmínek pouze na rozdílných vlnových délkách. Tento podnět byl důvodem realizace spoje s označením ATMO TL – 02_DUAL.

3.2 Návrh duálního měřicího spoje ATMO TL - 02_DUAL

Jedná se o simplexní digitální duální (ve smyslu dvou vlnových délek) testovací optický spoj určený pro měření dvou vlnových délek, v našem případě se jedná o vlnové délky 830 nm a 1550 nm. Tento spoj umožňuje srovnání vlivu atmosféry na komunikaci optickým svazkem s různou vlnovou délkou záření. Energetická bilance navrhovaného spoje je přiložena jako příloha.

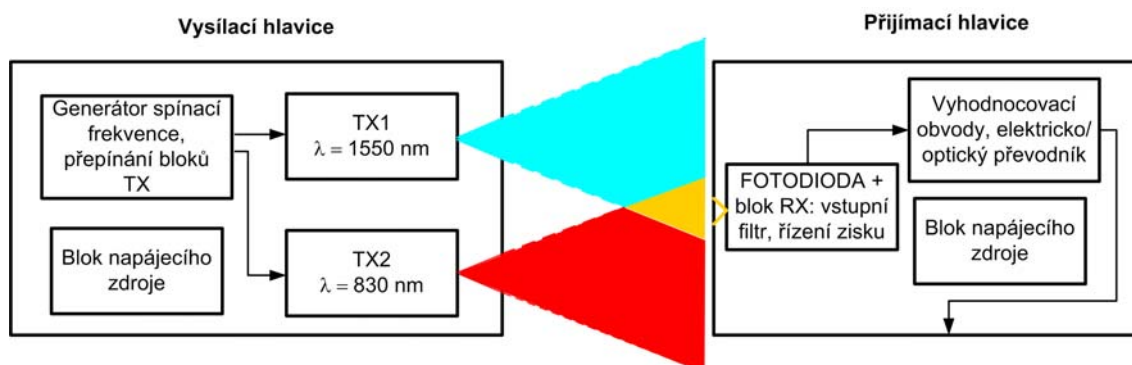
Tab. 5.2. Parametry prvků ATMO TL - 02_DUAL

Technická data ATMO TL - 02_DUAL	
Laserová dioda 1	RLT1550-15G/max 15mW
Délka vlny λ_1	1550 nm
Střední vysílaný výkon $P_{1m, TXA}$	7 mW
Laserová dioda 2	DL5032/max 40mW
Délka vlny λ_2	830 nm
Střední vysílaný výkon $P_{2m, TXA}$	12 mW
Úhlová šířka svazku ϕ_i	10 mrad
Průměr vysílací apertury D_{TXA}	2 x 25,4 mm
přijímací prvek	FGA10/ $S_{FD} = 0,81 \text{ mm}^2$
Průměr přijímací apertury D_{RXA}	60 mm
Dynamický rozsah Δ	45 dB
Délka spoje L_{12}	60 m

3.2.1 Koncepce jednotlivých bloků

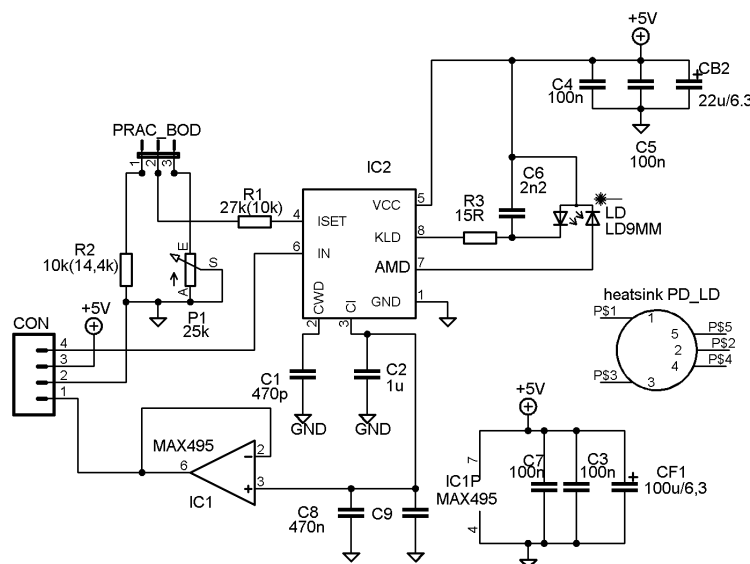
Testovací optický spoj ATMO TL - 02_DUAL se skládá z hlavičky vysílací a hlavičky přijímací. Vysílací hlavičky obsahuje dva moduly laserů, jeden s laserovou diodou zářící na $\lambda_1 = 1550 \text{ nm}$, druhý s laserovou diodou zářící na $\lambda_2 = 830 \text{ nm}$. U vysílací hlavičky musíme zajistit možnost nastavení rovnoběžnosti obou os optických svazků. Laserové moduly jsou ovládány za pomoci modulu řízení vysílače. Modul řízení vysílače

zajišťuje generování modulačního kmitočtu (řádově kHz) a přepínání laserových modulů s periodou přibližně 15 s. Blokové schéma spoje je znázorněno na Obr. 3.4.



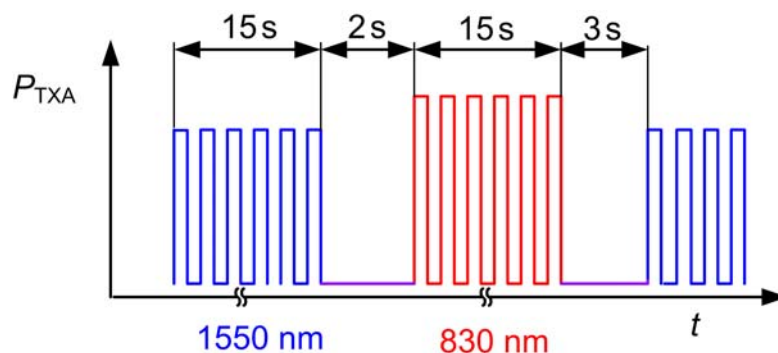
Obr. 3.4. Blokové schéma duálního spoje

Vysílací hlavice obsahuje dva identické moduly laserů zobrazených na Obr. 3.5. Pro zvolený způsob modulace je velmi vhodný typ budiče ICWJ [39].



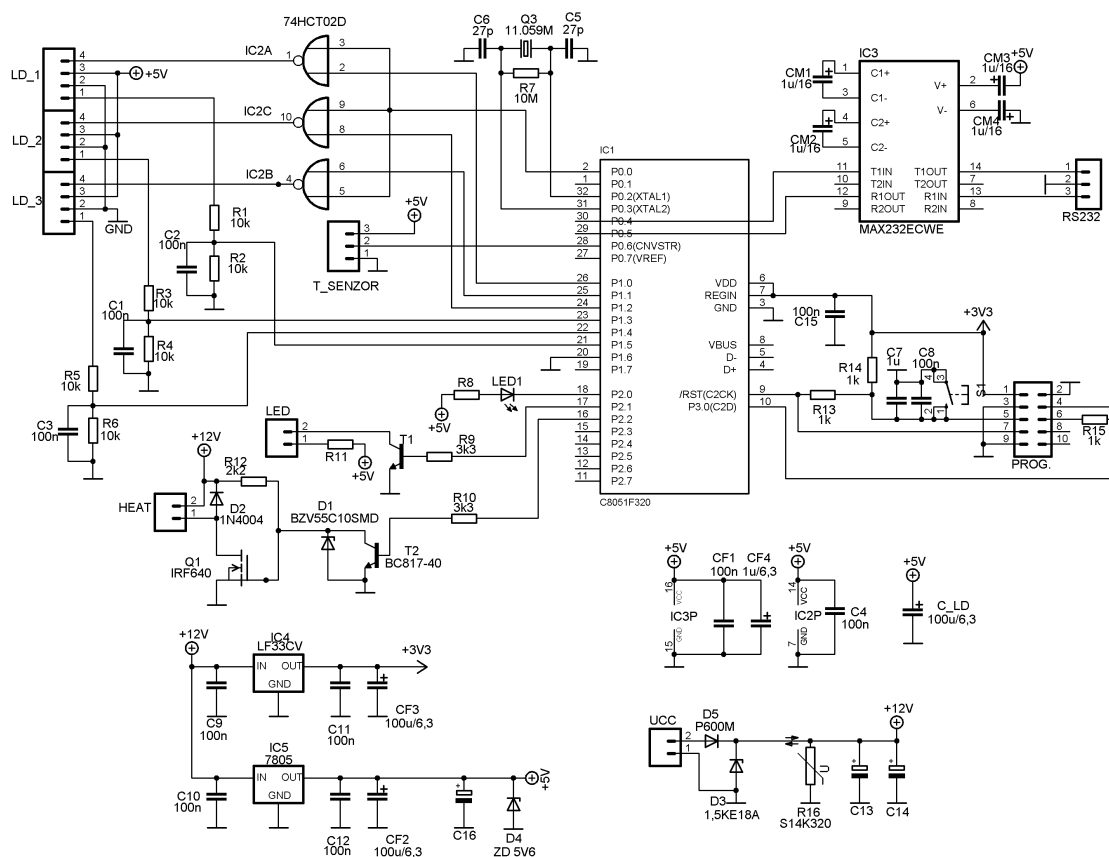
Obr. 3.5. Schéma bloku budiče laseru

Blok budiče laseru obsahuje tři hlavní obvodové prvky: IC1, IC2 a LD. LD je laserová dioda emitující záření na příslušné vlnové délce. IC2 zajišťuje nastavení pracovního bodu LD za pomoci R1, R2 (pro prvotní nastavení P1) a modulaci daty přivedenými z modulu řízení. Navíc je IC2 schopen monitorovat aktuální emitovaný optický výkon. Tento údaj je za pomoci IC1 výkonově posílen pro účely zpracování na desce řízení vysílače. Vysílací moduly jsou periodicky uváděny v činnost s periodou přibližně 20 s. Spektrální závislost citlivosti fotodiody umožňuje použít v pásmu 1550 nm menšího emitovaného výkonu. Podle délky prodlevy mezi detekcí optického signálu je možno rozeznat, která vlnová délka je aktuálně emitována. Na Obr. 3.6 je ukázána funkce přepínání modulů.



Obr. 3.6. Princip přepínání vlnových délek

Na Obr. 3.7 je vykresleno schéma modulu řízení vysílače.



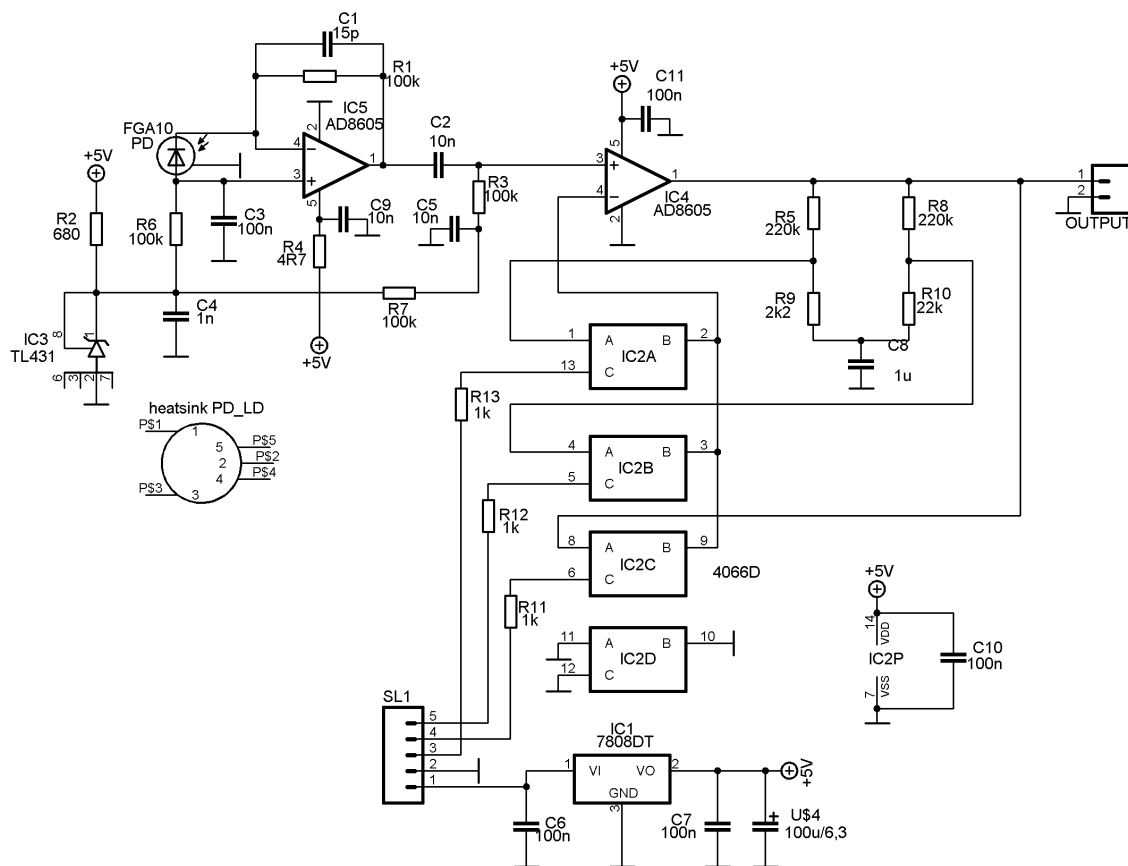
Obr. 3.7. Schéma modulu řízení vysílače

Modul řízení vysílače obsahuje obvody řízení, obvody signalizace a obvody pro zajištění napájení. Napájení je řešeno standardními lineárními stabilizátory. Obvody signalizace jsou tvořeny LED pro upozornění na vzniklou závadu ve funkci optického vysílače. Na DPS je navíc umístěn spínací prvek Q1 pro možnost vyhřívání průzoru vysílače z důvodu možnosti zamlžení. Jeho činnost může být řízena na základě podnětu teplotního čidla, jiný princip by byl zbytečně náročný na konstrukci. Srdce modulu tvoří mikroprocesor IC1 s přílehlými obvody. Pro potřeby programování je zařazen IC3. Obvod IC2 zajišťuje uvedení v činnost vybraného laserového modulu. Naopak z laserových modulů je na tuto desku přiveden signál o aktuálním emitovaném optickém výkonu. Tento signál je napětovým děličem upraven na hodnoty, které je mikroprocesor schopen zpracovat. Tak jsme schopni posoudit, zda jsou jednotlivé LD

v pořádku. Je možno připojit až 3 moduly vysílačů současně, použity jsou prozatím pouze dvě vlnové délky.

Přijímací hlavice je mechanicky tvořena obdobně, jako hlavice vysílací. Fotodioda PIN je umístěna na malém modulu (Obr. 3.8) obsahujícím některé nezbytné obvodové prvky pro dosažení velkého dynamického rozsahu měření. Předpokládá se, že detekovaný signál bude ovlivněn velkou mírou mlhami s útlumem řádu stovek decibelů na kilometr (viz kap. 1.2).

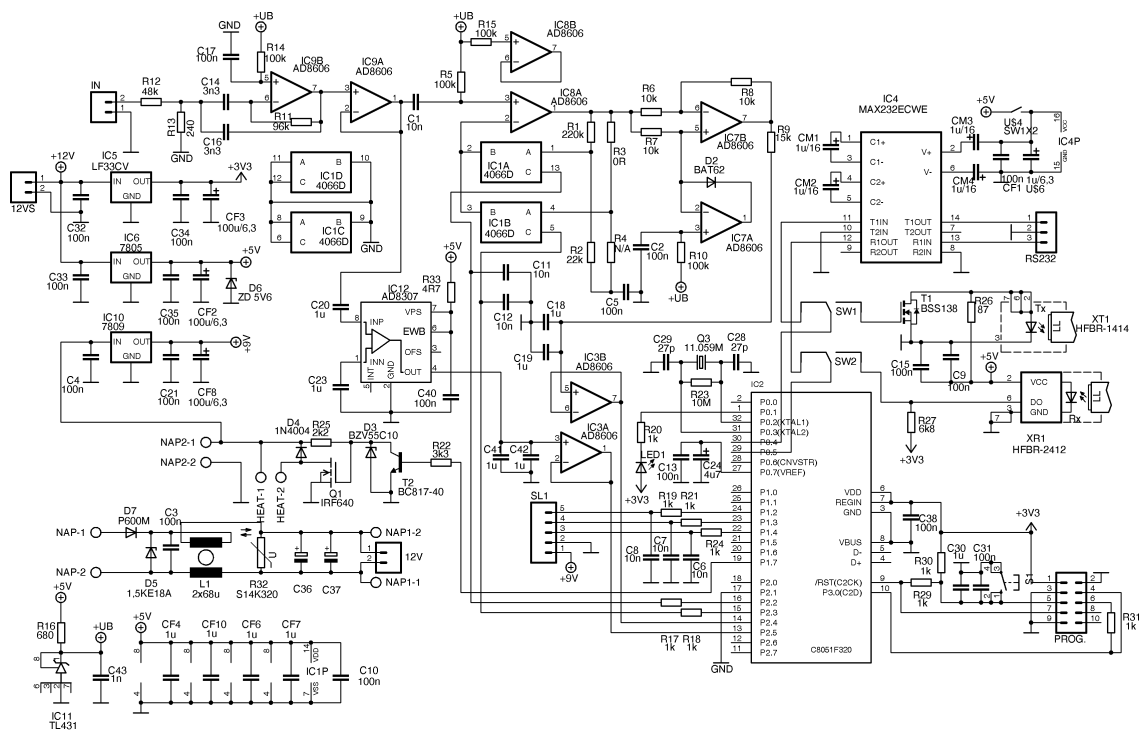
Na Obr. 3.8 je vykresleno schéma modulu přijímače.



Obr. 3.8. Schéma modulu přijímače

Hlavní částí modulu jsou: přijímací fotodioda, vstupní filtr, zesilovač s řízeným zesílením a napájecí obvod. Napájecí obvod je opět z důvodu jednoduchosti a dostačující účinnosti řešen lineárním stabilizátorem. Navíc je zde použita napěťová reference IC3, což umožňuje použít nesymetrické napájení celého modulu. IC5 ve svém zapojení tvoří vstupní filtr pro omezení šumu v dalším zpracování signálu. IC4 spolu s IC2 tvoří zesilovač s proměnným zesílením. Tím jsme schopni dosáhnout dostatečné úrovně elektrického signálu pro přenos signálu metalickým vedením k dalšímu modulu i při velmi nízké hodnotě přijímaného signálu optického.

Obr. 3.9 zachycuje poslední důležitou elektronickou část řetězce OBS, tím je řízení modulu přijímače.



Obr. 3.9. Schéma modulu řízení přijímače

Blok řízení přijímače je tvořen několika obvody: mikroprocesorem vyhodnocujícím úroveň přijatého signálu, obvody úpravy napětového rozsahu vstupního signálu, následně zesilovačem s velkým dynamickým rozsahem, zesilovačem s proměnným zesílením a obvody podpůrnými pro programování procesoru a komunikaci hlavice s okolím. Napájecí obvody jsou tvořeny lineárními stabilizátory, dalšího komentáře není třeba. Část obvodu tvořená IC9 slouží k úpravě napětových úrovní přijatého signálu, opět je použito napětové reference IC11 pro možnost nesymetrického napájení tohoto obvodu a obvodů pomocných. Následuje logaritmický operační zesilovač IC12 s dynamickým rozsahem 90 dB (což dává výsledný dynamický rozsah 45 dB v oblasti optické), souběžně je možné za pomoci obvodů IC1, IC8 a IC7 sledovat úroveň přijatého optického signálu v lineárním měřítku. Pro potřeby programování a datového navázání přijímací hlavice k dalším zařízením je zařazen obvod IC4 spolu s částí elektro/optických převodníků XT1, XR1. Předpokladem je, že hlavice bude s monitorujícím a zaznamenávacím počítačem propojena pomocí optického vlákna na rozhraní XT1. Důvodem je lokalita umístění spoje a možná indukce nežádoucích napětí do vedení metalického.

4 Experimentálně stanovená data útlumu atmosféry

V této kapitole je prezentováno zpracování monitorovaných dat RSSI, meteorologické viditelnosti a útlumu atmosféry. Dílčí části této kapitoly jsou členěny podle veličiny, která je blíže analyzována. Mezi hlavní veličiny ovlivňující komunikaci v atmosféře patří náhodný útlum určený z meteorologické viditelnosti v souladu s kap. 1.2.6. Veličiny RSSI a doba nedostupnosti spoje jsou monitorovány pomocí speciálních vyvinutých zařízení, blíže popsanych v kapitolách 2 a 3.

4.1 Útlum atmosféry určený z meteorologické viditelnosti

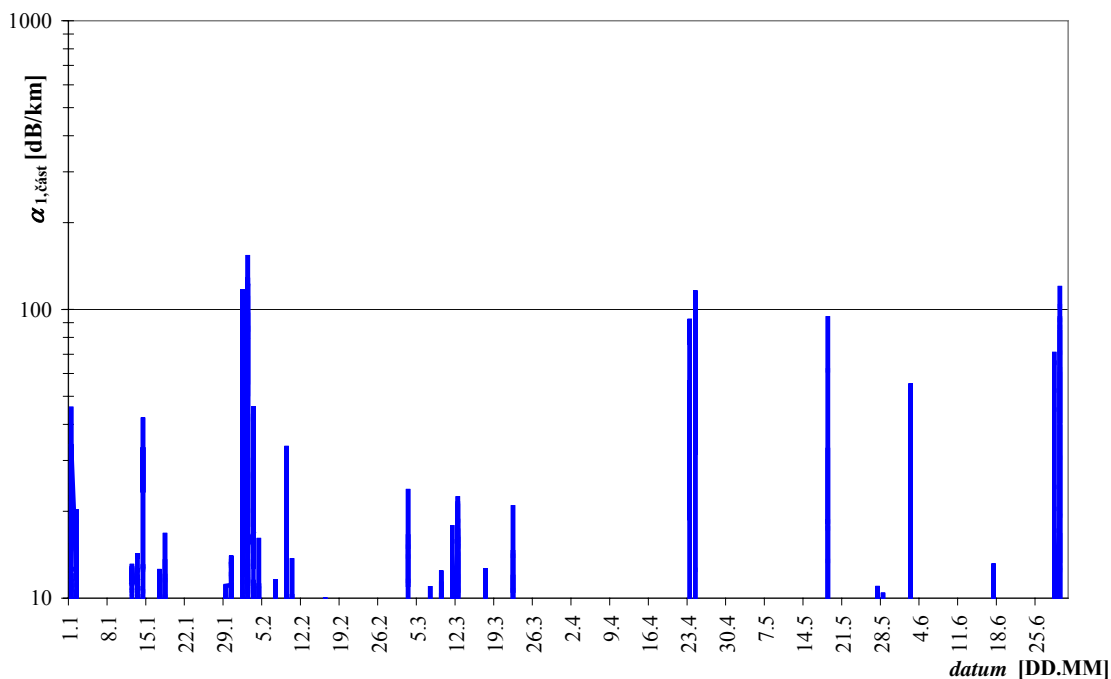
V této části jsou vyhodnocena naměřená data meteorologické viditelnosti. Pro stanovení hodnoty útlumu atmosféry je vybrán tzv. Kimův model [7]. Meteorologická viditelnost byla monitorována automaticky s periodou 15 minut. Hodnota meteorologické viditelnosti byla průměrována za celou periodu měření.

Základní data pro určení rozložení hustoty pravděpodobnosti náhodného útlumu atmosféry jsou monitorována v lokalitě umístění měřicího optické spoje (ČMI, Praha 4, Spořilov). Meteorologickou viditelnost zaznamenává zařízení Vaisala PWD10 [40]. Ze zaznamenaných hodnot meteorologické viditelnosti je podle (1.24) možno určit hodnotu útlumu atmosféry vyvolanou rozptylem na částicích. Zařízení Vaisala je schopno měřit meteorologickou viditelnost v rozsahu $10 < V_M \leq 2000$ m. Interval hodnot teoreticky vypočteného koeficientu útlumu $\alpha_{1,\text{část}}$ je omezen rozsahem hodnot meteorologické viditelnosti, kterou je dohledoměr PWD10 schopen zaznamenat. Rozsah $\alpha_{1,\text{část}}$ tedy leží v intervalu hodnot 8,5 dB/km až 1304 dB/km. Koeficient útlumu byl podle Kimova modelu určen pro délku vlny $\lambda = 830$ nm.

Příklad zaznamenaného řádku dat:

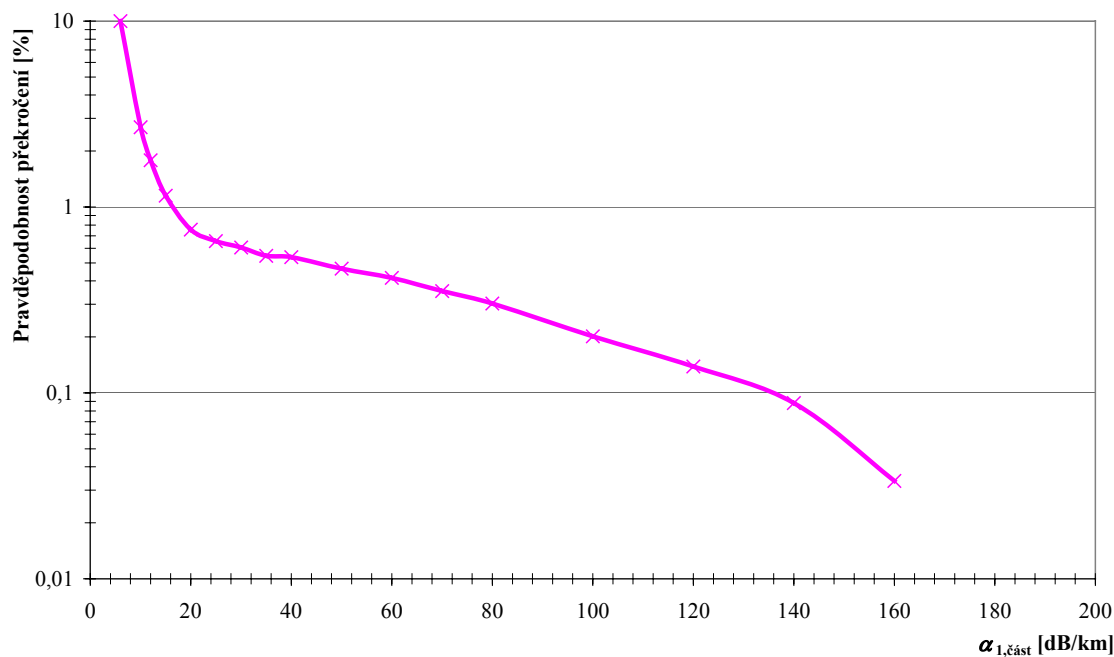
1.1.2006	00:00	1091	1225	0,4
----------	-------	------	------	-----

Uvedený řádek je z 1. 1. 2006, čas 0:00. Okamžitá hodnota meteorologické viditelnosti měla hodnotu 1091 m. Průměrná hodnota meteorologické viditelnosti (za posledních 15 min) nabývala hodnoty 1225 m. Teplota okolí byla 0,4°C. Podle vzorců (1.24) a (1.26) je možno z uvedených dat určit teoretickou hodnotu koeficientu útlumu atmosféry $\alpha_{1,\text{část}} = 14,8$ dB/km (pro $\lambda = 830$ nm). Je možné odhadnout (viz Tab. 1.3), že se jedná o hodnotu koeficientu útlumu odpovídající střední mlze. Ze změřených hodnot je možné zobrazit graf odpovídajících koeficientů útlumů na částicích pro období 1. 1. 2006 až 31. 6. 2006 viz Obr. 4.1. Charakter grafu na Obr. 4.1 je daný měřítkem časové osy a omezeným rozsahem dohledoměru PWD10.



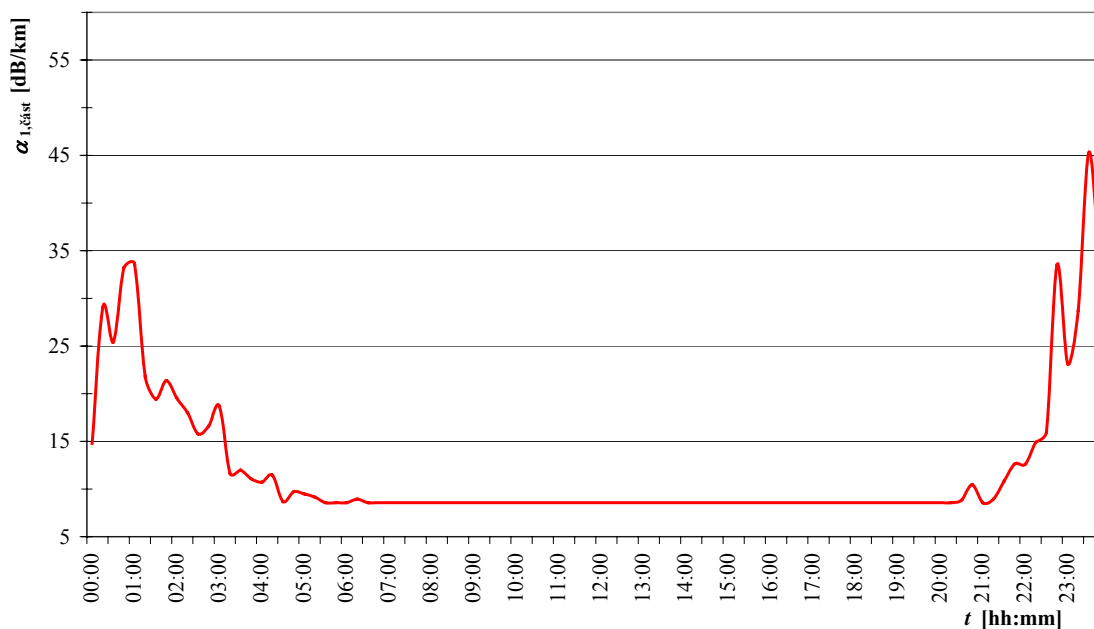
Obr. 4.1. Časové rozložení koeficientu útlumu atmosféry způsobeného rozptylem na částicích (1.1.2006 až 30.6.2006)

Dalším krokem zpracování dat je stanovení hodnoty pravděpodobnosti, se kterou bude překročena určitá hodnota koeficientu útlumu atmosféry. Na Obr. 4.2 je uvedena závislost pravděpodobnosti překročení koeficientu útlumu pro $\lambda = 830$ nm.

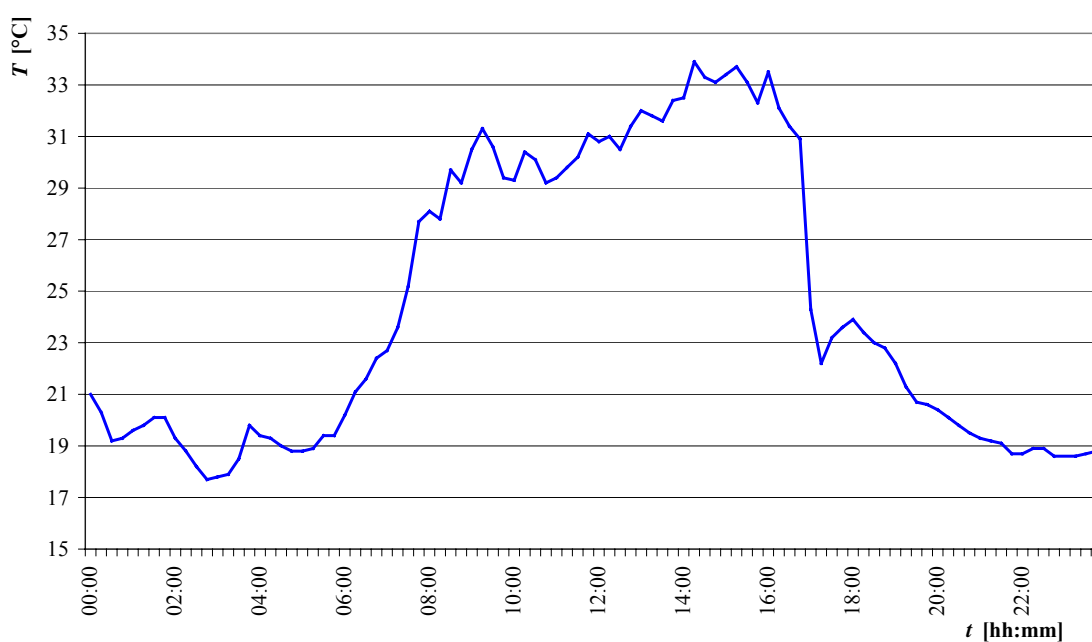


Obr. 4.2. Pravděpodobnost překročení dané hodnoty koeficientu útlumu atmosféry

Zajímavé je pro vybraná období porovnat aktuální vlastnosti atmosféry - hodnoty koeficientu útlumu atmosféry a teploty s hodnotou chybovosti *BER*. (prezentované na Obr. 2.15, 2.16, kap. 2.3.1) Na Obr. 4.3 je zobrazeno rozložení koeficientu útlumu $\alpha_{1,část}$ ze dne 1. 1. 2006.



Obr. 4.3. Hodnota koeficientu útlumu atmosféry v průběhu 1.1.2006



Obr. 4.4. Teplota okolní atmosféry ze dne 16. 6. 2006

Porovnáním chybovosti optického spoje měřené dne 1. 1. 2006 a 16. 6. 2006 (kap. 2.3.1 viz Obr. 2.15, Obr. 2.16) s hodnotou koeficientu útlumu (Obr. 4.3) a teploty atmosféry (Obr. 4.4) je možno dospět k závěru, že metoda odhadu dostupnosti optického spoje na základě meteorologické viditelnosti [24] není zcela přesná. Na Obr. 2.15 je patrné, že nedochází k zvýšení chybovosti v časných hodinách dne 1. 1. 2006, jak by odpovídalo průběhu hodnoty koeficientu útlumu atmosféry na Obr. 4.3. Naopak, dne 16. 6. 2006 v poledních hodinách nabývá hodnota koeficientu útlumu minimální hodnoty (8,5 dB/km), a přesto dochází v tomto období k poměrně velké chybovosti.

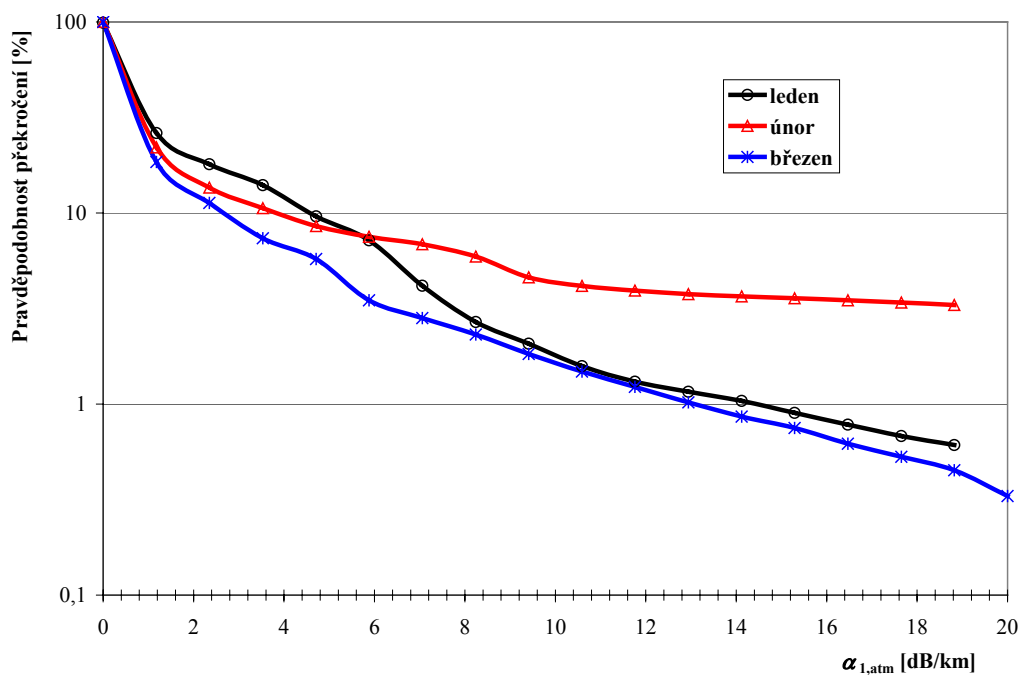
Vysvětlení pozorovaného jevu může být následující: Mechanismus vyvolávající zvýšení chybovosti spoje nespočívá jen ve zvýšení atmosférického útlumu aerosoly. Dalšími jevy, které zvyšují chybovost spoje, jsou vzrůst fluktuace přijímaného optického výkonu vlivem atmosférické turbulence projevující se zejména za jasných slunečných dnů, popřípadě částečné odsměrování optického svazku apod. Uvedené poznatky potvrzují nutnost sledovat vedle meteorologické viditelnosti i mechanismus, kterým je meteorologická viditelnost snižována.

4.2 Útlum atmosféry stanovený z RSSI

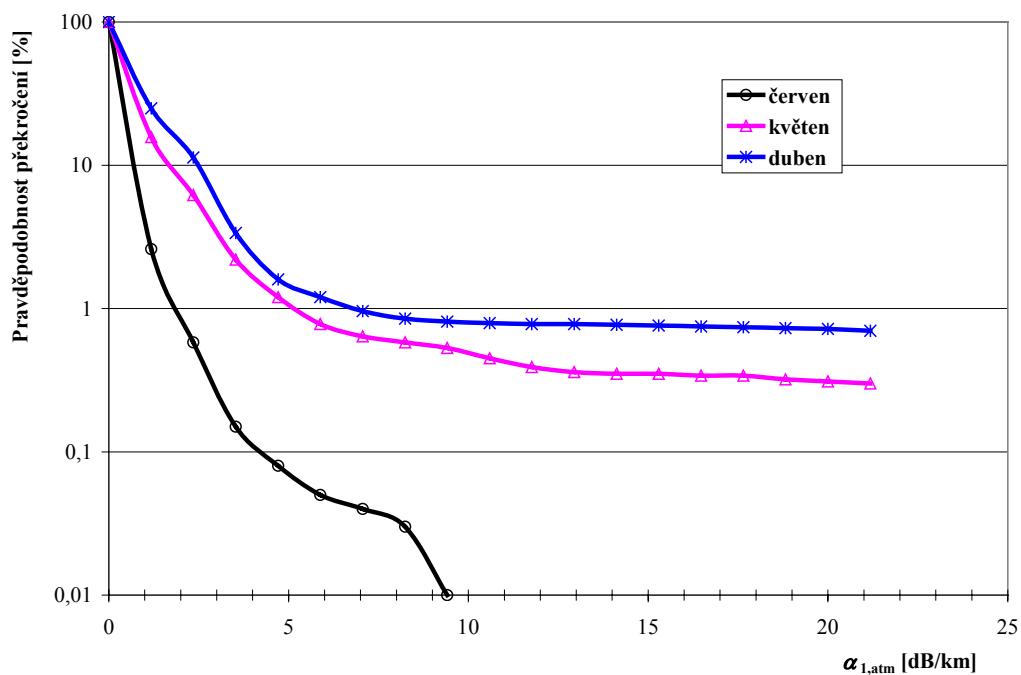
K určení hodnoty koeficientu útlumu atmosféry je v této kapitole využito dat o hodnotě přijímaného optického výkonu na měřicím spoji. O přijímaném optickém výkonu nás informuje hodnota RSSI signálu. Z hodnot přijatého optického výkonu je stanoven útlum atmosféry α_{atm} . Hodnota útlumu α_{atm} odpovídá rozdílu mezi naměřenou hodnotou RSSI při úniku a hodnotou RSSI odpovídající čisté atmosféře. Relativní hodnoty byly získány po kalibraci spoje. Aby bylo možno hodnoty α_{atm} získané z RSSI kvantitativně porovnat s hodnotami koeficientu útlumu $\alpha_{1,\text{část}}$, získanými z meteorologické viditelnosti, je nutné hodnotu α_{atm} normovat pro délku spoje L_{12}

$$\alpha_{1,\text{atm}} = \frac{\alpha_{\text{atm}}}{L_{12}}, \quad (4.1)$$

tímto postupem získáme koeficient útlumu atmosféry $\alpha_{1,\text{atm}}$ určený jak pomocí meteorologické viditelnosti, tak pomocí úrovně přijatého signálu RSSI.

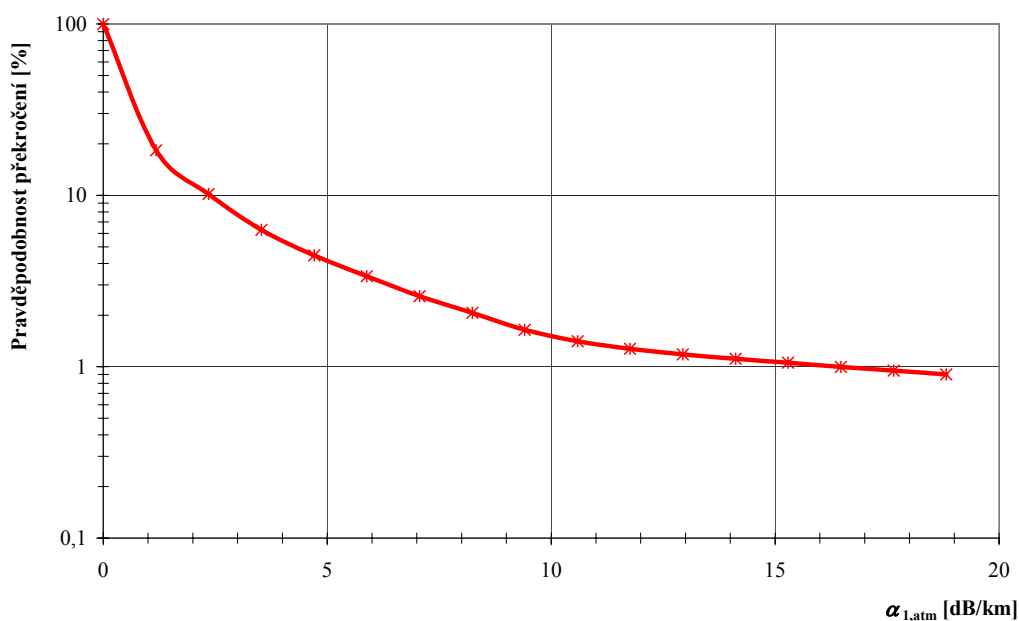


Obr. 4.5. Pravděpodobnost překročení hodnoty koeficientu útlumu atmosféry leden až duben



Obr. 4.6. Pravděpodobnost překročení hodnoty koeficientu útlumu atmosféry duben až červen

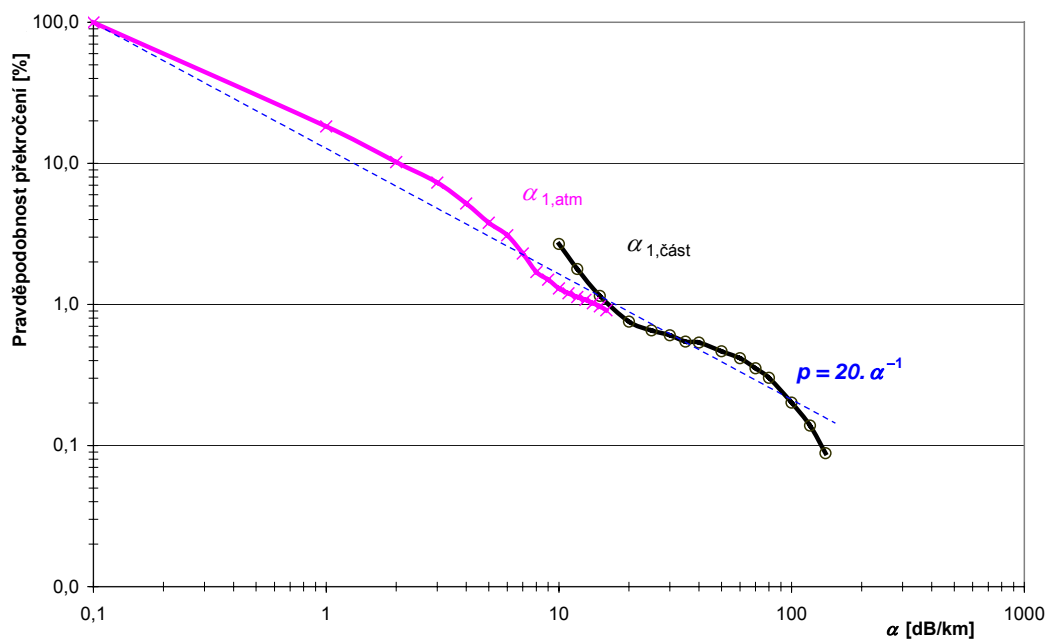
Obr. 4.5 a Obr. 4.6 ukazují na sezónní rozdílnost v útlumu atmosféry. Můžeme stanovit, s jakou pravděpodobností přesáhne hodnota útlumu $\alpha_{1,atm}$ zvolenou mez. Pro takovou statistiku použijeme data za celé první pololetí roku 2006. Obr. 4.7 zobrazuje takový průběh.



Obr. 4.7. Pravděpodobnost překročení hodnoty koeficientu útlumu atmosféry

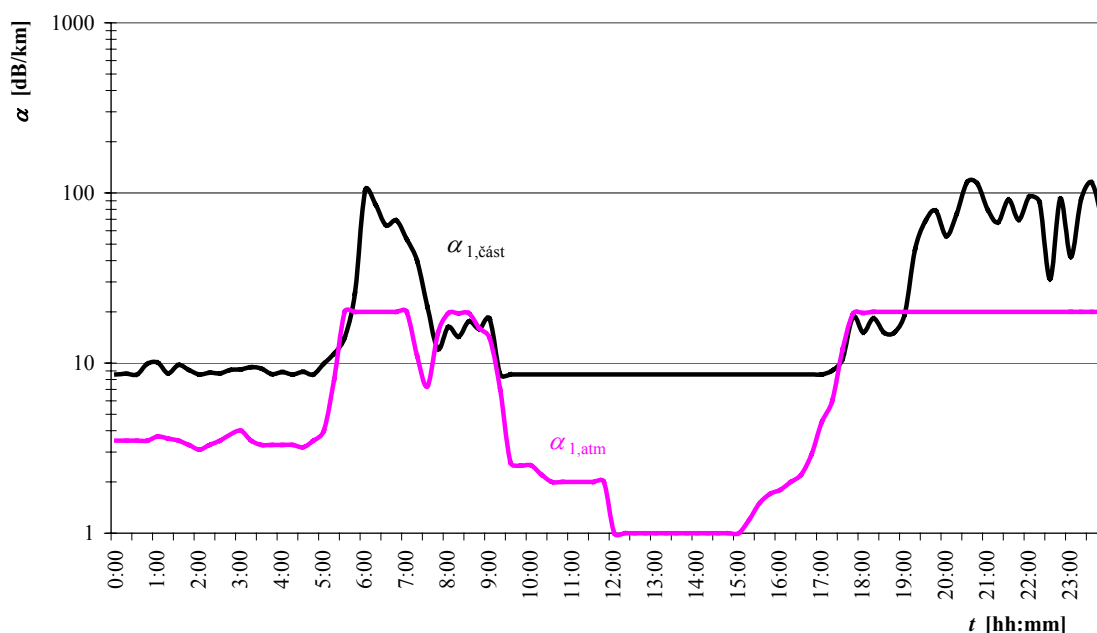
4.3 Porovnání koeficientů útlumu stanovených pomocí meteorologické viditelnosti a pomocí RSSI

Zajímavé je nyní porovnat hodnoty koeficientů útlumu určené pomocí meteorologické viditelnosti $\alpha_{1,část}$ a hodnoty koeficientů útlumu $\alpha_{1,atm}$ určené pomocí RSSI.



Obr. 4.8. Porovnání metod určování pravděpodobnosti překročení útlumu

Na Obr. 4.9 je pro porovnání $\alpha_{1,\text{část}}$ a $\alpha_{1,\text{atm}}$ prezentováno časové rozložení obou veličin ze dne 2. 1. 2006.



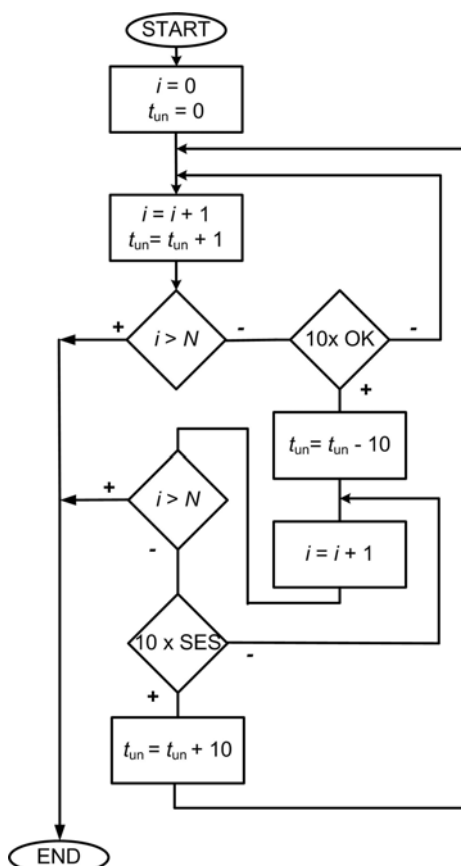
Obr. 4.9. Porovnání metod určování hodnoty útlumu

Je patrné, že hodnota koeficientu útlumu $\alpha_{1,\text{část}}$ vycházející z meteorologické viditelnosti nabývá ve své maximální hodnotě úrovně asi pětkrát vyšší, než hodnota koeficientu útlumu $\alpha_{1,\text{atm}}$ vycházející z RSSI. Rozdíl v hodnotách koeficientů útlumu je způsoben relativně malým dynamickým rozsahem spoje, na kterém je hodnota RSSI monitorována. Z Obr. 4.9 je patrný maximální rozsah koeficientů útlumu atmosféry 20 dB/km. Hodnota koeficientů útlumu atmosféry 20 dB/km je i v našich zeměpisných šířkách běžně překračována. Jsme tedy nuceni zabývat se metodou, jak takové útlumy spolehlivě měřit a zaznamenávat.

Jedním možným řešením, jak měřit větší hodnoty koeficientu útlumu, je u měřicího spoje zmenšit vzájemnou vzdálenost hlavic L_{12} na podstatně menší hodnotu (např. 100 m). Tento krok by umožnil teoreticky měřit koeficienty útlumů do hodnot přibližně 200 dB/km. Hodnota koeficientu útlumu 200 dB/km odpovídá silné mlze (viz Tab. 1.3). Jiným řešením je sestavení měřicího spoje s relativně velkým dynamickým rozsahem. Návrh spoje s velkým dynamickým rozsahem (45 dB v optické oblasti měřicího řetězce) je uveden v kap. 3.2. Optimální vzdálenost, při které je vhodné měřit útlum atmosféry, je vzdálenost, při které komunikují standardní komerční spoje (stovky metrů až jednotky kilometrů).

4.4 Pravděpodobnost přerušení spoje

Za dostupný považujeme takový spoj, který pracuje s nižší chybovostí BER , než je její stanovená hodnota. Pokud chybovost vzroste nad stanovenou mez, spoj je považovaný za nedostupný. K vyhodnocení doby nedostupnosti spoje použijeme data získaná pomocí měřicího spoje. Obr. 4.10 ukazuje metodu určení doby nedostupnosti spoje.



Obr. 4.10. Algoritmus vyhodnocení doby nedostupnosti spoje

t_{un} značí dobu nedostupnosti spoje ve zvolený intervalu N sekund. Pravděpodobnost nedostupnosti spoje se určí podle vztahu

$$P_{un} = \frac{t_{un}}{N} \cdot 100. \quad (4.2)$$

Pro období od 1. 1. 2006 do 31. 11. 2006 je na spoji s datovou rychlostí $v_i = 2,048\text{Mbps}$ čas nedostupnosti spoje roven $t_{un} = 16685$ s a celková doba měření $N = 2085670$ s. Pro nedostupnost spoje pak vychází

$$P_{un} = \frac{16685}{2085670} \cdot 100 = 0,8\%. \quad (4.3)$$

Je možno určit celkový procentuální počet bitových bloků mimo synchronizaci P_{nj} v období 1. 1. 2006 až 30. 11. 2006. Počet bitových bloků mimo synchronizaci nabývá hodnoty $n_j = 364207908$ s dobou trvání 1 ms. Celkový počet všech bloků $n_{j,celk}$

za uvedené období je $2088,576 \cdot 10^7$ bloků s dobou trvání 1 ms. Mimo synchronizaci bylo procentuálně bloků

$$P_{nj} = \frac{n_j}{n_{j,\text{celk}}} = \frac{364207908}{2088,76 \cdot 10^7} = 1,74\%. \quad (4.4)$$

Z algoritmu pro učení doby nedostupnosti je patrné, že doba nedostupnosti zahrnuje výpadky spoje delší než 10 s po sobě jdoucích. Pokud je výpadek spoje kratší, doba nedostupnosti není ovlivněna, v těchto silně chybových vteřinách (SES) narůstá však hodnota chybovosti spoje.

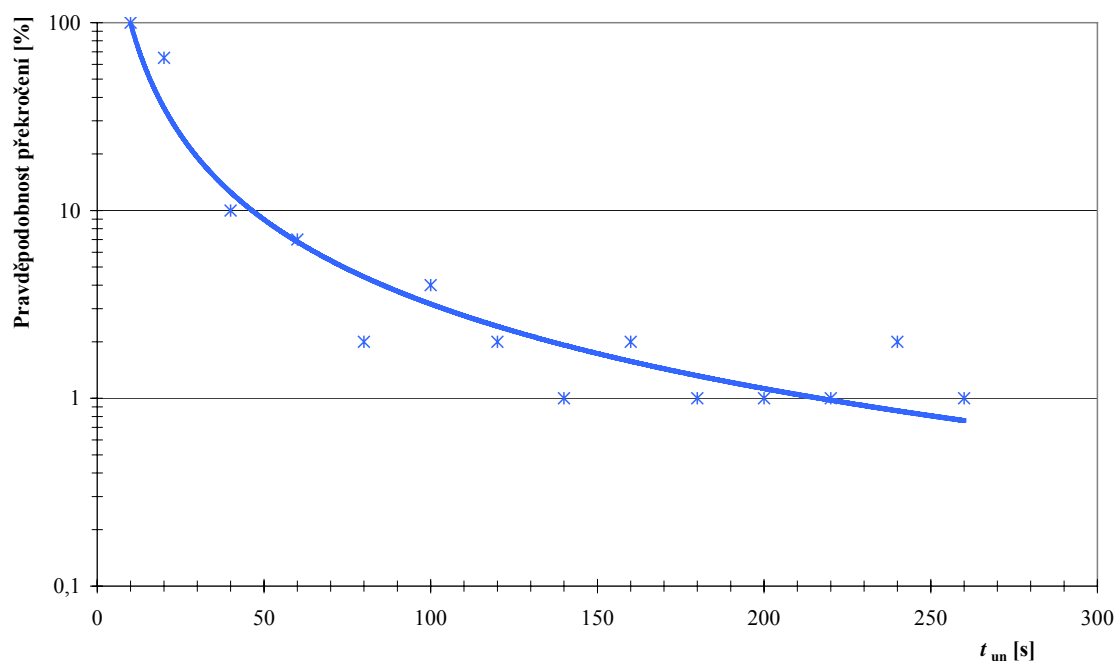
Celkový počet bezchybných sekund je možno určit dle vztahu

$$t_{\text{ef}} = N - t_{\text{un}} - \frac{1}{1000} \cdot \sum_{i=1}^N e_i. \quad (4.5)$$

Pravděpodobnost doby, kdy je přenos dat spojem bez chyb, určuje vztah

$$P_{\text{ef}} = \frac{t_{\text{ef}}}{N} \cdot 100. \quad (4.6)$$

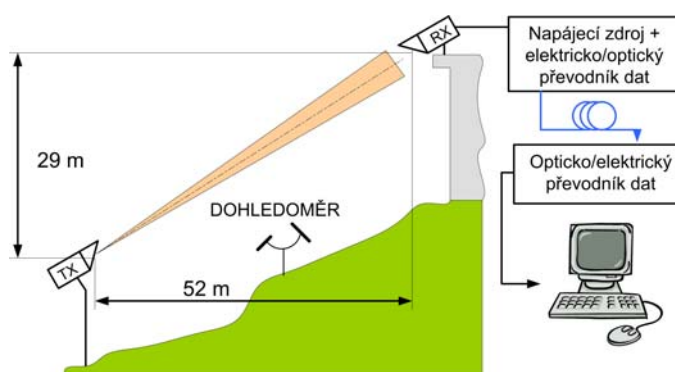
V případě, kdy je spoj nedostupný nás zajímá, po jakou dobu a s jakou pravděpodobností bude tento stav trvat. Jednotlivé intervaly doby nedostupnosti byly zpracovány a byla určena jejich statistika. Na Obr. 4.11 je zobrazena pravděpodobnost překročení doby nedostupnosti spoje.



Obr. 4.11. Pravděpodobnost přerušení spoje s určitou dobou trvání

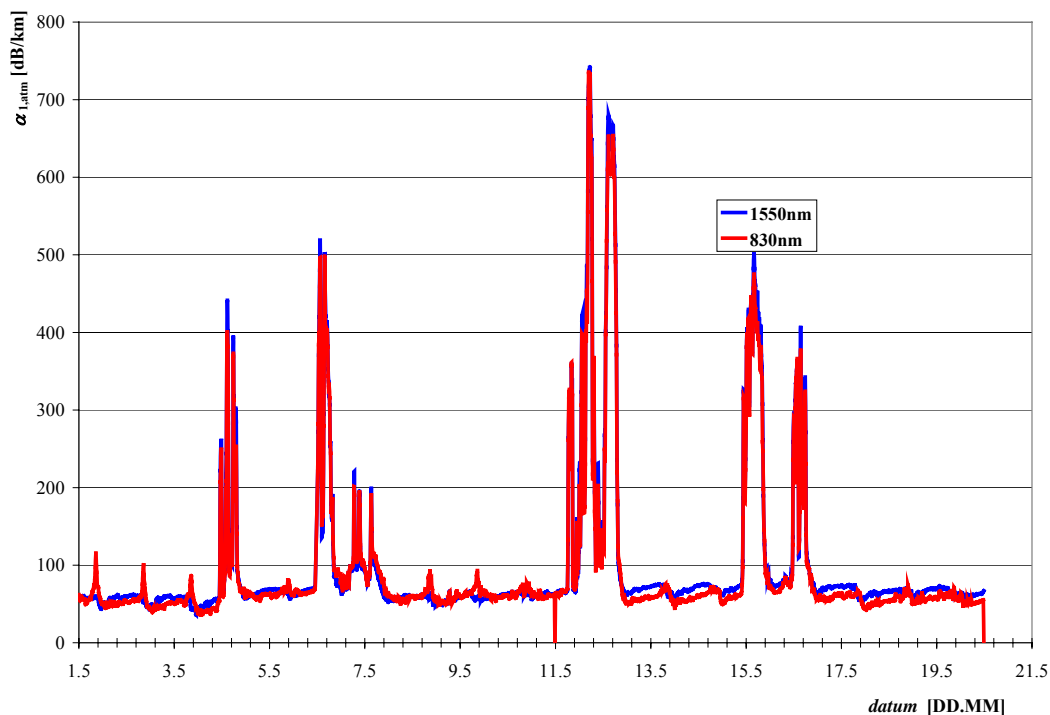
4.5 Porovnání útlumu atmosféry pro záření o dvou různých vlnových délkách

V této kapitole bude experimentálně stanoven koeficient útlumu atmosféry pro dvě různé vlnové délky. K provedení experimentu byl vyvinut speciální měřicí optický spoj ATMO TL - 02_DUAL (kap. 3.2). Optický spoj je umístěn na nejvyšší hoře Českého středohoří, Milešovce (837 m nad mořem). Spoj byl záměrně umístěn do prostředí s největší četností výskytu hustých dešťových srážek a hustých mlh v Čechách. Uspořádání měřicího spoje je na Obr. 4.12.

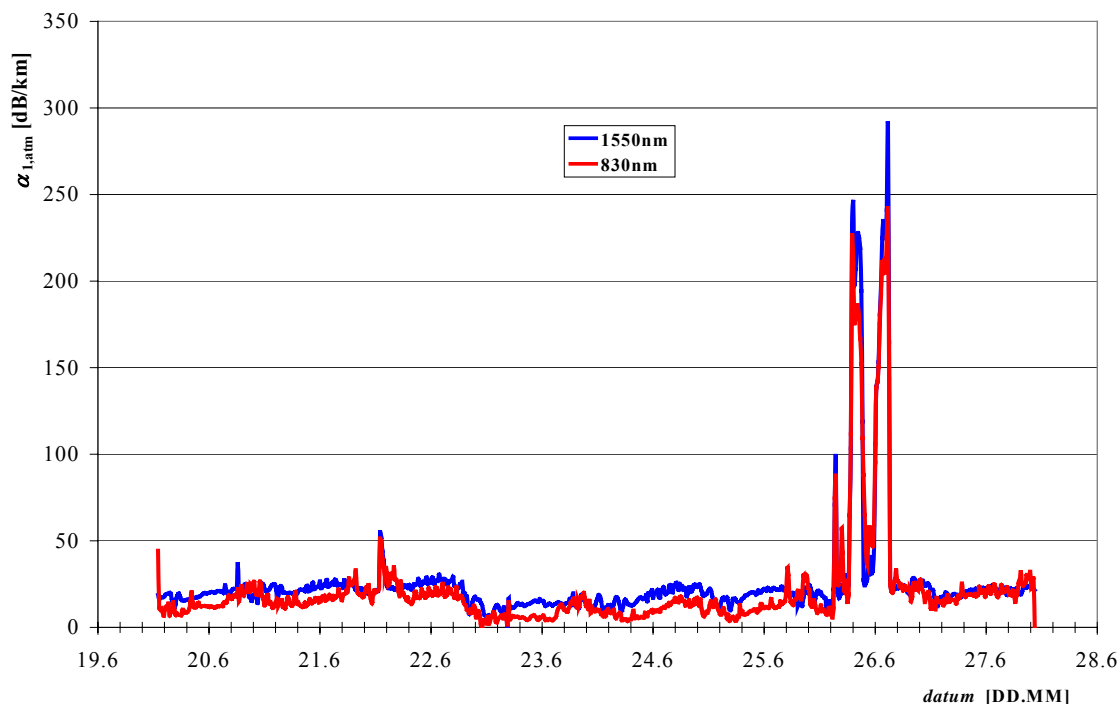


Obr. 4.12. Uspořádání měřicího řetězce

Vyhodnocená data o koeficientu útlumu atmosféry za měsíc květen 2008 jsou znázorněna na Obr. 4.13. Na Obr. 4.14 jsou změřené hodnoty koeficientu útlumu atmosféry za část měsíce červen 2008.

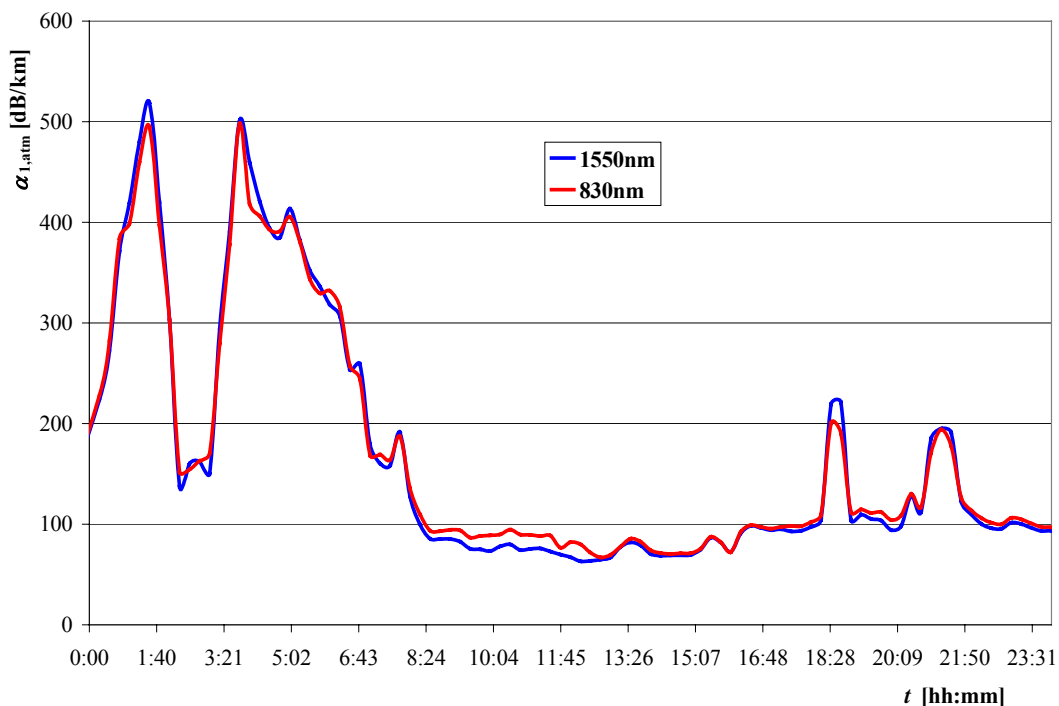


Obr. 4.13. Rozložení koeficientu útlumu atmosféry stanovený za měsíc květen



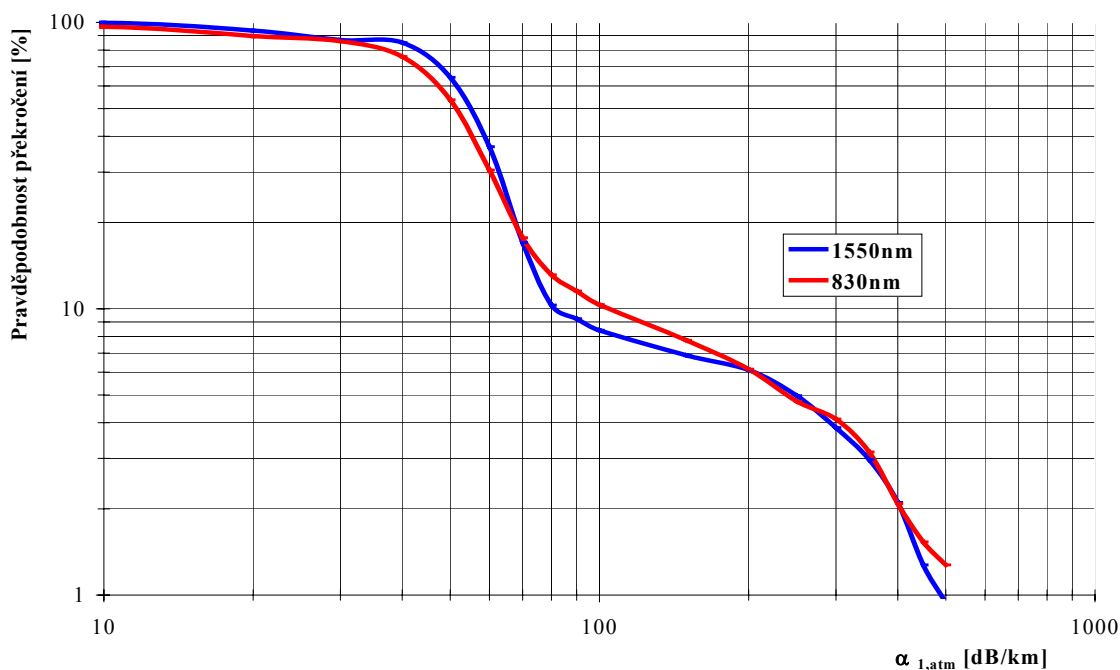
Obr. 4.14. Rozložení koeficientu útlumu atmosféry stanovený za měsíc červen

Detailnější pohled na průběh koeficientu útlumu pro interval 24 hodin ze dne 6. 5. 2008 je zobrazen na Obr. 4.15.



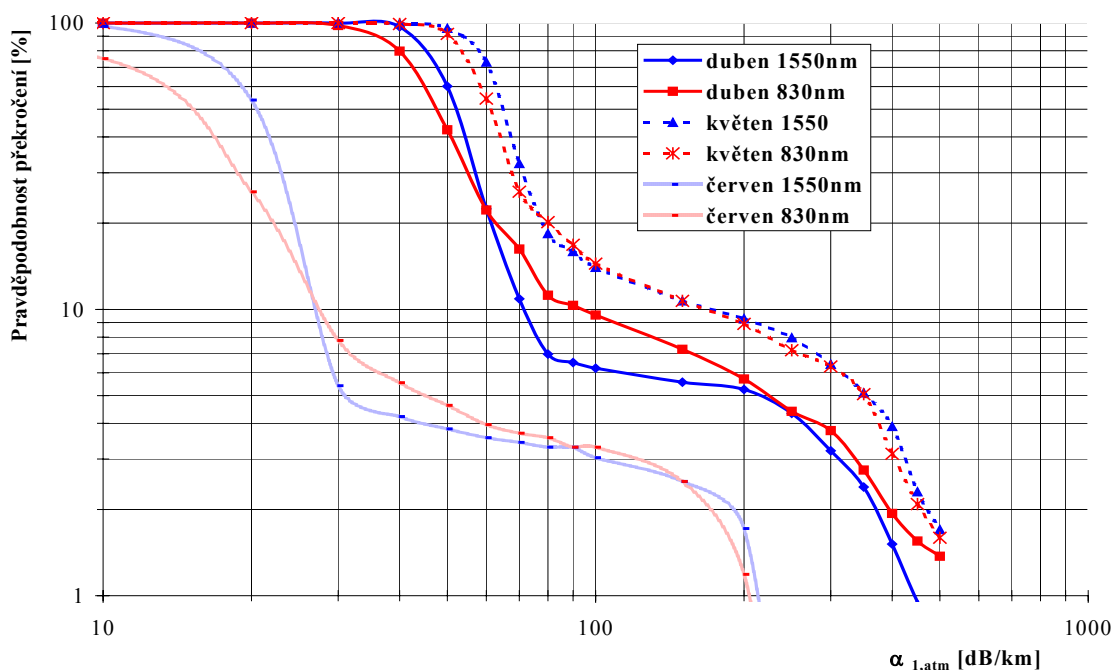
Obr. 4.15. Koeficient útlumu atmosféry dne 6. 5. 2008

Z naměřených dat koeficientu útlumu jsme schopni sestavit křivku pravděpodobnosti překročení stanovené hodnoty koeficientu útlumu atmosféry (Obr. 4.16). Křivky na Obr. 4.17 prezentují porovnání pravděpodobnosti překročení koeficientu útlumu za měsíce duben až červen roku 2008 (délka vlny nosné je parametrem).



Obr. 4.16. Pravděpodobnost překročení koeficientu útlumu atmosféry duben až červen 2008

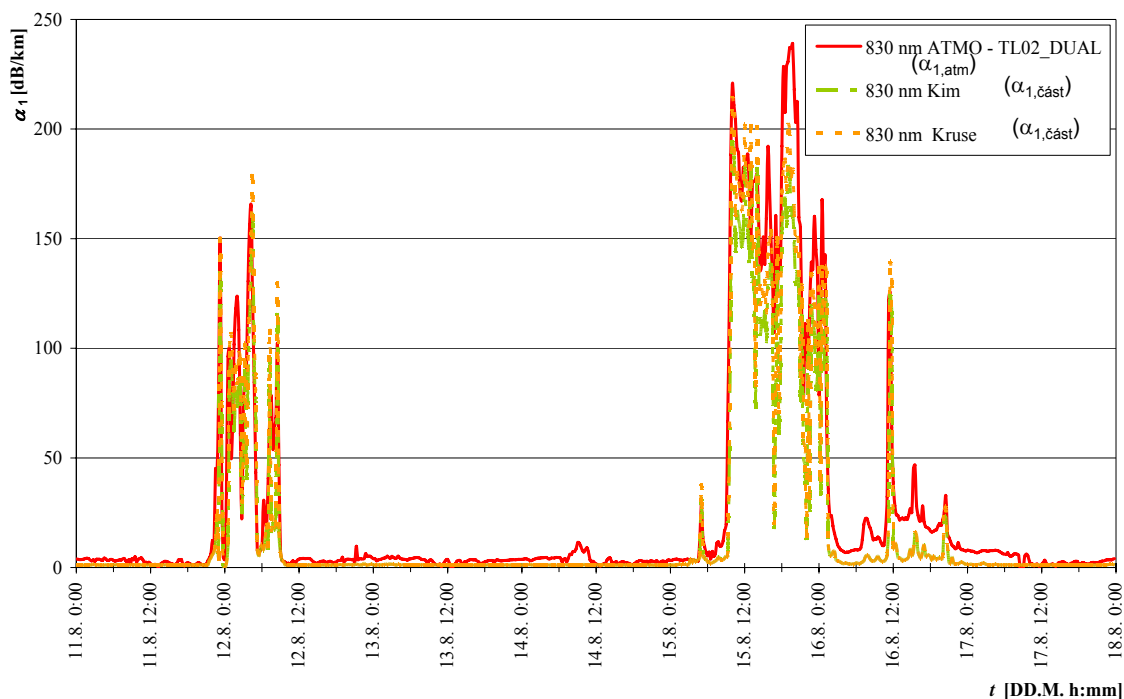
Obr. 4.17 současně ukazuje sezónní závislost koeficientu útlumu. Charakter průběhu křivek zůstává zachován, jen se kvantitativně mění změřené hodnoty.



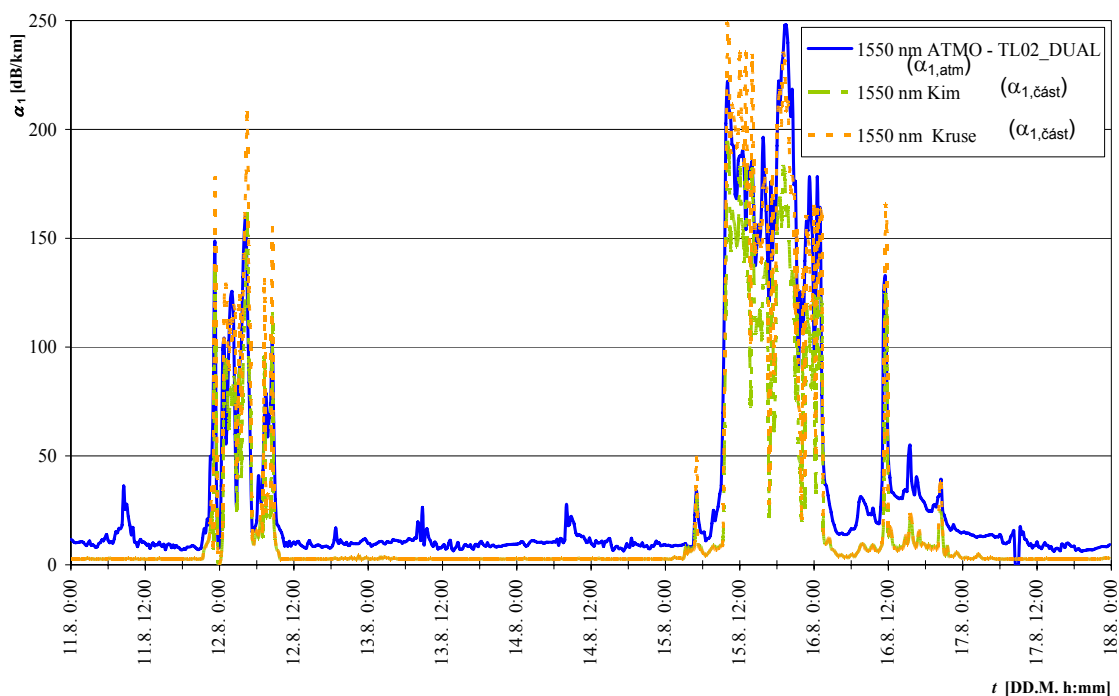
Obr. 4.17. Pravděpodobnost překročení koeficientu útlumu atmosféry pro jednotlivé měsíce roku 2008

Rozborem naměřených dat se ukázaly pozoruhodné závěry. Kimův model tvrdí, že koeficient útlumu atmosféry určený z meteorologické viditelnosti nad hodnotou 10 dB/km je spektrálně nezávislý (10 dB/km odpovídá $V_M = 0,5$ km). Model dle Kruse tvrdí, že koeficient útlumu by při $V_M < 1$ km pro větší vlnové délky měl nabývat nižších hodnot, než pro menší vlnové délky. Ze změřených charakteristik je možno usoudit, že koeficient útlumu atmosféry s hodnotami přesahujícími 70 dB/km nastává pro vlnovou délku 1550 nm s relativně nižší pravděpodobností než pro vlnovou délku 830 nm (což potvrzuje teorii Krusova modelu). Možným vysvětlením relativně menšího koeficientu útlumu na vlnové délce 1550 nm oproti 830 nm je uplatnění spektrálně závislého rozptylu světla. Velké hodnoty útlumů jsou způsobeny extrémní mlhou, přičemž je možné, že se začíná nepatrně uplatňovat jev obdobný jako v NLOS (Non Light Of Sight) komunikacích využívajících UV záření.

V období srpen 2008 a září 2008 je k dispozici vzorek dat z monitorujícího spoje a dohledoměru. Hodnota meteorologické viditelnosti byla zaznamenávána dohledoměrem Vaisala typu PWD 11 [40]. Obr. 4.18 a Obr. 4.19 ukazují porovnání výsledků měření koeficientu útlumu atmosféry spojem ATMO a modelů atmosféry z V_M dle Kima a Kruse.



Obr. 4.18. Porovnání koeficientů útlumu z ATMO – TL02_DUAL a modelů atmosféry, $\lambda = 830$ nm



Obr. 4.19. Porovnání koeficientů útlumu z ATMO – TL02_DUAL a modelů atmosféry, $\lambda = 1550$ nm

Rozborem změřených dat za období srpen a září roku 2008 bylo zjištěno, že model dle Kruse skutečně přesněji popisuje hodnotu koeficientu útlumu atmosféry. Byla vypočtena relativní chyba, s jakou je hodnota koeficientu útlumu stanovena v souladu s jednotlivými modely atmosféry. Pro vyloučení mezních hodnot, byla chyba stanovena až pro hodnoty koeficientu útlumu atmosféry nad 15 dB/km. Relativní chyba mezi hodnotou koeficientu útlumu atmosféry změřenou pomocí ATMO – TL02_DUAL a stanovenou z hodnoty V_M je pro Krusův model při $\lambda = 830$ nm cca 15 % (při $\lambda = 1550$ nm cca 12 %). Relativní chyba stanovené hodnoty koeficientu útlumu atmosféry je pro Kimův model při $\lambda = 830$ nm cca 23 % (při $\lambda = 1550$ nm cca 34 %).

Problém přesnosti dat z dohledoměru by mohl vyřešit novější typ dohledoměru PWD 21, který se plánuje použít pro měření dohlednosti v tak výjimečných podmínkách, jaké nastávají v lokalitě měření.

Měření extrémně velkých útlumů vyvolalo zájem v zahraničí. Spolupráce v této oblasti se rozvíjí mezi UREL, ÚFA AV ČR a Politecnico di Milano, Itálie (Prof. Carlo Capsoni).

5 Komplexní model OBS

Komplexní model OBS je syntézou stacionárního modelu (energetické bilance spoje) a statistického modelu. Problematika stacionárního modelu byla popsána v kap. 1.2, problematika statistického modelu je blíže rozebrána v kap. 1.3. Komplexní model spoje slouží k odhadu nedostupnosti optického spoje pomocí speciálního nomogramu [41].

Pro sestavení nomogramu komplexního modelu spoje je třeba znát zejména dva parametry. Tzv. charakteristiku normované rezervy spoje $M_1(L_{12})$ a pravděpodobnost překročení hodnoty koeficientu útlumu popsanou v kap. 4.

Pro vyjádření normované linkové rezervy můžeme vyjít z Obr. 1.1 a (1.1). Linkovou rezervu M je možno vyjádřit

$$M = \tilde{P}_{m,RXA} - P_{0,RXA}, \quad (5.1)$$

za podmínky $L_{12}\phi_t \gg D_{RXA}$ můžeme (5.1) vyjádřit ve tvaru

$$M \cong P_{m,TXA} - P_{0,RXA} + 20 \log \frac{D_{RXA}}{\phi_t} - 20 \log L_{12} - \tilde{\alpha}_{atm}. \quad (5.2)$$

První tři členy (5.2) nezávisí na délce spoje L_{12} a můžeme je označit jako systémová rezerva spoje M_S

$$M_S = P_{m,RXA} - P_{0,RXA} + 20 \log \frac{D_{RXA}}{\phi_t}. \quad (5.3)$$

Parametr M_S je jediná, přesto spoj plně charakterizující veličina.

Charakteristika normované rezervy vychází ze vztahu

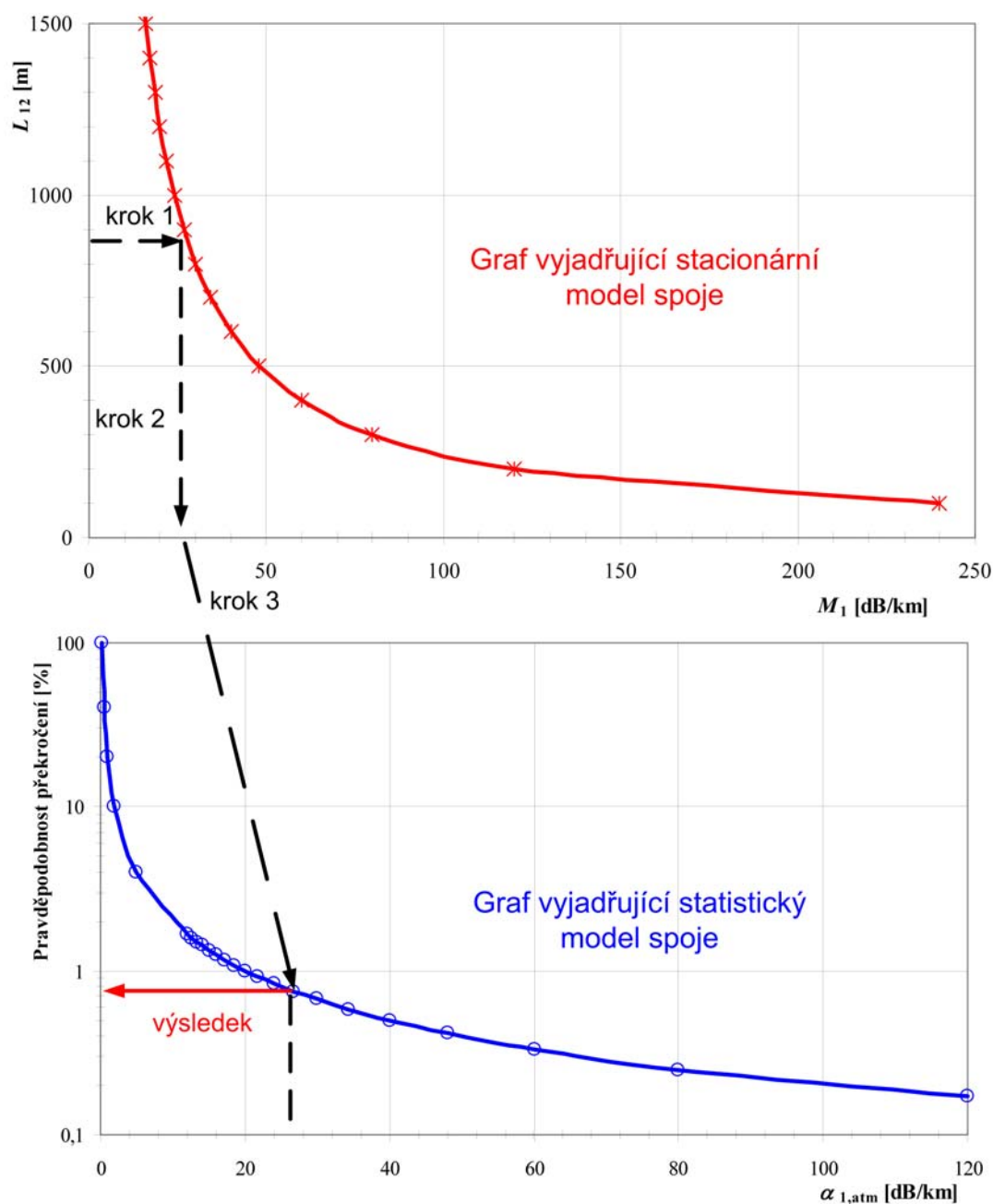
$$M_1(L_{12}) = \frac{M}{L_{12}}. \quad (5.4)$$

Tato veličina umožňuje sjednocení obou modelů stacionárního a statistického. Obdobou veličiny $M_1(L_{12})$ ve stacionárním modelu je veličina koeficient útlumu $\alpha_{1,atm}$ ve statistickém modelu.

Jako příklad použijeme data z konkrétního optického spoje. Na Obr. 5.1 nahoře je zobrazena závislost normované rezervy M_1 na dosahu spoje L_{12} (spoj CBL viz Tab. 2.2). Ve spodní části Obr. 5.1 je uvedena pravděpodobnost překročení hodnoty koeficientu útlumu atmosféry $\alpha_{1,atm}$ (stanovená viz kap. 4), určená ve stejné lokalitě. Postup při určení nedostupnosti spoje je pak následující:

V prvním kroku je nutné zvolit dosah spoje (komunikační vzdálenost L_{12}). Pro určité energetické parametry daného spoje máme určitou charakteristiku $M_1(L_{12})$, pomocí níž lze stanovit hodnotu normované rezervy M_1 (druhý krok). Číselná hodnota M_1 udává současně mezní hodnotu koeficientu útlumu atmosféry $\alpha_{1,atm}$, kdy se spoj stává nedostupným. Při menší hodnotě $\alpha_{1,atm}$ ještě považujeme spoj za dostupný. Třetím

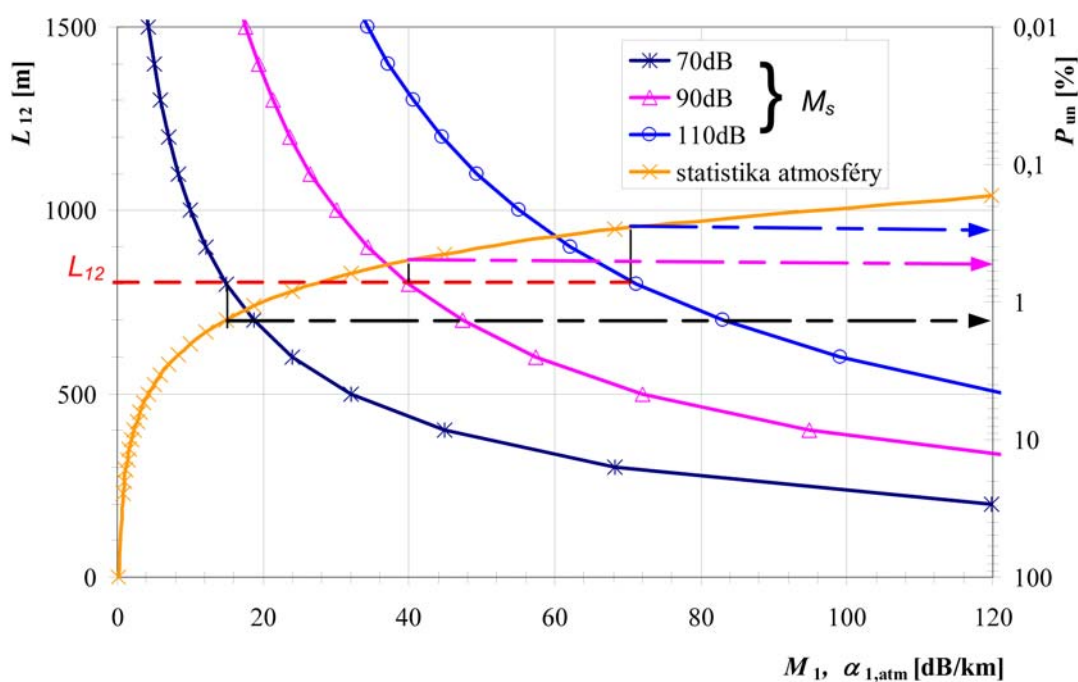
krokem je přiřazení hodnotě M_1 hodnotu $\alpha_{1,\text{atm}}$, což je ukázáno ve spodní části Obr. 5.1. Pomocí charakteristiky znázorňující pravděpodobnost překročení koeficientu hodnoty útlumu platné pro zvolenou lokalitu lze nalézt výsledek.



Obr. 5.1. Určení pravděpodobnosti nedostupnosti spoje

Uvedený postup je grafickou predikcí pravděpodobnosti doby nedostupnosti vybraného spoje. Pomocí BERT byl tento konkrétní spoj monitorován, v kap. 4.4 (4.3) byla experimentálně stanovena jeho doba nedostupnosti. Následně byla vyhodnocena pravděpodobnost nedostupnosti spoje s hodnotou $P_{\text{un}} = 0,8 \%$. Grafický odhad ukazuje na pravděpodobnost nedostupnosti přibližně $P_{\text{un}} = 0,7 \%$, což svědčí o dobrém souladu teorie s experimentem.

Celý postup lze shrnout do jediného nomogramu (viz Obr. 5.2).



Obr. 5.2. Komplexní model spoje

Na Obr. 5.2 jsou zobrazeny tři distribuční funkce překročení odpovídající třem různým zařízením (se třemi různými systémovými rezervami). Zvolme pro ukázkou délku spoje $L_{12} = 800$ m. Pro spoj se systémovou rezervou $M_S = 70$ dB je odhad procenta nedostupnosti spoje cca 1,5 %. Naproti tomu spoj se systémovou rezervou $M_S = 110$ dB by byl nedostupný pouze po 0,3 % provozovaného času.

6 Závěr

Optické bezkabelové spoje patří k základním komunikačním prostředkům informační společnosti a mají své specifické výhody:

- pracují v takové oblasti spektra záření, kde nedochází k dalšímu znečišťování životního prostředí vyzařováním energie na radiových frekvencích
- jejich použití není v současné době vázáno na licenční řízení
- díky velmi úzkému vyzařovanému svazku mohou být jen velmi obtížně rušeny nebo odposlouchávány a nedochází k interferenci s jiným spojem
- jejich potenciál z hlediska šířky pásma přenosu odpovídá možnostem vláknové optiky a jsou tedy přirozeným článkem moderních kabelových optických sítí

Disertační práce se zabývá problematikou měření chybovosti a stanovením dostupnosti optických bezkabelových spojů pracujících v turbulentním atmosférickém prostředí s náhodným charakterem útlumu. V práci jsou objasněny základní atmosférické jevy ovlivňující kvalitativní parametry spoje. Pozornost je přitom zaměřena na náhodný útlum vyvolaný aerosoly a scintilaci v důsledku atmosférické turbulence. Uvedeny jsou definice veličin, které jsou mírou atmosférických jevů a které jsou použity při modelování funkce spoje.

Při modelování energetické bilance samotného spoje byla použita deterministická metoda a vztah mezi základními parametry spoje souvisejícími s jeho energetikou byl uveden v energetické bilanční rovnici (kap. 1.1). Usnadnění výpočtu energetiky konkrétního spoje umožňuje program v prostředí MathCad. Při modelování charakteru atmosféry v místě vybrané lokality umístění spoje byla použita statistická metoda prezentovaná rozložením pravděpodobnosti překročení určitého (náhodného atmosférického) útlumu na spoji (kap. 1.3) [35], [42].

Analytická část práce spočívá v nalezení vztahů jak mezi veličinami charakterizujícími vlastnosti spoje, tak mezi veličinami charakterizující vlastnosti atmosféry. Syntéza je pak uvedena v části práce, která uvádí do souvislosti deterministický model spoje a statistický model atmosféry (kap. 5). Ke studiu vlastností atmosféry byly použity závěry z teorie, které byly doplněny původními experimentálními pracemi zaměřenými na měření chybovosti spoje a stanovení potřebné doby takového měření (kap. 2.4.1, kap. 4.4)

Přínosem práce je získání velkého objemu dat týkajících se statického projevu relativně velkého atmosférického útlumu měřeného v nejhorších povětrnostních podmínkách na nejvyšší hoře Českého středohoří - Milešovce. Data byla získána

pomocí speciálně vyvinutého měřicího spoje pracujícího ve dvou aktuálních a perspektivních spektrálních pásmech 850 nm a 1550 nm (kap. 3.2, kap. 4.5; příloha 7.2). Získaná data byla vyhodnocena s ohledem na spektrální závislost útlumu a s ohledem na samotnou metodu měření. Byly porovnány dvě metody měření: metoda pomocí dohledoměru a metoda pomocí měřicího spoje.

Měření bylo prováděno v rámci grantového projektu GAČR č. 102/05/0571. Výsledky měření a jejich zpracování bylo konzultováno na domácím pracovišti ÚPT AV ČR v Praze a na zahraničním pracovišti Politecnico di Milano, Itálie. S universitou v Itálii byla na dalším měření dohodnuta spolupráce. Sběr dat nadále pokračuje v rámci grantového projektu GAČR č. 102/07/1295.

Disertační práce obohacuje optickou komunikaci v oblasti stanovení dostupnosti spojů, kde zpřesňuje experimentální způsob ohodnocování kvalitativních parametrů spoje a ukazuje na důležitost a způsob měření chybovosti spoje. K tomuto účelu byla analyzována problematika měření chybovosti a vyvinut byl speciální tester BER potvrzující výchozí předpoklady. Výsledky práce najdou uplatnění jak při návrhu, tak při provozu optických bezkabelových spojů.

Literatura

- [1] AL NABOULSI, M., SIZUN, H., Fornel, F. Propagation of optical and infrared waves in the atmosphere. <[http://www.ursi.org/Proceedings/ProcGA05/pdf/F01P.7\(01729\).pdf](http://www.ursi.org/Proceedings/ProcGA05/pdf/F01P.7(01729).pdf)> [citováno 2007-1-15].
- [2] GEBHART, M., LEITGEB, E., SEIKH MUHAMMAD, S., FLECKER, B., CHLESTIL, C., AL NABOULSI, M., SIZUN, H., Fornel, F. Measurement of Light attenuation in dense fog conditions for FSO applications. *Proc. of Atmospheric Optical Modeling, Measurement, and Simulation*. SPIE vol. 5891, 2005.
- [3] SUMMERFIELD, M. Minding Your BER's and Q's Bit-Error-Rate and Q Factor Measurement:Theory and Practice <<http://www.ee.unimelb.edu.au/staff/kaic/PRL-TS/ms1-bnq.pdf>> [citováno 2005-04-09].
- [4] ANDREWS, L., PHILLIPS, R., HOPEN, C. *Laser Beam Scintillation with Applications*. ashington: Spie Press, 2001.
- [5] DERICKSON, D. *Fiber Optic (Test and measurement)*. New Persey: Pretice Hall, 1998. ISBN 0-13-534330-5.
- [6] KASAP, S.O. *Optoelektronics and Photonics: Principles and Practices*. New Jersey: Prentice-Hall, Inc., 2001. ISBN 0-201-61087-6
- [7] KIM, I. I., MITCHEL, M., KOREVAAR, E.Measurement of scintillation for free-space laser communication at 785 nm and 1550 nm. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.* 3850, 49 (1999)
- [8] KVÍČALA, R. Determination of Availability of Optical Link. In *Proceedings EDS '05 IMAPS CS International Conference Brno. Czech Republic 2005*, p. 50 – 54. ISBN 80-214-2990-9.
- [9] KVÍČALA, R. Statistic of FSO. In *15th Internacional Czech-Slovak Scientific Conference RADIOELEKTRONIKA 2005*. Brno: Department of Radio Electronics, Brno University of Technology, 2005, p. 366 – 369. ISBN 80-214-2904-6.
- [10] KIM, I.I., STIEGER R., KOONTZ J.A., MOURSUND C., BARCLAY M., ADHIKARI P., SCHUSTER J., KOREVVAR E. Wireless optical transmission of fast ethernet, FDDI, ATM, and ESCON protocol data using the TerraLink laser communication systém. *Optical Engineering*.37(12) s.3143–3155. December 1998.
- [11] YATES, H. W., TAYLOR J. H. Infrared transmissions of the Atmosphere. *NRL report 5453*. U.S. Washington DC: Naval Research Laboratory, 1960. ASTIA AD 240188.
- [12] RAZAVI, B. *Design of Integrated Circuits for Optical Communications*. New York: McGraw Hill, 2003. ISBN 0-07-282258-9.
- [13] GAGLIARDI, R. M. and KARP, S. *Optical Communications*. New York: John Wiley & Sons, 1995. ISBN 0-741-54287-3.
- [14] KOŽÍŠEK, J. *Statistická analýza – příklady*. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2002. ISBN 80-01-02618-3.
- [15] WILFERT, O. *Optické bezkabelové spoje*. Brno, 2004. 84s., 8 s. příloh. Habilitační práce na Fakultě elektrotechniky a komunikačních technologií na Ústavu radioelektroniky.
- [16] KOLKA,Z.: Monitoring of optical directional link. In: *Proc. of the 9th Czech-Slovak Conf. RADIOELEKTRONIKA 99*, TU Brno 1999, pp. 82-85.
- [17] WILFERT,O., BIOLKOVÁ,V., KOLKA, Z.: Vybudování dvou vysokorychlostních komunikačních mostů pomocí laserových směrových spojů v rámci metropolitní akademické počítačové sítě v Brně. Závěrečná zpráva k řešení grantového projektu č.0244/1998 Fondu rozvoje VŠ. UREL FEI, Brno, prosinec 1998.
- [18] WILFERT,O.-KOLKA,Z.-BIOLKOVÁ,V.: Optical directional links for transmission of information. In: *Proc. of the 9th Czech-Slovak Conf. RADIOELEKTRONIKA 99*, Brno, 1999, pp. I-1 – I-11.

-
- [19] HLAVÁČ, D., WILFERT, O. Availability of free-space link. In: Sborník příspěvků konference Elektrotechnika a informatika 2002. ZCU Plzeň, 2002, s. 83 – 168.
- [20] WILFERT, O., KOLKA, Z., HLAVÁČ, D., BIOLKOVÁ, V. Statistický model optického směrového spoje. In: Sborník příspěvků celostátní konference Optické komunikace O.K.'2001. TECH-MARKET Praha, listopad 2001, s. 71-75.
- [21] KVÍČALA, R. Problems of Determination of PIN'S Parameters. In 16th Internacional Czech-Slovak Scientific Conference RADIOELEKTRONIKA 2006. Bratislava, p. 109 – 113. ISBN 80-227-2388-6.
- [22] SÄCKINGER, E. Broadband Circuits for Optical Fiber Communication. USA: WILEY-INTERSCIENCE, 2005. 436 pages. ISBN 0-471-71233-7.
- [23] MILLER, J. L., FRIEDMAN, E. Optical Communications Rules of Thumb. USA: McGraw-Hill, 2003. 428 pages. ISBN 0-07-138778-1.
- [24] KIM, I. I., KOREVAAR, E. Availability of Free Space Optics (FSO) and Hybrid FSO/RF Systems. In: Proc. of Optical Wireless Communications IV. SPIE 4530, 2001, pp. 84 –95.
- [25] AVIV, D. G. Laser Space Communications. London: ARTECH HOUSE, 2006. 194 pages. ISBN 1-59693-028-4.
- [26] HEMMATI, D. Deep Space Optical Communications. USA: WILEY 2006. ISBN 13978-0-470-04002-7.
- [27] ITU-T G.827: Availability performance parameters and objectives for end-to-end international constant bit-rate digital paths, ITU, Geneva, 2003.
- [28] FRIEDMAN, E., MILLER, J. L. Photonics Rules of Thumb. USA: SPIE PRESS, 2003. 418 pages. ISBN 0-07-138519-3.
- [29] Aplikační poznámky k obvodu DS31348, URL: <<http://datasheets.maxim-ic.com/en/ds/DS21348-DS21Q348.pdf>> [citováno 2007-03-02].
- [30] Aplikační poznámky k obvodu PM5346, URL: <http://www.datasheetcatalog.net/es/datasheets_pdf/P/M/5/3/PM5346-RC.shtml> [citováno 2007-03-04].
- [31] GRÁBNER M., KVIČERA V. Influence of Meteorological Phenomena on Parallel Optical and Millimetre Wave links in Prague. In: Proc. URSI GA 2005, [CD ROM], New Delhi, India 2005.
- [32] 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.
- [33] KVÍČALA, R. Bit error rate tester for optical links. In Seminář o řešení projektu GA ČR 102/03/H105, Moderní metody řešení, návrhu. Brno: Ing. Zdeněk Novotný, CSc., Brno, Ondráčkova 105, 2006. s. 36-75. ISBN: 80-214-3328-0.
- [34] KVÍČALA, R. CONDITIONS FOR THE OPTICAL WIRELESS LINKS BIT ERROR RATIO DETERMINATION. In Proceedings of ICSO 2006. Noordwijk, Nizozemi: ESA Publications Division, 2006. s. 1-4. ISBN: 92-9092-932-4.
- [35] KVÍČALA, R. Optical Wireless Link Availability and Bit Error Ratio. In Proceedings of 17th international conference Radioelektronika 2007. Brno, CZ,,: Department of radioelectronics, Brno, CZ, 2007. s. 407-411. ISBN: 978-80-214-3390.
- [36] UYSAL, M., LI, J., YU, M. Error Rate Performance Analysis of Coded Free-Space Optical Links over Gamma-Gamma Atmospheric Turbulence Channels. IEEE Trans. on Wireless Communications, vol. 5, no. 6, June 2006, p. 1229-1233.
- [37] PERLOT, N., FRITZSCHE, D. Aperture-Averaging - Theory and Measurements, Proc. of the SPIE, volume 5338, 2004, p. 233-242.

- [38] KOLKA, Z.; KVÍČALA, R.; BIOLKOVÁ, V. Transmission Properties of Free-Space Optical Links. In *Proceedings of the 4th Scientific Conference with International Participation Communications and Information Technologies KIT 2007*. Tatranské Zruby, Slovakia: AFCEA, 2007. s. 64-68. ISBN: 978-80-8040-325-6.
- [39] Aplikační poznámky k obvodu ICWJ, URL: < <http://www.htmldatasheet.ru/pdf/ichaus/icwj.pdf>> [citováno 2007-02-18].
- [40] Technická dokumentace dohledoměru vaisala PWD10, URL: <<http://www.vaisala.com/weather/products/pwd-visibility.html>> [citováno 2008-09-18].
- [41] KOLKA, Z., WILFERT, O., FIŠER, O. Achievable qualitative parameters of optical wireless links. *Journal of Optoelectronics and Advanced Materials*. 2007, vol. 9, no. 8, p. 2419-2423
- [42] KVÍČALA, R., KVIČERA, V., GRÁBNER, M., FIŠER, O. BER and Availability Measured on FSO Link. *Radioengineering*, 2007, roč. 16, č. 3, s. 7-13. ISSN: 1210-2512.

7 Přílohy

Seznam příloh:

Energetická bilance duplexního OBS ATMO_TL - 01 provedená v prostředí MathCad

Energetická bilance duálního, simplexního OBS ATMO_TL - 02_DUAL provedená v prostředí MathCad

Elektronické bloky ATMO TL-02_DUAL, desky plošných spojů, osazovací plány

Finální konstrukce ATMO TL-02_DUAL

7.1 Energetická bilance duplexního OBS ATMO_TL - 01 provedená v prostředí MathCad

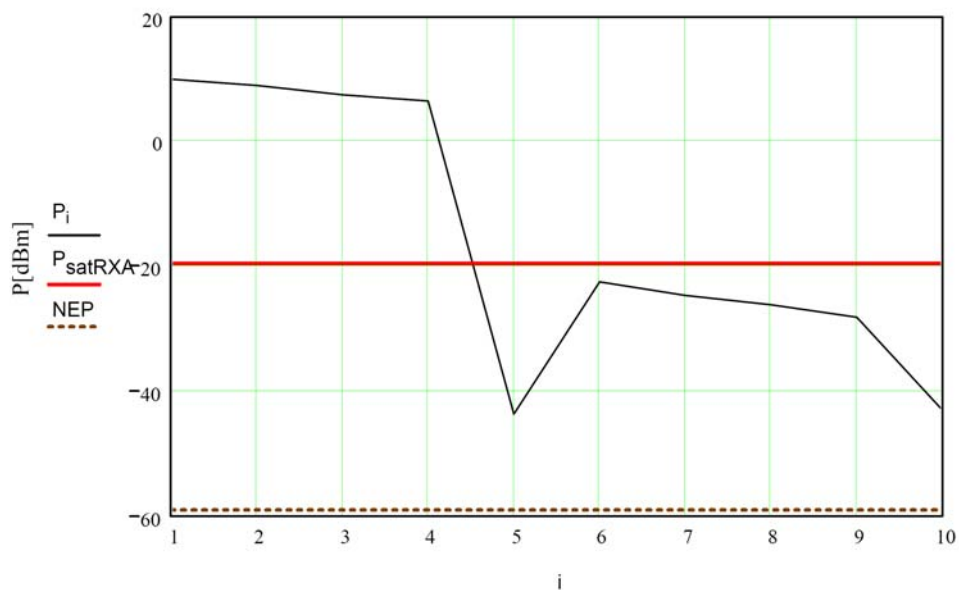
ATMO TL-01 (830nm)

$P_{LD} := 10$	mW		střední výkon laserové diody (LD)
$\lambda := 830 \cdot 10^{-9}$	m		vlnová délka laserového záření
$P_{mLD} := 10 \cdot \log(P_{LD})$		$P_{mLD} = 10$	střední výkon LD [dBm]
$\alpha_{LD} := 1$	dB		útlum vazby LD/TL (TL - vysílací čočka)
$\alpha_{TXA} := 1.0$	dB		útlum na vysílací optické soustavě
$\alpha_{Wt} := 0.5$	dB		útlum na krycím skle vysílače
$D_{ekv} := 20$	mm		průměr energeticky ekvivalentního (kruhově symetrického) svazku na TXA
$\alpha_{al} := 1$	dB		útlum nedokonalým zaměřením spoje
$P_{TXA} := P_{mLD} - \alpha_{LD} - \alpha_{TXA} - \alpha_{Wt} - \alpha_{al}$		$P_{TXA} = 6.5$	výkon na TXA [dBm]
$\phi_t := 8$	mrad		úhlová šířka energeticky ekvivalentního svazku
$L_o := \frac{D_{ekv}}{\phi_t}$		$L_o = 2.5$	pomocná délka [m]
$L_{12} := 800$	m		vzájemná vzdálenost hlavic
$\alpha_{12} := \left 20 \cdot \log \left(\frac{L_o}{L_o + L_{12}} \right) \right $		$\alpha_{12} = 50.13$	útlum šířením [dB]
$D_{RXA} := 150$	mm		průměr efektivní kruhové RXA (přijímací optická soustava)
$\gamma_{celk} := 3.67 + 10 \cdot \log \left[\left(\frac{D_{RXA}}{D_{ekv}} \right)^2 \right]$		$\gamma_{celk} = 21.171$	zisk na RXA a zisk na rozložení intenzity [dB]
$\alpha_{geom} := \left 20 \cdot \log \left(\frac{D_{RXA}}{D_{ekv} + \phi_t \cdot L_{12}} \right) \right $		$\alpha_{geom} = 32.629$	geometrický útlum [dB] (útlum šířením optického svazku)
$\alpha_{Wr} := 0.5$	dB		útlum na krycím skle přijímače
$\alpha_{RXA} := 1$	dB		útlum na přijímací optické soustavě
$\alpha_{IF} := 1$	dB		útlum na interferenčním filtru (IF)
$\alpha_{PD} := 1$	dB		útlum vazby RL/PD (RL přijímací čočka)

$\alpha_{1\text{part}} := 0.5$	dB/km			koeficient útlumu standardní "čistě" atmosféry
$\alpha_{\text{part}} := L_{12} \cdot 10^{-3} \cdot \alpha_{1\text{part}}$	dB;m, dB/km	$\alpha_{\text{part}} = 0.4$		útlum částicemi v "čisté" atmosféře [dB]
$C_{2n} := 10^{-14}$	m ^{-2/3}			strukturní parametr indexu lomu standardní "slabě" turbulentní atmosféry
$\sigma_{rl} := \left[0.5 \cdot C_{2n} \cdot \left(2 \cdot \frac{\pi}{\lambda} \right)^{\frac{7}{6}} L_{12}^{\frac{11}{6}} \right]^2$		$\sigma_{rl} = 0.334$		relativní standardní odchylka optické intenzity [-]
$\alpha_{\text{turb}} := \left 10 \cdot \log(1 - \sigma_{rl}) \right $		$\alpha_{\text{turb}} = 1.764$		útlum turbulencí [dB]
$\alpha_{\text{atm}} := \alpha_{\text{part}} + \alpha_{\text{turb}}$		$\alpha_{\text{atm}} = 2.164$		celkový útlum "čisté" a "slabě" turbulentní atmosféry [dB]
$\alpha_{\Sigma t} := \alpha_{LD} + \alpha_{TXA} + \alpha_{Wt} + \alpha_{al}$		$\alpha_{\Sigma t} = 3.5$		celkový útlum vysílací optické soustavy
$\alpha_{\Sigma r} := \alpha_{Wr} + \alpha_{RXA} + \alpha_{IF} + \alpha_{PD}$		$\alpha_{\Sigma r} = 3.5$		celkový útlum přijímací optické soustavy
$\alpha_{\Sigma} := \alpha_{\Sigma t} + \alpha_{\Sigma r}$		$\alpha_{\Sigma} = 7$		celkový útlum spoje (nezávislý na L_{12})
$\rho_0 := \left[0.55 \cdot C_{2n} \cdot \left(2 \cdot \frac{\pi}{\lambda} \right)^2 L_{12} \right]^{\frac{-3}{5}} \cdot 10^3$		$\rho_0 = 36.225$		poloměr koherence svazku [mm]
$z_0 := 10^{-6} \pi \frac{D_{\text{ekv}}^2}{4\lambda}$		$z_0 = 378.505$		hranice blízké a vzdálené zóny záření [m]
$\text{SNR}_0 := 16$	dB			odstup signálu k šumu pro BER=-6
$\text{NEP} := -59$	dBm			výkon ekvivalentní šumu (na APD s předzesilovačem při rychlosti 155Mb/s)
$\Delta := 20$	dB			dynamický rozsah přijímače (v opt. části)
$d_{PD} := 0.5$	mm			průměr aktivní plochy fotodiody
$f_{RXA} := 150$	mm			ohnisková vzdálenost přijímací čočky
$\phi_{RXA} := \frac{1000d_{PD}}{f_{RXA}}$		$\phi_{RXA} = 3.333$		zorný úhel přijímače [mrad]
$P_{0PD} := \text{NEP} + \text{SNR}_0$		$P_{0PD} = -43$		citlivost přijímače (na fotodiodě) [dBm]
$P_{0RXA} := \text{NEP} + \text{SNR}_0 + \alpha_{\Sigma r}$		$P_{0RXA} = -39.5$		citlivost přijímače (na RXA) [dBm]
$P_{\text{satRXA}} := P_{0RXA} + \Delta$		$P_{\text{satRXA}} = -19.5$		výkon na RXA saturující přijímač [dBm]

Útlumový diagram spoje

$$\begin{aligned}
 P_1 &:= P_{mLD} & P_2 &:= P_1 - \alpha_{LD} & P_3 &:= P_2 - \alpha_{TXA} - \alpha_{Wt} & P_4 &:= P_3 - \alpha_{al} \\
 P_5 &:= P_4 - \alpha_{12} & P_6 &:= P_5 + \gamma_{celk} & P_7 &:= P_6 - \alpha_{atm} & P_8 &:= P_7 - \alpha_{RXA} - \alpha_{Wr} \\
 P_9 &:= P_8 - \alpha_{IF} - \alpha_{PD} & P_{10} &:= NEP + SNR_0 \\
 P_{RXA} &:= P_7 & P_{PD} &:= P_9 & P_{OPD} &:= P_{10} & M &:= P_9 - P_{10} \\
 i &:= 1..11
 \end{aligned}$$



$$i := 1..10 \quad P_{11} := P_{10} \quad \Delta_i := P_i - P_{i+1}$$

i =	P _i =	Δ _i =	
1	10	1	P _{RXA} = -24.623 dBm výkon na RXA
2	9	1.5	
3	7.5	1	
4	6.5	50.13	P _{PD} = -28.123 dBm výkon na fotodiodě
5	-43.63	-21.171	
6	-22.459	2.164	P _{PD} := 10 ^{0.1P_{PD}}
7	-24.623	1.5	P _{PD} = 1.541 × 10 ⁻³ V výkon na fotodiodě
8	-26.123	2	
9	-28.123	14.877	M = 14.877 dB rezerva spoje na počasí
10	-43	0	

$$M_s := P_{TXA} - P_{ORXA} + 20 \cdot \log\left(\frac{D_{RXA}}{\phi_t}\right) \quad M_s = 71.46 \quad \text{dB} \quad \text{systémová rezerva spoje}$$

Vyjádření útlumu standardní "čisté" atmosféry

$$n := 1..10 \quad L_n := n \cdot 100 \quad \alpha_{\text{geom}_n} := \left| 20 \cdot \log\left(\frac{D_{RXA}}{D_{\text{ekv}} + \phi_t \cdot L_n}\right) \right| \quad \sigma_{r_l_n} := \left[0.5 \cdot C2_n \cdot \left(2 \cdot \frac{\pi}{\lambda}\right)^{\frac{7}{6}} (L_n)^{\frac{11}{6}} \right]^{\frac{1}{2}}$$

n =	L _n =	α _{geom_n} =	σ _{r_{l_n}} =
1	100	14.754	0.05
2	200	20.668	0.094
3	300	24.154	0.136
4	400	26.635	0.177
5	500	28.563	0.217
6	600	30.139	0.256
7	700	31.473	0.295
8	800	32.629	0.334
9	900	33.649	0.372
10	1·10 ³	34.562	0.41

$$\alpha_{\text{turb}_n} := \left| 10 \cdot \log(1 - \sigma_{r_l_n}) \right| \quad \alpha_{\text{part}_n} := L_n \cdot 10^{-3} \cdot \alpha_{1\text{part}} \quad \alpha_{\text{atm}_n} := \alpha_{\text{part}_n} + \alpha_{\text{turb}_n}$$

α _{turb_n} =	α _{part_n} =	α _{atm_n} =
0.221	0.05	0.271
0.427	0.1	0.527
0.634	0.15	0.784
0.845	0.2	1.045
1.062	0.25	1.312
1.287	0.3	1.587
1.52	0.35	1.87
1.764	0.4	2.164
2.019	0.45	2.469
2.288	0.5	2.788

Normovaná rezerva spoje

$$M_n := M_s - 20 \cdot \log(L_n) + \gamma_{\text{celk}} - \alpha_{\text{atm}_n}$$

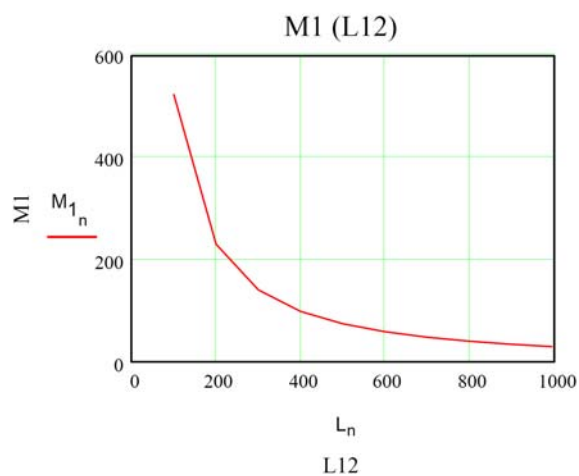
$$M_{1_n} := \frac{M_n \cdot 1000}{L_n}$$

$M_n =$

52.36
46.084
42.305
39.545
37.34
35.482
33.859
32.406
31.077
29.843

$M_{1_n} =$

523.602
230.418
141.016
98.863
74.68
59.136
48.37
40.507
34.53
29.843



7.2 Energetická bilance duálního, simplexního OBS ATMO_TL - 02_DUAL provedená v prostředí MathCad

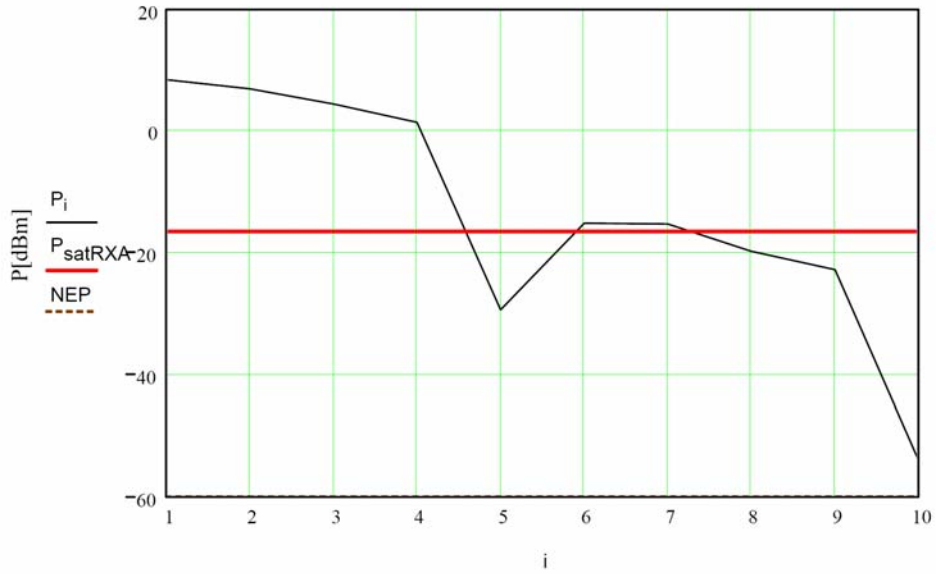
ATMO TL-02 (1550nm)

$P_{LD} := 7$	mW		střední výkon laserové diody (LD)
$\lambda := 1550 \cdot 10^{-9}$	m		vlnová délka laserového záření
$P_{mLD} := 10 \cdot \log(P_{LD})$		$P_{mLD} = 8.451$	střední výkon LD [dBm]
$\alpha_{LD} := 1.5$	dB		útlum vazby LD/TL (TL - vysílací čočka)
$\alpha_{TXA} := 1.0$	dB		útlum na vysílací optické soustavě
$\alpha_{Wt} := 1.5$	dB		útlum na krycím skle vysílače
$D_{ekv} := 17.8$	mm		průměr energeticky ekvivalentního (kruhově symetrického) svazku na TXA
$\alpha_{al} := 3$	dB		útlum nedokonalým zaměřením spoje
$P_{TXA} := P_{mLD} - \alpha_{LD} - \alpha_{TXA} - \alpha_{Wt} - \alpha_{al}$		$P_{TXA} = 1.451$	výkon na TXA [dBm]
$\phi_t := 10$	mrad		úhlová šířka energeticky ekvivalentního svazku
$L_o := \frac{D_{ekv}}{\phi_t}$		$L_o = 1.78$	pomocná délka [m]
$L_{12} := 60$	m		vzájemná vzdálenost hlavice
$\alpha_{12} := \left 20 \cdot \log \left(\frac{L_o}{L_o + L_{12}} \right) \right $		$\alpha_{12} = 30.809$	útlum šířením [dB]
$D_{RXA} := 60$	mm		průměr efektivní kruhové RXA (přijímací optická soustava)
$\gamma_{celk} := 3.67 + 10 \cdot \log \left[\left(\frac{D_{RXA}}{D_{ekv}} \right)^2 \right]$		$\gamma_{celk} = 14.225$	zisk na RXA a zisk na rozložení intenzity [dB]
$\alpha_{geom} := \left 20 \cdot \log \left(\frac{D_{RXA}}{D_{ekv} + \phi_t \cdot L_{12}} \right) \right $		$\alpha_{geom} = 20.254$	geometrický útlum [dB] (útlum šířením optického svazku, zahrnuje zisk optických soustav)
$\alpha_{Wr} := 1.5$	dB		útlum na krycím skle přijímače
$\alpha_{RXA} := 3$	dB		útlum na přijímací optické soustavě
$\alpha_{IF} := 0$	dB		útlum na interferenčním filtru (IF)
$\alpha_{PD} := 3$	dB		útlum vazby RL/PD (PL přijímací čočka)

$\alpha_{1\text{part}} := 0.5$	dB/km			koeficient útlumu standardní "čistě" atmosféry
$\alpha_{\text{part}} := L_{12} \cdot 10^{-3} \cdot \alpha_{1\text{part}}$	dB;m,dB/km	$\alpha_{\text{part}} = 0.03$		útlum částicemi v "čisté" atmosféře [dB]
$C2_n := 10^{-14}$	$\text{m}^{-2/3}$			strukturní parametr indexu lomu standardní "slabě" turbulentní atmosféry
$\sigma_{\text{rl}} := \left[0.5 \cdot C2_n \cdot \left(2 \cdot \frac{\pi}{\lambda} \right)^{\frac{7}{6}} L_{12}^{\frac{11}{6}} \right]^{\frac{1}{2}}$		$\sigma_{\text{rl}} = 0.022$		relativní standardní odchylka optické intenzity [-]
$\alpha_{\text{turb}} := \left 10 \cdot \log(1 - \sigma_{\text{rl}}) \right $		$\alpha_{\text{turb}} = 0.095$		útlum turbulencí [dB]
$\alpha_{\text{atm}} := \alpha_{\text{part}} + \alpha_{\text{turb}}$		$\alpha_{\text{atm}} = 0.125$		celkový útlum "čisté" a "slabě" turbulentní atmosféry [dB]
$\alpha_{\Sigma t} := \alpha_{\text{LD}} + \alpha_{\text{TXA}} + \alpha_{\text{Wt}} + \alpha_{\text{al}}$		$\alpha_{\Sigma t} = 7$		celkový útlum vysílací optické soustavy
$\alpha_{\Sigma r} := \alpha_{\text{Wr}} + \alpha_{\text{RXA}} + \alpha_{\text{IF}} + \alpha_{\text{PD}}$		$\alpha_{\Sigma r} = 7.5$		celkový útlum přijímací optické soustavy
$\alpha_{\Sigma} := \alpha_{\Sigma t} + \alpha_{\Sigma r}$		$\alpha_{\Sigma} = 14.5$		celkový útlum spoje (nezávislý na L_{12})
$\rho_0 := \left[0.55 \cdot C2_n \cdot \left(2 \cdot \frac{\pi}{\lambda} \right)^2 L_{12} \right]^{\frac{-3}{5}} \cdot 10^3$		$\rho_0 = 362.638$		poloměr koherence svazku [mm]
$z_0 := 10^{-6} \pi \frac{D_{\text{ekv}}^2}{4\lambda}$		$z_0 = 160.546$		hranice blízké a vzdálené zóny záření [m]
$\text{SNR}_0 := 6$	dB			odstup signálu k šumu (odhad pro korektní funkci spoje)
$\text{NEP} := -60$	dBm			výkon ekvivalentní šumu (na PD s předzesilovačem)
$\Delta := 45$	dB			dynamický rozsah přijímače (v opt. části)
$d_{\text{PD}} := 1$	mm			průměr aktivní plochy fotodiody
$f_{\text{RXA}} := 108$	mm			ohnisková vzdálenost přijímací čočky
$\phi_{\text{RXA}} := \frac{1000d_{\text{PD}}}{f_{\text{RXA}}}$		$\phi_{\text{RXA}} = 9.259$		zorný úhel přijímače [mrad]
$P_{0\text{PD}} := \text{NEP} + \text{SNR}_0$		$P_{0\text{PD}} = -54$		citlivost přijímače (na fotodiodě) [dBm]
$P_{0\text{RXA}} := \text{NEP} + \text{SNR}_0 - \alpha_{\Sigma r}$		$P_{0\text{RXA}} = -61.5$		citlivost přijímače (na RXA) [dBm]
$P_{\text{satRXA}} := P_{0\text{RXA}} + \Delta$		$P_{\text{satRXA}} = -16.5$		výkon na RXA saturující přijímač [dBm]

Útlumový diagram spoje

$$\begin{aligned}
 P_1 &:= P_{mLD} & P_2 &:= P_1 - \alpha_{LD} & P_3 &:= P_2 - \alpha_{TXA} - \alpha_{Wt} & P_4 &:= P_3 - \alpha_{al} \\
 P_5 &:= P_4 - \alpha_{12} & P_6 &:= P_5 + \gamma_{celk} & P_7 &:= P_6 - \alpha_{atm} & P_8 &:= P_7 - \alpha_{RXA} - \alpha_{Wr} \\
 P_9 &:= P_8 - \alpha_{IF} - \alpha_{PD} & P_{10} &:= NEP + SNR_0 \\
 P_{RXA} &:= P_7 & P_{PD} &:= P_9 & P_{0PD} &:= P_{10} & M &:= P_9 - P_{10} \\
 i &:= 1..11
 \end{aligned}$$



$$i := 1..10 \quad P_{11} := P_{10} \quad \Delta_i := P_i - P_{i+1}$$

i =	P _i =	Δ _i =	
1	8.451	1.5	P _{RXA} = -15.258 dBm výkon na RXA
2	6.951	2.5	
3	4.451	3	
4	1.451	30.809	P _{PD} = -22.758 dBm výkon na fotodiódě
5	-29.358	-14.225	
6	-15.133	0.125	P _{PD} := 10 ^{0.1P_{PD}}
7	-15.258	4.5	P _{PD} = 5.299 × 10 ⁻³ mW výkon na fotodiódě
8	-19.758	3	
9	-22.758	31.242	M = 31.242 dB rezerva spoje na počasí
10	-54	0	

$$M_s := P_{TXA} - P_{ORXA} + 20 \cdot \log\left(\frac{D_{RXA}}{\phi_t}\right) \quad M_s = 78.514 \text{ dB} \quad \text{systemová rezerva spoje}$$

$$n := 1..10 \quad L_n := n \cdot 100 \quad \alpha_{geom_n} := \left| 20 \cdot \log\left(\frac{D_{RXA}}{D_{ekv} + \phi_t \cdot L_n}\right) \right| \quad \sigma_{rl_n} := \left[0.5 \cdot C2_n \cdot \left(2 \cdot \frac{\pi}{\lambda}\right)^{\frac{7}{6}} (L_n)^{\frac{11}{6}} \right]^{\frac{1}{2}}$$

n =	L _n =
1	100
2	200
3	300
4	400
5	500
6	600
7	700
8	800
9	900
10	1·10 ³

α _{geom_n} =
24.59
30.535
34.031
36.517
38.447
40.026
41.361
42.518
43.539
44.452

σ _{rl_n} =
0.034
0.065
0.094
0.123
0.151
0.178
0.205
0.232
0.258
0.284

$$\alpha_{turb_n} := \left| 10 \cdot \log(1 - \sigma_{rl_n}) \right| \quad \alpha_{part_n} := L_n \cdot 10^{-3} \cdot \alpha_{1part} \quad \alpha_{atm_n} := \alpha_{part_n} + \alpha_{turb_n}$$

α _{turb_n} =
0.152
0.292
0.43
0.569
0.709
0.852
0.997
1.146
1.298
1.454

α _{part_n} =
0.05
0.1
0.15
0.2
0.25
0.3
0.35
0.4
0.45
0.5

α _{atm_n} =
0.202
0.392
0.58
0.769
0.959
1.152
1.347
1.546
1.748
1.954

Normovaná rezerva spoje

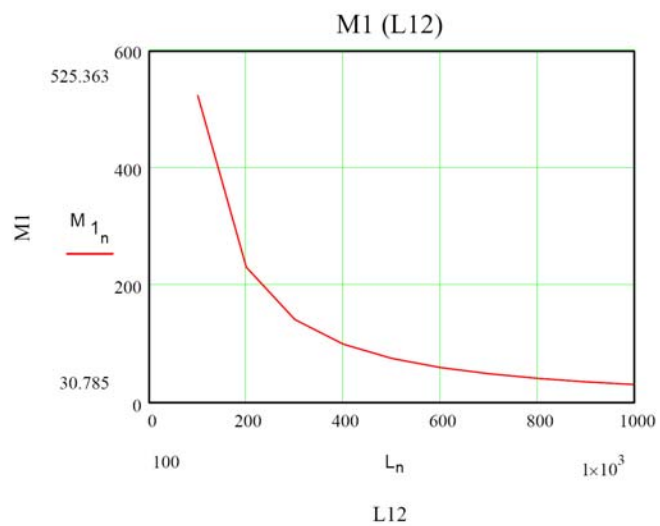
$$M_n := M_s - 20 \cdot \log(L_n) + \gamma_{\text{celk}} - \alpha_{\text{atm}_n} \quad M_{1_n} := \frac{M_n \cdot 1000}{L_n}$$

$M_n =$

52.536
46.326
42.616
39.928
37.8
36.024
34.49
33.131
31.906
30.785

$M_{1_n} =$

525.363
231.629
142.053
99.821
75.6
60.04
49.271
41.414
35.451
30.785



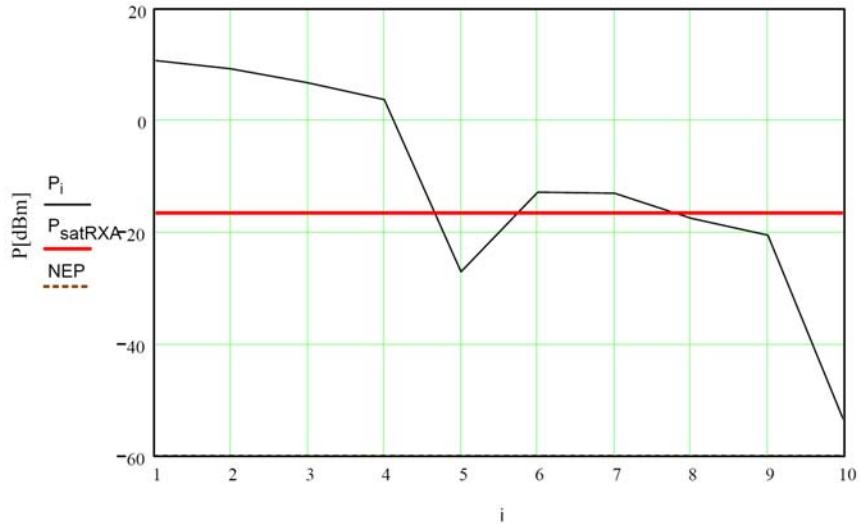
ATMO TL-02 (830nm)

$P_{LD} := 12$	mW		střední výkon laserové diody (LD)
$\lambda := 830 \cdot 10^{-9}$	m		vlnová délka laserového záření
$P_{mLD} := 10 \cdot \log(P_{LD})$		$P_{mLD} = 10.792$	střední výkon LD [dBm]
$\alpha_{LD} := 1.5$	dB		útlum vazby LD/TL (TL - vysílací čočka)
$\alpha_{TXA} := 1.0$	dB		útlum na vysílací optické soustavě
$\alpha_{Wt} := 1.5$	dB		útlum na krycím skle vysílače
$D_{ekv} := 17.8$	mm		průměr energeticky ekvivalentního (kruhově symetrického) svazku na TXA
$\alpha_{al} := 3$	dB		útlum nedokonalým zaměřením spoje
$P_{TXA} := P_{mLD} - \alpha_{LD} - \alpha_{TXA} - \alpha_{Wt} - \alpha_{al}$		$P_{TXA} = 3.792$	výkon na TXA [dBm]
$\phi_t := 10$	mrad		úhlová šířka energeticky ekvivalentního svazku
$L_o := \frac{D_{ekv}}{\phi_t}$		$L_o = 1.78$	pomocná délka [m]
$L_{12} := 60$	m		vzájemná vzdálenost hlavíc
$\alpha_{12} := \left 20 \cdot \log \left(\frac{L_o}{L_o + L_{12}} \right) \right $		$\alpha_{12} = 30.809$	útlum šířením [dB]
$D_{RXA} := 60$	mm		průměr efektivní kruhové RXA (přijímací optická soustava)
$\gamma_{celk} := 3.67 + 10 \cdot \log \left[\left(\frac{D_{RXA}}{D_{ekv}} \right)^2 \right]$		$\gamma_{celk} = 14.225$	zisk na RXA a zisk na rozložení intenzity [dB]
$\alpha_{geom} := \left 20 \cdot \log \left(\frac{D_{RXA}}{D_{ekv} + \phi_t \cdot L_{12}} \right) \right $		$\alpha_{geom} = 20.254$	geometrický útlum [dB] (útlum šířením optického svazku, zahrnuje zisk optických soustav)
$\alpha_{Wr} := 1.5$	dB		útlum na krycím skle přijímače
$\alpha_{RXA} := 3$	dB		útlum na přijímací optické soustavě
$\alpha_{IF} := 0$	dB		útlum na interferenčním filtru (IF)
$\alpha_{PD} := 3$	dB		útlum vazby RL/PD (PL přijímací čočka)

$\alpha_{1\text{part}} := 0.5$ dB/km		koeficient útlumu standardní "čistě" atmosféry
$\alpha_{\text{part}} := L_{12} \cdot 10^{-3} \cdot \alpha_{1\text{part}}$ dB;m,dB/km	$\alpha_{\text{part}} = 0.03$	útlum částicemi v "čisté" atmosféře [dB]
$C_{2n} := 10^{-14}$ m ^{-2/3}		strukturní parametr indexu lomu standardní "slabě" turbulentní atmosféry
$\sigma_{rl} := \left[0.5 \cdot C_{2n} \cdot \left(2 \cdot \frac{\pi}{\lambda} \right)^{\frac{7}{6}} L_{12}^{\frac{11}{6}} \right]^{\frac{1}{2}}$	$\sigma_{rl} = 0.031$	relativní standardní odchylka optické intenzity [-]
$\alpha_{\text{turb}} := \left 10 \cdot \log(1 - \sigma_{rl}) \right $	$\alpha_{\text{turb}} = 0.137$	útlum turbulencí [dB]
$\alpha_{\text{atm}} := \alpha_{\text{part}} + \alpha_{\text{turb}}$	$\alpha_{\text{atm}} = 0.167$	celkový útlum "čisté" a "slabě" turbulentní atmosféry [dB]
$\alpha_{\Sigma t} := \alpha_{LD} + \alpha_{TXA} + \alpha_{Wt} + \alpha_{al}$	$\alpha_{\Sigma t} = 7$	celkový útlum vysílací optické soustavy
$\alpha_{\Sigma r} := \alpha_{Wr} + \alpha_{RXA} + \alpha_{IF} + \alpha_{PD}$	$\alpha_{\Sigma r} = 7.5$	celkový útlum přijímací optické soustavy
$\alpha_{\Sigma} := \alpha_{\Sigma t} + \alpha_{\Sigma r}$	$\alpha_{\Sigma} = 14.5$	celkový útlum spoje (nezávislý na L_{12})
$\rho_0 := \left[0.55 \cdot C_{2n} \cdot \left(2 \cdot \frac{\pi}{\lambda} \right)^2 L_{12} \right]^{\frac{-3}{5}} \cdot 10^3$	$\rho_0 = 171.384$	poloměr koherence svazku [mm]
$z_0 := 10^{-6} \pi \frac{D_{\text{ekv}}^2}{4\lambda}$	$z_0 = 299.814$	hranice blízké a vzdálené zóny záření [m]
$\text{SNR}_0 := 6$ dB		odstup signálu k šumu (odhad pro korektní funkci spoje)
$\text{NEP} := -60$ dBm		výkon ekvivalentní šumu (na PD s předzesilovačem)
$\Delta := 45$ dB		dynamický rozsah přijímače (v opt. části)
$d_{PD} := 1$ mm		průměr aktivní plochy fotodiody
$f_{RXA} := 108$ mm		ohnisková vzdálenost přijímací čočky
$\phi_{RXA} := \frac{1000d_{PD}}{f_{RXA}}$	$\phi_{RXA} = 9.259$	zorný úhel přijímače [mrad]
$P_{0PD} := \text{NEP} + \text{SNR}_0$	$P_{0PD} = -54$	citlivost přijímače (na fotodiodě) [dBm]
$P_{0RXA} := \text{NEP} + \text{SNR}_0 - \alpha_{\Sigma r}$	$P_{0RXA} = -61.5$	citlivost přijímače (na RXA) [dBm]
$P_{\text{satRXA}} := P_{0RXA} + \Delta$	$P_{\text{satRXA}} = -16.5$	výkon na RXA saturující přijímač [dBm]

Útlumový diagram spoje

$$\begin{aligned}
 P_1 &:= P_{\text{mLD}} & P_2 &:= P_1 - \alpha_{\text{LD}} & P_3 &:= P_2 - \alpha_{\text{TXA}} - \alpha_{\text{Wt}} & P_4 &:= P_3 - \alpha_{\text{al}} \\
 P_5 &:= P_4 - \alpha_{\text{12}} & P_6 &:= P_5 + \gamma_{\text{celk}} & P_7 &:= P_6 - \alpha_{\text{atm}} & P_8 &:= P_7 - \alpha_{\text{RXA}} - \alpha_{\text{Wr}} \\
 P_9 &:= P_8 - \alpha_{\text{IF}} - \alpha_{\text{PD}} & P_{10} &:= \text{NEP} + \text{SNR}_0 \\
 P_{\text{RXA}} &:= P_7 & P_{\text{PD}} &:= P_9 & P_{0\text{PD}} &:= P_{10} & M &:= P_9 - P_{10} \\
 i &:= 1..11
 \end{aligned}$$



$$i := 1..10 \quad P_{11} := P_{10} \quad \Delta_i := P_i - P_{i+1}$$

i =	P _i =	Δ _i =
1	10.792	1.5
2	9.292	2.5
3	6.792	3
4	3.792	30.809
5	-27.017	-14.225
6	-12.792	0.167
7	-12.959	4.5
8	-17.459	3
9	-20.459	33.541
10	-54	0

$P_{\text{RXA}} = -12.959 \text{ dBm}$ výkon na RXA

$P_{\text{PD}} = -20.459 \text{ dBm}$ výkon na fotodiodě

$$P_{\text{PD}} := 10^{0.1 P_{\text{PD}}}$$

$P_{\text{PD}} = 8.997 \times 10^{-3} \text{ V}$ výkon na fotodiodě

$M = 33.541 \text{ dB}$ rezerva spoje na počasí

$$M_s := P_{TXA} - P_{ORXA} + 20 \cdot \log\left(\frac{D_{RXA}}{\phi_t}\right) \quad M_s = 80.855 \text{ dB} \quad \text{systemová rezerva spoje}$$

$$n := 1..10 \quad L_n := n \cdot 100 \quad \alpha_{\text{geom}_n} := \left| 20 \cdot \log\left(\frac{D_{RXA}}{D_{\text{ekv}} + \phi_t \cdot L_n}\right) \right| \quad \sigma_{rI_n} := \left[0.5 \cdot C2_n \cdot \left(2 \cdot \frac{\pi}{\lambda}\right)^{\frac{7}{6}} \cdot \frac{11}{6} \cdot L_n \right]^{\frac{1}{2}}$$

n =	L _n =	α _{geom_n} =	σ _{rI_n} =
1	100	24.59	0.05
2	200	30.535	0.094
3	300	34.031	0.136
4	400	36.517	0.177
5	500	38.447	0.217
6	600	40.026	0.256
7	700	41.361	0.295
8	800	42.518	0.334
9	900	43.539	0.372
10	1·10 ³	44.452	0.41

$$\alpha_{\text{turb}_n} := \left| 10 \cdot \log(1 - \sigma_{rI_n}) \right| \quad \alpha_{\text{part}_n} := L_n \cdot 10^{-3} \cdot \alpha_{1\text{part}} \quad \alpha_{\text{atm}_n} := \alpha_{\text{part}_n} + \alpha_{\text{turb}_n}$$

α _{turb_n} =	α _{part_n} =	α _{atm_n} =
0.221	0.05	0.271
0.427	0.1	0.527
0.634	0.15	0.784
0.845	0.2	1.045
1.062	0.25	1.312
1.287	0.3	1.587
1.52	0.35	1.87
1.764	0.4	2.164
2.019	0.45	2.469
2.288	0.5	2.788

Normovaná rezerva spoje

$$M_n := M_s - 20 \cdot \log(L_n) + \gamma_{\text{celk}} - \alpha_{\text{atm}_n}$$

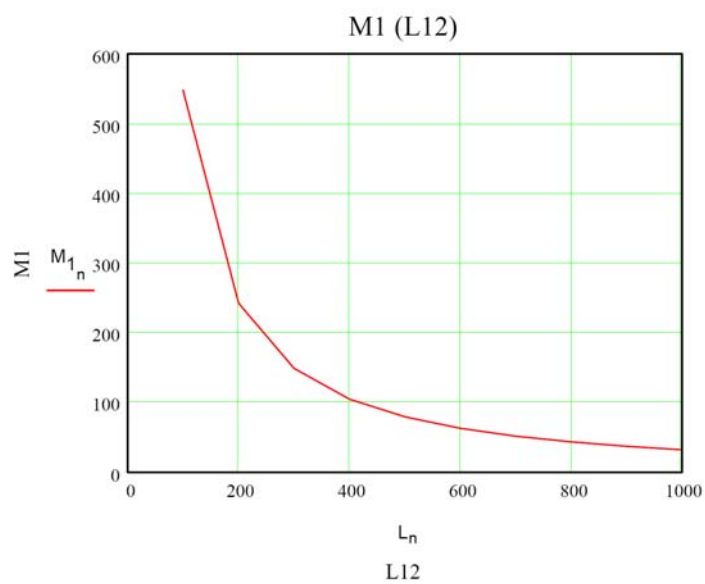
$$M_{1_n} := \frac{M_n \cdot 1000}{L_n}$$

$M_n =$

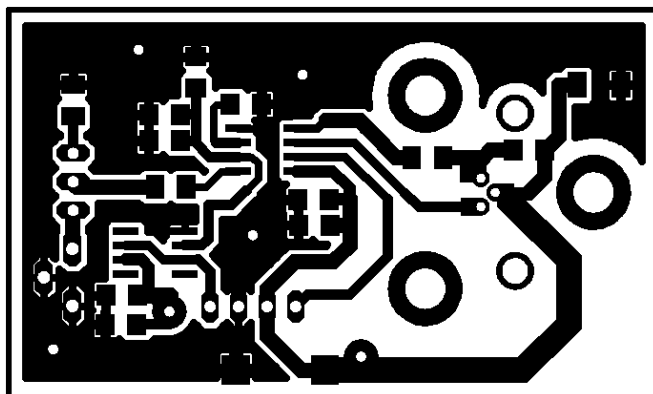
54.808
48.532
44.753
41.993
39.788
37.93
36.307
34.854
33.525
32.291

$M_{1_n} =$

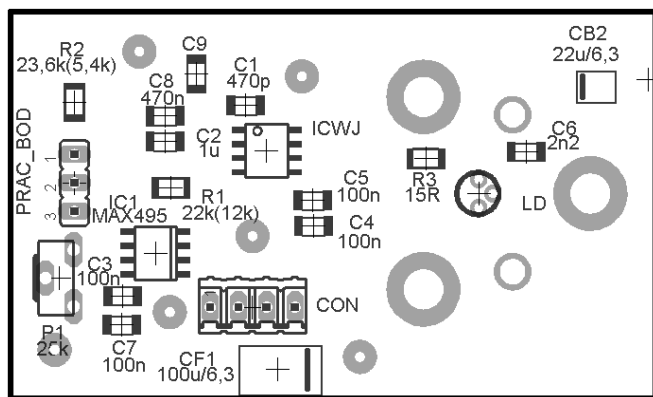
548.085
242.659
149.177
104.983
79.576
63.216
51.868
43.567
37.25
32.291



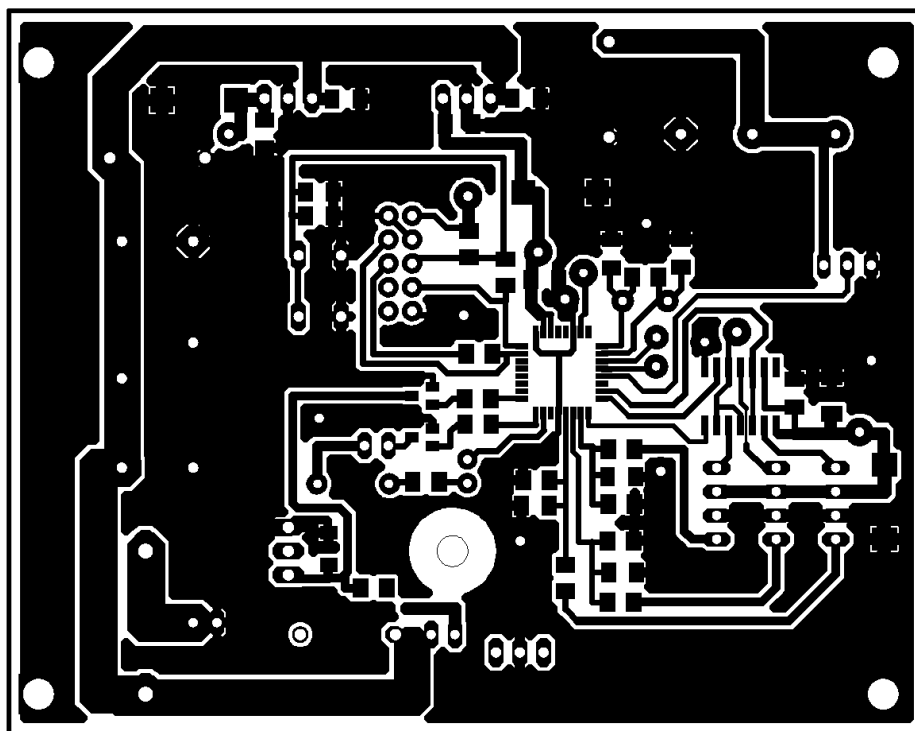
7.3 Elektronické bloky ATMO TL-02_DUAL, desky plošných spojů, osazovací plány



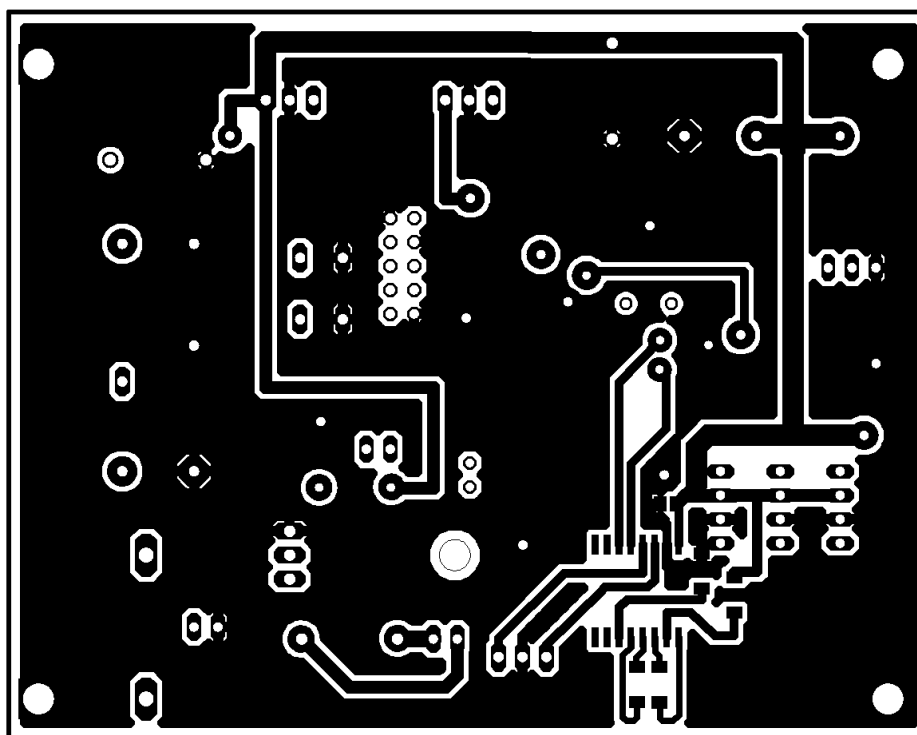
DPS bloku laseru, měřítko 1:1,5



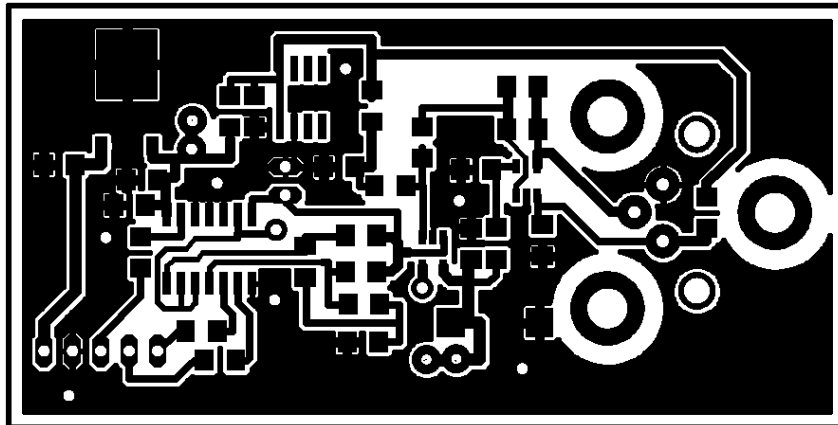
Osazovací plán bloku laseru



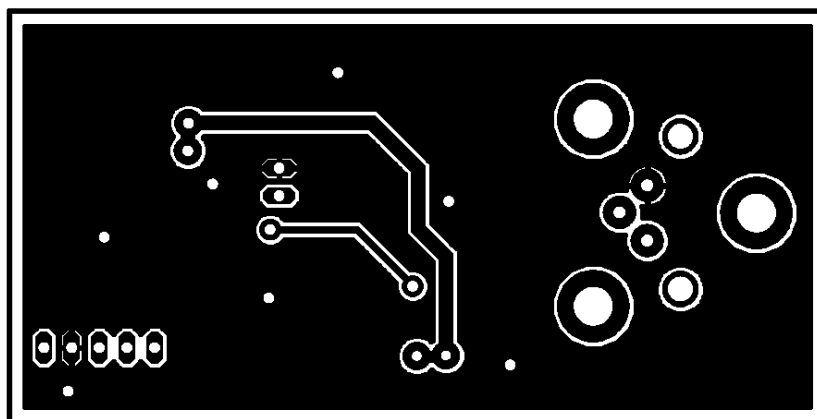
DPS modulu řízení vysílače, vrstva TOP, měřítko 1:1,25



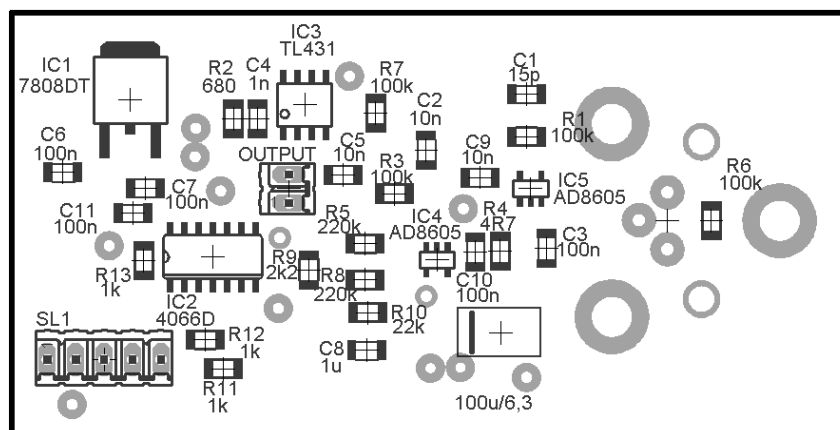
DPS modulu řízení vysílače, vrstva BOT, měřítko 1:1,25



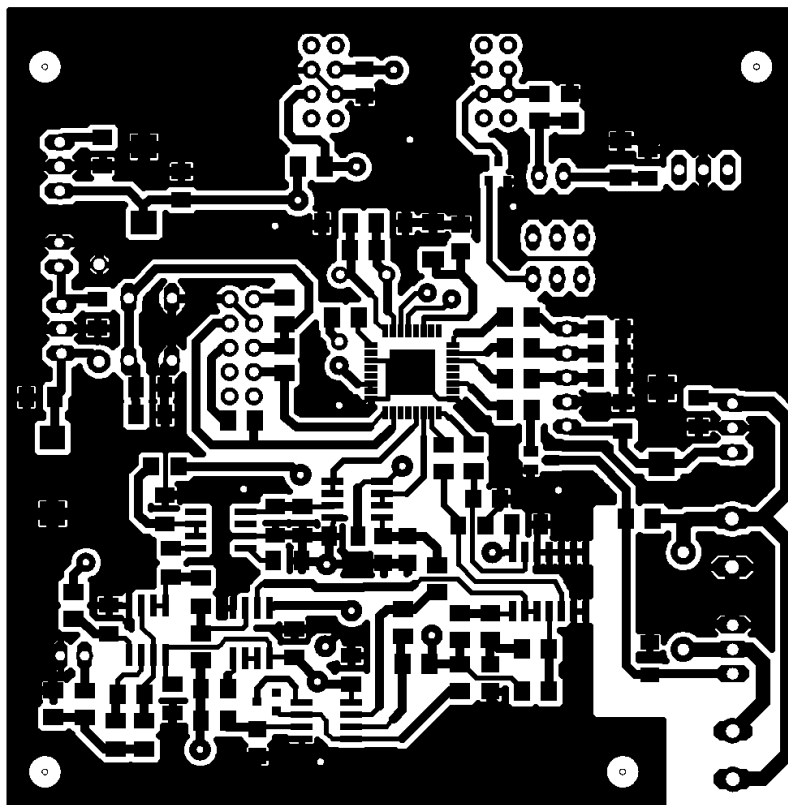
DPS bloku přijímače, vrstva TOP, měřítko 1:1,5



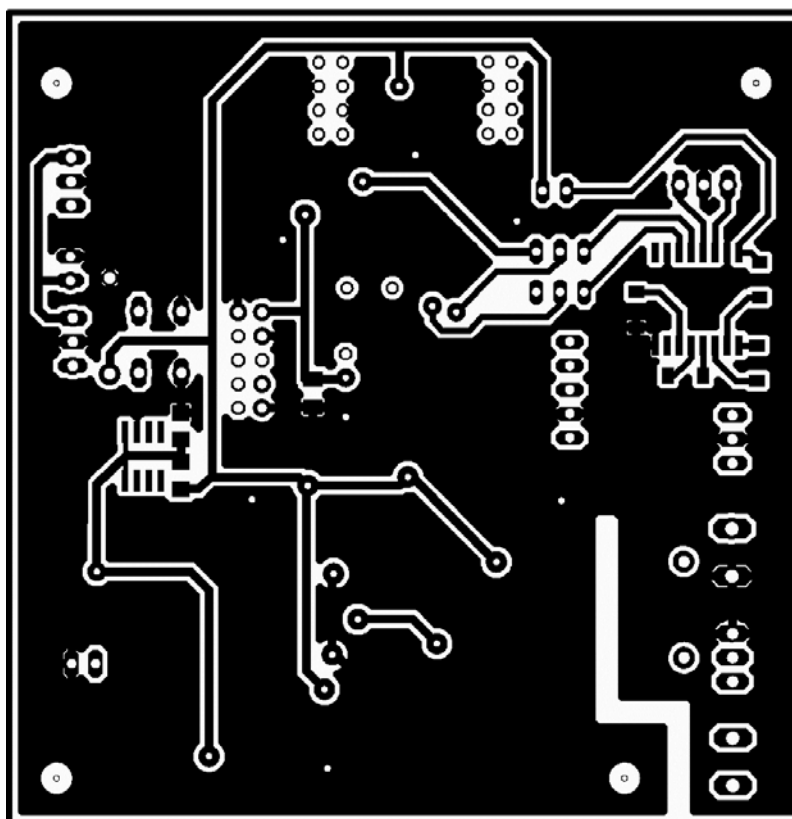
DPS bloku přijímače, vrstva BOT, měřítko 1:1,5



Osazovací plán modulu přijímače, vrstva TOP, měřítko 1:1,5

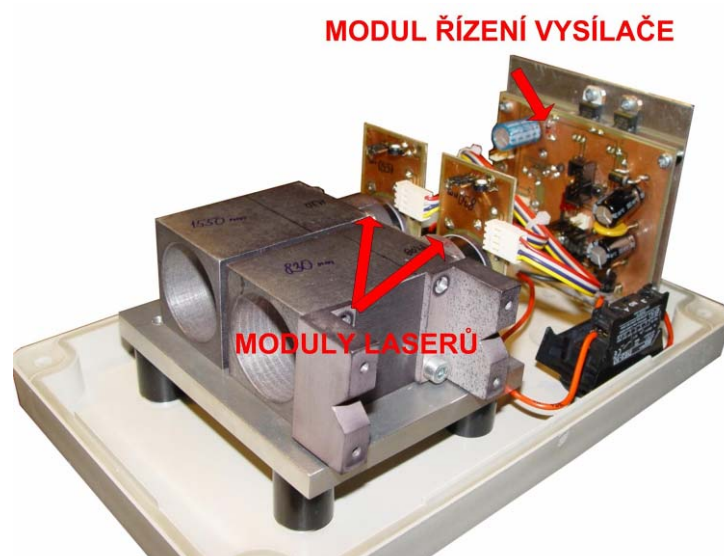


DPS modulu řízení přijímače, vrstva TOP, měřítko 1:1,25



DPS modulu řízení přijímače, vrstva BOT, měřítko 1:1,25

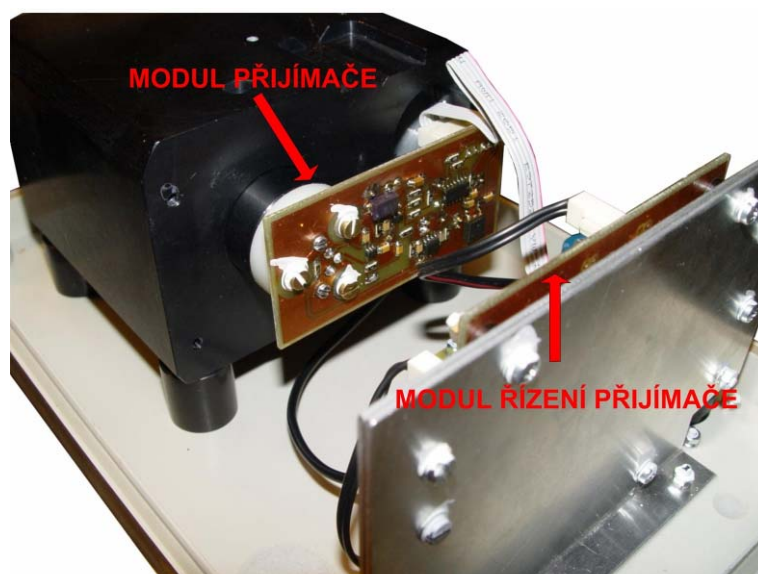
7.4 Finální konstrukce ATMO TL-02_DUAL



Mechanické uspořádání uvnitř TX



Pohled na kompletní hlavici TX



Mechanické uspořádání uvnitř TX



Pohled na kompletní hlavici RX

Poděkování

Děkuji mému školiteli panu profesorovi Wilfertovi za odborné vedení, velmi cenné rady a pomoc při práci na této disertaci. Rovněž děkuji akademickým pracovníkům Ústavu radioelektroniky za finanční podporu plynoucí z jejích grantových prostředků, a to především panu profesorovi Wilfertovi za finanční podporu z grantu GA102/09/0550 a za finanční podporu z grantů GD102/03/H105 a MSM0021630513.

Životopis

Osobní údaje

Jméno: Radek KVÍČALA
Narozen: 5. července 1981 v Prostějově
Kontakt: Kvicala.R@seznam.cz

Vzdělání

- 2004 – 2007 **Vysoké učení technické v Brně / Ústav radioelektroniky**
- doktorský program Elektronika a sdělovací technika
 - státní doktorská zkouška složena v červnu 2005
- 1999 – 2004 **Vysoké učení technické v Brně / Ústav radioelektroniky**
- magisterský program Elektronika a sdělovací technika
 - státní zkouška složena v červnu 2004
 - diplomová práce Optický vysílač pro mikrovlnný signál obhájena v červnu 2004
- 1995 – 1999 **Střední odborné učiliště a Učiliště v Boskovicích**
- obor Mechanik elektronik se zaměřením na automatizační techniku

Profesní praxe

- 1999 – 2007 **Televizní opravna Robert Sedláček**
- opravy, modifikace a návrh elektronických zařízení
- Od 2006 **PVfree.net o.s.**
- výstavba a údržba metropolitní počítačové sítě
 - použití bezdrátových spojů v radiovém/optickém pásmu, kabelové rozvody
- Od 2007 **2MAX+ s.r.o.**
- návrh a realizace zabezpečovacích, kamerových systémů
 - návrh a realizace anténní a satelitních
 - opravy elektronických zařízení

Ostatní aktivity

Poradenství v oblasti elektroniky, bezdrátových sítí, počítačů.

Jazyky

Angličtina

Curriculum vitae

Personal information

Name: Radek KVÍČALA
Born: July 5th 1981 in Prostějov
Contact: Kvicala.R@seznam.cz

Education

- 2004 – 2007 **Technical University of Brno / Department of Radio Electronics**
- Ph.D study of electronics
 - state exam passed in June 2006
- 1999 – 2004 **Technical University of Brno / Department of Radio Electronics**
- Pre-graduate study of radio electronics
 - State exam passed in June 2004
 - Diploma Thesis Optical transmitter for microwave signal
- 1995 – 1999 **Vocational school and school Boskovice**
- Field of knowledge Mechanik elektronik for automatization

Professional practice

- 1999 – 2007 **TV service Robert Sedláček**
- Repair, modification and design electronic systems
- Since 2006 **PvFree.net o.s.**
- Metropolitan area network service and building
 - Application of wireless radio/optical link. LAN systems
- Since 2007 **2MAX+ s.r.o.**
- design and realization security and camera systems
 - design and realization satellite and antenna systems
 - design PC/data systems,
 - design/repair electronics systems

Other activities

Consulting and advisories in the area of electronics, wireless networks, computers.

Languages

Czech, English