

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií
Ústav Radioelektroniky

Ing. Petr Křivák

Optické bezkabelové spoje velkého dosahu

Long range free space optical links

Zkrácená verze Ph.D. Thesis

Obor: Elektronika a sdělovací technika
Školitel: Doc. Ing. Otakar Wilfert, CSc
Oponenti:

Datum obhajoby:

KLÍČOVÁ SLOVA

Optické bezkabelové spoje, optický přijímač, lavinová fotodioda, rozložení optické intenzity

KEYWORDS

Optical wireless links, optical receiver, avalanche photodiode, optical intensity distribution

MÍSTO ULOŽENÍ PRÁCE:

Vědecké oddělení děkanátu FEKT VUT v Brně, Údolní 53, Brno, 602 00

© Petr Křivák, 2009

ISSN 1213-4198

ISBN 80-214-

OBSAH

1 ÚVOD	5
2 DOSAVADNÍ VÝVOJ OBS	6
2.1 Výkonová bilance spoje – stacionární model	7
2.2 Geometrický popis optického svazku	9
2.2.1 Útlumy spojené s optickým vysílačem	9
2.2.2 Volba optického zdroje	10
2.2.3 Volba vysílací čočky	11
2.2.4 Útlumy spojené s optickým přijímačem	11
2.2.5 Volba přijímací čočky	12
2.2.6 Volba vhodného detekčního prvku	13
2.2.7 Popis optického svazku	14
2.2.8 Útlum šířením	17
2.2.9 Zisk přijímací čočky	18
2.2.10 Fluktuační optické intenzity – turbulence atmosféry	19
2.2.11 Extinkce optické intenzity čisté atmosféry	22
2.2.12 Útlumy způsobené aerosoly, deštěm a sněhem	23
2.3 Statistický model spoje	24
2.3.1 Potlačení vlivů působících na optický spoj	25
2.4 Komplexní model spoje	26
2.4.1 Nomogram pro výpočet nedostupnosti spoje	26
2.5 Vyhodnocení získaných poznatků	28
3 MĚŘENÍ - ZPRACOVÁNÍ VÝSLEDKŮ	30
3.1 Laboratorní měření	30
3.2 Měření na dálkovém spoji	32
3.3 Měření na duálním spoji	33
4 ZÁVĚR	37
5 LITERATURA	38
CURRICULUM VITAE	42
ABSTRACT	43

1 ÚVOD

Počet zařízení využívajících bezdrátovou komunikaci se stále zvyšuje. Vyrůstají nároky na rychlost a bezpečnost přenosu vedou k zahlcení rádiových frekvencí a hledají se alternativní řešení. Velmi perspektivní se jeví využívání optických bezkabelových spojů (OBS), a to nejen pro krátké vzdálenosti (řádů stovek metrů až jednotek kilometrů), ale i pro vzdálenosti řádově nízkých desítek kilometrů. OBS dělíme zejména podle jejich dosahu a přenosové rychlosti. Pro krátké a střední vzdálenosti se již běžně používají přenosové rychlosti 125 Mbit/s Fast Ethernet a 155 Mbit/s dané standardem STM-1, ale objevují se i návrhy spojů s rychlostmi 622 Mbit/s, 1 Gbit/s i více.

Jako každé zařízení i OBS přinášejí jisté výhody a nevýhody.

Hlavní výhody OBS oproti rádiovým spojům jsou:

vysoká směrovost – nehrozí interference s jinými spoji

vysoká přenosová rychlost

absence legislativních překážek – nespádají do působnosti ČTÚ

Hlavní nevýhody optických spojů velkého dosahu jsou:

úzký svazek – vyšší náročnost na mechanickou stabilitu

malá dostupnost vysílacích a přijímacích diod

nutnost přímé viditelnosti

Přenosovým prostředím pro optický svazek přenášející informaci je nejnižší vrstva atmosféry (troposféra), v níž se rušení spoje projevuje nejvíce.

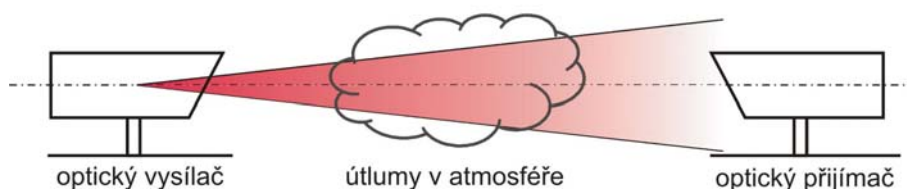
Disertační práce se zabývá návrhem konkrétního optického spoje s dosahem 30 km pro přenosovou rychlost 10 Mbit/s. Navrhovaný spoj je určen pro komunikaci mezi městy k přenosu rentgenových snímků mezi nemocnicemi. Projekt byl motivován zájmem ředitele pro počítačové sítě Ústavu výpočetní techniky Masarykovy university v Brně o vývoj spoje velkého dosahu. Řešeny jsou problémy „elektronické“ (návrh elektronické části spoje), „mechanické“ (uchycení, stabilita, nastavování) a problémy související se šířením optického svazku v atmosféře.

V závěru práce jsou vyhodnoceny parametry popisující jednotlivé části i funkčnost celého spoje. Vzhledem k relativně vysokým optickým výkonům vysílačů jsou zohledněny podmínky bezpečnosti práce s lasery.

2 DOSAVADNÍ VÝVOJ OBS

Optické bezdrátové komunikace prodělaly v posledních letech velký vývoj a jejich využití se dnes dostalo prakticky do všech oblastí od komunikace uvnitř místností až po komunikaci typu Země-Mars. V disertační práci se zaměřuji zejména na spoje stacionární pracující v atmosférickém přenosovém prostředí.

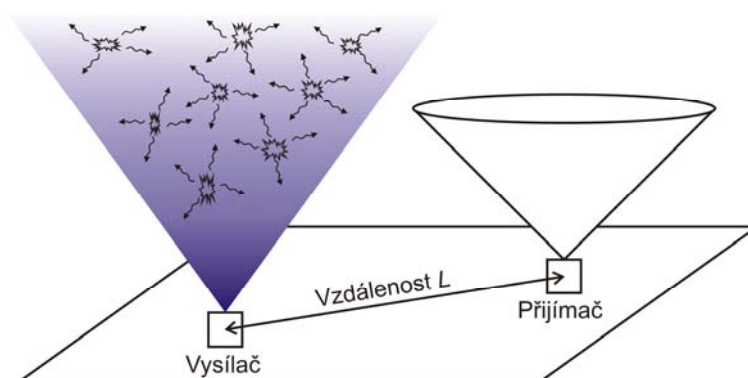
Pro atmosférické optické spoje existují dva základní principy šíření optického signálu. První princip využívá přímého šíření optického signálu (spoje směrové) dle Obr.2.1. Jeden nebo více svazků se šíří přímým směrem. Atmosférické vlivy zde působí jako rušivé elementy způsobující přídavný útlum šířením, zhoršující přenosové vlastnosti optického spoje.



Obr. 2.1 Nákres přímého optického bezkabelového spoje.

Jako zdroj optického signálu se zde mohou použít tři typy optických zdrojů. Prvním používaným zdrojem byly LED diody. Od těchto zdrojů se již upustilo, neboť jejich svazek vyznačující se velkou šířkou spektrální čáry je více ovlivněn atmosférou, než svazek s úzkou spektrální čarou, jenž je typická pro současné optické spoje využívající laserové diody. Jako poslední optický zdroj, jehož se nyní používá zejména pro měřicí zařízení a výzkum, je použití pevnolátkových nebo plynových laserů v kombinaci s externím modulátorem [34]. Tyto lasery jsou obtížnější přinášejí možnost použití větších vlnových délek, méně ovlivňovaných atmosférou, jejich nevýhodou je však obtížnější modulace přenášeným signálem a jejich mnohem vyšší cena.

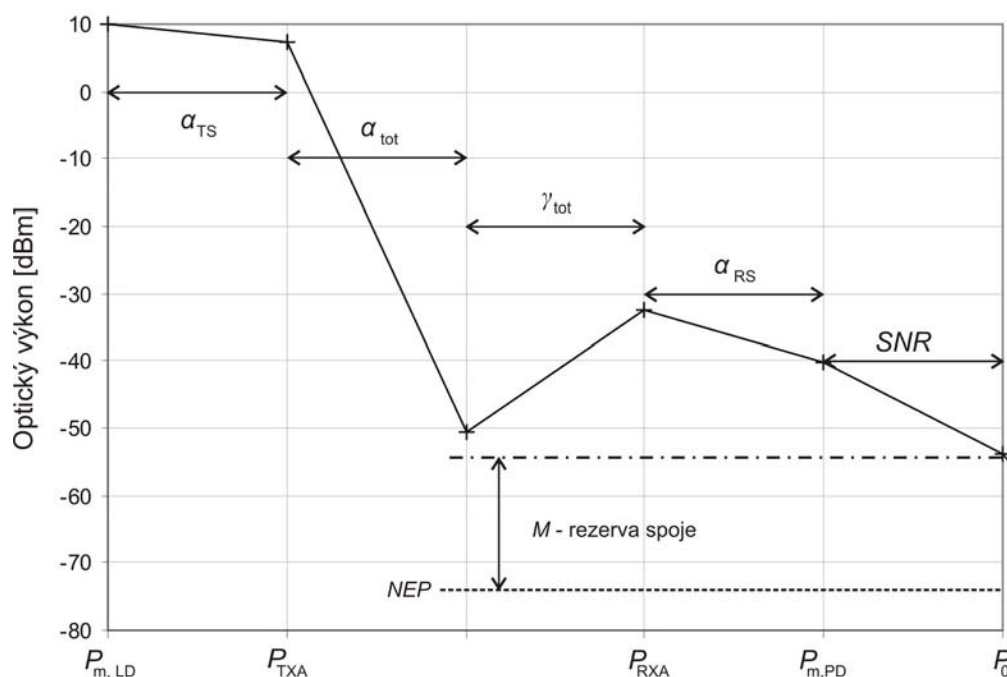
Jako druhý princip komunikace je možné uvést komunikaci založenou na rozptylu světla vlivem rozptylu světla atmosférou (viz. Obr. 2.2). Tento princip využívá vlnových délek, v ultrafialové části spektra, jenž jsou nejvíce ovlivňovány atmosférou. Jako zdroj UV záření jsou používány UV-LED diody o vlnových délkách od 250 do 280 nm. Toto světlo je atmosférou značně rozptylováno a také utlumeno, což má za následek, že se v této oblasti spektra méně projevuje rušení okolním a slunečním zářením. Tento způsob komunikace je podrobně popsán v [35].



Obr. 2.2 Nákres optického bezkabelového spoje, založeného na rozptylu světla atmosférou.

2.1 VÝKONOVÁ BILANCE SPOJE – STACIONÁRNÍ MODEL

Při návrhu optických bezkabelových spojů se vychází z diagramu energetické bilance spoje, což je matematický model popisující výkonové úrovně ve významných místech optického vysílače a přijímače.



Obr. 2.3 Diagram energetické bilance optického spoje.

($P_{m,LD}$ – střední výkon emitovaný LD, P_{TXA} – střední výkon na výstupu z vysílací hlavice, P_{RXA} – střední výkon dopadající na čočku přijímací hlavice, $P_{m,PD}$ – střední výkon na fotodiodě, P_0 – minimální úroveň výkonu na fotodiodě potřebná pro „bezchybný“ chod spoje, NEP – úroveň vlastního šumu přijímací fotodiody, SNR – požadovaný odstup signál šum odpovídající dané chybovosti spoje BER , α_{TS} – útlum vysílací části, α_{tot} – celkový útlum šířením atmosférickým přenosovým prostředím, γ_{tot} – celkový zisk, α_{RS} – útlum přijímací části.)

Z diagramu uvedeného na Obr. 2.3 a uspořádání spoje vyplývá zápis bilanční rovnice spoje v decibelové míře.

$$P_{m,PD} = P_{m,LD} - \alpha_{TS} - \alpha_{RS} - \alpha_{tot} + \gamma_{RXA}, \quad (2.1)$$

kde

$$\alpha_{tot} = \alpha_{12} + \alpha_{atm} + \alpha_{al}. \quad (2.2)$$

Útlum α_{12} je útlum šířením (viz. kapitola 2.2.8) a α_{al} je útlum způsobený nedokonalým zaměřením spoje. Definice ostatních útlumů (α_{atm} , α_{TS} , α_{RS}) a zisku γ_{tot} budou podrobněji diskutovány dále.

Při návrhu a počítání energetické bilance optického bezkabelového spoje je potřeba znát všechny útlumy ke kterým obecně dochází. Známe-li všechny uvedené veličiny můžeme určit jaký výkon dopadá na přijímací fotodiodu. Pro určení výkonové rezervy spoje pak vycházíme z hodnoty vlastního šumu přijímací fotodiody (NEP). Citlivost přijímače je pak dána výrazem

$$P_0 = NEP + SNR, \quad (2.3)$$

NEP je hodnota závisující na šířce přenášeného pásma B , která je přímo úměrná použité přenosové rychlosti

$$NEP = NEP_1 10 \log B. \quad (2.4)$$

Pro přenosovou rychlost 10 Mbit/s je potřebná šířka pásma $B = 10$ MHz a NEP_1 je konkrétní hodnota úrovně šumu uváděná v katalogové listu fotodiody. Z závislosti mezi BER a SNR pak odpovídá hodnotám v tabulce Tab. 2.1.

Tab. 2.1 Tabulka pro převod BER na SNR [14].

BER [-]	SNR [dB]
10^{-3}	10,0
10^{-6}	13,5
10^{-9}	15,5

Uvedené hodnoty odstupu signál šum jsou získané výpočtem. Chceme-li při návrhu spoje výpočtem určit výkonovou rezervu spoje, musíme si již při návrhu jako jeden ze zadaných parametrů stanovit jaká je přípustná chybovost, která ještě neovlivní jeho funkčnost. Výkonová rezerva spoje je pak nejdůležitější parametr popisující kvalitu navrženého spoje, neboť jeho hodnota udává o kolik se může zhoršit úroveň přijímaného signálu, aby spoj fungoval s předepsanou chybovostí BER .

2.2 GEOMETRICKÝ POPIS OPTICKÉHO SVAZKU

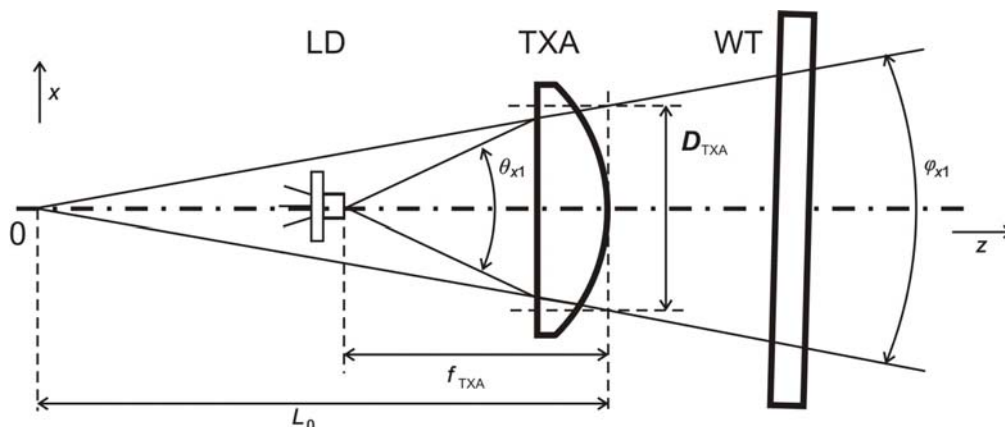
Popis šíření optického svazku může být dosti obtížné a proto je nutné zvolit vhodnou metodu aproximace a specifikovat vlastnosti svazku tak aby vyhovovala, jak potřebám přesnosti, tak i zjednodušení výpočtů. Víme, že svazek emitovaný laserovou diodou má Gaussovské rozložení optické intenzity. Při jeho popisu vycházíme s potřeby znalosti rozložení optické intenzity v různých místech spoje. Budeme-li předpokládat šíření signálu nezkresleného atmosférickým přenosovým prostředím, pak můžeme říci, že po celou dobu šíření se bude svazek stále odpovídat Gaussovskému rozložení a měnit se bude pouze šířka svazku a úroveň optické intenzity na ose svazku. Pro spoje velkého dosahu může být svazek aproximován a charakterizován pološířkou svazku, intenzitou na ose svazku a divergencí svazku (dle Obr. 2.4).

2.2.1 Útlumy spojené s optickým vysílačem

Celkový útlum vysílací optické soustavy α_{TS} je dán součtem útlumu krycího skla α_{WT} , útlumu vysílací čočky α_{TXA} a útlumu způsobeného vazbou záření emitovaného laserovou diodou LD do vysílací čočky TXA

$$\alpha_{TS} = \alpha_{WT} + \alpha_{TXA} + \alpha_{LD}. \quad (2.5)$$

Útlumy krycího skla a čočky můžeme změřit přímou metodou vyplývající z rovnice 2.3 pro konkrétní vlnovou délku. Pro stanovení útlumu vazby LD – TXA můžeme vyjít z geometrického uspořádání (Obr. 2.4) a znalosti rozložení optické intenzity v emitovaném svazku [25].

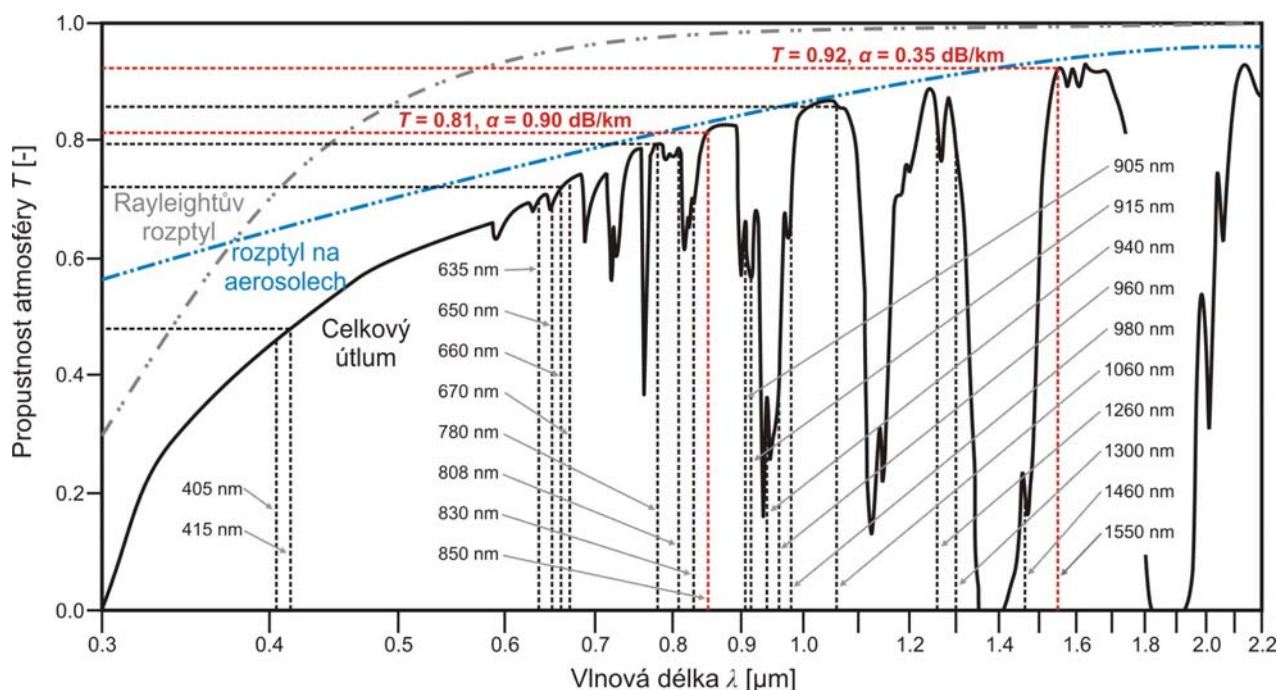


Obr. 2.4 Vysílací optická soustava.

(LD – laserová dioda, θ_{x1} – vyzařovací úhel LD, TXA – vysílací čočka, f_{TXA} – ohnisková vzdálenost čočky vysílače, L_0 – pomocná délka, D_{TXA} – průměr svazku na výstupu vysílače, WT – krycí sklo vysílače, φ_{x1} – divergence výstupního svazku)

2.2.2 Volba optického zdroje

V současné době jsou nejpoužívanějším zdrojem laserové diody, u nichž se používá přímá modulace optického výkonu změnou budicího proudu. Tato modulace je elektronicky i konstrukčně jednodušší než použití externího modulátoru, což v kombinaci s vysokou cenou znevýhodňuje použití jiného typu optického zdroje jiného typu modulace. S ohledem na požadavek velkého dosahu se upřednostňují LD před LED diodami, které v porovnání s LD nedosahují požadovaného výkonu.



Obr. 2.5 Propustnost 1 km čisté atmosféry se zvýrazněním vlnových délek komerčně vyráběných laserových diod. Ukázáno je působení Rayleighova rozptylu, rozptylu na aerosolech a útlum na molekulách atmosférických plynů. Obrázek vychází z grafu uvedeného v [36].

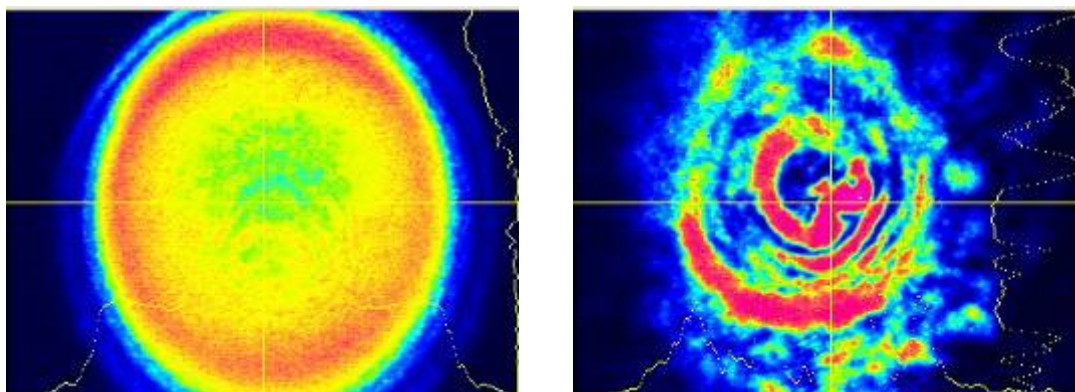
V grafu na Obr. 2.5 jsou patrná dvě nejpoužívanější atmosférická okna v okolí 850 a 1550 nm. Zaměříme-li se na šířku spektrální čáry použitého optického zdroje vidíme, že rozložení optické intenzity u LED diody s šířkou spektrální čáry (řádu desítek nm) může zasahovat i do oblasti s vysokým útlumem způsobeným rozptylem na molekulách plynů obsažených v atmosféře. Těchto vlnových délek se však musíme vyvarovat i při použití laserových diod s úzkou spektrální čarou (řádu jednotek nm), neboť se jejich centrální vlnová délka může v jistém rozmezí změnit s měnící se teplotou, budícím proudem nebo optickým výkonem.

Při porovnání hodnot útlumu čisté atmosféry s tabulkou vyráběných laserových diod se z hlediska maximálního dostupného výkonu a ceny laserové diody jeví jako nejvhodnější použití prvků pracujících na vlnových délkách 830, 1060 a 1550 nm.

2.2.3 Volba vysílací čočky

U terestriálních optických bezkabelových spojů se předpokládá dosah spoje řádově stovek metrů až desítek kilometrů (ve vesmíru až tisíce kilometrů), což v praxi znamená že výstupní svazek musí mít velmi malou rozbíhavost – malou divergenci. Rovněž je patrné že v případě použití laserové diody jako zdroje záření, můžeme LD považovat za téměř bodový zdroj. Vyjdeme li z těchto předpokladů, musí mít vysílací čočka velmi malou otvorovou vadu. Vyžadují číselnou hodnotu poměru $f_{TXA}/D_{TXA} > 1.5$. Nižší hodnoty poměru f_{TXA}/D_{TXA} umožní tzv. „korigovaný dublet“.

Z uspořádání vysílací hlavice je rovněž patrné, že volbou poměru ohniskové vzdálenosti a průměru čočky můžeme útlum vazbou snížit na zanedbatelnou hodnotu, avšak praktické měření ukázalo, že špatná volba tohoto poměru spolu s nepřesnostmi a vadami vysílací čočky s sebou může přinést nevhodné rozložení optické intenzity. Srovnání volby čoček je patrné z Obr. 2.6.

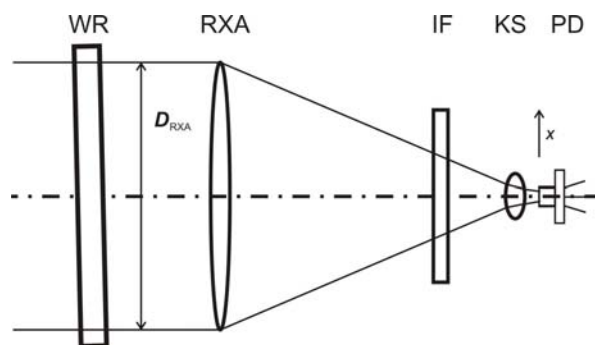


Obr. 2.6 Rozložení optické intenzity ve svazku,
vlevo: vhodná čočka – dublet s parametry $f_{TXA}/D_{TXA} = 60/40$,
vpravo: nevhodná čočka s parametry $f_{TXA}/D_{TXA} = 13/18$.

2.2.4 Útlumy spojené s optickým přijímačem

Celkový útlum přijímací optické soustavy α_{RS} vyplývá z jejího geometrického uspořádání (Obr. 2.7) a je dán součtem útlumu krycího skla α_{WR} , útlumu přijímací Fresnelovy čočky α_{RXA} , útlumu interferenčního filtru α_{IF} , útlumu koncentrátoru (nejčastěji další čočky) α_{KS} a útlumu způsobeného vazbou záření do přijímací fotodiody PD [26]

$$\alpha_{RS} = \alpha_{WR} + \alpha_{RXA} + \alpha_{IF} + \alpha_{KS} + \alpha_{PD}. \quad (2.6)$$



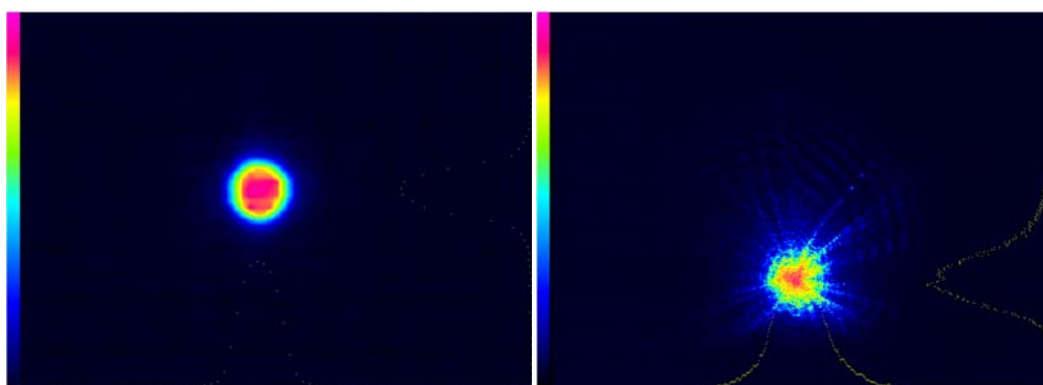
Obr. 2.7 Přijímací optická soustava.

Většinu zmíněných útlumů můžeme změřit přímou metodou. Pro stanovení útlumu vazby do PD vycházíme z poměru velikosti průměru spotu D_{spot} a průměru aktivní plochy fotodiody D_{PD}

$$\alpha_{\text{PD}} = 20 \log \frac{D_{\text{spot}}}{D_{\text{PD}}} . \quad (2.7)$$

2.2.5 Volba přijímací čočky

Základní funkce čočky spočívá ve fokusování světelných paprsků do oblasti ohniska čočky. K tomuto fokusování dochází lomem paprsků na povrchu čočky. Uvnitř čočky se pak paprsky šíří po přímých drahách. Čím delší je optická dráha, po níž se paprsek šíří uvnitř čočky, tím vyšší je útlum čočky způsobený absorpcí. Jejich konstrukce má ve srovnání s obvyklou čočkou několik významných předností. Fresnelovy čočky mají menší útlum absorpcí, což se projevuje zejména na vlnových délkách ve vzdálené infračervené oblasti spektra. Další hlavní výhodou jsou menší rozměry a hmotnost, jenž vedou k možnosti konstrukce větších průměrů čoček a ke snížení jejich ceny.



Obr. 2.8 Porovnání rozložení optické intenzity ve spotu vzniklého pomocí spojného dubletu (vlevo, $f = 40 \text{ mm}$ / $D = 25,4 \text{ mm}$) a pomocí Fresnelovy čočky (vpravo, $f = 152 \text{ mm}$ / $D = 152 \text{ mm}$). Vzniklé spoty byly snímány pomocí laser beam-profileru LBP (spoty nejsou zobrazeny ve stejném měřítku).

2.2.6 Volba vhodného detekčního prvku

Při návrhu optického přijímače vycházíme z předpokladu použití přímé intenzitní modulace s přímou detekcí IM/DD (k tomuto účelu je na trhu rovněž celá řada obvodů zejména firem Maxim a Analog Devices). Základem vhodného návrhu je rovněž potřeba nalézt vhodný detekční prvek. Některé z kvalitativních parametrů detekčního prvku jsou spektrálně závislé, a proto je potřeba zvážit i tento jejich charakter při analýze šumů. Vyjdeme-li z uspořádání optického spoje pak se na celkovém odstupu signálu k šumu se podílí následující šумы:

- fotonový šum signálu,
- fotonový šum pozadí,
- šum zesílení (v případě lavinové fotodiody)
- šum proudu za tmy
- šum obvodový (tepelný) a
- šum atmosférického přenosového prostředí

Všechny zmíněné šумы (i šum obvodový) jsou uvažovány nebo přepočítány do místa dopadu optického svazku na aktivní plochu fotodiody. Důvodem pro tento přepočet je závislost převodu optického výkonu na elektrický proud, tj. na signál který je dále zpracováván. Hodnotě 10 dB SNR v optické oblasti odpovídá hodnoty 20 dB SNR v oblasti elektrické.

Podrobnou analýzou těchto šumů jsme došli k výslednému vztahu

$$SNR = \frac{\left(\frac{G_{PD}\eta e}{\hbar\omega} \right)^2 RP_S}{2eB_m G_{PD}^2 R \left[\frac{\eta e}{\hbar\omega} (P_{PD} + P_B) + I_{DC} \right] + 4kTB_m + \left(\frac{G_{PD}\eta e}{\hbar\omega} \right)^2 R\sigma_{i,rel}^2}, \quad (2.8)$$

kde G_{PD} je vlastní zisk fotodiody, η je kvantová účinnost fotodiody, e je elementární náboj, $\omega = 2\pi c/\lambda$ je úhlová frekvence světelného zdroje, R je odpor obvodu fotodiody, P_S je výkon dopadající na fotodiodu, P_B je výkon záření pozadí, B_m je šířka pásma signálu, I_{DC} je proud za tmy, k je Boltzmannova konstanta, T je termodynamická teplota vodiče a $\sigma_{i,rel}^2$ variance optické intenzity přijímaného signálu. V decibelové míře, pak $SNR_{dB} = 10 \log(SNR)$.

Porovnáním hodnot jednotlivých šumových příspěvků spočítaných pro reálný spoj prokázalo, že pro zisk G_{PD} v optické oblasti u lavinových fotodiód je součet fotonového šumu signálu, šumu způsobeného zářením pozadí a šumu způsobeného temným proudem násoben druhou mocninou zisku G_{PD} a zmíněné šумы pak dosahují hodnot o dva až čtyři řády vyšších než šum tepelný. Výsledný zjednodušený vztah pak nabývá tvaru

$$SNR_{APD} = \frac{\left(\frac{e\eta}{\hbar\omega}\right)^2 RP_{PD}^2}{2eB_m \left[\frac{e\eta}{\hbar\omega} (P_{PD} + P_{BN}) + I_{DC} \right]}. \quad (2.9)$$

Podobně pro fotodiody typu PIN se dá odvodit, že odstup signál šum je dán zejména šumem obvodovým (tepelným šumem) a vztah 2.8 se dá zjednodušit do tvaru

$$SNR_{PIN} = \left(\frac{e\eta}{\hbar\omega}\right)^2 \frac{RP_{PD}^2}{4kT_K B_m}. \quad (2.10)$$

Pro praktický návrh spoje můžeme pro základní ohodnocení šumových vlastností fotodiod vycházet z výrobcem udávaného parametru NEP_1 (noise equivalent power)

$$NEP_1 = \frac{P_{PD} \sqrt{\sigma_u^2}}{u_{PD} \sqrt{B_m}}, \quad (2.11)$$

kde u_{PD} je střední hodnota napětí na výstupu předzesilovače vyvolaná střední hodnotou výkonu dopadajícího na fotodiodu P_{PD} a σ_u^2 je variance šumového napětí pro danou šířku pásma B_m . Hodnota NEP používaná ve výpočtech bývá udávaná pro konkrétní vlnovou délku a šířku pásma filtru a je dána vztahem

$$NEP = 10 \log \left(\frac{NEP_1}{10^{-3}} \sqrt{B_m} \right) \quad [\text{dBm}]. \quad (2.12)$$

2.2.7 Popis optického svazku

Laserová dioda emituje eliptický svazek s gausovským rozložením optické intenzity, který můžeme popsat úhly vyzařování a pološírkami svazku (pološířka svazku FWHM je radiální vzdálenost od osy svazku pro níž hodnota optické intenzity poklesne z maxima I_0 na hodnotu $0,5I_0$ tedy na 50%). Jelikož zde kombinujeme eliptický symetrický svazek s kruhovou aperturou vysílací čočky narážíme zde na problém, jakou máme volit velikost stopy na vysílací čočce.

Pro zjednodušení výpočtů nahradíme eliptický svazek s pološírkami w_x a w_y (rozdílnými v ose x a y) kruhovým energeticky ekvivalentním svazkem – PEGB o pološířce w_{PEGB} . Podmínkou je stejná optická intenzita na ose svazku a stejný celkový přenášený výkon.

Předpokládáme-li, že výstupní eliptický svazek z laserové diody má ve zvolené rovině $z = \text{konst.}$ Gaussové rozložení, pak relativní rozložení optické intenzity v jedné ose svazku $I_r(x)$ normované vůči intenzitě na ose svazku $I_0(z)$ je dáno matematickým vztahem

$$I_r(x) = \frac{1}{\sigma_x \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-\mu_x)^2}{2\sigma_x^2}}, \quad (2.13)$$

kde μ_x udává posunutí středu svazku od osy šíření a σ_x^2 je variance optické intenzity. Výsledné rozložení Gaussovského svazku pak odpovídá vztahu

$$I_r(x, y) = \frac{1}{\sigma_x \sigma_y 2\pi} e^{-\frac{(x-\mu_x)^2}{2\sigma_x^2} - \frac{(y-\mu_y)^2}{2\sigma_y^2}}. \quad (2.14)$$

Při počítání laserového svazku můžeme přejít od standardní odchylky σ k tzv. pološířce svazku w , která má z hlediska pravděpodobnosti stejný význam

$$\sigma_x^2 = \left(\frac{w_x}{2} \right)^2. \quad (2.15)$$

Dosazením vztahů 2.14 a 2.15 a umístěním středu svazku na osu šíření pak dospějeme k normovanému rozložení optické intenzity elipticky symetrického svazku

$$I_r(x, y, z) = \frac{2}{\pi w_x(z) w_y(z)} e^{-2 \left(\frac{x^2}{w_x^2(z)} + \frac{y^2}{w_y^2(z)} \right)}, \quad (2.16)$$

kde hodnota z je parametrem.

Pro obecné rozložení energie ve svazku pak platí vztah

$$I(x, y, z) = I_0(z) \frac{2w_{x0}(z)w_{y0}(z)}{\pi w_x(z)w_y(z)} e^{-2 \left(\frac{x^2}{w_x^2(z)} + \frac{y^2}{w_y^2(z)} \right)}. \quad (2.17)$$

Integrací optické intenzity přes plochu S pak spočteme celkový výkon přenášený svazkem

$$P = I_0(z) \iint_S \frac{2w_{x0}(z)w_{y0}(z)}{\pi w_x(z)w_y(z)} e^{-2 \left(\frac{x^2}{w_x^2(z)} + \frac{y^2}{w_y^2(z)} \right)} dS. \quad (2.18)$$

Pro rozložení optické intenzity a celkový výkon přenášený kruhovým svazkem pak platí vztahy

$$I_{\text{kruh}}(x, y, z) = I_0(z) \frac{2w_0^2(z)}{\pi w^2(z)} e^{-2 \left(\frac{x^2+y^2}{w^2(z)} \right)} \quad (2.19)$$

a

$$P_{\text{kruh}} = I_0(z) \iint_S \frac{2w_0^2(z)}{\pi w^2(z)} e^{-2 \left(\frac{x^2+y^2}{w^2(z)} \right)} dS. \quad (2.20)$$

Zavedeme-li proměnnou k jako poměr pološírek eliptického svazku dojdeme k závěru že výsledný energetický ekvivalentní (kruhově symetrický) svazek bude mít výslednou pološíрку danou vztahem

$$w_{\text{PEGB}} = w_x \sqrt{k} = w_y \frac{1}{\sqrt{k}} = \sqrt{w_x w_y} . \quad (2.21)$$

Při návrhu optického bezkabelového spoje hledáme vhodnou vlnou délku vzhledem k útlumům a turbulencím atmosféry. Při její volbě se však musíme přizpůsobit i dostupnosti, ceně a limitním parametrům vyráběných optických prvků.

Dalším problémem je volba vhodné šířky stopy svazku v rovině vysílací čočky. Pokud použijeme aproximaci pro transformaci eliptického svazku na svazek s kruhovou stopou s pološírkou svazku definovanou vztahem 3.12, pak lze definovat pojem Gaussovske čočky – GL (Gaussian lens) jako čočky o stejném průměru D_{GL} jaký má stopa svazku

$$D_{\text{TXA}} = D_{\text{GL}} = 2w_{\text{PEGB}} . \quad (2.22)$$

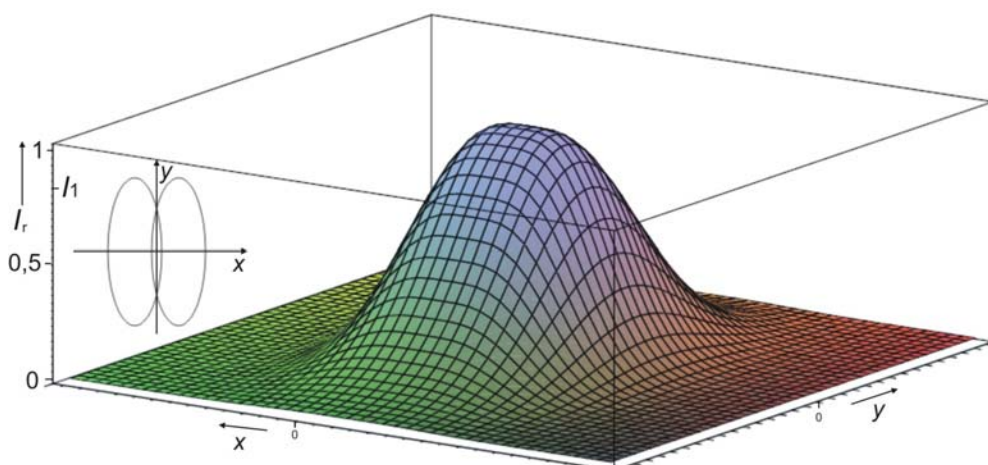
Celkový výkon který projde (je oříznut) touto čočkou je dán vztahem

$$P = I_{(0,z)} 2\pi \int_0^{\frac{D_{\text{GL}}}{2}} \rho e^{-2\frac{\rho^2}{w_{\text{PEGB}}^2}} d\rho , \quad (2.23)$$

kde $I_{(0,z)}$ je intenzita na ose svazku, ρ je radiální vzdálenost od osy svazku a w_{PEGB} je pološířka energeticky ekvivalentního Gaussovského svazku.

Při použití Gaussovy čočky je přeneseno 86% celkového výkonu, což odpovídá ztrátám 0,63 dB. Uvážíme-li, že průměr stopy svazku je definován poklesem optické intenzity I_0 z maxima na hodnotu $I_0 e^{-2}$, pak úroveň intenzity na kraji svazku dosahuje hodnoty 13,5%.

V případě odsměrování spoje vlivem počasí (většinou změnou teploty) dojde k poklesu optické intenzity na straně přijímače. Pro alespoň částečné eliminování útlumu spojeného s odsměrováním svazku se snažíme dosáhnout tzv. „flat-top beam“, tedy svazku s přibližně konstantním rozložením optické intenzity v okolí osy svazku. Jelikož se pro zvýšení odolnosti svazku proti vlivům atmosféry a zvýšení celkového emitovaného výkonu běžně používá více optických zdrojů v jedné hlavici, můžeme vhodného rozložení optické intenzity dosáhnout jejich vhodným nasměrováním viz. Obr. 2.9.



Obr. 2.9 Skládání svazků za účelem dosažení vhodného rozložení optické intenzity v rovině přijímací apertury pro dva svazky rovnoběžně vedle sebe.

2.2.8 Útlum šířením

Do průchodu svazku atmosférou zahrnujeme všechny útlumy závislé na délce optického spoje, tedy na vzdálenosti L_{12} , jenž udává vzdálenost mezi vysílací a přijímací hlavicí. Patří sem útlum vlastní atmosféry – α_{atm} a útlum šířením – α_{12} .

Útlum šířením nabývá vysokých hodnot a jeho hodnota je dána poměrem optických intenzit na ose svazku v místě přijímače a vysílače. V praxi je dán především úhlem vyzařovaného svazku a jeho výpočet vychází z tzv. konceptu pomocné délky vycházejícího z Obr. 2.4 [25] a z útlumu šířením daným poměrem přijímaného a vysílaného výkonu. Vycházíme-li z předpokladu shodné velikosti vysílací a přijímací čočky a stejného rozložení optické intenzity pak je útlum šířením dán vztahem

$$\alpha_{12} = 10 \log \frac{I_{0,\text{RXA}}}{I_{0,\text{TXA}}} = 20 \log \frac{L_0}{L_0 + L_{12}}, \quad (2.24)$$

kde $I_{0,\text{TXA}}$ a $I_{0,\text{RXA}}$ jsou optické intenzity na ose svazku v rovině vysílací a přijímací čočky, L_0 vyjadřuje tzv. pomocnou délku a k jejímu určení je třeba znát průměr čočky vysílače nebo přesněji průměrem vysílacího otvoru D_{RXA} (záleží na uchycení čočky) a vysílacím úhlu φ_{TX} (viz. Obr. 3.2). L_0 je pak dána poměrem

$$L_0 \approx \frac{D_{\text{RXA}}}{\varphi_{\text{TX}}}. \quad (2.25)$$

V případě různých hodnot D_{TXA} a D_{RXA} bude vztah určující útlum rozšířen do tvaru

$$\frac{P_{\text{RXA}}}{P_{\text{TXA}}} = \frac{I_{0,\text{RXA}}}{I_{0,\text{TXA}}} \frac{D_{\text{RXA}}^2}{D_{\text{TXA}}^2} \frac{D_{\text{TXA}}^2}{2w_{\text{TXA}}^2 \left(1 - e^{-\frac{D_{\text{TXA}}^2}{2w_{\text{TXA}}^2}} \right)}. \quad (2.26)$$

Útlum a je možné rozdělit do tří částí: útlum šířením, zisk přijímací čočky a tzv. přídatný zisk daný různým rozložením optické intenzity v rovině vysílací a přijímací čočky. Získaný výraz vyjadřuje tzv. geometrický útlum.

$$\alpha_{\text{geom}} = 10 \log \frac{P_{\text{RXA}}}{P_{\text{TXA}}} = a_{12} + \gamma_{\text{add}} + \gamma_{\text{RXA}}. \quad (2.27)$$

Charakteristika atmosférického přenosového prostředí je dosti složitá a náročná a proto se používají zjednodušení matematické modely jejího popisu. Vzhledem ke složení atmosféry a jevům v ní se vyskytujícím ji obecně považujeme za nehomogenní a nestacionární – její parametry závisí na konkrétní poloze a čase. Je také nutné si uvědomit, že zmíněné jevy vzájemně souvisí a projevují se zároveň [4].

2.2.9 Zisk přijímací čočky

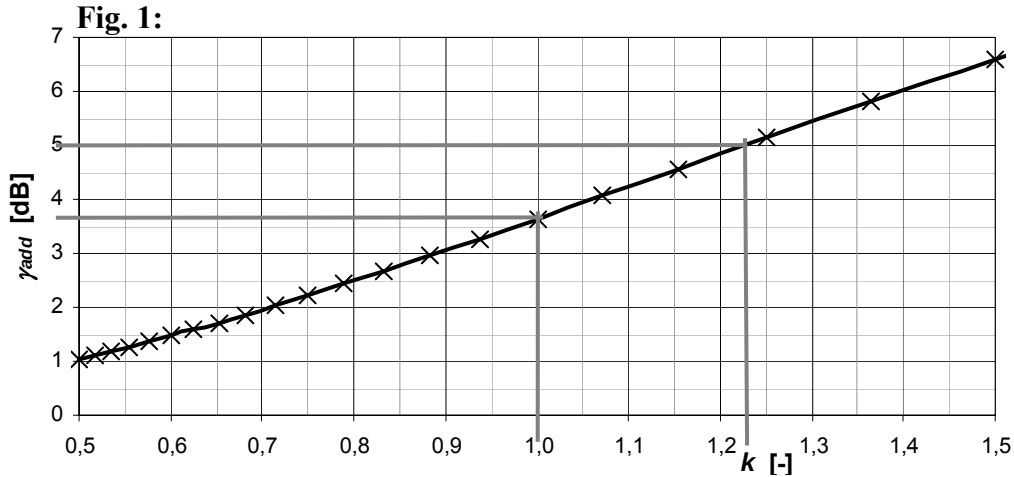
Zisk přijímací čočky γ_{RXA} vychází z poměrů vysílaného a přijímaného optického výkonu je dán vztahem

$$\gamma_{\text{RXA}} = 20 \log \frac{D_{\text{RXA}}}{D_{\text{TXA}}}. \quad (2.28)$$

Rozložení optické intenzity na vysílací čočce má však jiný charakter než rozložení optické intenzity na přijímací čočce. Již bylo zmíněno, že vysílací čočka je využita jako Gaussova čočka, což prakticky znamená, že různé části čočky mají různou váhu. Ve středu čočky je optická intenzita větší než u okraje čočky, proto střed čočky je z hlediska vysílání výkonu důležitější než okraj čočky.

Vzhledem k velké šířce svazku v rovině přijímače je možné rozložení optické intenzity na přijímací čočce považovat prakticky za konstantní, což má za důsledek, že všechny části této čočky mají stejnou váhu. Z hlediska modelu zisku přijímače je tedy možno brát průměr vysílací čočky menší než je ve skutečnosti. Vhodné je zavést efektivní průměr vysílací čočky brané jako Gaussova čočky s konstantním ozářením. Takový postup odpovídá předpokladu vysílací čočky menší než skutečné, což se ve vztahu (2.26) projeví dodatečným ziskem γ_{ADD} . Jako součást zisku přijímací čočky je tedy třeba uvažovat také tzv. přídatný (aditivní) zisk γ_{ADD} daný rovnicí 2.29. Tento zisk vychází z předpokladu, že intenzita v rovině vysílače má Gaussovské rozložení a intenzita vymezená průměrem přijímací čočky může být považována za konstantní. Pro tzv. Gaussovu čočku vychází $\gamma_{\text{ADD}} = 3,66$ dB.

$$\gamma_{\text{add}} = 10 \log \frac{2k}{1 - e^{-2k}} \quad \text{kde } k = \frac{D_{\text{TXA}}^2}{2w_{\text{TXA}}^2}. \quad (2.29)$$



Obr. 2.10 Graf přídatného zisku v závislosti na poměru plochy energeticky ekvivalentního svazku k ploše čočky vysílače.

Mezi hlavní jevy ovlivňující šíření a útlum optického svazku patří:

Extinkce optické intenzity vlivem absorpce a rozptylu na molekulách a aerosolech.

Fluktuace optické intenzity vlivem působení deště nebo sněhu.

Fluktuace optické intenzity vlivem turbulencí – vzdušné víry, vítr, ...

Přerušování svazku, například letícím ptákem nebo hmyzem.

2.2.10 Fluktuace optické intenzity – turbulence atmosféry

Pro modelování turbulencí uvažujeme, že se v atmosféře nachází nehomogenní oblasti různých tvarů a velikostí (řádově od milimetrů až po stovky metrů) s různým indexem lomu. Index lomu se mění s polohou v závislosti na teplotě a tlaku. Pro vyhodnocení turbulencí – náhodných procesů se využívá statistických metod. Veličinou popisující turbulentní atmosféru je strukturní funkce indexu lomu, která je dána vztahem

$$D_n = \left\langle [n(A, t) - n(B, t)]^2 \right\rangle, \quad (2.30)$$

kde D_n je strukturní funkce indexu lomu, n je index lomu v daném bodě (A nebo B) v čase t . Strukturní funkce indexu lomu je v případě Kolmogorova modelu dána vztahem

$$D_n = C_n^2 r^{2/3} \quad \text{pro } l_0 \ll r \ll L_0, \quad (2.31)$$

kde r je vzdálenost mezi body A a B , C_n^2 je strukturní parametr indexu lomu. Tento výraz platí v rozsahu minimální l_0 a maximální L_0 velikosti turbulentních vírů.

Tab. 2.2 Útlum turbulencí pro vlnové délky $\lambda = 850$ a 1550 nm a délky spoje $L_{12} = 1$ a 30 km.

$C_n^2 [\text{m}^{-2/3}]$	míra turbulence	$\alpha_{\text{turb}, 1 \text{ km}} [\text{dB}]$		$\alpha_{\text{turb}, 30 \text{ km}} [\text{dB}]$	
		$\lambda = 850 \text{ nm}$	$\lambda = 1550 \text{ nm}$	$\lambda = 850 \text{ nm}$	$\lambda = 1550 \text{ nm}$
10^{-16}	klidná atmosféra	0,55	0,39	8,75	12,4
10^{-15}	mírná	1,74	1,22	39,3	27,7
10^{-14}	střední	5,5	3,9	124	87,5
10^{-13}	silná	17,4	12,2	393	277
10^{-12}	velmi silná	55	39	1242	875

Strukturního parametru indexu lomu je dán tabulkou Tab. 2.2 jenž se používá k ohodnocení míry turbulencí a na jejímž základě je také možné určit relativní varianci optické intenzity v místě příjmu vztahem

$$\sigma_{I,\text{rel}}^2 = KC_n^2 \left(\frac{2\pi}{\lambda} \right)^6 L_{12}^{\frac{11}{6}}, \quad (2.32)$$

kde λ je vlnová délka optické nosné vlny, K je konstanta charakterizující optickou vlnu (1,23 pro rovinnou vlnu a 0,5 pro sférickou vlnu).

Útlum, odpovídající turbulencím v atmosféře α_{turb} lze pomocí empirických poznatků vyjádřit jen přibližně na základě modelu slabě turbulentní atmosféry (relativní variance optické intenzity v místě optického přijímače jsou menší než 1).

Pro odhad útlumu vyvolaného pouze turbulencí platí přibližný vztah

$$\alpha_{\text{turb}} = \sqrt{1 + K \cdot (\sigma_{I,\text{rel}}^2)^{-2/5}}. \quad (2.33)$$

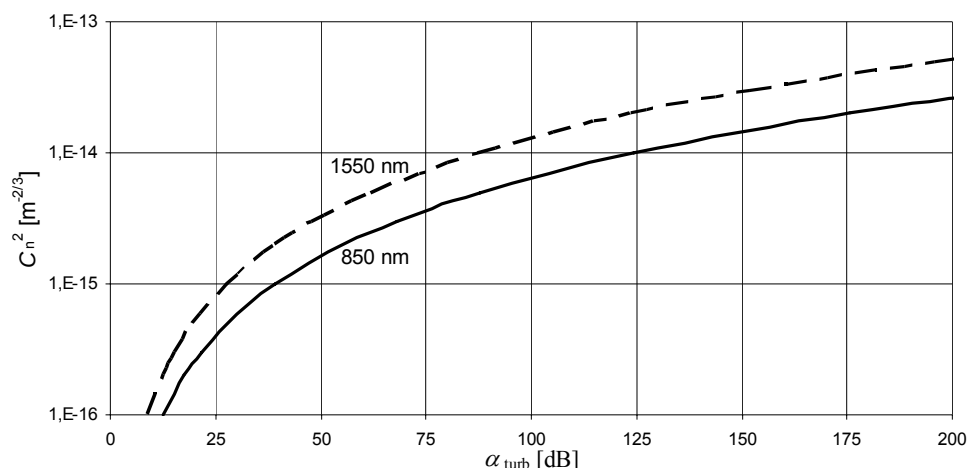
Představíme-li si nehomogenity v atmosféře jako koule o jiném indexu lomu pak logickou úvahou můžeme usoudit, že různé velikosti mají různý vliv na optický svazek. Malé nehomogenity způsobí spíše rozptyl záření, zatímco velké homogenity mohou svazek zcela odklonit.

Víry s rozměrem mnohem menším než je průměr optického svazku, způsobují lokální fázový posuvu v těchto oblastech a tím dochází k scintilacím a deformaci svazku, který se projevuje tzv. skvrnkovou strukturou. Turbulencí způsobují rychle se měnící změny přijímané optické intenzity (délka trvání řádově jednotky milisekund) a nejvýrazněji se projevují za jasných dnů, působením slunečního záření ohřívajícím zemský povrch [4].

Přesnější vztah pro výpočet útlumu vlivem turbulencí je uveden v [33]

$$\alpha_{\text{turb}} = 2 \sqrt{23,17 \left(\frac{2\pi}{\lambda} \right)^6 C_n^2 L_{12}^{\frac{11}{6}}}. \quad (2.34)$$

Je zde patrná přímá úměra mezi útlumem a strukturním parametrem indexu lomu a také jeho závislost na použité vlnové délce a délce optického spoje.



Obr. 2.11 Závislost útlumu způsobeného vlivem turbulencí na míře turbulencí a použité vlnové délce (graf uveden pro délku spoje $L_{12} = 30$ km).

Jak je patrné z grafů na obr. 2.11 a tabulky 2.2, tak u spojů na určených pro velké vzdálenosti dosahuje tento útlum velmi vysokých hodnot i v případě velmi slabých turbulencí. Proto je u spojů velkého dosahu vhodné volit vyšší vlnové délky. Pro spoje krátkého dosahu je vidět, že je rozdíl mezi vlnovou délkou 850 a 1550 nm nejsou již tak výrazné. Pokud pro určení míry turbulencí vyjdeme z teorie uvedené v [4] a [30] kde je útlum vlivem turbulencí vyjádřen na základě Rytovovy variance β_0^2 a je zohledněn jev průměrování na apertuře přijímací čočky, pak pro sférickou vlnu platí pro relativní varianci optické intenzity vztah

$$\sigma_{I,rel}^2(D_{RXA}) = e^{\left[\frac{0,49\beta_0^2}{(1+0,18d^2+0,56\beta_0^{12/5})^{7/6}} + \frac{0,51\beta_0^2(1+0,69\beta_0^{12/5})^{-5/6}}{1+0,90d^2+0,62d^2\beta_0^{12/5}} \right]} - 1, \quad (2.35)$$

kde parametr d je veličina dána poměrem poloměru přijímací apertury a Fresnelovy zóny

$$d = \sqrt{\frac{\pi}{2\lambda L_{12}}} D_{RXA}. \quad (2.36)$$

koefficienty β_0^2 a σ_1^2 vychází z asymptotické aproximace Rytovovy aproximace [4] a pro sférickou vlnu platí vztahy

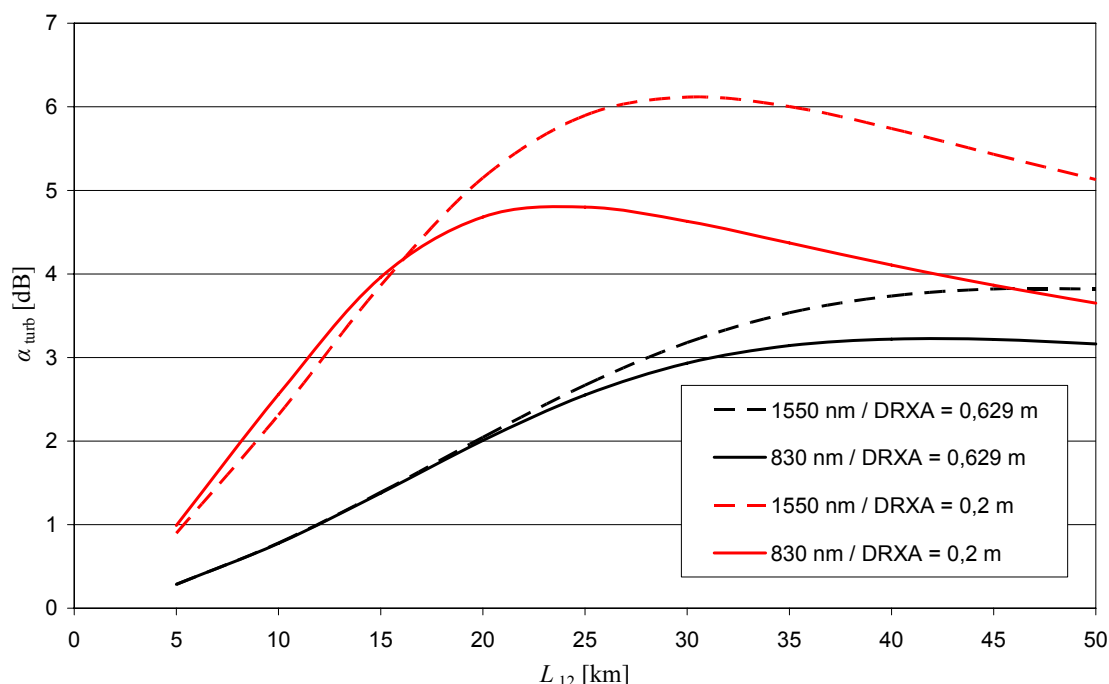
$$\beta_0^2 = 0,4\sigma_1^2 \quad (2.37)$$

a

$$\sigma_1^2 = 1,23C_n^2 \left(\frac{2\pi}{\lambda} \right)^{\frac{7}{6}} L_{12}^{\frac{11}{6}}. \quad (2.38)$$

Pro odhad útlumu vlivem turbulencí použijeme vztah

$$\alpha_{\text{turb}} = 10 \log \left| 1 - \sqrt{\sigma_{I,\text{rel}}^2 (D_{\text{RXA}})} \right|. \quad (2.39)$$



Obr. 2.12 Závislost útlumu způsobeného vlivem turbulencí pro dva různé průměry přijímací apertury a dvě vlnové délky 830 nm a 1550 nm (graf uveden pro $C_n^2 = 10^{-16} \text{ m}^{-2/3}$).

2.2.11 Extinkce optické intenzity čisté atmosféry

Útlum čisté atmosféry vychází z faktu, že atmosféra se skládá atomů a molekul, jenž absorbují některé spektrální složky optického záření. Útlum způsobený touto absorpcí lze popsat jako poměr optických intenzit a na základě Bouguerova zákona popsat obecným vztahem

$$T \approx \frac{1}{\lambda_2 - \lambda_1} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} T_{(\lambda)} d\lambda \approx \frac{1}{\lambda_2 - \lambda_1} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} e^{-\alpha_e(\lambda) L_{12}} d\lambda, \quad (2.40)$$

kde T je spektrálně střední hodnota propustnosti atmosféry, L_{12} je délka trasy a α_e je spektrálně závislý koeficient absorpce atmosféry [14]. Je patrné, že tento popis je v praxi nepoužitelný a proto se vychází z naměřených hodnot spektrální závislosti propustnosti atmosféry. Na Obr. 2.5 je vidět že některé vlnové délky jsou pro komunikaci vhodné a jiné naopak zcela nevhodné. Vhodné vlnové délky se obecně označují jako atmosférická okna, nejběžnější jsou v okolí 850 nm a 1550 nm.

Na základě praktického měření předpokládáme zanedbatelnou šířku spektrální čáry a konstantní absorpce atmosféry. Vztah 2.40 se nám pak zjednoduší do tvaru

$$T = e^{-\alpha_e L_{12}}, \quad (2.41)$$

kde koeficient propustnosti T pak odečteme z Obr.2.5. Závislost poklesu optické intenzity s rostoucí vzdáleností L_{12} je dána Bougerovým – Lambertovým – Beerovým zákonem.

2.2.12 Útlumy způsobené aerosoly, deštěm a sněhem

Přítomnost aerosolů nebo sněžení způsobuje největší útlumy a tím i nejčastější důvod výpadku přijímaného signálu. Pro popis tohoto útlumu vychází taktéž ze vztahu 2.40 potažmo 2.41. Pro matematické vyjádření útlumu se využívá koeficient extinkce α_e a v praxi používaná veličina udávající meteorologickou viditelnost V_M [14].

Meteorologická viditelnost je definovaná jak vzdálenost při níž klesne poměr vstupní a výstupní optické intenzity na 5% (tato definice se udává pro vlnovou délku $\lambda = 555$ nm, tedy pro vlnovou délku na níž je lidské oko nejcitlivější). Výpočet útlumu dle meteorologické viditelnosti se je vhodný i z důvodu, že tato veličina bývá měřena na mnoha místech světa, například na letištích.

Mezi veličinami V_M a α_e platí vztah

$$0,05 = e^{-\alpha_e V_M}, \quad (2.42)$$

a pro konkrétní vlnovou délku pak může vyjít z empiricky zjištěného vztahu

$$\alpha_e(\lambda) \approx \frac{3}{V_M} \left(\frac{\lambda}{550 \cdot 10^{-9}} \right)^{-q}, \quad (2.43)$$

kde q je parametr rovněž závisející na útlum a meteorologické viditelnosti a je dán tabulkou Tab. 2.3.

Tab. 2.3 Tabulka parametru q .

Q		hodnota viditelnosti	atmosféra
KIM model	KRUSE model		
1,6	1,6	$V_M > 50$ km	čistá
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	opar
$V_M - 0,5$		$0,5 \text{ km} < V_M < 1$ km	střední mlha
0		$V_M < 0,5$ km	silná mlha

Pro výpočet útlumu potřebujeme koeficient útlum v decibelové míře odpovídající poklesu optických intenzit dle vztahu

$$\alpha_{\text{část}} = \left| \frac{1}{L_{12}} 10 \log \frac{I_2}{I_1} \right|. \quad (2.44)$$

Vztah mezi koeficient extinkce $\alpha_e [\text{km}^{-1}]$ a $\alpha_{\text{část}} [\text{dB.km}^{-1}]$ je možné zapsat

$$\alpha_e = 0,23 \alpha_{\text{část}}. \quad (2.45)$$

Tab. 2.4 Tabulka hodnot meteorologické viditelnosti a odpovídajících útlumů.

$V_M [\text{km}]$	$\alpha_{\text{část}} [\text{dB.km}^{-1}]$	stav atmosféry
10 ÷ 23	1,0 ÷ 0,5	čistá
2,0 ÷ 4,0	7,0 ÷ 3,0	opar
1,0 ÷ 2,0	14 ÷ 7,0	slabá mlha
0,2 ÷ 0,5	85 ÷ 34	střední mlha
< 0,05	> 340	silná mlha

Z uvedené tabulky Tab. 2.4 je patrné, že optický spoj navržený se systémovou rezervou $\Delta M = 15 \text{ dB}$ bude při délce spoje $L_{12} = 30 \text{ km}$ fungovat pouze za předpokladu čisté atmosféry. V případě oparu by bylo nutné aby rezerva spoje byla 45 dB a více. Celkový útlum způsobený průchodem svazku atmosférou α_{atm} je pak dán součtem útlumu vlivem turbulencí a způsobených útlumem na částicích

$$\alpha_{\text{atm}} = \alpha_{\text{turb}} + \alpha_{\text{část}}. \quad (2.46)$$

2.3 STATISTICKÝ MODEL SPOJE

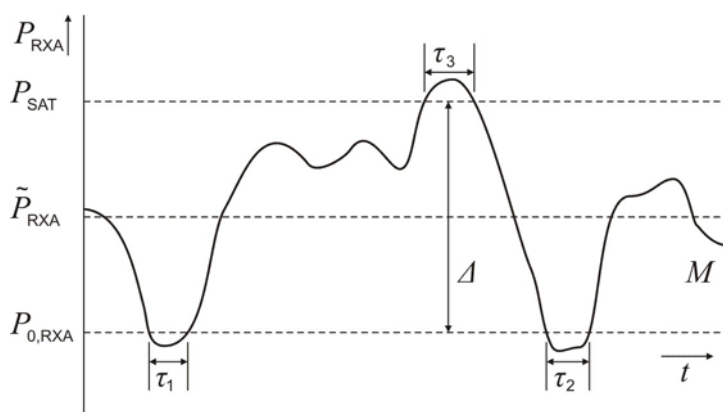
Do přerušení optického svazku spadají náhodné jevy které mají způsobující úplný výpadek přijímaného signálu, jedná se tedy spíše o statistické zhodnocení stavu přijímaného signálu – tzv. statistický model spoje. Výpadky spoje dělíme v zásadě na krátkodobé a dlouhodobé. Krátkodobé výpadky mohou být způsobeny například letícím hmyzem nebo ptákem a dalo by se říci, že tyto jevy nejsou většinou podstatné a je jen třeba, tyto výpadky byly rychle rozpoznány a spojení v co nejkratším čase obnoveno. Dlouhodobé výpadky jsou pak většinou způsobeny útlumem atmosféry, nejčastěji mlhou. Zde je již nutné komunikaci přesměrovat na záložní komunikační linku. Jelikož atmosférické jevy působí jinak na optický a rádiový signál, používá se v dnešní době k záloze většinou mikrovlnných spojů.

K ohodnocení spolehlivosti spoje se používá statistický model spoje. Jako hodnotící parametr se určuje hodnota dostupnosti P_{av} respektive hodnota nedostupnosti spoje P_{un} .

$$P_{\text{av}} = 1 - P_{\text{un}}. \quad (2.47)$$

$$P_{\text{un}} = \frac{T_{\text{un}}}{T}, \quad (2.48)$$

kde T_{un} je celková doba nedostupnosti spoje, tedy doba během které přijímaný výkon klesl pod prahovou úroveň citlivost přijímače nebo překročí úroveň saturace a T je celková doba měřeného období tedy doby kdy se přijímaný výkon nachází mimo dynamiku spoje Δ .



Obr. 2.13 Znáornění charakteru přijímaného výkonu na spoji s úniky.

Celková doba nedostupnosti je pak dle Obr. 2.13. dána

$$T_{\text{un}} = \sum_i \tau_i. \quad (2.49)$$

Výpadky spoje dělíme na krátkodobé a dlouhodobé. Krátkodobé výpadky spoje přispívají ke zhoršení chybovosti spoje a dlouhodobé k celkové nedostupnosti spoje. Nedostupnost spoje může být deklarována např. dle normy ITU-T G.826, která říká, že se spoj považuje za nedostupný pokud v deseti po sobě jdoucích vteřinách došlo k vysoké chybovosti. Podrobnější popis je uveden v disertační práci nebo [24], [40].

2.3.1 Potlačení vlivů působících na optický spoj

Pro potlačení atmosférických vlivů je vhodné jak použití vícesvazkového provozu, tak vhodného tvarování svazků. Obě tyto metody jde vhodně zkombinovat. Například při skládání svazku dle Obr. 2.9 můžeme využít vyšší odolnosti jak proti turbulencím v atmosféře, tak proti odsměrování vytvořením vhodného tvaru svazku. Ideální tvar svazku v místě příjmu je svazek s konstantním prostorovým rozložením optické intenzity často nazývaný výrazem flat-top beam. Je patrné, že čím více svazku použijeme tím ploššího svazku jsme schopni docílit. Další výhodou je, že skládáním svazků můžeme rovněž docílit vyššího vysílaného výkonu.

2.4 KOMPLEXNÍ MODEL SPOJE

Komplexní model spoje vzniká syntézou statistického a stacionárního modelu. Stacionární model je pro určitý spoj reprezentován systémovými parametry samotného spoje a linkovou rezervou M závislou na dosahu spoje. Statistický model je pro danou lokalitu reprezentován funkcí překročení určité hodnoty koeficientu útlumu atmosféry a pravděpodobností přerušení spoje vyvolané únikem určité hloubky a určité doby trvání [40].

Pro komplexní model definujeme systémovou rezervu spoje M_s , což je rezerva spoje závislejší na parametrech vlastního spoje nezávislá na útlumech spojených s atmosférou

$$M_s = P_{\text{TXA}} - P_{0,\text{RXA}} + 20 \log \frac{D_{\text{RXA}}}{\varphi_{\text{TX}}} . \quad (2.50)$$

Výkonovou bilanční rovnici lze vyjádřit ve tvaru

$$M \approx P_{\text{m,PD}} - P_{0,\text{RXA}} + 20 \log \frac{D_{\text{RXA}}}{\varphi_{\text{TX}}} - 20 \log L_{12} + \gamma_{\text{add}}(L_{12}) - \alpha_{\text{atm}}(L_{12}) . \quad (2.51)$$

Pro klidnou a čistou atmosféru (s koeficientem útlumu α_{atm} a strukturním parametrem indexu lomu C_n^2) budeme definovat normovanou linkovou rezervu spoje M_1 s náhodným parametrem koeficientu útlumu atmosféry $\alpha_{1,\text{atm}}$

$$M_1 = \frac{M}{L_{12}} . \quad (2.52)$$

V komplexním modelu je funkcí 2.51 definován spoj pracující v klidné a čisté atmosféře a funkcí 2.50 pak samotný spoj bez vlivu atmosféry.

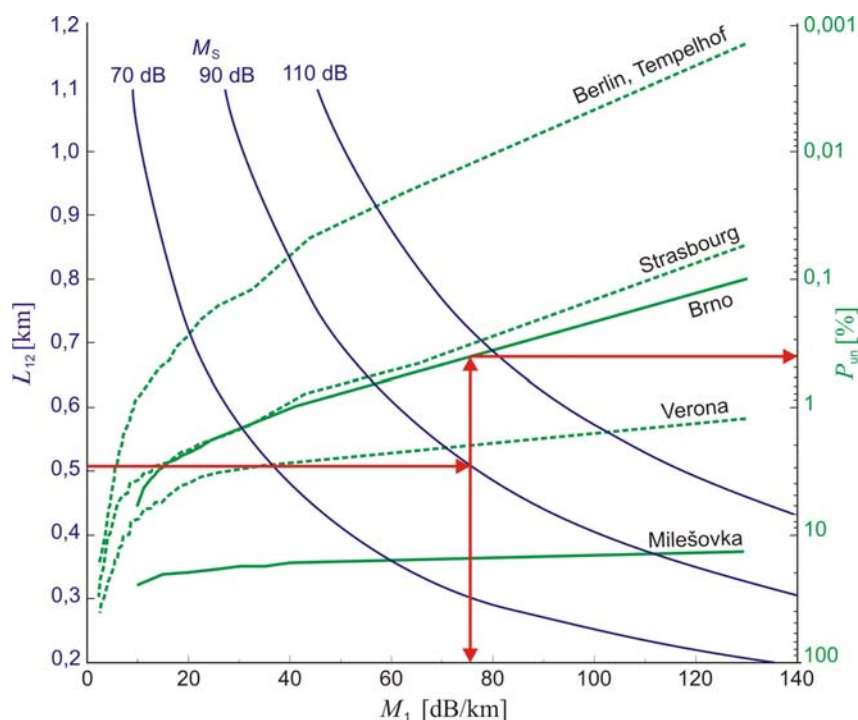
Charakteristika atmosférických podmínek v dané lokalitě umístění spoje pro odhad nedostupnosti spoje musí být zjištěna na základě praktického měření v této lokalitě a empiricky je určena funkcí překročení $E_\alpha(\alpha_i)$

$$E_\alpha(\alpha_i) = 1 - P(\alpha_{\text{atm}} < \alpha_i) = 1 - D_\alpha(\alpha_i) , \quad (2.53)$$

kde $D_\alpha(\alpha_i)$ je distribuční funkce překročení.

2.4.1 Nomogram pro výpočet nedostupnosti spoje

Nedostupnost spoje s označením P_{un} je definovaná jako pravděpodobnost, že bude překročena hodnota koeficientu útlumu atmosféry $\alpha_{1,\text{atm}}$, která je číselně rovna normované rezervě spoje M_1 a platí tedy $P_{\text{un}} = E_\alpha(\alpha_{1,\text{atm}})$. K určení nedostupnosti spoje slouží nomogram (viz Obr. 2.14). Nomogram vzniká syntézou vztahů $M_1 = f(L_{12})$ a $P_{\text{un}} = f(\alpha_{1,\text{atm}})$, kde $\alpha_{1,\text{atm}} = M_1$ do jednoho grafu.



Obr. 2.14 Nomogram pro stanovení nedostupnosti spoje

Postup stanovení nedostupnosti spoje pak probíhá ve dvou krocích. Nejprve se pro danou systémovou rezervu M_S a zvolenou délku spoje L_{12} určí normovaná linková rezerva M_1 , která současně reprezentuje maximální hodnotu koeficientu atmosféry $\alpha_{1,atm}$, která nesmí být překročena, má-li spoj pracovat bezchybně. Následně se pro zvolenou lokalitu umístění spoje vybere odpovídající funkce překročení E_α a z ní se odečte předpokládaná doba nedostupnosti spoje.

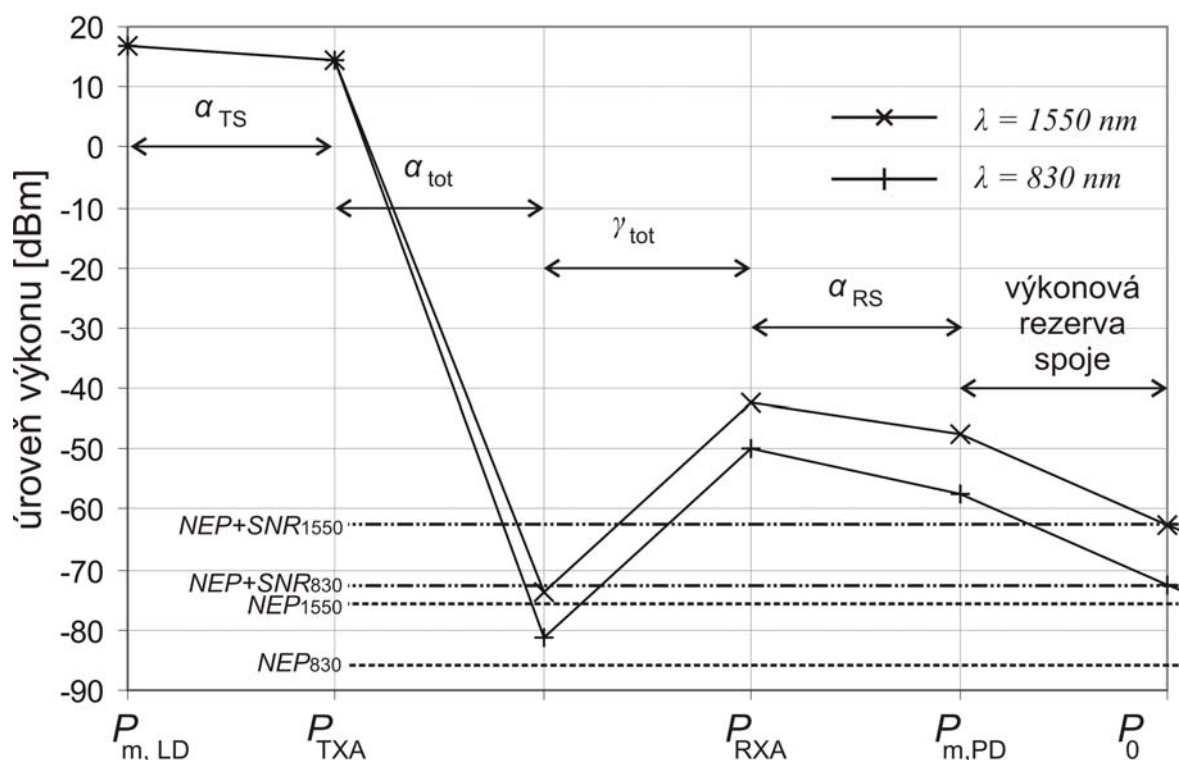
Pro uvedený příklad počítáme se spojem délky $L_{12} = 510$ m a systémovou rezervou $M_S = 90$ dB umístěným v Brně. Zjištěná nedostupnost spoje $P_{un} = 0,4\%$, což znamená, že spoj bude dostupný po dobu 99,6% celkové doby jeho používání.

Jedna z možností, jak získat funkci $P_{un} = E_\alpha(\alpha_{1,atm})$ pro vybranou lokalitu, je založena na dlouhodobém monitorování atmosférického útlumu v dané lokalitě. Další působ, který je méně technicky i časově náročný, spočívá ve využití meteorologických dat získaných již v minulosti a zaznamenaných v archívech profesionálních meteorologických stanic. Poměrně velká hustota těchto stanic vytváří předpoklad k věrohodnému zohlednění místních podmínek. Pro praktické využití je ještě potřebné zvážit, zda profesionální meteorologická stanice je umístěna dostatečně blízko plánovanému umístění spoje a zda jsou data zaznamenána s dostatečnou jemností (viz. kapitola 3).

2.5 VYHODNOCENÍ ZÍSKANÝCH POZNATKŮ

Vyjdeme-li z problematiky řešené v předešlých kapitolách, pak při návrhu spoje je potřeba znát požadované parametry spoje – délka spoje, přenosová rychlost a potřebná chybovost spoje. Následně si najdeme parametry dostupných fotodiod pro obě základní atmosférická okna (850 i 1550 nm). Následně si zvolíme vhodné optické prvky, zejména průměr přijímací apertury. Při znalosti těchto parametrů určíme hodnoty jednotlivých útlumů a zisků, sestavíme energetickou bilanční rovnici a následně diagram energetické bilance spoje (Obr. 2.15).

Pro vyhodnocení parametrů bylo vhodné sestavit výpočet energetické bilance spoje v prostředí Mathcad, v němž je přehledně vidět kompletní výpočet a je rovněž možné snadno měnit jednotlivé parametry spoje. Ukázky návrhu energetické bilance spoje v tomto prostředí jsou uvedeno v příloze disertační práce.



Obr. 2.15 Výkonová bilance navrhovaného spoje pro vlnové délky 830 a 1550 nm.

Na Obr. 2.15 a v tabulce 2.5 jsou výsledné parametry spoje navrženého pro vzdálenost 30 km. Dva navržené spoje se liší použitou vlnovou délkou a typem detektoru. Pro stejnou délku spoje se jeví jako nejvhodnější spoj pracující na vlnové délce 1550 nm. Detekční prvek pro vlnovou délku 1550 nm je typu PIN (na trhu není velká dostupnost lavinových fotodiod s průměrem aktivní plochy větší než 0,2 mm) a je tudíž i méně citlivý než lavinová fotodioda pro vlnovou délku 830 nm. Parametry těchto detektorů vedou k závěru, že citlivost lavinové fotodiody pro 830 nm je o 10 dB lepší než fotodiody PIN určena pro 1550 nm. Z grafu celkového

útlumu na Obr. 2.15 vyplývá že se u vlnové délky 1550 nm projevuje menší útlum atmosféry. Srovnáním rozdílů citlivostí detektorů dostupných na trhu s grafem celkového útlumu jsem došel k závěru, že pro spoje určené pro vzdálenost kratší než 20 km je vhodnější vlnová délka 830 nm a pro spoje delší pak vlnová délka 1550 nm.

Tab. 2.5 Tabulka vypočtených hodnot popisujících optický spoj navržený pro vzdálenost 30 km.

Označení spoje	Link 1550	Link 830
$P_{m,LD} - 100 \text{ mW}$	20 dBm	20 dBm
Označení PD	C8376-05	C30921S
Typ PD	InGaAs PIN	Si-APD
Vlnová délka λ	1550 nm	830 nm
Průměr aktivní plochy PD	0,5 mm	0,5 mm
Proudová citlivost PD	0,95 A/W	128 A/W
Spektrální šum NEP_1	$8,10^{-15} \text{ W/Hz}^{1/2}$	$0,86 \cdot 10^{-15} \text{ W/Hz}^{1/2}$
$NEP @ 10 \text{ Mbps/OOK}$	-76 dBm	-86 dBm
SNR (BER-6)	13,5 dB	13,5 dB
Útlum na TXA - α_{TX}	-2,6 dB	-2,6 dB
Útlum RXA - α_{RS}	-5,2 dB	-5,2 dB
Zisk na RXA - γ_{tot} $D_{RXA} = 46 \text{ cm}$	31,5 dB	31,5 dB
Celkový útlum šířením atmosférou	-88,2 dB	-101 dB
Rezerva spoje	16,2 dB	10,2 dB

K ohodnocení kvality spoje slouží parametr udávající rozdíl mezi minimálním výkonem potřebným pro bezchybný chod spoje P_0 a střední hodnotou výkonu dopadajícího na fotodiodu $P_{m,PD}$ označovaného jako linkovou rezervu spoje (link power margin). Čím je tato rezerva větší, tím bude spoj odolnější proti atmosférickým vlivům a větší časová dostupnost spoje (dle kapitoly 2.4.1).

3 MĚŘENÍ - ZPRACOVÁNÍ VÝSLEDKŮ

Součástí disertační práce byl návrh spoje určeného pro komunikaci na vzdálenost 30 km. Z teoretického rozboru jsem zjistil, že pro zjištění kvalitativních parametrů optického spoje není potřeba měřit přímo bitovou chybovost spoje, ale postačí nám změřit pouze jeho energetickou bilanci. Parametry navrženého spoje již byly stanoveny v předešlé kapitole. Pro jejich ověření byly navrženy dva spoje LONG-RANGE LR 830 nm a LR 1550 nm, které odpovídají parametrům uvedeným v tabulce 3.4 (podrobněji v přílohách disertační práce č. 1 a 2). Z důvodu špatné dostupnosti laserových diod a fotodiod pracujících na vlnové délce 1550 nm byl sestaven spoj pracující na vlnové délce 830 nm.

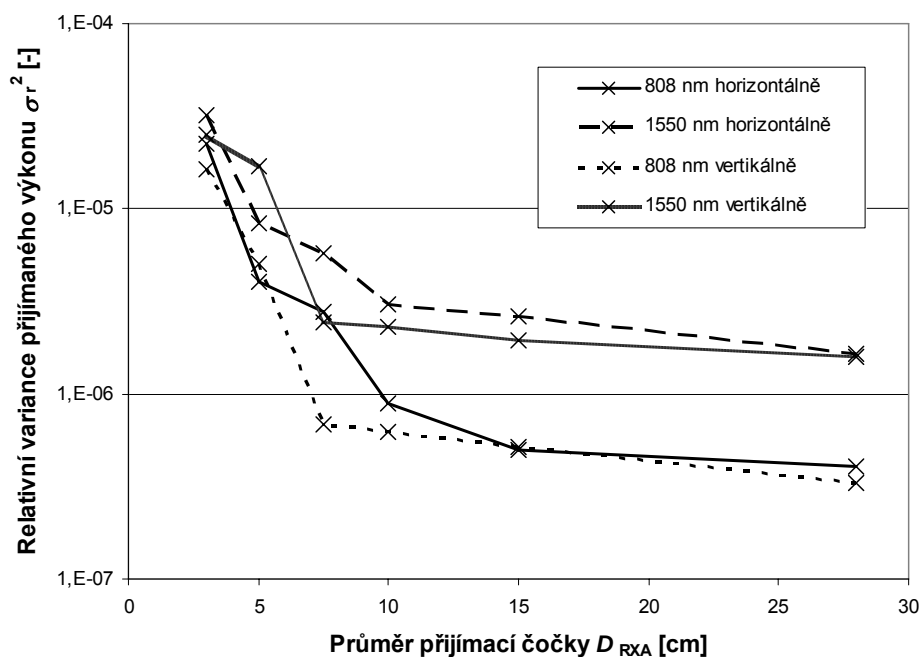
Stanovení časové dostupnosti spoje pro danou lokalitu je však obtížnější. U spojů velkého dosahu vychází velmi malá normovaná rezerva spoje M_1 a proto pro určení času dostupnosti spoje dle nomogramu uvedeného v kapitole 2.4.1 potřebujeme statistická data s vyšší přesností než data uvedená v grafu na Obr. 2.14. K tomuto účelu byl navržen a sestaven měřicí spoj Dual-Link-DL02 (dle přílohy disertační práce č. 3 a 4).

3.1 LABORATORNÍ MĚŘENÍ

Některá měření potřebná pro ověření platností teoretických předpokladů byla provedena v laboratoři.

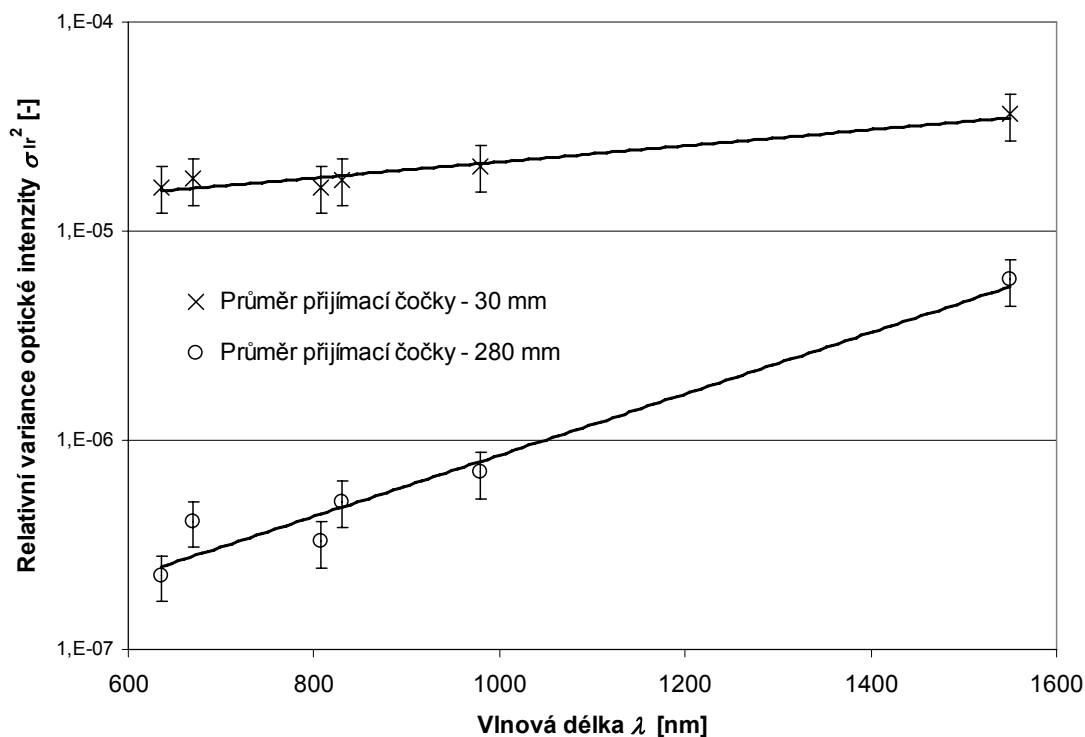
Před zahájením vlastního měření byla ověřena linearita přijímače v rozsahu předpokládaných změn úrovní přijímaného optického výkonu. K vytvoření slabých turbulencí v laboratorních podmínkách bylo použito čtyř vaříčů rozmístěných 20 cm pod osou šíření optického svazku. Vzdálenost mezi optickým zdrojem a přijímací čočkou (docílená použitím holografického zrcadla) byla 10 m.

Při prvním měření byl ověřen jev průměrování na přijímací apertuře. K měření byly jako zdroje použity dvě laserové diody pracující na vlnových délkách 808 nm a 1550 nm. Z grafu na Obr. 3.1 je patrné, že jev průměrování je výrazný. Graf potvrzuje teoretické předpoklady použité v kapitole 2.2.10. K přesnějšímu ohodnocení vlivu průměrování pro navrhovaný spoj by bylo potřebné provést toto měření v reálných podmínkách, neboť dle vztahů (2.36) a (2.38) míra variancí optické intenzity závisí rovněž i na délce spoje.



Obr. 3.1 Závislost relativní variance přijímaného optického výkonu na průměru přijímací apertury – jev průměrování.

Další z laboratorních měření prokázalo vliv vlnové délky na míru turbulencí atmosféry. Z důvodu průkaznosti bylo toto měření provedeno se stejnými typy optických zdrojů pro dva různé průměry kruhové přijímací apertury.

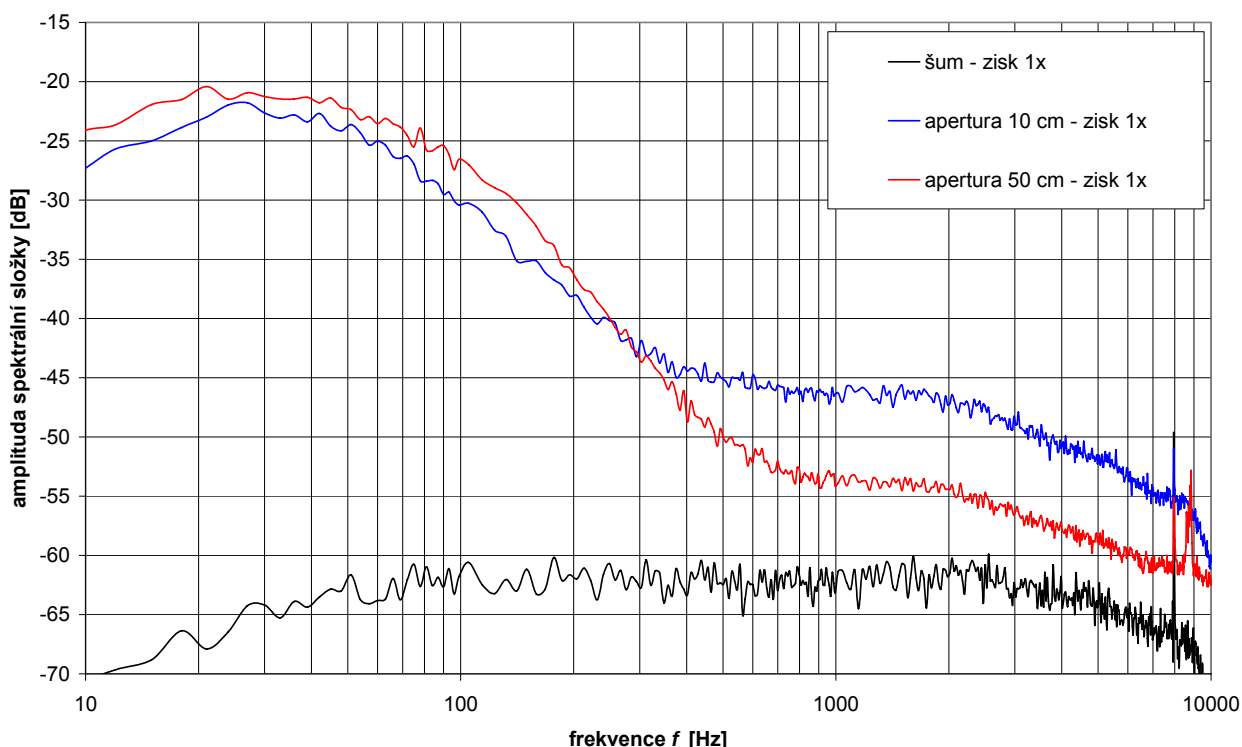


Obr. 3.2 Závislost relativní variance přijímaného optického výkonu v závislosti na vlnové délce laserové diody.

Z grafu na Obr. 3.2. je patrné, že pro navrhovaný spoj je z hlediska vlivů turbulencí atmosféry vhodnější použití kratších vlnových délek. Tento závěr rovněž odpovídá teoretickým výpočtům uvedeným v kapitole 2.2.10. Pro praktické ověření by bylo potřebné pro tento účel vyrobit dva dálkové spoje lišící se pouze vlnovou délkou.

3.2 MĚŘENÍ NA DÁLKOVÉM SPOJI

Pro měření frekvenčního spektra přijímaného signálu ovlivněného průchodem atmosférou byl použit námi navržený dálkový spoj. Při konstrukci přijímače se vycházelo ze zkušenosti, že fluktuace optické intenzity se projevují zejména na nízkých frekvencích (řádově do 1 kHz), zatímco na vyšších frekvencích (řádově od 10 kHz) jsou prakticky zanedbatelné. Frekvence nosné vlny přenášeného signálu byla zvolena 45,5 kHz a propustná šířka pásma filtru byla 5 kHz. K záznamu zesíleného přijímaného signálu byla použita zvuková karta počítače. Nahrávaný zvuk měl vzorkovací frekvenci 22 050 Hz a rozlišení amplitudy 32 bitů. Použití pásmové propusti v přijímači ovlivňuje vzhledem ke strmosti hran filtru přijímaný signál. Při výpočtech jsme použili numerický model inverzního filtru, odvozený z parametrů použitého filtru změřených v laboratoři při sestavování spoje.



Obr. 3.3 Spektrum šumu vlastního přijímače zisk 1x,
průměr přijímací apertury: černá – 0 cm (přijímač zastíněn),
modrá – 10 cm, červená – 50 cm

Naměřené hodnoty vlastního šumu přijímače dosahují, při zesílení vstupního zesilovače 1x, úrovní cca -60 dB.

Jak je vidět z grafu Obr. 3.3, fluktuace optické intenzity jsou výrazné na frekvencích do cca 500 Hz až 1 kHz. Mimo tuto oblast fluktuace optické intenzity splývají s vlastním šumem přijímače.

Měření na dálkovém spoji v terénu nám dalo potřebné praktické zkušenosti pro konstrukci přijímače dálkového spoje. Pracujeme-li s přenosovou rychlostí vyšší než 1 Mbit/s (frekvence přenášeného signálu je 1 MHz) a vyšší, pak vidíme, že fluktuace optické intenzity se projevují na frekvencích o tři řády nižších. Takový rozdíl vede k závěru, že při vhodné volbě horní propusti již fluktuace signálu způsobené turbulencí atmosféry, neovlivňují rozhodovací úroveň OOK demodulátoru.

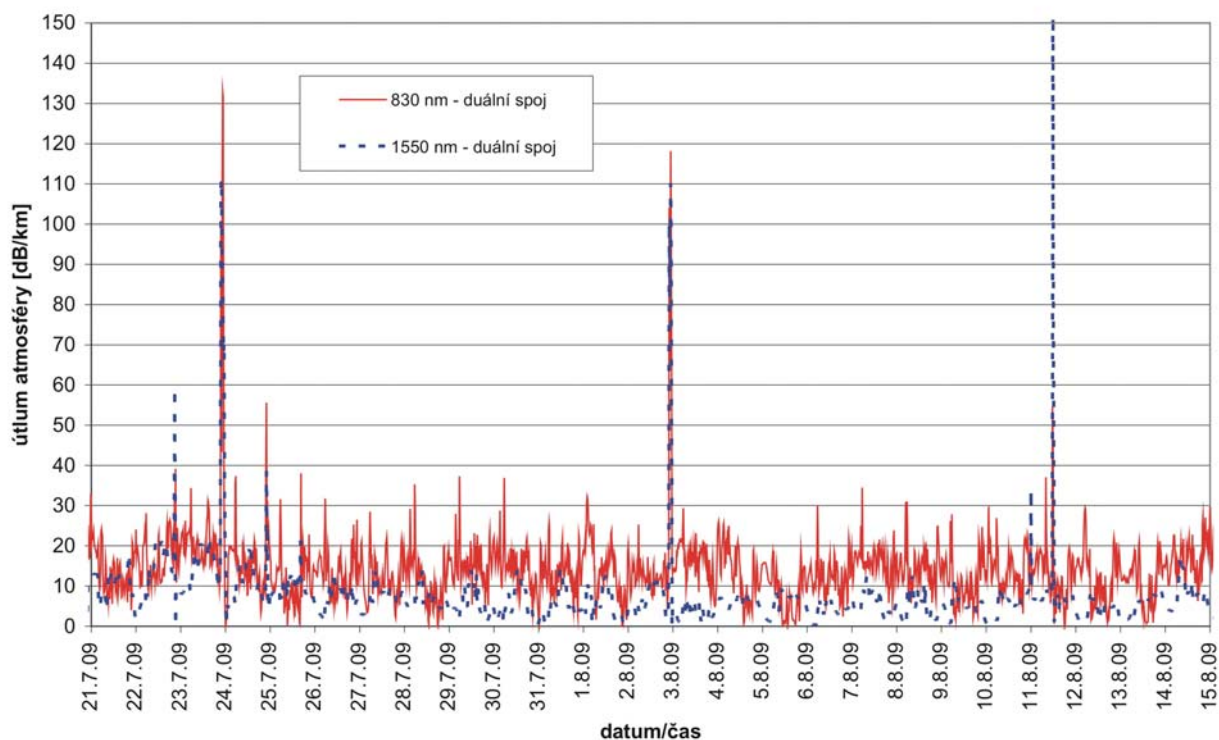
3.3 MĚŘENÍ NA DUÁLNÍM SPOJI

Důvodem sestavení duálního spoje bylo získání dat potřebných pro určení statistiky útlumu atmosféry na dvou různých vlnových délkách a stanovení dostupnosti optického spoje. K umístění tohoto testovacího spoje byla zvolena lokalita na střeše budovy ústavu Radioelektroniky VUT v Brně (Purkyňova 118) tedy lokalita v místě plánovaného umístění přijímače simplexního spoje velkého dosahu. Na stejném místě je rovněž umístěn dohledoměr PWD22 firmy Vaisala. Dohledoměr PWD22 měří útlum atmosféry principem založeným na rozptylu světla v atmosféře, zatímco duální spoj měří přímo úroveň útlum na trase spoje.

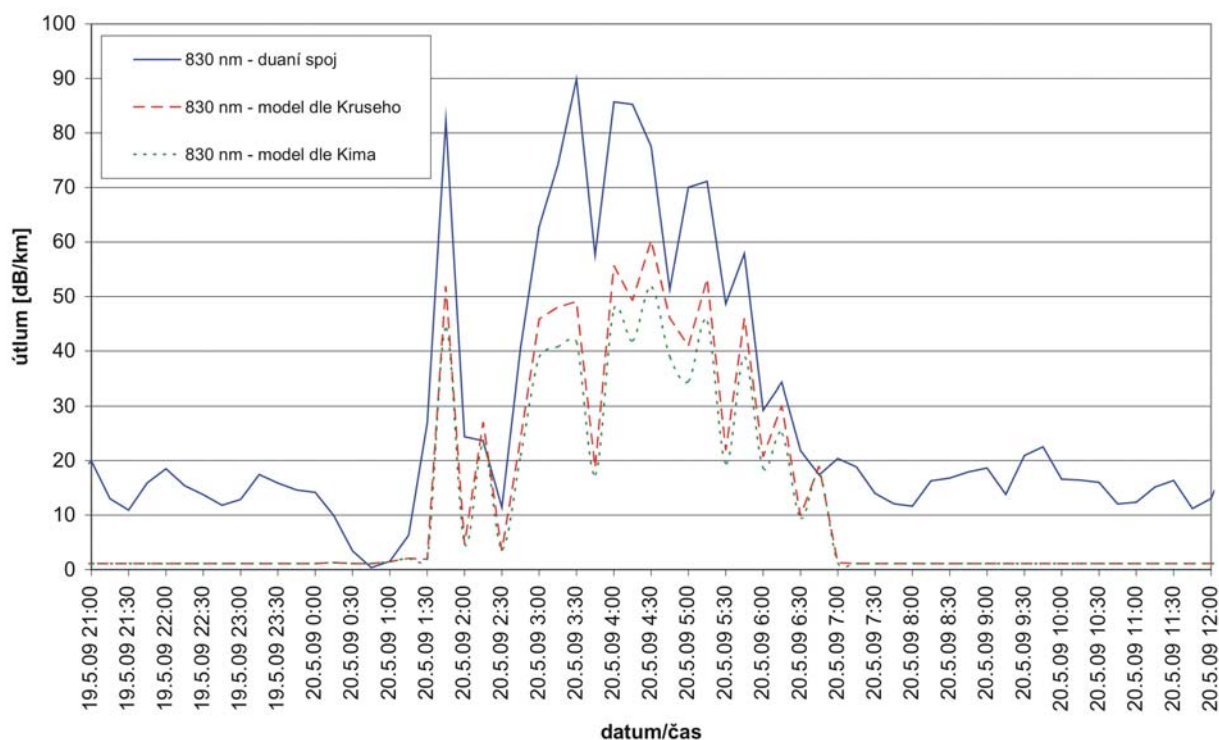
Podobné měření probíhá ve spolupráci s ústavem fyziky atmosféry v Praze v lokalitě Milešovky, v oblasti, která se projevuje častým výskytem mlhy a nízké oblačnosti. V této oblasti byl v roce 2008 instalován podobný duální spoj a data mohou být srovnána s dohledoměrem PWD11 firmy Vaisala umístěným v blízkosti spoje.

Na Obr. 3.4 je uvedena ukázka dat změřených pomocí duálního spoje v Brně. Na následujících obrázcích 3.5 a 3.6 jsou pak zobrazeny části dat, odpovídajících zvýšeným útlumům vlivem mlhy a jejich vzájemné srovnání s daty odvozenými z meteorologické viditelnosti dle modelu Kruse a Kima.

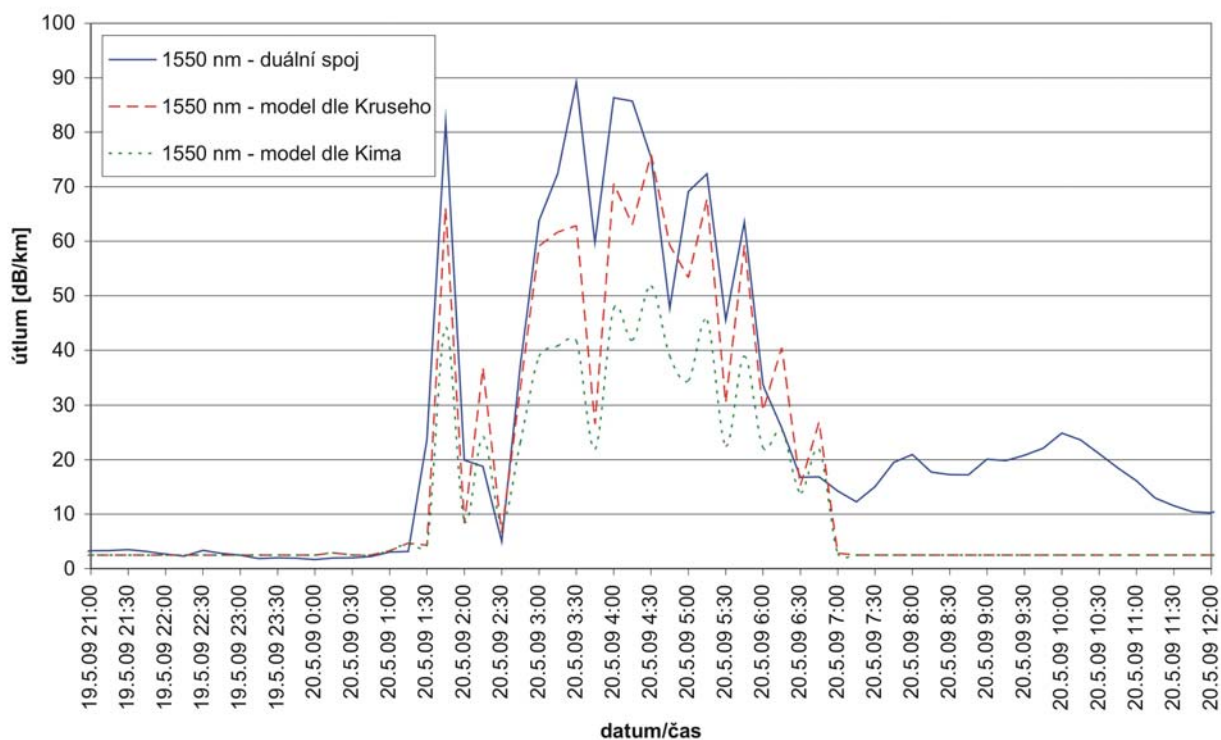
Díky měřicímu spoji jsou k dispozici data za období několika měsíců a bylo možno provést vyhodnocení statistického rozložení útlumů atmosféry (normovaných na délku spoje 1 km). Podobné vyhodnocení jsme provedli i pro duální spoj umístěný v lokalitě Milešovka.



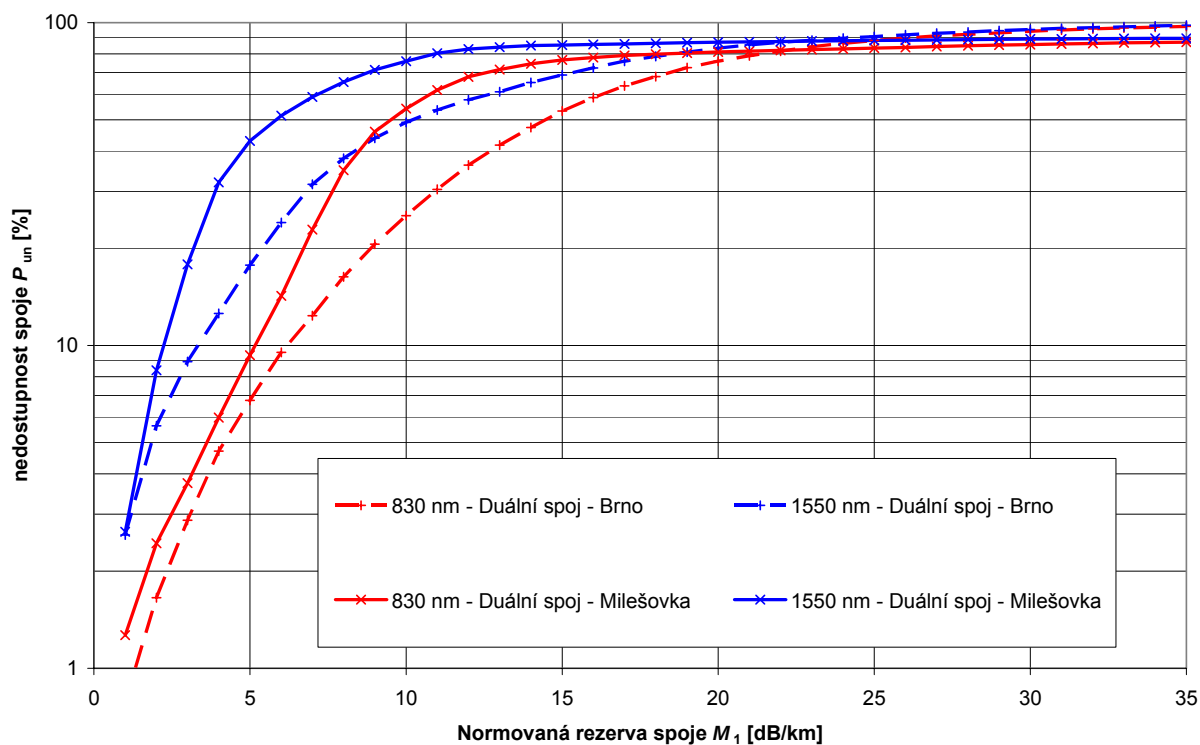
Obr. 3.4 Data útlumu atmosféry změřena duálním spojem umístěným v Brně.



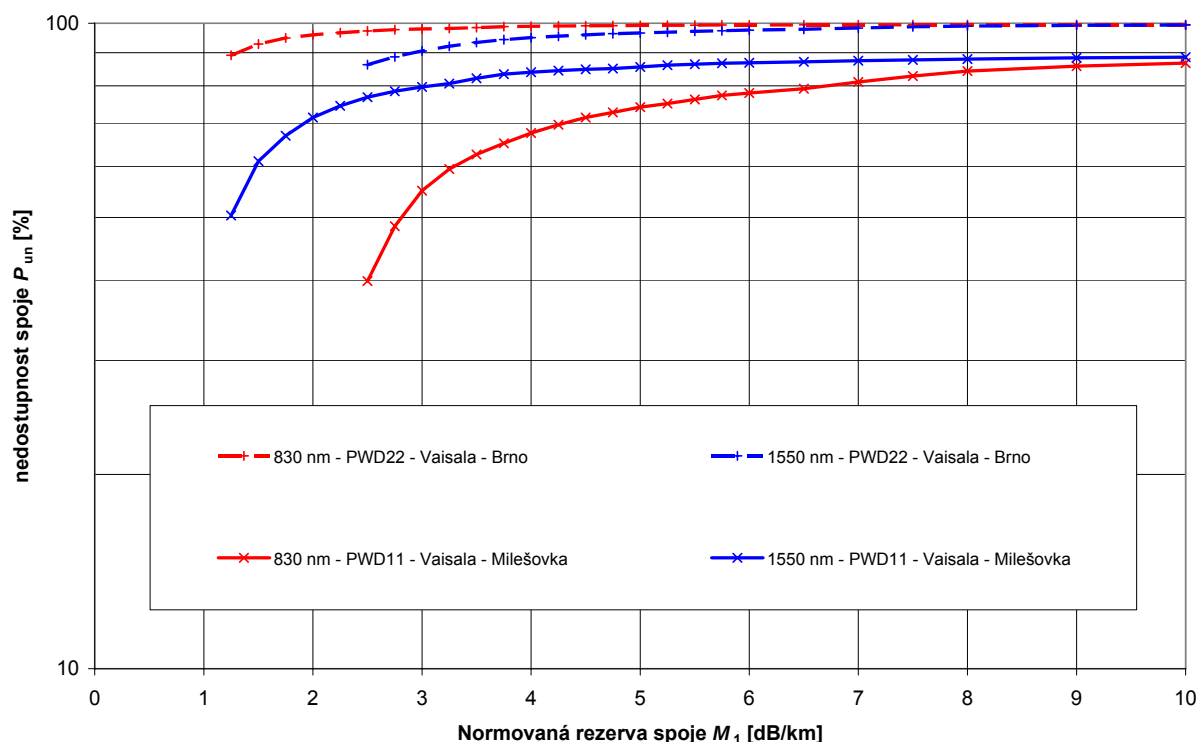
Obr. 3.5 Srovnání útlumu atmosféry změřených v Brně duálním spojem s daty vypočtenými z meteorologické viditelnosti měřené dohledoměrem PWD22 pro vlnovou délku 830 nm.



Obr. 3.6 Srovnání útlumu atmosféry změřených v Brně duálním spojem s daty vypočtenými z meteorologické viditelnosti měřené dohledoměrem PWD22 pro vlnovou délku 1550 nm.



Obr. 3.7 Graf nedostupnosti spoje získaný měřením pomocí duálního spoje.



Obr. 3.8 Graf nedostupnosti spoje získaný výpočtem z meteorologické dohlednosti měřené dohledoměry PWD11 a PWD22 firmy Vaisala.

Na Obr. 3.7 a 3.8 jsou zobrazeny grafy nedostupnosti spoje odvozené z naměřených dat. Dle teorie uvedené v kapitole 2.4.1 je z těchto grafů možné odvodit dostupnost navrhovaného spoje v dané lokalitě.

Ukázalo se, že získaná data jsou vhodná pro stanovení časové dostupnosti spojů s normovanou linkovou rezervou spoje větší než cca 3 dB/km. Pro spoj určený pro dosah 30 km a pracující na vlnové délce 830 nm vychází v návrhu tato normovaná rezerva přibližně 0,33 dB/km. Pro spoj pracující na vlnové délce 1550 nm vychází normovaná rezerva přibližně 0,5 dB/km. Odečet předpokládané doby dostupnosti pro spoje velkého dosahu z námi získaných grafů uvedených na Obr. 3.7 a 3.8 tedy není možný.

4 ZÁVĚR

Disertační práce se zabývá rozsáhlou problematikou týkající se návrhu optických bezkabelových spojů určených zejména pro velké vzdálenosti (desítky kilometrů). Pro tyto velké vzdálenosti se nejvíce projevují problémy mechanické stability, přesnosti optických prvků, nastavování jejich polohy a problémy spojené s atmosférickými jevy. Menší problémy pak mohou nastat v mechanické konstrukci přijímače z důvodu montáže chlazení lavinové fotodiody.

Dosavadní publikované práce se věnovaly především zkoumání problémů souvisejících se spoji kratšího dosahu, které jsou určené pro městské sítě (tzv. „řešení poslední míle“). Spoj velkého dosahu řešený v předložené disertační práci je určený k přenosu dat, u kterého není požadavek vysoké přenosové rychlosti. Jedná se o přenos metrologických dat, přenos lékařských snímků apod. Projekt byl motivován zájmem ředitele pro počítačové sítě Ústavu výpočetní techniky Masarykovy university v Brně o vývoj spoje velkého dosahu.

Velikosti výkonů použitelných pro optickou komunikaci dnes dosahují až stovek W, což umožňuje prodloužení dosahu spoje a/nebo zlepšení jeho parametrů. Se zvětšením dosahu spoje však vyvstávají některé nové problémy, jako je úroveň rozptylu a zpětného odrazu optické vlny vlivem atmosféry. Optická komunikace se také doposud považovala z hlediska utajení přenášené informace za relativně bezpečnou. Míra rozptylu optického záření v atmosféře však může způsobit, že rozptýlený signál dosáhne hodnoty dostačující pro jeho odposlech. U duplexního spoje může další problémy přinést signál odražený zpět do detektoru vysílací hlavičky. Tato problematika je v dnešní době stále více diskutována.

Hlavní cíle disertační práce – návrh, modelování, sestavení a ohodnocení optického spoje s dosahem 30 km pro přenosovou rychlost 10 Mbit/s – byly splněny. Při návrhu spoje byly respektovány bezpečnostní podmínky pro práci a použití laseru. Měření provedená na spoji ověřila energetickou bilanci spoje a umožnila stanovit limity kvalitativních parametrů spoje. Finální spoj je připraven pro další použití, zejména pro experimentální výzkum dostupnosti spoje a jeho chybovosti.

Ke splnění cílů bylo přistupováno jak deterministickou metodou (při hledání stacionárního modelu spoje), tak statistickou metodou (při hledání modelu atmosférického přenosového prostředí). Některé cíle byly plněny ve spolupráci se zahraničním partnerem (DLR, Wessling, SRN), který se podobnou problematikou rovněž intenzivně zabývá.

5 LITERATURA

- [1] SALEH, B.E.A., TEICH, M.C. *Základy fotoniky*. Praha: MATFYZPRESS Praha, 1994. ISBN 80-85863-00-6.
- [2] ORSCHE, G.R. *Optical Detection Theory for Laser Applications*, New York: Wiley, 2002. ISBN 0-471-22411-1.
- [3] FRANZ, J.H. and JAIN, V.K. *Optical Communications Components and Systems*. New York: CRC Press, 2000. ISBN 0-8493-0935-2.
- [4] ANDREWS, L., PHILLIPS, R., HOPEN, C. *Laser Beam Scintillation with Applications*. Washington: 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] MILLER, J.L., FRIEDMAN E. *Optical Communications Rule sof Thumb*. USA: McGraw-Hill 2003. 500 pages. ISBN 0-07-138778-1.
- [8] SNYDER, A.W., LOVE, J.D. *Optical Waveguide Theory*. England: Chapman & Hall 2003. 752 pages. ISBN 978-0412099502.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] RAZAVI, B. *Design of Integrated Circuits for Optical Communications*. New York: McGraw Hill, 2003. ISBN 0-07-282258-9.
- [12] GAGLIARDI, R. M. and KARP, S. *Optical Communications*. New York: John Wiley & Sons, 1995. ISBN 0-741-54287-3.
- [13] DOLEČEK, J. *Optoelektronika a optoelektronické prvky*. Praha: BEN-technická literatura, 2005. ISBN 80-7300-1845.
- [14] WILFERT, O. *Optické bezkabelové spoje*. Brno, 2004. 84s., 8 s. příloh. Habilitační práce na Fakultě elektrotechniky a komunikačních technologií na Ústavu radioelektroniky.

- [15] KOLKA,Z.: Monitoring of optical directional link. In: *Proc. of the 9th Czech-Slovak Conf. RADIOELEKTRONIKA 99*, TU Brno 1999, pp. 82-85.
- [16] 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.
- [17] 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.
- [18] HLAVÁČ, D., WILFERT, O. Availability of free-space link. In: *Sborník příspěvků conference Elektrotechnika a informatika 2002*. ZCU Plzeň, 2002, s. 83 – 168.
- [19] 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.
- [20] KŘIVÁK, P. Gain of FSO-Link Receiver. In *16th Internacional Czech-Slovak Scientific Conference RADIOELEKTRONIKA 2006*. Bratislava: Slovak University of Technology in Bratislava, 2006, s. 274 - 277, ISBN 80-227-2388-6.
- [21] KŘIVÁK, P., WILFERT, O. Additional Gain Calculation for the Free-Space Optical Link Transceiver. In *Proceedings of the 12th conference Student EEICT 2006 volume 4*. Brno: Brno University of Technology, 2006, s. 281 - 285, ISBN 80-214-3163-6
- [22] KŘIVÁK, P., WILFERT, O. Power Equivalent Gaussian Beam for Terrestrial Optical Wireless Link Power Budget. In *Junior Scientist Conference 2006*. Vienna, Austria: Vienna University of Technology, 2006, s. 39 - 40, ISBN 3-902463-05-8
- [23] 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.
- [24] 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.
- [25] KŘIVÁK, P., WILFERT, O. Modeling of Gaussian Beam for Terrestrial Optical Wireless Link. In *2006 Northern Optics Conference Proceedings*. Bergen, Norway: University of Oslo, UNIK, 2006, s. 79 - 81, ISBN 1-4244-0435-5

- [26] KŘIVÁK, P., WILFERT, O. Long Range Free Space Optical Link. In *17th Internacional Conference RADIOELEKTRONIKA 2007*. Brno, Czech Republic, Department of Radio Electronic Brno University of Technology, 2007, s. 625 - 629, ISBN 978-80-214-3390.
- [27] GRAEME, J. *Photodiode Amplifiers*. USA: McGraw-Hill, 1996. 254 pages. ISBN 0-07-024247-X.
- [28] AVIV, D.G. *Laser Space Communications*. London: Artech House, 2006. 196 pages. ISBN 978-1-59693-028-5.
- [29] CVIJETIC, N., WILSON, S.G., BEANDT-PEARCE, M. Receiver Optimization in Turbulent Free-Space Optical MIMO Channels With APDs and Q-ary PPM. *Photonics Technology Letters, IEEE*. 2007, vol. 19, no. 2, p. 102 - 105. ISSN 1041-1135.
- [30] ANDREWS, L.C. Free-Space laser propagation: Atmospheric effects. Digest of the LEOS Summer Topical Meetings, 2005, vol. 1, no. 1, p. 3-4. ISSN 1099-4742.
- [31] TARIGHAT, A., HSU, R.C.J., FELLOW, A.H.S., FELLOW, B.J. Digital Adaptive Phase Noise Reduction in Coherent Optical Links. *Journal of lightwave technology*. 2006, vol. 24, no. 3, p. 1269-1276. ISSN 0733-8724.
- [32] HENNIGER, H., EPPLE, B., GIGGENBACH, D. Mobil FSO Activities in Europe and Fading Mitigation Approaches. In *17th Internacional Conference RADIOELEKTRONIKA 2007*. Brno, Czech Republic, Department of Radio Electronic Brno University of Technology, 2007, s. 263 - 268, ISBN 978-80-214-3390.
- [33] SHEIKH, M. S., KÖHLDORFER, P., LEITGEB, E., "Channel Modeling for Terrestrial Free Space Optical Links," Proc. of 7th Transparent Optical Networks, p. 407- 410 (2005).
- [34] MAJUMDAR, A.K., RICKLIN, J.C., [Free-Space Laser Communications, Principles and Advances], Springer Science + Business Media Inc, New York, 407-417 (2008).
- [35] SHAW, G.A., SIEGEL, A.M., MODEL, J. "Ultraviolet Comm Links for Distributed Sensor Systems," IEEE LEOS - Laser & Electro-Optics Society Newsletter, vol. 19, no. 5, 26-29 (2005).
- [36] RUSSEL, P.B., LIVINGSTON, J.M., SCHMID, B., REDEMANN, J., EILERS, J., "Ames Airborne Tracking Sunphotometer," http://geo.arc.nasa.gov/sgg/AATS-website/AATS6_AATS14/AATS14_2-pg+table.doc
- [37] STEWARD, R.H., *Introduction to physical oceanography*, College Station: Texas A&M University 2007, http://oceanworld.tamu.edu/resources/ocng_textbook/chapter05/chapter05_02.htm

- [38] WILFERT, O., *Fotonika a optické komunikace*, Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav radioelektroniky, 2007, ISBN 978-80-214-3537-7.
- [39] KIM, I. I., MITCHELL, M., KOREVAAR, E. *Measurement of scintillation for free-space laser communication at 785 nm and 1550 nm*, Proc. SPIE Optical Wireless Communications II, Vol. 3850, p. 49-62, (1999).
- [40] WILFERT, O., KOLKA, Z. Statistical model of free-space optical data link. In: Proc. *Of The International Symposium on Optical Science and Technology. Conference 5550*. Denver: SPIE, 2004, p. 203-213.
- [41] PERKIN ELMER, *Photodiode datasheets*, <http://optoelectronics.perkinelmer.com>
- [42] ROITHNER LASERTECHNIK, *Laser diode datasheets*, <http://www.roithner-laser.com>
- [43] THORLABS, *Laser diode datasheets*, <http://www.thorlabs.com>
- [44] HAMAMATSU PHOTONICS, *Photodiode datasheets*, <http://www.hamamatsu.com>
- [45] NEWPORT, *Solar irradiance graph*, www.newport.com/images/webclickthru-EN/images/799.gif
- [46] POSPÍŠIL, J., *Základy optiky I.*, Olomouc: rektorát Univerzity palackého v Olomouci, 1983.
- [47] WEICHEL, H., *Laser beam propagation in the atmosphere*, SPIE Press, Bellingham WA, (1998).

CURRICULUM VITAE

Jméno: Petr KŘIVÁK

Narozen: 22. března 1981 v Čeladné

Dosažené vzdělání:

1999 – 2005 Magisterské studium na Fakultě elektrotechniky a komunikačních technologií, Vysokého učení technického v Brně,

Státní zkouška složena v květnu 2005

Diplomová práce na téma Aplikace filtrů s imitačními invertory a proudovými zesilovači

2005 – 2009 Doktorské studium na Fakultě elektrotechniky a komunikačních technologií, Vysokého učení technického v Brně,

Státní doktorská zkouška složena 13. května 2007

Praxe

2004 – 2005 ZŠ Záhuní, Frenštát pod Radhoštěm - správa počítačové sítě

Jazyky

Čeština, Angličtina

Ostatní aktivity

Konzultace a poradenství v oblasti počítačů a elektroniky.

ABSTRACT

This dissertation thesis deals with a long range free space optical links for communication over the distance of few tens of kilometers in the atmosphere. The problematic of the beam propagation and atmospheric effects influencing the beam and the quality of the communication protocol are discussed.

The measuring link is also designed to study the parameters of the communication link work conditions. The measuring link (simplex) consists of two heads. The transmitter head is designed to use two optical beams with laser diodes at the wavelength of the atmospheric windows about 850 or 1550 nm and the overall power of hundredths of mW. The receiver head includes the Fresnel lens. For the detection of very weak signal, the avalanche photodiode is used.

In the end of this work, due to the high power of the transmitting optical beam, the laser safety conditions are also discussed, including the deduced optical transmitters construction recommendations.