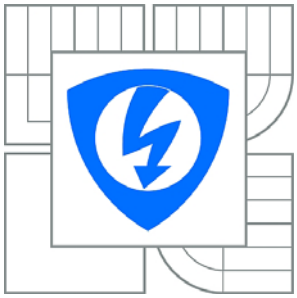
VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

ÚSTAV RADIOELEKTRONIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

DEPARTMENT OF RADIO ELECTRONICS

MODEL ATMOSFÉRICKÉHO PROSTŘEDÍ PRO OPTICKÉ BEZKABELOVÉ SPOJE

MODEL OF ATMOSPHERIC TRANSMISSION MEDIA FOR FREE SPACE OPTICS

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MAGISTER´S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Bc. PETR PŘIKRYL

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

prof. Ing. OTAKAR WILFERT, CSc.

BRNO 2013

Abstrakt

Cílem této práce je prostudovat metody návrhu optického bezkabelového spoje a jeho využití v komunikačních technologiích. Práce popisuje možné rušivé vlivy na přenášený optický signál, mezi něž patří šum signálu, útlum atmosféry a atmosférické turbulence. Práce se podrobně zaměřuje na vlivy atmosférických turbulencí a útlum atmosféry na optický svazek.

Klíčová slova

Optické bezkabelové spoje, optický svazek, atmosférické přenosové prostředí, atmosférická turbulence, útlum atmosféry, energetická bilance spoje, meteorologická viditelnost, optický přijímač.

Abstract

The aim of this thesis is to study the methods of a free space optical link design and its application in the communication technologies. The thesis describes possible intrusive influences on the transmitted optical signal, which are the signal noise, atmospheric attenuation and atmospheric turbulences. The thesis is particulary focused on the influence of the atmospheric turbulences and atmospheric attenuation on the optical beam.

Keywords

Free space optical links, optical beam, atmospheric transmissive environment, atmospheric turbulence, atmospheric attenuation, power budget of the link, meterological visibility, optical reciever.

Bibliografická citace

PŘIKRYL, P. *Model atmosférického prostředí pro optické bezkabelové spoje.* Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2013. 68 s. Vedoucí semestrální práce prof. Ing. Otakar Wilfert, CSc..

Prohlášení

Prohlašuji, že svou diplomovou práci na téma Model atmosférického prostředí pro optické bezkabelové spoje jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

V Brně dne 24. května 2013 .....

podpis autora

Poděkování

Děkuji vedoucímu diplomové práce Prof. Ing. Otakarovi Wilfertovi, CSc. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé diplomové práce.

V Brně dne 24. května 2013 .....

podpis autora

Obsah

Obsah ... **6**
1 Úvod ... **8**
2 Optický bezkabelový spoj ... **10**
2.1 Historie ... 10
2.2 Základní prvky ... 10
2.3 Parametry ... 11
2.4 Výhody a nevýhody OBS ... 13
2.5 Příklad aplikace spoje ... 14
3 Útlumy v optickém bezkabelovém spoji ... **15**
3.1 Útlumy spojené s optickým vysílačem ... 15
3.2 Útlumy spojené s optickým přijímačem ... 16
3.3 Popis optického svazku ... 16
3.4 Útlum šířením ... 17
3.5 Charakteristika atmosférického přenosového prostředí ... 19
3.5.1 Extinkce optické intenzity čisté atmosféry ... 20
3.5.2 Atmosférická turbulence ... 22
3.5.3 Útlumy způsobené aerosoly, deštěm a sněhem ... 23
3.6 Šumy v optických komunikacích ... 24
3.6.1 Kvantový šum ... 24
3.6.2 Šum temného proudu ... 25
3.6.3 Šum pozadí ... 25
3.6.4 Tepelný šum ... 25
4 Modelování funkce spoje ... **26**
4.1 Stacionární model OBS ... 26
4.2 Statistický model OBS ... 27
4.2.1 Kvalitativní ukazatelé ... 27
4.2.2 Zhodnocení ... 28
5 Skladba a energetická bilance spoje ... **29**
5.1 Vysílací systém OBS ... 30
5.2 Přijímací systém OBS ... 30
5.3 Energetická bilance OBS ... 31
5.4 Výhody OBS oproti jiným (radiovým) spojům ... 37
6 Odhad nedostupnosti OBS ... **37**
6.1 Příklad návrhu délky spoje pro známou nedostupnost $P_{un} < 1$ % ... 42
6.2 Pravděpodobnost přerušení spoje ... 43
7 Simulační program Atmos ... **45**
7.1 Úvod do programu Atmos ... 45
7.2 Spuštění programu Atmos ... 45
7.3 Program Atmos: Zadání parametrů optického bezkabelového spoje ... 46
7.3.1 Zadávání parametrů ... 46
7.3.2 Popis parametrů ... 47
7.4 Program Atmos: Komplexní model spoje ... 49
7.4.1 Zadávání délky L_{12} pro modelovaný spoj ... 49
7.4.2 Stacionární model spoje ... 50
7.4.3 Statistický model spoje ... 51
8 Závěr ... **54**
Seznam použité literatury ... **55**
Seznam použitých zkratek a symbolů ... **57**

Seznam příloh 61
Příloha A: Návrh a výpočet energetické bilance spoje 62
Příloha B: Modelování spoje v počítačovém prostředí Matlab 66

1 Úvod

Tato diplomová práce se zabývá optickými bezkabelovými spoji a atmosférickým přenosovým prostředím (APP), které slouží jako médium pro přenos optického svazku. Seznámíme se tedy s problematikou optického bezkabelového spoje, možnostmi útlumu v atmosféře a statistickým modelem optického bezkabelového spoje. Podrobněji se budeme věnovat koeficientu extinkce, atmosférické turbulenci, odhadu nedostupnosti spoje a pravděpodobností přerušení spoje.

Optické bezdrátové komunikace se v posledních letech velmi rozvíjejí. Je to zapříčiněno tím, že se zvyšujícími nároky na rychlost a bezpečnost přenosu, jsou již stávající sítě přehlceny a tudíž se hledají jiné alternativy. Optický bezkabelový spoj se jeví jako vhodná alternativa, protože ho lze využít jak na krátké vzdálenosti, řádů stovek metrů, tak i na několikakilometrové vzdálenosti. Ve srovnání s kabelovým optickým přenosem, by se dalo říci, že již nyní dosahuje stejných přenosových rychlostí, avšak jeho instalace je mnohem snadnější a levnější než při použití optických vláken u kabelového spoje.

Optický svazek je však ovlivněn řadou jevů, které se vyskytují v atmosféře. Mezi tyto jevy patří déšť, sníh, mlhy, bouřky, větry, větrné víry nebo atmosférické turbulence. Atmosférické turbulence mají významný vliv na optický svazek. Turbulence dokáží vyvolat ohyb svazku a zkreslení vlnoplochy, díky čemuž může dojít dokonce i k minutí přijímací soustavy. Proto se optický svazek přenáší na vybraných vlnových délkách, v tzv. atmosférických oknech, která nejsou tolik ovlivňována při průchodu atmosférou a intenzita optického svazku není tolik utlumena.

Optický bezkabelový spoj (dále jen OBS) se skládá ze dvou hlavic, které pracují v plně duplexním provozu. Komunikuje se pomocí optického svazku. Vysílač vysílá úzký optický svazek s úhlem divergence několik miliradiánů na přijímač. Mezi hlavicemi musí být přímá viditelnost. Skladba hlavic OBS odpovídá typu spoje. OBS se mohou lišit počtem vysílaných svazků, počtem použitých optických kanálů a metodou zvyšující dostupnost spoje.

Parametry OBS/APP lze rozdělit na stacionární a statistické. Stacionární parametry se týkají energetiky spoje, patří mezi ně přenosová rychlost, dosah a chybovost. Statistické parametry se týkají lokality, kde jsou hlavice umístěny a patří mezi ně procento času dostupnosti spoje a pravděpodobnost přerušení svazku ptákem. V současné době vyráběné OBS jsou schopny pracovat na vzdálenosti od stovek metrů až po vzdálenost okolo 4km s přenosovými rychlostmi od jednotek Mb/s do 10Gb/s. Dalšími parametry zvažovanými u OBS jsou vlnová délka nosné vlny, typ světelného zdroje, typ detekční fotodiody, podporovaný síťový protokol, propojovací rozhraní, rozměry a hmotnost. Kromě jednosvazkových a jednokanálových metod přenosu se užívá vícesvazkových a vícekanálových metod přenosu pro zvýšení spolehlivosti a přenosové rychlosti. V hlavicích se ojediněle objevuje systém automatického dosměrování svazku, který kompenzuje směr vysílání. K sledování chodu hlavic ze vzdálených počítačů se využívá managementu a monitorujících systémů. Data jsou namodulována na optickou nosnou vlnu intenzitní klíčovanou modulací OOK/IM (On/Off Keying Intensity Modulation), tedy svítí/nesvítí.

Výhodou OBS je rychlé sestavení a snadné překonání překážek typu rušná cesta, vlakové koleje, řeka, apod. Na zřízení spoje není třeba zvláštních licencí jako při zřizování rádiových spojů, protože přenos dat se odehrává na optické nosné vlně, která leží mimo oblast působení telekomunikačního úřadu. Spoj nalézá uplatnění např. v síťové aplikaci „last mile" - propojení vnitřní sítě LAN s páteřní telekomunikační sítí. Další uplatnění spoje je v propojení oddělených, ale mezi sebou přímo viditelných objektů. Na OBS lze z vnějšku pohlížet jako na prodloužené optické vlákno.

Při vyvíjení OBS je třeba brát v úvahu bezpečnostní opatření týkající se práce s lasery a zdroji světla o velké intenzitě. Výstupní výkon záření je tímto opatřením limitován.

2 Optický bezkabelový spoj

2.1 Historie

V polovině 60. let 20. století byl vyvinut optický bezkabelový spoj (OBS) jako další možnost přenosu dat. V této době ale nebyla taková technologická úroveň jako nyní, a tak k realizaci tohoto spoje došlo až v počátku 90. let minulého století.

K jejímu velkému rozvoji došlo v důsledku vyčerpanosti kmitočtových spekter v rádiové komunikaci. Problémem bylo hlavně zajištění spolehlivé komunikace v místech, kde již není možnost využití kabelového přenosového kanálu. K dalším důvodům patří stupňující se požadavky na vyšší přenosovou rychlost, ale také bezpečnost přenášených dat.

2.2 Základní prvky

Typ zdroje záření

Pro vysílací část OBS se používá laserová nebo LED (Light-Emitting Diode) dioda. Po přivedení elektrického signálu ve formě logického signálu na diodu dochází k jejímu buzení a tím k převodu elektrického signálu na signál optický.

Typ zdroje detektoru

Pro přijímací část OBS se používá fotodiody APD (Avalanche Photo Diode) nebo PIN diody. Slouží k přeměně optického signálu na elektrický. Nejčastěji se dnes používají diody APD pro svoje dobré vlastnosti hlavně v oblasti citlivosti.

Typy čoček

Čočky se dělí na spojky a rozptylky. Nejčastější materiál, ze kterého jsou čočky vyrobeny je BK7, UV Fused Silica, CaF2, MgF2, SF11, Ge, ZnSe, Si. Podle typu použití v aplikacích se používají např. asférické čočky (čočky vhodné pro aplikace s nutnou vysokou průchodností světla systémem), kulové čočky (čočky ideální pro navázaní z vlákna do vlákna, případně z diodového laseru do vlákna), gradientní čočky (čočky z materiálu s radiálním gradientem indexu lomu, opět vhodné pro vláknové aplikace) a složené čočky – doublet (kombinace dvou nebo více elementů pro dosažení určitých vlastností např. odstranění chromatické aberace (achromatický doublet apod.) [6]. Zajímavostí je Fresnelova čočka, která nese jméno po svém vynálezci. Tato čočka má při stejných parametrech a stejném použitém materiálu podstatně nižší hmotnost než běžná čočka, protože jsou z ní odstraněny ty části, které se nepodílejí přímo na lomu světla.

Filtry

Filtry se používají k utlumení nebo propuštění pouze určitého vlnového spektra. Nejčastěji se používají pásmové interferenční filtry (filtry propouštějící úzkou část spektra např. FWHM 3, 10, 25, 40 a 70 nm nebo UV oblasti). Další filtry jsou např. barevné filtry (filtry pro separaci barev), neutrální intenzitní filtry (filtry pro utlumení intenzity záření – rovnoměrný útlum v celém spektru záření), notch filtry (filtry pro odstranění velmi úzkého pásu spektra) [6].

2.3 Parametry

Dosah OBS

Dosah OBS je od několika metrů až po desítky kilometrů. S rostoucí vzdáleností mezi hlavicemi spoje narůstají požadavky na přesnost, výkon i ostatní parametry vysílací a přijímací strany, protože na trase se vyskytují už velké útlumy a turbulence, viz. tabulka 2.1.

Tabulka 2.1 Dělení OBS podle dosahu

charakter dosahu	vzdálenost hlavic [m]
velmi krátký	0 – 10
krátký	10 – 100
střední	100 – 1000
dlouhý	> 1000

Bitová chybovost OBS

Citlivost binárního systému s klíčováním přerušováním nosné vlny se definuje jako minimální optická energie, odpovídající potřebnému počtu fotonů na bit, potřebná k dosažení potřebné chybovosti *BER*. *BER* je veličina která udává pravděpodobnost výskytu chybného bitu v přenášené sekvenci [1]. Přehled hodnot je v tabulce 2.2.

$$BER = \frac{\eta_{chyb}}{\eta_{clk}} \tag{2.1}$$

Tabulka 2.2 Převod chybovosti *BER* na *SNR* [4]

BER [-]	SNR [dB]
10^{-3}	10,0
10^{-6}	13,5
10^{-9}	15,5
10^{-12}	16,9

Nejpoužívanější rozmezí chybovosti se v praxi používá $BER = 10^{-6}$ až 10^{-9}, čemuž odpovídá požadovaný odstup signál/šum SNR = 13,5 až 15,5 dB.

Přenosová rychlost

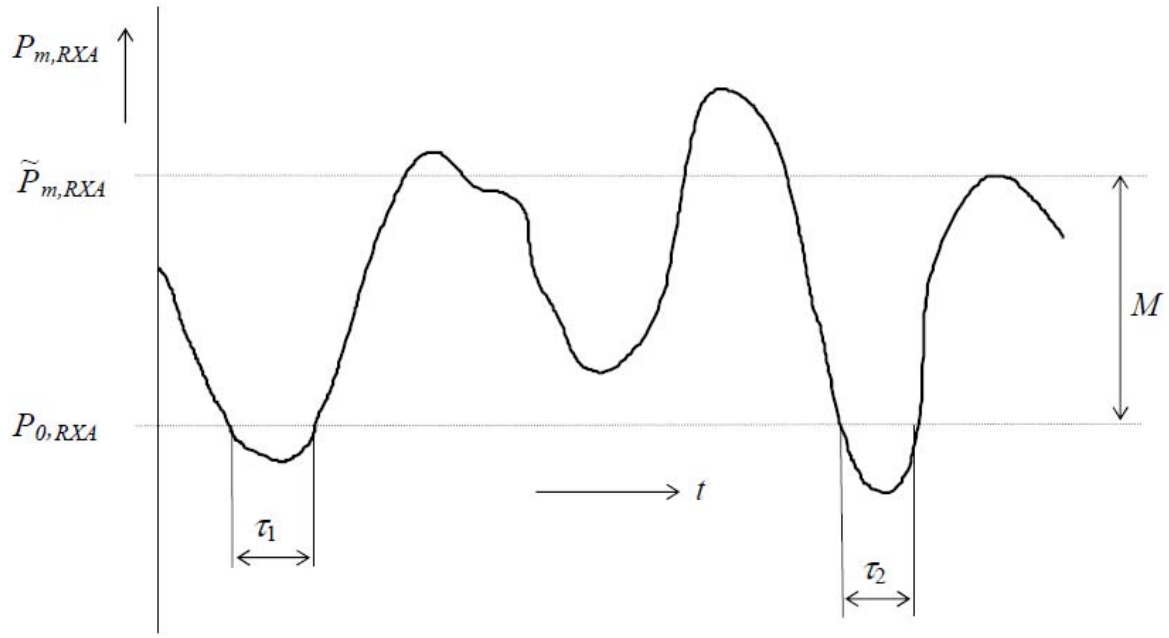
Přenosová rychlost OBS je až stovky MBit/s, existují ale i technologie s rychlostí 2,5 GBit/s a 10 GBit/s. Velká variabilita těchto rychlostí vede k použití těchto systémů ve všech typech přenosových sítí. Přehled rychlostí je v tabulce 2.3.

Tabulka 2.3 Dělení OBS podle přenosové rychlosti

charakter rychlosti	přenosová rychlost [Mbit/s]
nízká	< 1
střední	1 – 10
vysoká	> 10

Dostupnost spoje

Vlivem útlumu vzniklého v atmosféře, se může stát, že daný spoj je nedostupný. Problém nastane, když úroveň přijímaného výkonu klesne pod práh citlivosti přijímače (dojde k překročení rozsahu linkové rezervy spoje, obr. 2.1).



Obr. 2.1 Náhodný charakter přijímaného výkonu [7].

Nedostupnost spoje P_{un} je popsána následujícím vztahem

$$P_{un} = \frac{T_{un}}{T} \cdot 100 = \frac{\sum \Delta \tau_i}{T} \cdot 100 , \qquad (2.2)$$

kde τ_i je trvání jednotlivých úniků pozorovaných během dostatečně dlouhé doby T (většinou jeden rok).

Dalším způsobem popisu nedostupnosti spoje, je popis pomocí úniků (obr. 9). Ty dělíme na krátkodobé (doba trvání řádově ms) a dlouhodobé (doba trvání řádově jednotky až desítky minut). Dlouhodobé úniky jsou způsobeny rozptylem a lomem světla na molekulách plynů a aerosolů a teplotní deformací konzolí hlavic. Krátkodobé úniky mohou nastat jen v určitém časovém rozsahu.

Vlnové délky

Pro přenos se používají vlnové délky 785, 850 a 1550 nm. Obecně se označují jako atmosférická okna. Tyto délky odpovídají frekvencím 382, 353 a 194 THz, spadají tedy do infračerveného spektra a jsou oku neviditelné. Proto některé produkty OBS disponují funkcí automatického snížení výkonu laseru APR (Automatic Power Reduction), pokud se objeví v cestě paprsku překážka, aby například nepoškodili lidský zrak.

Aplikace

Optický bezkabelový spoj je použitelný pro jakýkoliv provoz, kde se jedná o přenos dat a informací. Přenos dat je totiž velmi rychlý, spolehlivý a díky snadné montáži a nízké ceně vhodný kamkoli. Velmi často je to díky nepřístupnosti dané lokality jediná možnost spojení s okolním světem. Můžeme ho tedy vidět nejčastěji u internetových providerů nebo v komunikačních sítích mezi budovami (např. areály nemocnic).

2.4 Výhody a nevýhody OBS

Výhody

- Kompatibilita pro používané protokoly a navazující sítě
- Přenosová rychlost
- Nenáchylnost k vzájemnému rušení
- Bezpečnost přenášených dat
- Bezplatnost přidělování kmitočtového pásma
- Mobilita zařízení
- Snadná a levná montáž zařízení

Nevýhody

- Závislost kvality přenosu na stavu atmosféry
- Nebezpečí přerušování svazku (oblaka, ptáci apod.)
- Potřeba přímé viditelnosti mezi hlavicemi
- Relativně velké nároky na systém směrování a sledování

2.5 Příklad aplikace spoje

Pro brněnskou počítačovou síť byl v roce 1996 vyvinut digitální plně duplexní spoj s označením DAOS-4 pracující s přenosovou rychlostí 10 Mbit/s při vzájemné vzdálenosti hlavic 200 m, obr. 2.2.

Obr. 2.2 Překlenutí silnice Úvoz mezi Dětskou nemocnicí a Fakultní porodnicí na Obilním trhu v Brně v roce 1996 [8].

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.

3 Útlumy v optickém bezkabelovém spoji

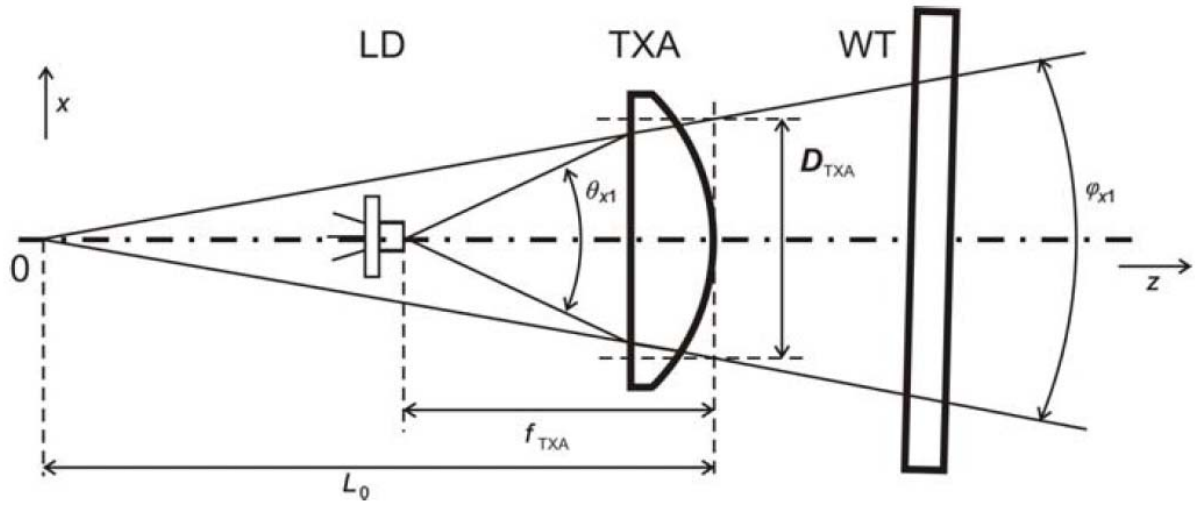
Útlumy v OBS dělíme na stacionární a statistické. Stacionární útlum se projevuje průchodem vysílaného signálu čočkami, dále pak útlumem vlivem šíření v prostoru. Statistický útlum stále kolísá a závisí na aktuálním počasí a lokalitě, kde se spoj nachází.

3.1 Útlumy spojené s optickým vysílačem

Celkový útlum vysílací optické soustavy α_{TS} (obr. 3.1) je dán součtem útlumu krycího skla α_{WT}, útlumu vysílací čočky α_{TXA} a útlumu α_{LD} způsobeného vazbou záření emitovaného laserovou diodou *LD* do vysílací čočky *TXA*.

Typické hodnoty jsou: α_{TS} = 2,5dB, α_{WT} = 0,5 dB, α_{TXA} = 0,5 dB a α_{LD} = 1,5 dB.

$$\alpha_{TS} = \alpha_{WT} + \alpha_{TXA} + \alpha_{LD} \tag{3.1}$$



Obr. 3.1 Vysílací optická soustava [1].

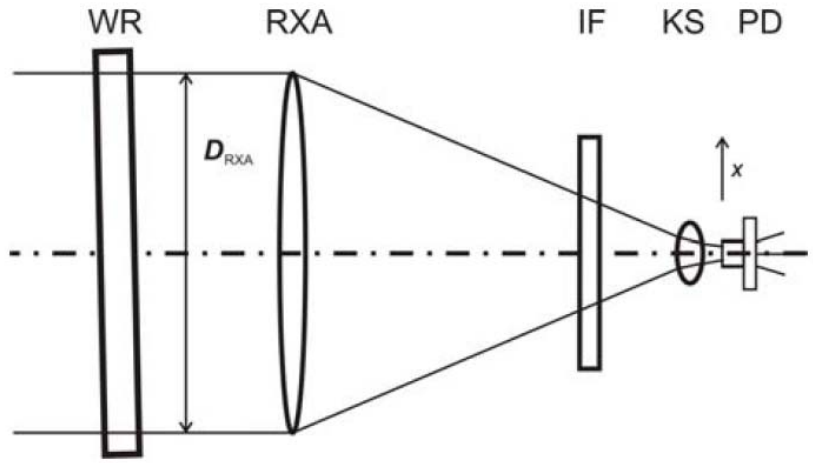
(LD – laserová dioda; θ_{x1} – vyzařovací úhel LD; TXA – vysílací čočka; f_{TXA} – ohnisková vzdálenost čočky vysílače; L_0 – pomocná délka; D_{TXA} – průměr svazku na výstupu vysílače; WT – krycí sklo vysílače; φ_{x1} – divergence výstupního svazku)

3.2 Útlumy spojené s optickým přijímačem

Celkový útlum přijímací optické soustavy α_{RS} vyplývá z jejího geometrického uspořádání (obr. 3.2) a je dán součtem útlumu krycího skla α_{WR}, útlumu přijímací čočky α_{RXA}, útlumu interferenčního filtru α_{IF}, útlumu koncentrátoru (nejčastěji další čočky) α_{KS} a útlumu α_{PD} způsobeného vazbou záření do přijímací fotodiody *PD* [1].

Typické hodnoty jsou: α_{RS} = 6 dB, α_{WR} = 0,5 dB, α_{RXA} = 0,5 dB, α_{IF} = 3 dB, α_{KS} = 0,5 dB, α_{PD} = 1,5 dB.

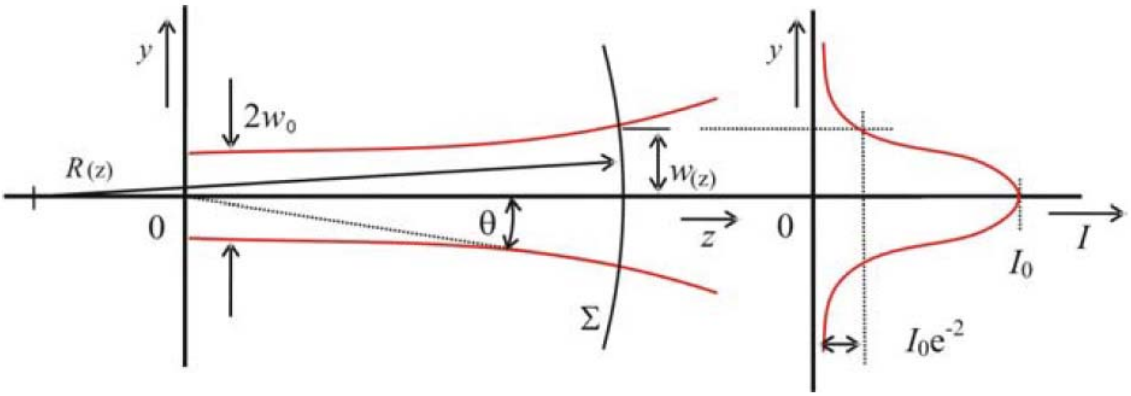
$$\alpha_{RS} = \alpha_{WR} + \alpha_{RXA} + \alpha_{IF} + \alpha_{KS} + \alpha_{PD} \tag{3.2}$$



Obr. 3.2 Přijímací optická soustava [1].

3.3 Popis optického svazku

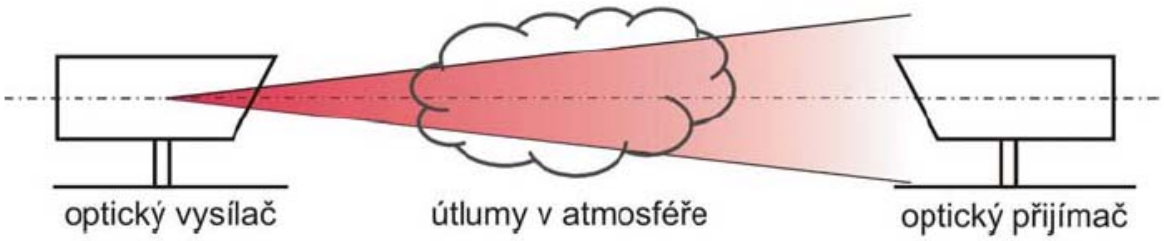
Laserová dioda emituje eliptický svazek s Gausovským rozložením optické intenzity. Budeme-li předpokládat šíření signálu nezkresleného atmosférickým přenosovým prostředím, pak můžeme říci, že po celou dobu šíření se bude svazek stále odpovídat Gaussovskému rozložení a měnit se bude pouze šířka svazku a úroveň optické intenzity na ose svazku. Svazek pak může být charakterizován položířku svazku a intenzity na ose svazku. Sekundárními parametry jsou pak poloměr křivosti vlnoplochy a divergence svazku. Více na obr. 3.3.



Obr. 3.3 Profil Gaussova svazku [1]
(I_0 - intenzita záření v ose svazku; Σ - vlnoplocha; w(z) - položířka svazku; R(z) - poloměr křivosti; θ - úhel divergence).

3.4 Útlum šířením

Průchod svazku atmosférou zahrnuje všechny útlumy závislé s délkou 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}. Jednoduchý nákres přímého optického bezkabelového spoje je na obr. 3.4.



Obr. 3.4 Nákres přímého optického bezkabelového spoje [1].

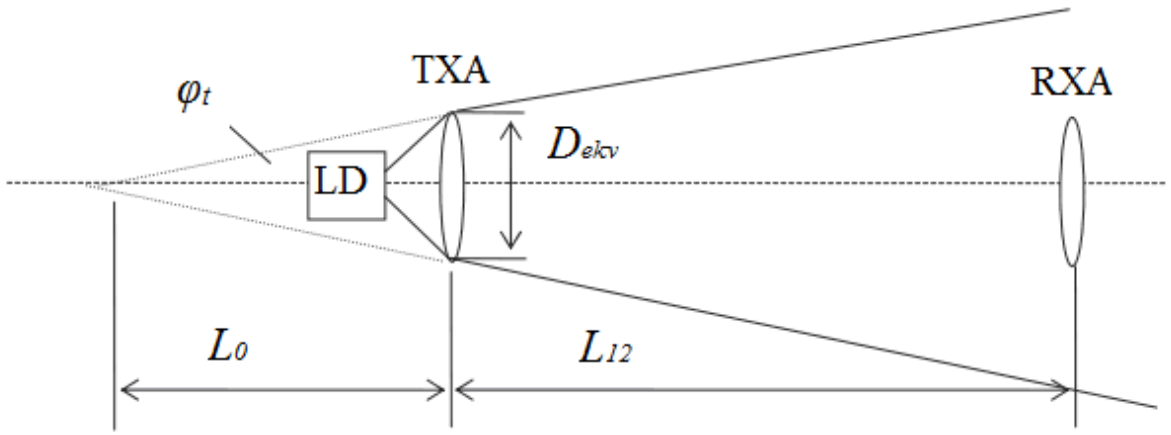
Útlum šířením nabývá vysokých hodnot a jeho hodnota je dána poměrem optických intenzit na ose svazku v místě přijímače a vysílače. V praxi je dán především úhlem vyzařovaného svazku a jeho výpočet vychází z tzv. konceptu pomocné délky vycházejícího z obr. 3.1 a z útlumu šířením daným poměrem přijímaného a vysílaného výkonu.

Vycházíme-li z předpokladu shodné velikosti vysílací a přijímací čočky a stejného rozložení optické intenzity pak je útlum šířením dán vztahem

$$\alpha_{12} = 10\log\frac{I_{0,RXA}}{I_{0,TXA}} = 20\log\frac{L_0}{L_0 + L_{12}} \quad , \tag{3.3}$$

kde $I_{0,TXA}$ a $I_{0,RXA}$ jsou optické intenzity na ose svazku v rovině vysílací a přijímací čočky, L_0 vyjadřuje tzv. pomocnou délku (obr. 3.5) a k jejímu určení je třeba znát průměr čočky vysílače nebo přesněji průměrem vysílacího otvoru D_{ekv} a vysílacím úhlu φ_t. L_0 je pak dána poměrem

$$L_0 \approx \frac{D_{ekv}}{\varphi_t} . \tag{3.4}$$



Obr. 3.5 Znázornění významu veličiny L_0 (pomocné délky).

Geometrický útlum je možné rozdělit do tří částí: útlum šířením, zisk přijímací čočky a tzv. přídavný zisk daný různým rozložením optické intenzity v rovině vysílací a přijímací čočky.

$$\alpha_{geom} = 10\log\frac{P_{RXA}}{P_{TXA}} = a_{12} + \gamma_{add} + \gamma_{RXA} \tag{3.5}$$

3.5 Charakteristika atmosférického přenosového prostředí

Charakteristika atmosférického přenosového prostředí (APP) 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, nestacionární a index lomu atmosféry závisí na konkrétní poloze a času. Je také nutné si uvědomit, že zmíněné jevy vzájemně souvisí a projevují se zároveň [3].

Při šíření světelného paprsku atmosférou dochází k jeho útlumu, který se vyjadřuje tzv. koeficientem útlumu, jehož jednotka je dB/km. Koeficient útlumu je závislý na vlnové délce procházejícího záření a může se měnit ve velmi širokém rozsahu. Např. pro vlnovou délku 850nm se koeficient útlumu mění v rozsahu od 0,06dB/km do 272dB/km, viz [10]. Na útlum světelné vlny má větší vliv mlha než déšť. Protože se útlum atmosféry během dne mění, je třeba do návrhu spoje zahrnout tzv. „rezervu spoje na počasí".

Další vliv na šíření optické vlny mají turbulence, které mohou svazek krátkodobě směrově odchýlit od osy šíření. Turbulence je atmosférický jev modelovaný jako náhodné vznikání a zanikání nehomogenit indexu lomu ve tvaru koulí o velikosti od několika mm do km. Turbulence atmosféry je vnímaná jako jakési „třepotání vzduchu" pozorovatelné za letních horkých dnů nad zahřátými plochami. Míra turbulence se vyjadřuje strukturním parametrem indexu lomu.

Změna teploty s sebou nese další působení na spoj. Vlivem tepelné roztažnosti stativu hlavice dochází k jeho zkrutu a k nežádoucímu odchýlení svazku. Toto odchýlení svazku souvisí s jeho divergencí a je třeba ho brát v úvahu při stanovování celkového útlumu optického signálu. Dále bude toto odchýlení svazku zhoršovat kvalitu přenosu tím víc, čím bude svazek úhlově užší.

Jedna z vlastností atmosféry je schopnost odfiltrovat některé vlnové délky, proto vlnová délka vysílaného paprsku musí ležet v tzv. atmosférických oknech, viz obr. 3.5.

V OBS může dojít ke krátkodobému přerušení optické trasy průletem ptáků. Při přerušení svazku průletem ptáka nastane výpadek spojení přibližně na deset milisekund.

Hlavní jevy ovlivňující šíření a útlum optického svazku v atmosféře:

- ***Extinkce optické intenzity – atmosférický útlum***
  vznikající rozptylem a nebo absorpcí na molekulách plynů a aerosolech.
- ***Fluktuace optické intenzity – atmosférická turbulence***
  způsobená turbulencí atmosféry v troposféře např. vzdušné víry, vítr.
- ***Přerušení optického svazku***
  způsobeno např. přeletem ptáka.

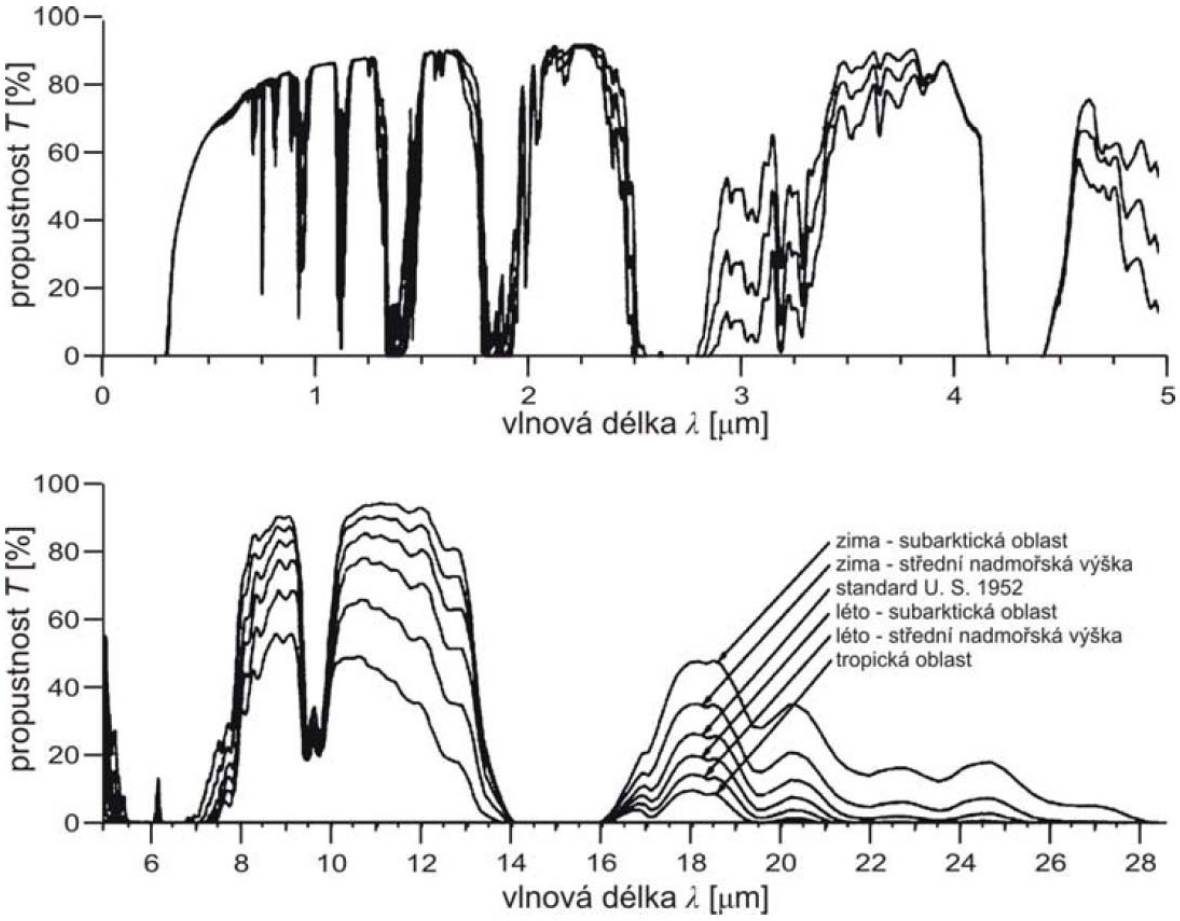
3.5.1 Extinkce optické intenzity čisté atmosféry

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

$$T \approx \frac{1}{\lambda_2 - \lambda_1} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} T_{(\lambda)} d\lambda \approx \frac{1}{\lambda_2 - \lambda_1} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} e^{-\alpha_{e(\lambda)} L_{12}} d\lambda \quad , \tag{3.6}$$

kde T je spektrálně střední hodnota propustnosti atmosféry, L_{12} je délka trasy a α_e je spektrálně závislý koeficient absorpce atmosféry [4].

Je patrné, že tento popis je v praxi nepoužitelný a proto se vychází z naměřených hodnot spektrální závislosti propustnosti atmosféry. Na obr. 3.6 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.



Obr. 3.6 Atmosférická okna [5]
(ilustrativní obrázek - závisí na složení atmosféry v konkrétním místě, relativní propustnost je uvedena pro šest modelů atmosféry a meteorologickou viditelnost 23 km).

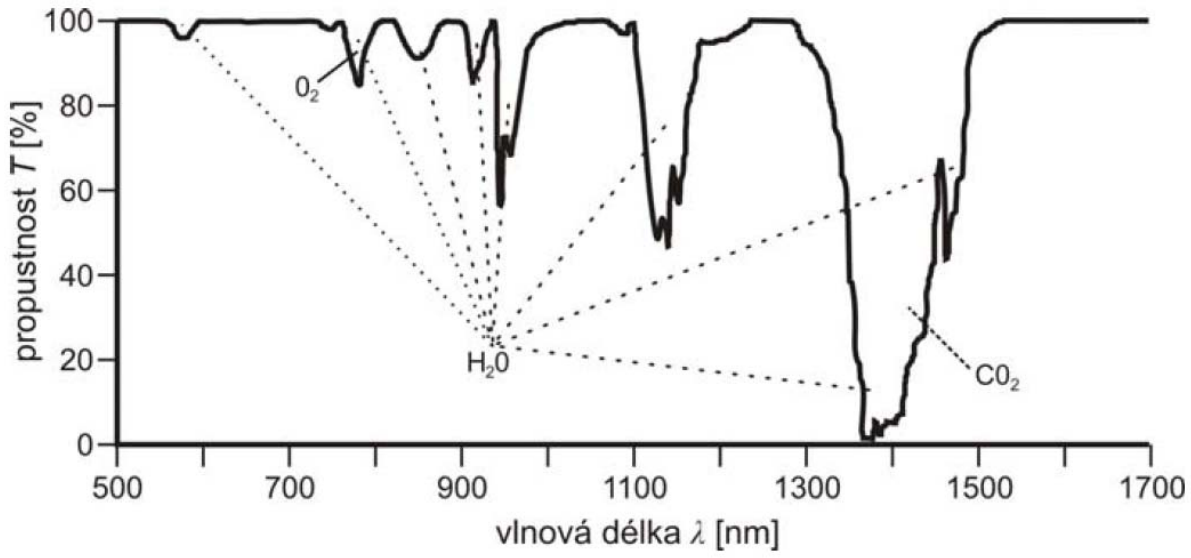
Na základě praktického měření pro útlum čisté a klidné atmosféry předpokládáme zanedbatelnou šířku spektrální čáry a konstantní absorpce atmosféry. Vztah se nám pak zjednoduší do tvaru

$$T = e^{-\alpha_e L_{12}} . \qquad (3.7)$$

Závislost poklesu optické intenzity s rostoucí vzdáleností L_{12} je dána Bougerovým – Lambertovým – Beerovým zákonem.

Na vlnových délkách blízkých vlnovým délkám používaných pro přenos signálu, dochází k absorpci na molekulách vody a kyslíku (obr. 3.7). Při výpočtu útlumu atmosféry tedy musíme brát v úvahu, že daná spektrální propustnost je způsobena absorpcí na těchto molekulách a výsledný útlum bude záviset na lokalitě ve které byl průběh změřen (různé znečištění atmosféry) a na jednotlivých parametrech popisujících atmosféru, jako jsou vlhkost vzduchu, tlak a teplota.

Zvážíme-li rozsahy těchto hodnot můžeme dojít k závěru, že vlhkost vzduchu se v našich podmínkách mění v rozmezí od 30 do téměř 100 %, tlak v rozmezí od 990 do 1040 hPa a teplota od -15 do 40 °C. K započtení těchto parametrů do výpočtu útlumu atmosféry by bylo zapotřebí přesných měření a pochopení vzájemných souvislostí mezi zmíněnými veličinami. Logicky je možné usoudit, že nejnižší útlum nastane při nízkém tlaku, nízké vlhkosti vzduchu a nízké teplotě.



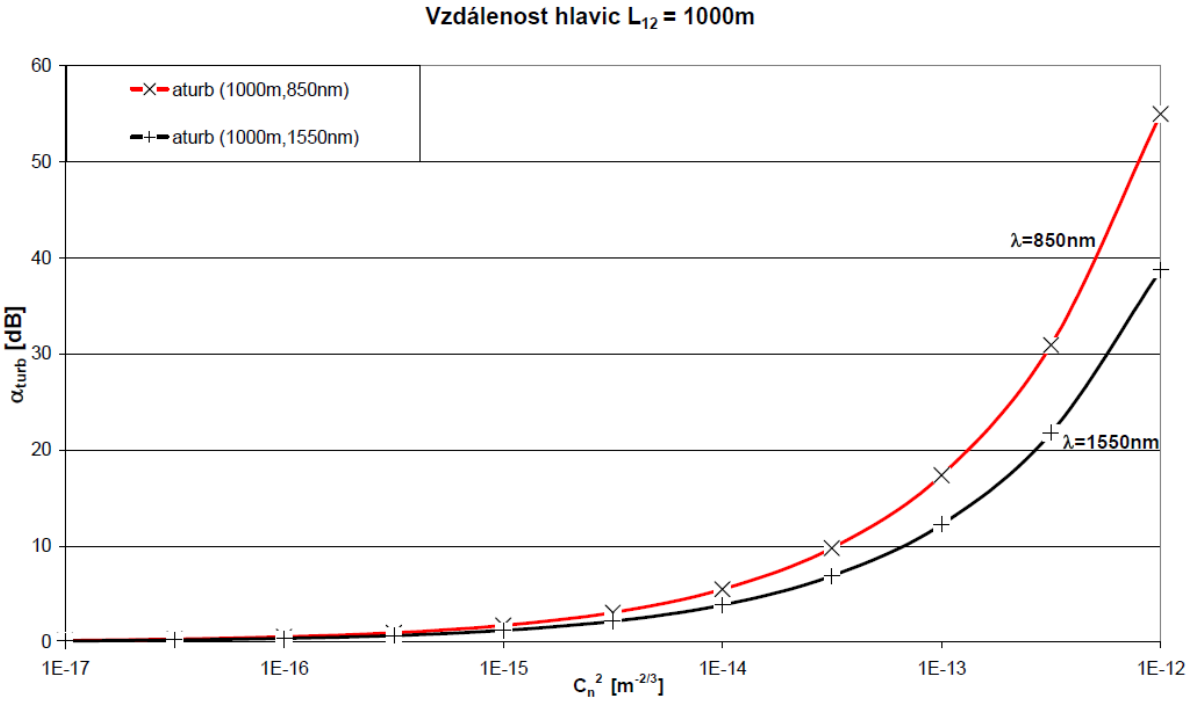
Obr. 3.7 Absorpce na molekulách - propustnost "čisté" atmosféry [1]
(na úrovni mořské hladiny při délce trasy 1 km a šířce spektrální čáry 1,5 nm).

3.5.2 Atmosférická turbulence

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 parametr indexu lomu C_n^2. Tabulka 3.1 ukazuje útlum turbulencí pro různé vlnové délky λ.

Tabulka 3.1 Útlum turbulencí pro vlnové délky λ = 850 a 1550 nm, délka spoje L_{12} = 1 km

C_n^2 [m$^{-2/3}$]	míra turbulence	$\alpha_{turb,\ 1km}$ [dB]	
		λ=850 nm	λ=1550 nm
10^{-16}	klidná atmosféra	0,55	0,39
10^{-15}	mírná	1,74	1,22
10^{-14}	střední	5,5	3,9
10^{-13}	silná	17,4	12,2
10^{-12}	velmi silná	55	39



Obr 3.8 Útlum na trase vlivem turbulencí L_{12} = 1000 m [9].

Z grafických závislostí (obr 3.8) je zřejmé, že s rostoucím strukturním parametrem C_n^2 útlum na trase roste a svazek při vlnové délce λ = 1550 nm dosahuje lepších vlastností z hlediska útlumu, než při vlnové délce λ = 850 nm.

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. Turbulence 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 [3].

3.5.3 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 3.6 potažmo 3.7. Pro matematické vyjádření útlumu se využívá koeficient extinkce α_e a v praxi používaná veličina udávající meteorologickou viditelnost V_M [4].

Meteorologická viditelnost je definovaná jak vzdálenost při níž klesne poměr vstupní a výstupní optické intenzity na 2% (tato definice se udává pro vlnovou délku λ = 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

$$0{,}02 = e^{-\alpha_e V_M}, \tag{3.8}$$

pro koeficient extinkce tedy platí

$$\alpha_e = \frac{3{,}91}{V_M}; (\lambda = 555nm) \tag{3.9}$$

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

$$\alpha_e(\lambda) \approx \frac{3{,}91}{V_M \cdot \left(\frac{555}{\lambda}\right)^q} [dB/km], \tag{3.10}$$

kde q je parametr rovněž závisející na útlumu a meteorologické viditelnosti. Přehled parametru q je v tabulce 3.2.

Tabulka 3.2 Přehled parametru q pro různé viditelnosti

Q		hodnota viditelnosti	atmosféra
KIM model	KRUSE model		
1,6	1,6	$V_M > 50$ km	čistá
1,3	1,3	6 km $< V_M \leq 50$ km	
0,16 V_M + 0,34	0,585 $V_M^{1/3}$	1 km $< V_M \leq 6$ km	opar
$V_M - 0,5$		0,5 km $< V_M \leq 1$ km	střední mlha
0		$V_M \leq 0,5$ km	silná mlha

3.6 Šumy v optických komunikacích

Šumy v optických bezkabelových spojích zastávají významnou roli. Pokud totiž úroveň šumu v OBS překročí určitou mez, je přijatý signál pro potřeby komunikace nepoužitelný. Pro stanovenou přenosovou rychlost a požadovanou chybovost spoje BER je potřeba zaručit minimální odstup signálu od šumu SNR. Celkový šum se skládá ze čtyř částí.

- **Kvantový šum**
- **Šum temného proudu**
- **Šum pozadí**
- **Tepelný šum**

Souhrn kvantového šumu, šumu temného proudu a šumu pozadí se nazývá výstřelkový šum. V optickém bezkabelovém spoji nás tedy zajímá výstřelkový šum a tepelný šum. Výstřelový šum se nejvíce uplatňuje právě u lavinových diod a diod typu PIN. U lavinových diod je tento šum ještě násoben multiplikačním činitelem diody M.

3.6.1 Kvantový šum

Kvantový šum je významnou součástí výstřelového šumu. Pro fotony platí Poissonovo rozdělení. Fotonový (kvantový) šum je tedy dán kvantovou povahou světla. Tím, že fotony dopadají náhodně na aktivní plochu fotodetektoru, dochází ke generaci tohoto šumu a nelze jej už z principu eliminovat. Pro Poissonovo rozdělení lze také určit poměr signálu k šumu, který je roven střední hodnotě signálu, která odpovídá počtu zaznamenaných fotonů v určitém časovém okamžiku. Z toho vyplývá, že *SNR* neomezeně roste s rostoucím středním počtem fotonů.

3.6.2 Šum temného proudu

Šum temného proudu lze pozorovat při náhodné generaci elektron-děrových párů, buď tepelnou excitací nebo tunelováním. Jak už z názvu vyplývá je možno tento šum pozorovat i bez přítomnosti světla.

3.6.3 Šum pozadí

Šum pozadí představuje fotonový šum spojený se světlem, které dopadá na detektor z vnějších zdrojů v okolí vlastního zdroje signálu, jako je např. sluneční světlo nebo světlo hvězd. Šum pozadí je obzvláště omezující při detekci ve střední a vzdálené infračervené oblasti spektra, neboť předměty, které mají pokojovou teplotu, vyzařují v této oblasti značné množství tepelného záření [9].

3.6.4 Tepelný šum

Také bývá označovaný jako Johnsonův nebo Nyquistův šum. Vzniká při náhodném pohybu nosičů v odporových elektrických materiálech při konečných teplotách. Obecně je závislý pouze na teplotě, nezávisí na napětí, proudu ani na frekvenci, jedná se o bílý šum (AWGN). Nejčastěji to bývá šum vznikající na zatěžovacím rezistoru diody.

4 Modelování funkce spoje

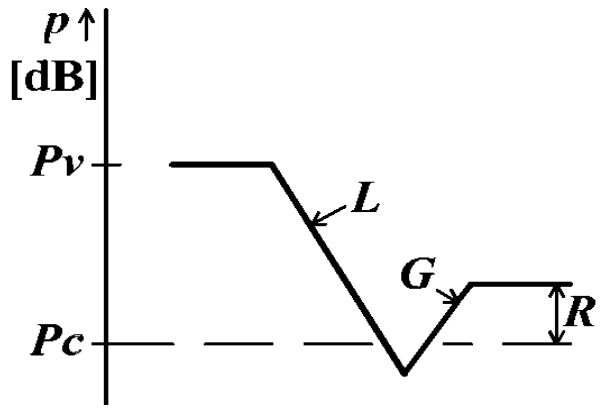
4.1 Stacionární model OBS

Stacionární model OBS slouží k řešení problémů týkajících se výkonu optického signálu a jeho útlumu, případně zesílení na trase vysílací dioda - přijímací dioda. Vychází se ze známých útlumů a zisků jednotlivých částí optické trasy, vypočítává se potřebný výkon vysílací diody a citlivost přijímací fotodiody.

Při výpočtu jsou brány v úvahu tyto veličiny: útlum vazby vysílací dioda - vysílací čočka, útlum na krycích sklech, útlum ve volném atmosférickém přenosovém prostředí, zisk přijímací čočky, útlum na přijímací čočce, ztráty zamířením, rezerva na počasí, rezerva na chybovost, divergence svazku, požadovaný dosah spoje, požadovaná chybovost, dostupnost spoje. Souhrnně lze stacionární model OBS popsat výkonovou rovnicí (4.1):

$$P_C = P_V + G + L - R \tag{4.1}$$

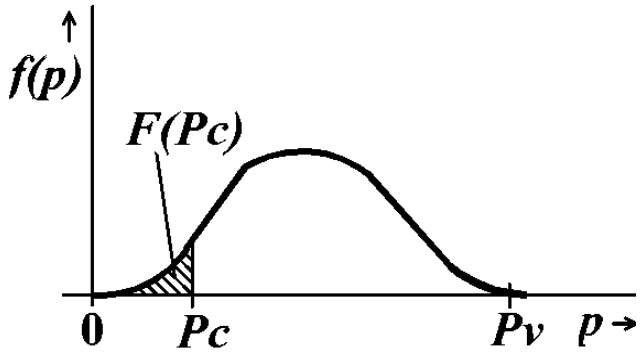
kde P_C je citlivost přijímací fotodiody v [dBm], P_V je vysílaný výkon v [dBm], G je součet zisků a L je součet ztrát na trase vysílací dioda - přijímací dioda v [dB], R je systémová rezerva v [dB]. Výkonový diagram spoje je na obr. 4.1.



Obr. 4.1 Výkonový diagram optického bezkabelového spoje.

4.2 Statistický model OBS

Statistický model OBS slouží k řešení problémů týkajících se spolehlivosti spoje a pravděpodobnosti úplného přerušení svazku letícím ptákem. Sleduje se jak krátkodobé přerušení spoje způsobené např. průletem ptáka, tak dlouhodobé přerušení vzniklé např. mlhou. Statistický model v sobě může koncentrovat časový záznam sledované veličiny i za dlouhé období. Na obr. 4.2 je příklad grafu hustoty pravděpodobnosti přijatého výkonu, kde *p* je výkon přijatého signálu, *f(p)* je jeho hustota pravděpodobnosti, P_C je mezní citlivost přijímače, P_V je vysílaný výkon přijímače, $F(P_C)$ je distribuční funkce výkonu přijatého signálu pro bod P_C.



Obr. 4.2 Příklad grafu hustoty pravděpodobnosti přijatého výkonu OBS.

V rovnici (4.2) je výpočet pravděpodobnosti nedostupnosti spoje v dané kvalitě $F(P_C)$ pro bod P_C citlivosti přijímače pro danou chybovost spoje BER:

$$F(P_C) = \int_0^{Pc} f(p)dp \tag{4.2}$$

4.2.1 Kvalitativní ukazatelé

Kvalitativní ukazatelé ukazují na vlastnosti spoje z hlediska spolehlivosti. Tyto ukazatelé závisí na systému jako celku (parametrech hlavic spoje, přenosovém prostředí, připojení do datové sítě). Mezi tyto ukazatele patří chybovost, procento času dostupnosti spoje, pravděpodobnost přerušení svazku a procento bezchybných sekund. Procento času dostupnosti spoje popisuje spoj z pohledu dlouhodobého, procento bezchybných sekund popisuje spoj z pohledu krátkodobého.

Chybovost *BER* je vyjádřena rovnicí (4.3):

$$BER = \frac{n_{ch}}{n} \tag{4.3}$$

kde n_{ch} je počet chybně přenesených bitů a *n* je celkový počet přenesených bitů.

Procento času dostupnosti spoje je vyjádřením relativního časového intervalu, po který byla při přenosu dat dodržena daná chybovost *BER*. Procento času dostupnosti spoje t_k je vyjádřeno rovnicí (4.4):

$$t_k = 100 \frac{\sum_i \Delta t_i}{T} \tag{4.4}$$

kde čitatel zlomku je součet časových úseků, pro které bylo žádané kritérium chybovosti dodrženo, T je celkový čas měření (doba jednoho roku). Procento času dostupnosti spoje t_k a procento dostupnosti spoje P_{un} jsou stejné veličiny.

Procento bezchybných sekund slouží k ohodnocení pravděpodobnosti krátkodobého přerušení svazku ptáky. K tomuto přerušení může docházet několikrát za den. Jedná se o významnou veličinu typickou pro určitou lokalitu. Dva identické spoje s rozdílnými umístěními nemusí mít nutně stejné kvalitativní parametry.

4.2.2 Zhodnocení

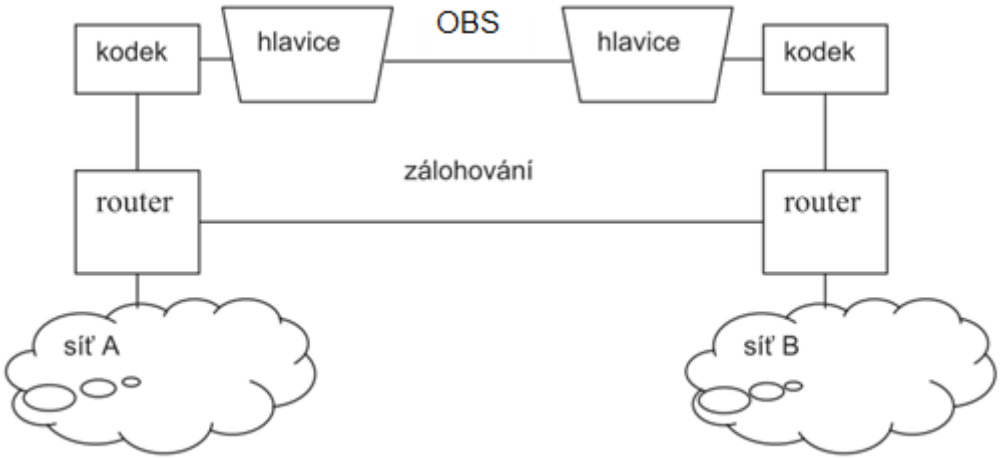
Snaha při nasazení OBS je, aby spoj byl spolehlivý. Dřívější dostupnosti spoje 98% jsou dnes již nedostačující, telekomunikační operátoři požadují 99,99% nebo dokonce 99,999% dostupnosti spoje. Pro zvýšení spolehlivosti se uplatňují tato opatření:

- ***vícesvazkové šíření*** *(přijímač je ozařován dvěma a více zdroji)*
- ***přechod z oblasti záření 850nm do oblasti 1550nm, kde je možné výstupní výkon vysílací diody zvýšit***
- ***použití záložního rádiového spoje***
- ***relativně krátké vzdálenosti mezi hlavicemi*** *(jeví se výhodnější použít na delší vzdálenosti několik na sebe navázaných dílčích spojů než jeden spoj s velkým dosahem)*
- ***použití struktury sítě „mesh"*** *(spoj typu bod-bod je přerušen při poruše jednoho z bodů, použitím síťové struktury „mesh" se eliminuje riziko výpadku sítě při poruše jednoho bodu)*

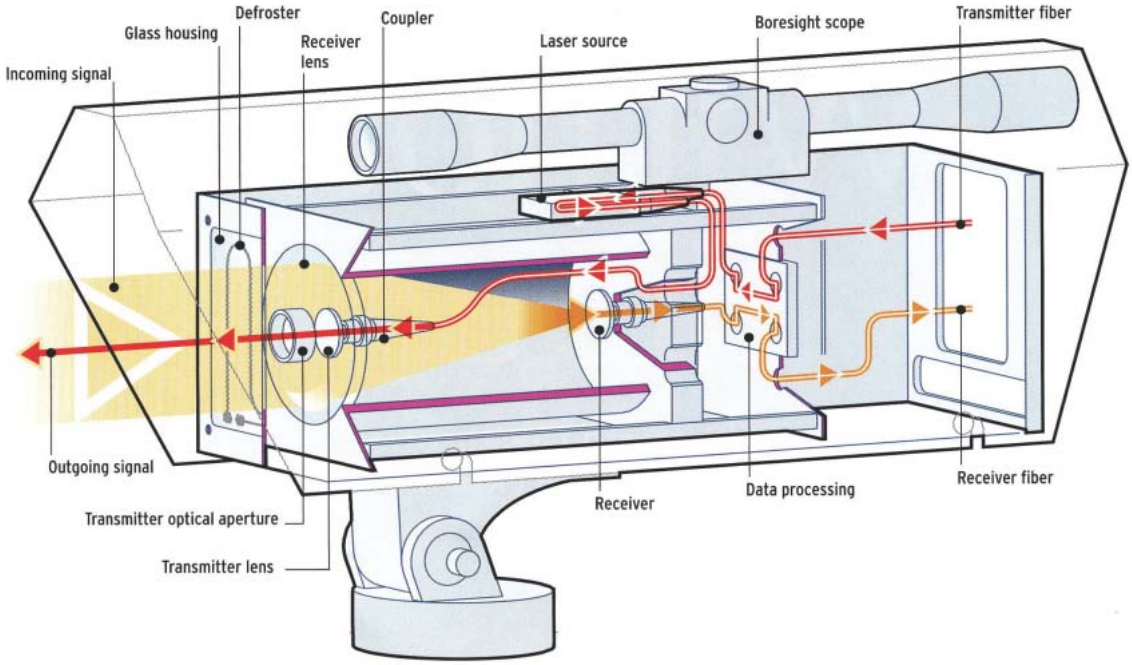
Jednou ze snah současné doby je fotonizace hlavic, tj. vynechání transformace optika - elektronika a elektronika - optika v hlavici; jde o záměr realizace přímého přechodu mezi optickým vlákmen a APP. V budoucnu se pravděpodobně bude sledovat možnost nasazení výhodných prostředků užívaných v optických vláknech - erbiem dopované optovláknové zesilovače (EDFA) a vlnově dělený multiplex (WDM), viz. [4].

5 Skladba a energetická bilance spoje

OBS se skládá ze dvou hlavic pracujících mezi sebou plně duplexním způsobem. Každá hlavice je pak připojena k osobnímu počítači, serveru nebo ústředně. Hlavice jsou vybaveny vysílacím a přijímacím systémem pro komunikaci mezi sebou v APP a také vysílacím a přijímacím systémem pro komunikaci mezi hlavicí a počítačem v síti. Tato komunikace se uskutečňuje po optickém vláknu nebo díky metalickému kabelu. Příklad zařazení OBS do komunikační sítě je uveden na obr. 5.1. Obr. 5.2 popisuje hlavici pro spoj OBS.



Obr. 5.1 Příklad zařazení OBS v komunikační síti [16] *(„kodek" je zařízení pro kódování a dekódování signálu; „router" je směrovač, který volí optimální cestu signálu; zálohování spoje v případě výpadku optického spoje je uskutečněno mikrovlnnou technologií)*.



Obr. 5.2 Detailní popis hlavice pro spoj OBS [8].

Podle druhu přenášeného signálu rozlišujeme analogové a digitální spoje. Podle způsobu přenosu se rozlišují spoje s koherentní nebo nekoherentní metodou přenosu. V následujícím textu jsou popsány pouze digitální duplexní nekoherentní OBS umístěné v troposféře s intenzitní modulací (IM/on-off keying, OOK) a přímou detekcí.

5.1 Vysílací systém OBS

Vysílací systém OBS je část hlavice, která tvaruje vyzařovaný svazek a zabezpečuje jeho modulaci. Hlavními bloky vysílacího systému (VS) jsou: budič optického zdroje, laserová dioda (LD), zaměřovací systém, elektronický blok zaměřovacího systému a vysílací optická soustava (TXA).

Prostorové tvarování optického svazku vystupujícího z LD zabezpečuje vysílací optická soustava (povrstvený plankonvexní dublet). Svazek prochází optickým průzorem (WT), který slouží jako ochrana proti nečistotám přítomným v atmosféře. Optický průzor nesmí vyvolat žádnou deformaci svazku nebo jeho nadměrný útlum. Směrování optické osy VS zabezpečuje směrovací systém ovládaný mechanicky nebo elektronicky. K hrubému nastavení směru slouží dalekohled, který je pevně připevněn na VS. Součástí pouzdra LD je snímací fotodioda, která je zde použita k proudové stabilizaci optického výkonu. Účinnost stabilizace optického výkonu lze zvýšit teplotní stabilizací s využitím Peltierova chladiče.

U OBS není nutné provádět kruhovou symetrizaci svazku, protože svazek je tvarován osově symetrickou optickou soustavou. Při energetické bilanci se přiřazuje původnímu svazku tzv. „energeticky ekvivalentní svazek“ definovaný jako symetrický Gaussův svazek, který má na ose svazku stejnou intenzitu jako původní svazek, kde v jeho kruhové stopě je obsažen stejný výkon jako v eliptické stopě původního svazku.

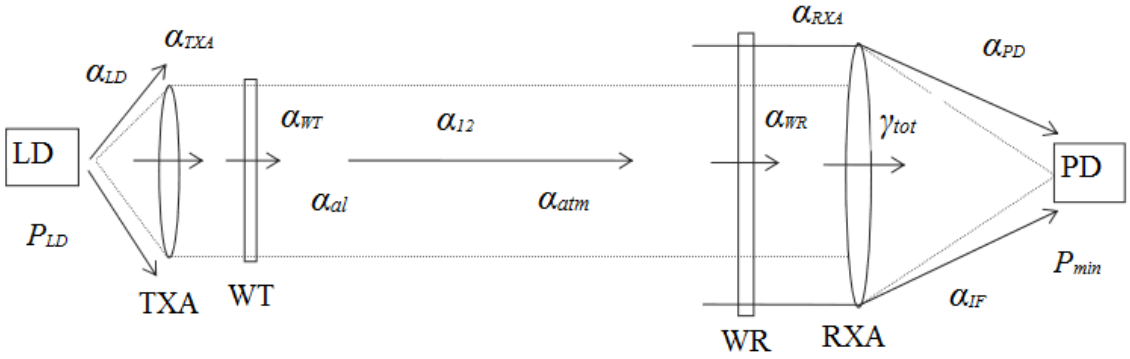
5.2 Přijímací systém OBS

Přijímací systém OBS je část hlavice, která prostřednictvím přijímací optické soustavy (RXA) soustřeďuje přijatý optický svazek na aktivní plochu fotodiody (PD). Hlavními bloky přijímacího systému (PS) jsou: přijímací optická soustava (RXA), fotodioda (PD), předzesilovač a demodulátor. Předpokládá se, že v přijímacím systému je použita fotodioda PIN, která přímo převádí dopadající optický výkon na fotoproud.

Svazek dopadající na PS prochází optickým průzorem (WR). Soustředění optického svazku přicházejícího z VS protější hlavice zabezpečuje přijímací optická soustava RXA (povrstvený plankonvexní dublet nebo Fresnelova čočka). Směrování optické osy PS zabezpečuje zaměřovací systém ovládaný mechanicky nebo elektronicky. Součástí zaměřovacího zařízení je dalekohled, ketrý je pevně připevněn na PS. Ke snížení vlivu záření pozadí je v PS použit interferenční filtr navržený s ohledem na vlnovou délku záření.

5.3 Energetická bilance OBS

Na obr. 5.3 vidíme výkon laserové diody P_{LD} , účinnost vazby „laserová dioda-vysílací optická soustava“ α_{LD}, propustnosti vysílací a přijímací optické soustavy α_{TXA} a α_{RXA}, propustnost optických průzorů α_{WT} a α_{WR}, útlum šířením α_{12}, zesílení přijímací optické soustavy γ_{tot}, účinnost vazby „přijímací optická soustava-fotodioda“ α_{PD}, útlum vyvolaný nedokonalostí vzájemného zamíření hlavic spoje α_{al}, rezervu spoje na atmosférické přenosové prostředí M, minimální hodnotu poměru signálu k šumu SNR_0, minimální detekovatelný výkon fotodiody P_{min}, citlivost přijímacího systému P_0 a úroveň přijímaného výkonu, při které dochází k saturaci přijímače P_{max}.



Obr. 5.3 Místa útlumu a zesílení v energetické bilanci OBS.

Výkonová bilanční rovnice OBS:

$$P_{mPD} = P_{mLD} - \alpha_{TS} - \alpha_{al} - \alpha_{12} - \alpha_{atm} - \alpha_{RS} + \gamma_{tot} , \tag{5.1}$$

kde P_{mPD} střední výkon dopadající na přijímací fotodiodu PD, P_{mLD} je střední výkon emitovaný laserovou diodou LD, α_{TS} je útlum vysílací části TXA (vazba, čočka, krycí sklo), α_{RS} je útlum přijímací části RXA (krycí sklo, čočka, interferenční filtr, vazba), α_{12} je útlum šířením atmosférickým přenosovým prostředím zavislý na délce spoje, α_{atm} je útlum způsobený atmosférickými vlivy (turbulence a častice) a γ_{tot} je zisk na přijímací čočce.

Útlum vysílací optické soustavy

Celkový útlum vysílací optické soustavy α_{TS} je dán součtem útlumu krycího skla α_{WT}, útlumu vysílací čočky α_{TXA} a útlumu α_{LD} způsobeného vazbou záření emitovaného laserovou diodou *LD* do vysílací čočky *TXA*. Podrobněji viz. kapitola 3.1.

Útlum přijímací optické soustavy

Celkový útlum přijímací optické soustavy α_{RS} vyplývá z jejího geometrického uspořádání a je dán součtem útlumu krycího skla α_{WR}, útlumu přijímací čočky α_{RXA}, útlumu interferenčního filtru α_{IF}, útlumu koncentrátoru (nejčastěji další čočky) α_{KS} a útlumu α_{PD} způsobeného vazbou záření do přijímací fotodiody *PD*. Podrobněji viz. kapitola 3.2.

Útlum šířením α_{12} a pomocná délka L_0

Útlum šířením α_{12} nabývá vysokých hodnot. Jeho hodnota je dána poměrem optických intenzit na ose svazku v místě přijímače a vysílače. Závisí prakticky jen na vzdálenosti L_{12} vysílače a přijímače.Více v kapitole 3.4.

Atmosférický útlum

Útlum α_{atm} je závislý na stavu atmosféry (mlha, déšť, sněžení, apod.) a samozřejmě též na vzdálenosti L_{12}. Je tedy proměnný v čase. Celkový atmosférický útlum α_{atm} je rozdělen na útlum způsobený částicemi α_{part} a útlum způsobený turbulencemi α_{turb}. Za předpokladu, že atmosféra je homogenní stacionární, je možné vyjádřit útlum způsobeny částicemi v cestě jako

$$\alpha_{part} = \alpha_{1,part} \cdot L_{12}[dB], \tag{5.2}$$

kde $\alpha_{1,part}$ je koeficient útlumu [dB/km] a L_{12} je vzdálenost mezi vysílačem a přijímačem.

Použití modelu pro slabě turbulentním prostředí kdy relativní rozptyl optické intenzity v rovině přijímače je menší než 1 je možné vyjádřit α_{turb} jako [11]

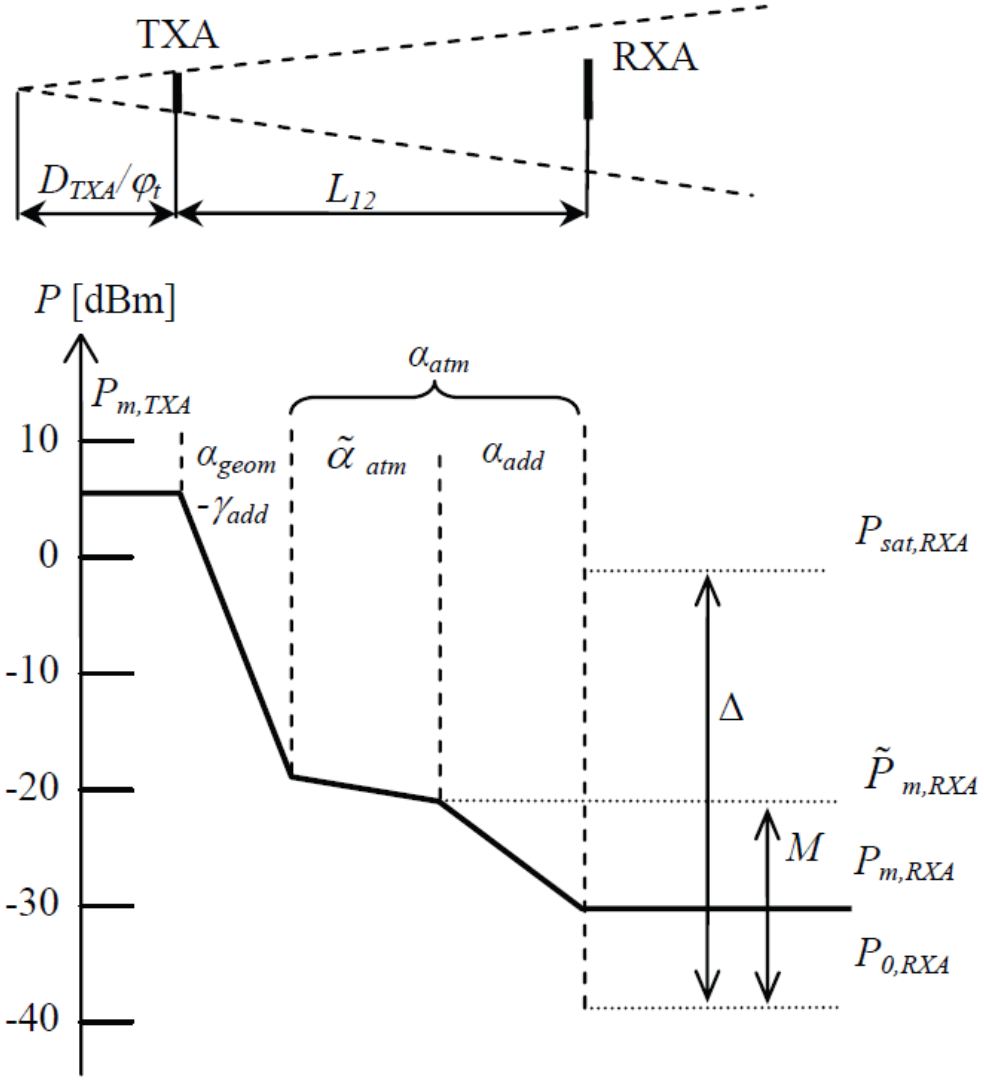
$$\alpha_{turb} \approx \left|10\log\left(1-\sqrt{\sigma_{r,I}^2}\right)\right|[dB], \tag{5.3}$$

kde $\sigma^2_{r,I}$ je relativní variance optické intenzity v rovině přijímače, stejně jako [3]

$$\sigma_{r,I}^2 = 0{,}5 \cdot C_n^2 \left(\frac{2\pi}{\lambda}\right)^{7/6} \cdot L_{12}^{11/6}. \tag{5.4}$$

Ve standardní čisté atmosféře ($\widetilde{\alpha}_{1,part} \approx 0{,}5dB/km$; $\widetilde{C}_n^2 = 10^{-14}\, m^{-2/3}$), pro λ = 850 nm a pro L_{12} = 1 km je koeficient útlumu vztahující se k turbulenci $\widetilde{\alpha}_{1,turb} \approx 2{,}2dB$. Součet obou zeslabení vyjadřuje celkový útlum čiré atmosféry: $\widetilde{\alpha}_{1,part} + \widetilde{\alpha}_{1,turb} = \widetilde{\alpha}_{1,atm}$.

Na obr. 5.4 vidíme vysílač, atmosféru a přijímač v podélném horizontálním směru, tedy výkonový diagram. Atmosférický útlum se skládá z útlumu čisté atmosféry $\tilde{\alpha}_{atm}$ a náhodného přídavného útlumu α_{add}. Součet obou útlumů vyjadřuje celkový útlum reálné atmosféry $\tilde{\alpha}_{atm} + \alpha_{add} = \alpha_{atm}$.



Obr. 5.4 Výkonový diagram s typyckými hodnotami zobrazených veličin [7].

Ve výkonovém diagramu označuje $P_{m,TXA}$ střední výkon vysílací apertury a $\tilde{P}_{m,RXA}$ střední výkon příjmací apertury ve standardní čisté atmosféře. $P_{sat,RXA}$ je práh saturace přijímače a $P_{0,RXA}$ úroveň citlivosti přijímače (minimální výkon zaručující předepsanou chybovost). Jejich rozdílem dostaneme dynamický rozsah Δ přijímače. Rozdíl mezi střední hodnotou přijímaného výkonu $\tilde{P}_{m,RXA}$ pro ideálně čistou atmosféru a prahem citlivosti se nazývá linková rezerva spoje M. Hodnota M hraje rozhodující roli pro spolehlivost spoje. Udává maximální hodnotu přídavného útlumu α_{atm}, pro kterou bude spoj ještě pracovat.

Útlum nedokonalým zaměřením spoje

Útlum vyvolaný nedokonalostí vzájemného zamíření hlavic spoje α_{al} je způsoben různými vlivy, např. nezkušeností obsluhy při zaměřování, mechanickými deformacemi úchytu hlavice při aretaci, teplotními deformacemi konzol apod. Empiricky bylo zjištěno, že útlum α_{al} nepřevyšuje hodnotu 1,5 dB.

Zesílení přijímací optické soustavy

Zesílení přijímací optické soustavy je dáno poměrem ploch přijímací a vysílací apertury, rozložením intenzity v Gaussovu svazku a umístěním středu přijímací apertury v ose Gaussova svazku. Celkový zisk přijímače γ_{tot} lze rozdělit na geometrický zisk γ_{RXA} a přídavný zisk γ_{add}. Geometrický zisk γ_{RXA} získáme poměrem průměrů apertur D_{RXA} a D_{ekv} a přídavný zisk γ_{add} získáme různým rozložením optické intenzity na vysílací a přijímací apertuře.

$$\gamma_{tot} = \gamma_{RXA} + \gamma_{add} = \left| 20 \log \frac{D_{RXA}}{D_{ekv}} \right| + \gamma_{add} [dB] . \tag{5.5}$$

Pokud je rozložení intenzity na vysílací apertuře Gaussovského typu [12], šířka paprsku je stejná jako průměr vysílací apertury D_{ekv} a rozložení intenzity v rovině přijímací apertury je přibližně konstantní. Tedy pokud

$$L_{12} \cdot \varphi_t >> D_{RXA} , \tag{5.6}$$

bude přídavný zisk γ_{add} = 3,7 dB. φ_t je šířkový úhel vysílacího paprsku.

Geometrický útlum

Útlum šířením α_{12} a geometrický zisk γ_{tot} mohou být spojeny do jedné veličiny označované jako geometrický útlum α_{geom}.

$$\alpha_{geom} = \alpha_{12} - \gamma_{tot} = \left| 20 \log \frac{D_{RXA}}{D_{ekv} + L_{12} \cdot \varphi_t} \right| [dB] . \tag{5.7}$$

Normovaný přídavný útlum

Pro účely srovnání různých OBS je výhodné také uvažovat normovaný přídavný útlum

$$\alpha_{1,atm} = \frac{\alpha_{atm}}{L_{12}} [dB] . \tag{5.8}$$

Útlum vazby α_{LD}

Účinnost vazby α_{LD} závisí na úhlové šířce a rozložení svazku vyzařovaném LD a na numerické apertuře vysílací optické soustavy. V decibelové míře se α_{LD} vyjádří

$$\alpha_{LD} = 10\log\left(\frac{P_{TXA}}{P_{LD}}\right)[dB], \tag{5.9}$$

kde P_{TXA} je výkon dopadající na aperturu vysílací optické soustavy. V praxi je možno předpokládat, že útlum vazby α_{LD} je přibližně 1,5 dB.

Útlum vazby α_{PD}

Účinnost vazby α_{PD} závisí na poměru aktivní plochy fotodiody A_{PD} a velikosti skvrny A_{spot}, kterou v ohniskové rovině přijímací optické soustavy vytváří přijaté světlo. Pro $A_{PD} \geq A_{spot}$ je $\alpha_{PD} = 0$ dB.

Chybovost BER

Minimální hodnota SNR_0 se stanovuje v závislosti na typu modulace a požadované chybovosti *BER*. Pro intenzitní modulaci typu OOK a chybovost spoje *BER* = 10^{-9} je $SNR_0 = 15{,}5$ dB.

Minimální detekovatelný výkon přijímače

Minimální detekovatelný výkon přijímače P_{min} závisí na přenosové rychlosti, typu použité fotodiody a šumových parametrech předzesilovače *NEP*.

$$P_{\min} = NEP + SNR_0[dB] \tag{5.10}$$

Citlivost přijímacího systému

Citlivost přijímacího systému je definovaná jako minimální úroveň přijatého optického výkonu P_0, která je nutná k dosažení stanovené hodnoty SNR_0.

$$P_0 = P_{\min} + SNR_0[dB] \tag{5.11}$$

Dynamický rozsah přijímače

Oblast dynamiky přijímacího systému je vzhledem k vysoké míře fluktuací přijímaného výkonu (vliv šumu APP) významnou veličinou. Její hodnota v decibelové míře bývá

$\Delta \cong 30$ dB. Dynamika přijímacího systému Δ je pak definovaná výrazem:

$$\Delta = P_{SAT} - P_0 \left[dB\right]. \tag{5.12}$$

Maximální detekovatelný výkon přijímače

Posledním důležitým parametrem energetické bilance OBS je úroveň přijímaného výkonu, při které dochází k saturaci přijímače P_{sat} .

$$P_{SAT} = P_{MIN} + \Delta \tag{5.13}$$

Rezerva spoje"na počasí"

Rezervu spoje pro atmosférické přenosové prostředí M lze odvodit z dlouhodobého měření útlumu atmosférického přenosového prostředí (APP). Maximální dosah spoje s linkovou rezervou spoje M, lze určit ze závislosti na geometrickém útlumu α_{geom} a atmosférickém útlumu $\widetilde{\alpha}_{atm}$ v závislosti na vzdálenost L_{12}.

$$M = \widetilde{P}_{m,RXA} - P_{0,RXA} = P_{m,TXA} - P_{0,RXA} + \gamma_{add} - \alpha_{geom}\left(L_{12}\right) - \widetilde{\alpha}_{atm}\left(L_{12}\right). \tag{5.14}$$

S ohledem na předchozí rovnice, se rovnice (5.14) zjednoduší na

$$M \cong P_{m,TXA} - P_{0,RXA} + 20\log\frac{D_{RXA}}{\varphi_t} - 20\log L_{12} + \gamma_{add} - \widetilde{\alpha}_{atm}\left(L_{12}\right). \tag{5.15}$$

Chceme-li mít opatření pro různé OBS zařízení s ohledem na atmosférický koeficient útlumu $\alpha_{1,atm}$ [dB/km] je výhodné zavést si taktéž i linkovou rezervu spoje v normovaném tvaru

$$M_1 = \frac{M}{L_{12}}\left[dB/km\right]. \tag{5.16}$$

Závislost normované linkové rezervy M_1 na L_{12} představuje stacionarní model OBS spoje. Model představuje syntézu rovnice výkonové bilance s modelem šíření svazku v čisté atmosféře [3].

5.4 Výhody OBS oproti jiným (radiovým) spojům

- ***vysoce směrový svazek*** *(vysoká prostorová selektivita; nehrozí interference s jinými spoji)*
- ***vysoká přenosová rychlost*** *(možnost nasazení ve všech typech počítačových sítí)*
- ***absence legislativních překážek*** *(urychlení rozvoje sítí; optické pásmo nosné vlny leží mimo oblast působnosti ČTU)*
- ***není nutné zakopávat do země nebo zavěšovat nad zemí optický kabel***

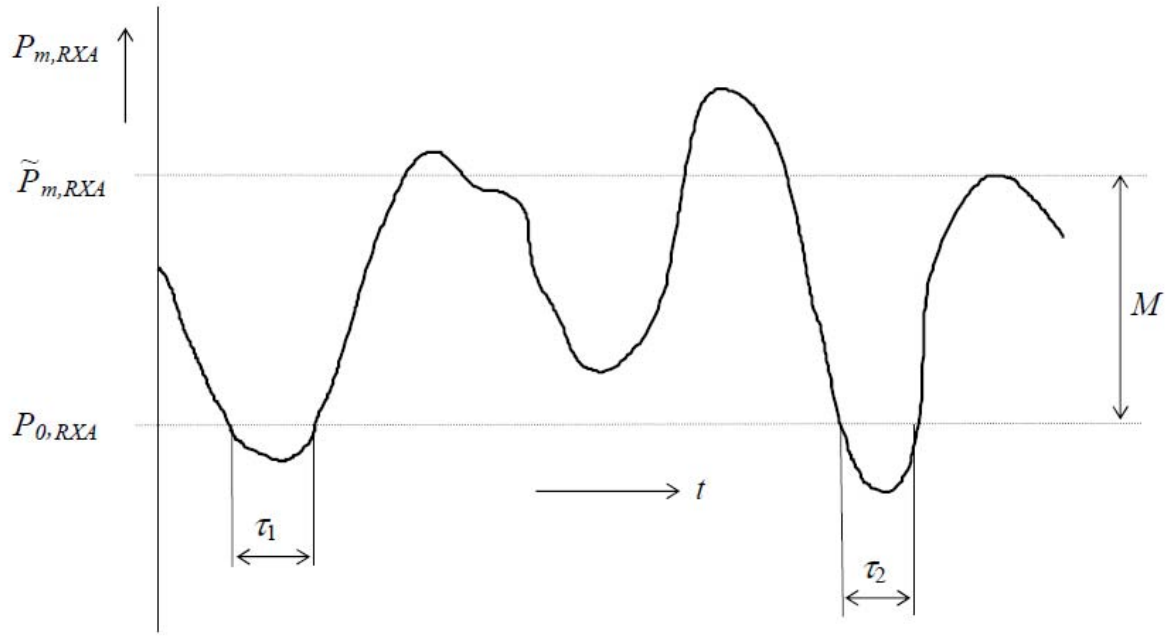
6 Odhad nedostupnosti OBS

Odhad nedostupnosti OBS je založen na syntéze dvou modelů. Je to stacionární výkonový model vlastního spoje a statistický model atmosférického přenosového kanálu v místě instalace spoje.

Stacionární model je založen na znalosti OBS parametrů vysílače, z nichž lze pro daný spoj vypočítat výkonovou bilanci. Ukazuje závislost výkonové rezervy spoje na vzdálenosti mezi vysílači.

Statistický model je založen na znalosti statistických parametrů atmosféry, např. útlumového koeficientu $\alpha_{1,atm}$ v dané lokalitě instalace spoje. Výsledkem je zjištění podmíněné distribuční funkce, která vychází z útlumového koeficientu $\alpha_{1,atm}$. Statistický model charakterizuje také statistické vlastnosti hloubek úniků a statistické vlastnosti doby trvaní jednotlivých úniků. V této práci jsem se zaměřil na lokalitu Brno, ale stejný princip výpočtu lze použít i v jiných lokalách.

Známá nevýhoda atmosférických spojů je citlivost na meteorologické jevy, jako jsou mlha a srážky, což způsobuje značný nárůst α_{add}. Obr. 6.1 ukazuje záznam úrovně přijímaného optického výkonu [13]. Výpadek nastane, když úroveň přijímaného optického výkonu poklesne pod práh citlivosti přijímače, tj. když přídavný atmosférický útlum α_{add} přesahne rozsah rezervy spoje.

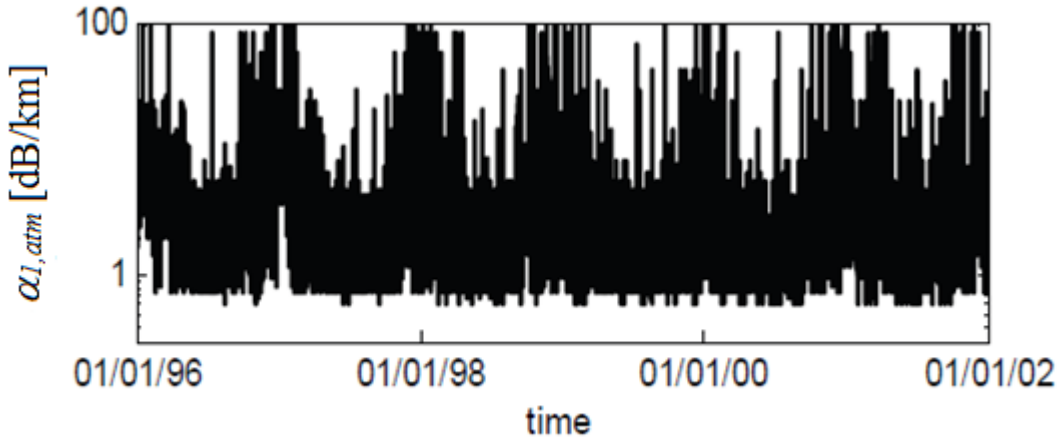


Obr. 6.1 Náhodný charakter přijímaného optického výkonu s úniky [7]
(τ_1 a τ_2 - intervaly, kde přijímaný výkon je nižší než práh citlivosti přijímače).

S přihlédnutím k velkému rozdílu mezi obvyklými přenosovými rychlostmi a rychlostí procesů v atmosféře je doba trvání úniků vždy mnohem delší než hodinový takt přenášených dat. Vzhledem k obr. 6.2 lze popsat pravděpodobnost nedostupnosti spoje jako

$$P_{un} = \frac{T_{un}}{T} = \frac{\sum \tau_i}{T} \quad , \tag{6.1}$$

kde τ_i je trvání jednotlivých úniků pozorovaných během dostatečně dlouhé doby T.



Obr. 6.2 Příklad záznamu atmosférického útlumu $\alpha_{1,atm}$ za období šesti let [7].

Obr. 6.2 ukazuje záznam šesti let pozorování atmosférických útlumů, kde lze vidět zjevnou roční periodicitu. Je zřejmé, že útlumy pro různé měsíce v roce se významně liší. Pro získání reprezentativních závěrů je proto nutné analyzovat data za období několika celých roků.

S ohledem na náhodný charakter přídavného atmosférického útlumu $\alpha_{1,atm}$ můžeme nedostupnost spoje vyjádřit jako

$$P_{un} = P\left(\alpha_{1,atm} \geq M_1\right) = E_\alpha\left(M_1\right) \, , \tag{6.2}$$

kde M_1 je normalizovaná výkonová rezerva spoje (5.16), a E_α je doplňková distribuční funkce náhodného útlumu, která udává pravděpodobnost, že útlum je větší než zadaná úroveň.

Koeficient útlumu je možné získat přepočtem z meteorologické dohlednosti, což je veličina dlouhodobě sledovaná meteorologickou službou především pro účely zabezpečení letového provozu. Zdrojem hodnot je hlášení z letiště Brno - Tuřany podle standardu METAR, ve kterém je mimo jiné udávána i dohlednost. Měřené hodnoty pocházejí z měřících pracovišť,

které na našem území provozuje Český hydrometeorologický ústav a Řízení letového prvozu České republiky. V tabulce 6.1 jsou vypsány informace o měřeném místě pro lokalitu Brno.

Koeficient útlumu byl vypočten za použití Kimova empirického vztahu [14]

$$a_{1,part} = \frac{3{,}91}{V_M \left(\frac{555}{\lambda} \right)^q} \left[dB/km \right], \tag{6.3}$$

kde V_M je meteorologická dohlednost v km, λ je vlnová délka v nm, a q závisí na V_M. Parametr q pro Kimův empirický vztah je k nahlédnutí v tabulce 3.2. V souladu s [15] je očekávaná nepřesnost vztahu (6.3) okolo ± 10 dB/km pro nižší hodnoty V_M.

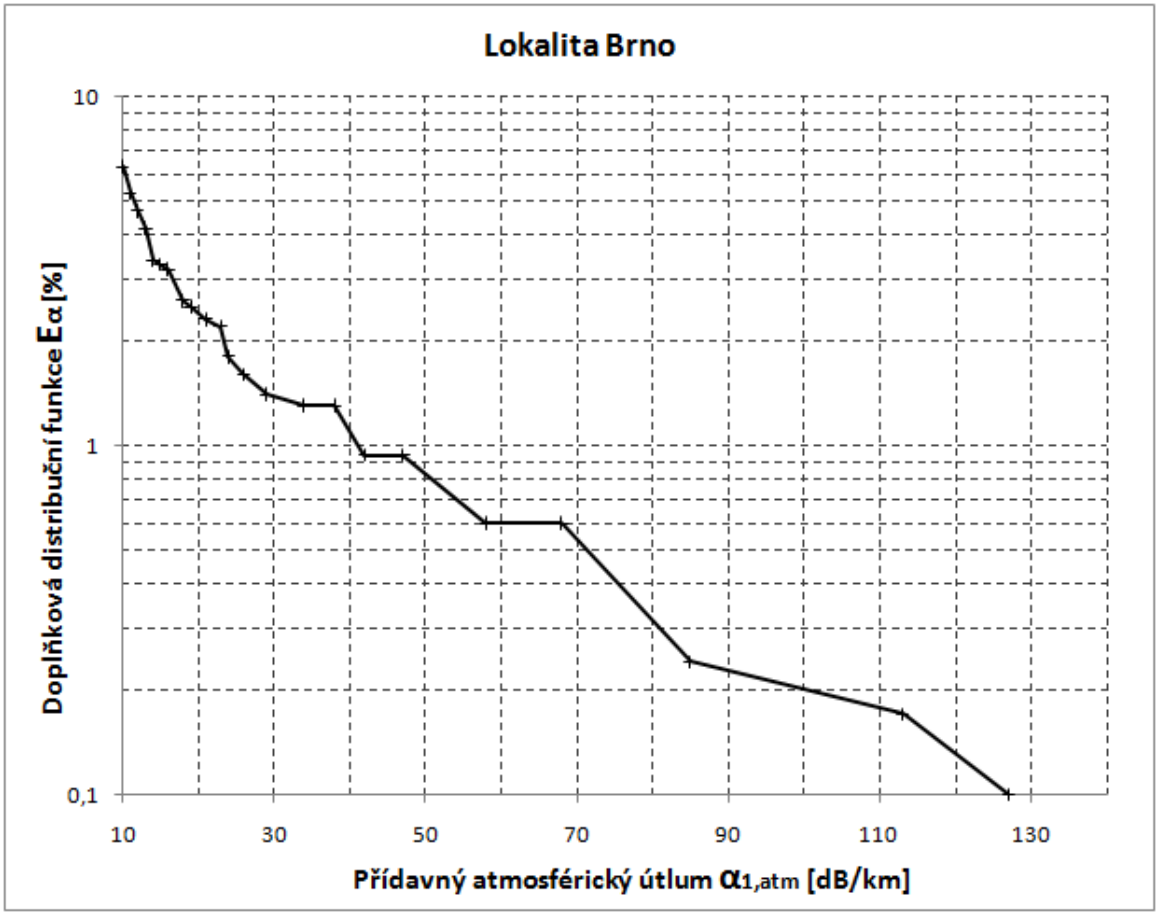
Tabulka 6.1 Monitorovaná lokalita Brno

místo	souřadnice	nadm. výška	období	interval snímání	typ
Brno	49°09‘05“ N, 16°42‘01“ E	237 m	1996-2001	1 hod	letiště

Obr. 6.3 ukazuje empirickou doplňkovou distribuční funkci E_α pro měřenou lokalitu Brno. Graf zobrazuje E_α pro $\alpha_{1,atm} > 10$dB/km. Nižší hodnoty není nutné uvažovat s ohledem na typické parametry OBS. Extrémní útlumy určují požadavky na návrh a instalaci OBS pro dosažení akceptovatelné nedostupnosti spoje. Křivka vykazuje ohyb mezi 20 dB/km a 40 dB/km. Přibližně lineární průběh pro větší hodnoty útlumu v semilogaritmických souřadnicích ukazuje na exponenciální průběh doplňkové distribuční funkce. Tabulka 6.2 shrnuje celkovou nedostupnost spoje ve sledované lokalitě Brno.

Tabulka 6.2 Pravděpodobnost nedostupnosti spoje P_{un} [%] pro lokalitu Brno (λ = 850nm)

lokalita Brno					
M_1 [dB/km]	E_α [%]	M_1 [dB/km]	E_α [%]	M_1 [dB/km]	E_α [%]
10	6,3	19	2,5	42	0,94
11	5,3	21	2,3	47	0,94
12	4,7	23	2,2	58	0,6
13	4,2	24	1,8	68	0,6
14	3,4	26	1,6	85	0,24
15	3,3	29	1,4	113	0,17
16	3,2	34	1,3	127	0,1
18	2,6	38	1,3		



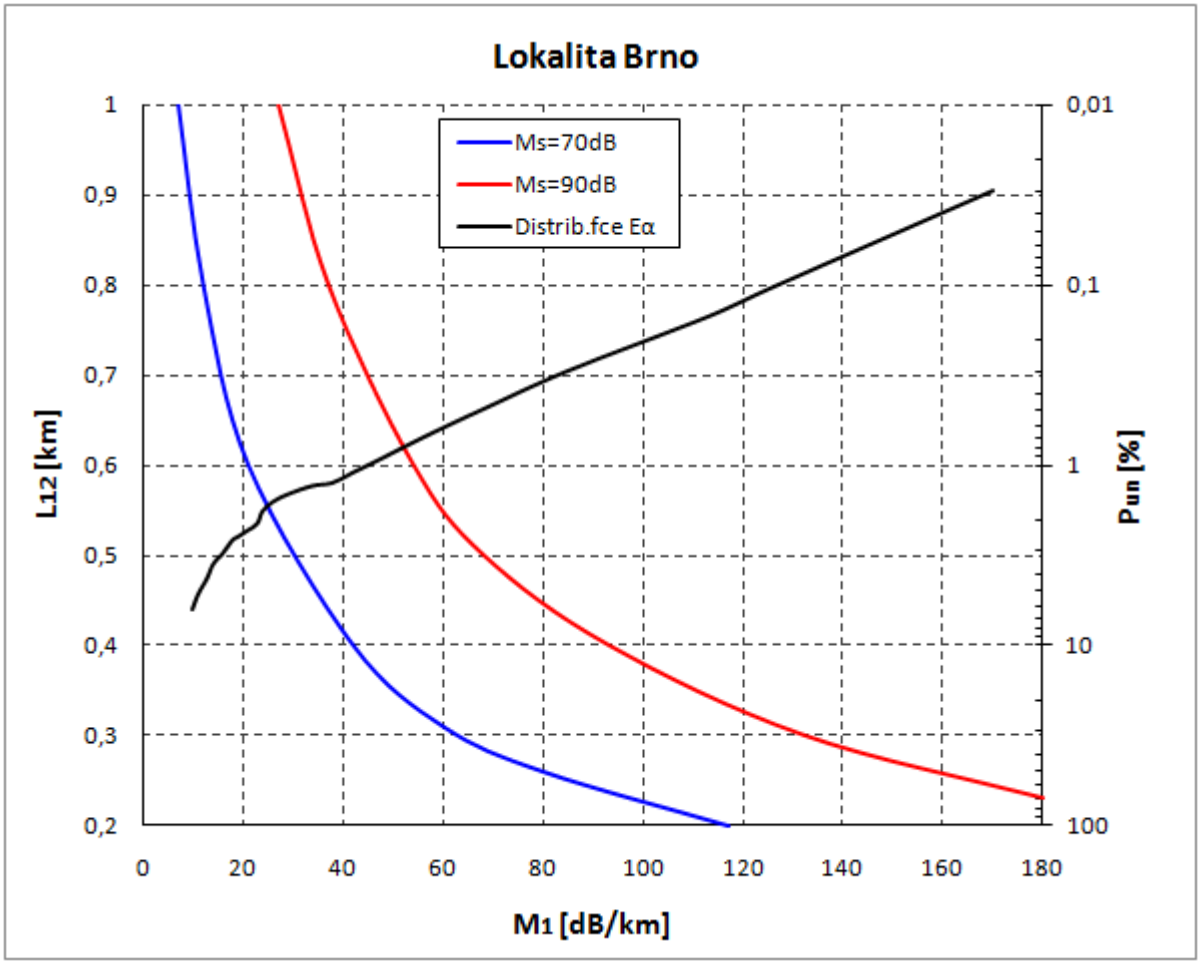
Obr. 6.3 Doplňková distribuční funkce přídavného atmosférického útlumu $\alpha_{1,atm}$, λ = 850nm.

Nomogram na obr. 6.4 představuje syntézu modelu stacionárního a statistického. OBS je charakterizován rezervou systému

$$M_S = P_{m,TXA} - P_{0,RXA} + 20\log\frac{D_{RXA}}{\varphi_t} \quad , \tag{6.4}$$

která nezávisí na vzdálenosti L_{12} vysílače a přijímače. Nomogram představuje stacionární model spoje, který je kombinován se statistickými parametry v dané lokalitě, tzn. dostáváme podmíněnou doplňkovou distribuční funkci, která je závislá na velikosti útlumu $\alpha_{1,atm}$.

Nomogram na obr. 6.4 je koncipován pro typické hodnoty systémové rezervy spoje M_S pro polovodičové laserové spoje při dodržení nejlepších a nejhorších atmosférických podmínek.



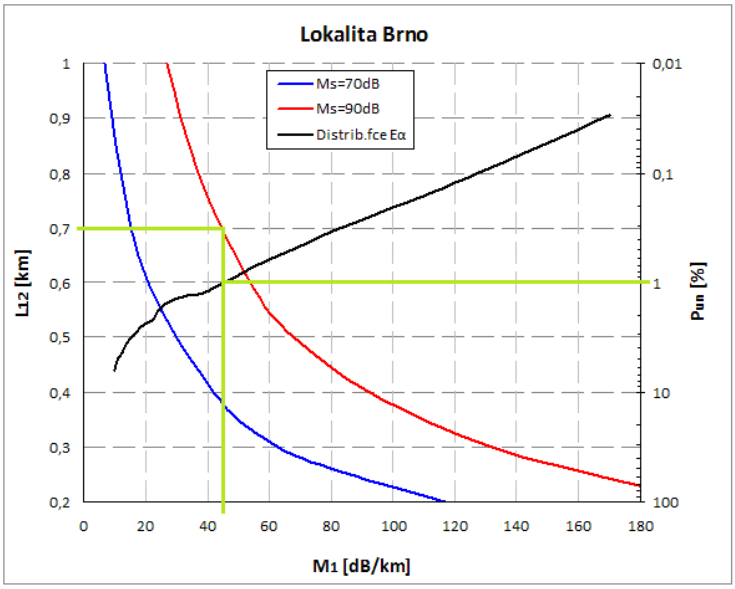
Obr. 6.4 Nomogram pro výpočet nedostupnosti spoje P_{un} [%].

Postup pro výpočet podmínek u konkrétní lokality je následující:

- Pro danou systémovou rezervu M_S a vysílací vzdálenost L_{12} najdeme normalizovanou výkonovou rezervu spoje M_1. Hodnota M_1 také představuje největší hodnotu atmosférického útlumu $\alpha_{1,atm}$.
- Pro dané místo instalace najdeme nedostupnost spoje P_{un}.

6.1 Příklad návrhu délky spoje pro známou nedostupnost P_{un} < 1 %

Pokud bychom tedy chtěli navrhnout OBS v lokalitě Brno, který bude mít nedostupnost spoje P_{un} < 1 % a systémovou rezervu spoje M_S = 90dB, bude postup výpočtu následující.
Po vynesení přímky v nomogramu ohraničující nedostupnosti spoje P_{un} = 1% a z působíku této přímky s křivkou doplňkové distribuční funkce E_α odvodíme normovanou linkovou rezervu M_1, která se bude rovnat 45dB/km. V dalším kroku námi nalezenou kolmicí M_1 protneme křivku systémové rezervy spoje M_S pro 90dB a průsečík vyneseme na vertikální osu L_{12}. Výsledkem nám tedy bude vzdálenost mezi vysílačem a přijímačem L_{12} = 700 m. Viz názorný nákres na obr. 6.5.



Obr. 6.5 Nákres výpočtu vzdálenosti OBS při zvolené nodostupnosti spoje P_{un} < 1%.

Pro námi zvolený spoj v lokalitě Brno, tedy bude muset být maximální vzdálenost mezi vysílačem a příjimačem rovna 700 m, předpokládaná hodnota normované linkové rezervy bude 45dB/km a jestě stále bude zachována maximální nedostupnost spoje P_{un} < 1%. Pokud bude spoj kratší, např. 400 m, bude moci být hodnota hodnota normované linkové rezervy až 92dB/km a stále bude vyhovovat naší podmínce nedostupnosti spoje P_{un} < 1%.

Závěrečné shrnutí odhadu nedostupnosti OBS

Na základě výsledků získaných z měření pro lokalitu Brno můžeme konstatovat, že dnešní technologie pracující s normalizovanou linkovou rezervou M_1 > 100dB (spoje do 500m) dosahuje dlouhodobé míry nedostupnosti 0,1% - 1% pro místa s nejlepší instalační polohou. S tímto faktem je nutné počítat při návrhu sítě využívající technologii OBS.

Předložená metoda pro odhad nedostupnosti využívá výsledky meteorologických měření, která jsou dostupná pro rozsáhlá území Evropy. Je tedy možné stanovit, ve kterých lokalitách budou dosahovat OBS uspokojivou míru dostupnosti.

6.2 Pravděpodobnost přerušení spoje

Uvažujme-li jistou hodnotu normalizované linkové rezervy spoje M_1. Doby trvání jednotlivých úniků tvoří náhodnou posloupnost $\{\tau_i\}$, jejíž statistické vlastnosti jsou spolu s nedostupností P_{un} důležitým parametrem optických spojů. Uvažujme podmíněnou doplňkovou distribuční funkci

$$P\left(\tau \geq \tau^* \middle| a_{1,atm} \geq M_1\right) = E_{\tau|a}\left(\tau^* \middle| M_1\right), \tag{6.5}$$

tj. pravděpodobnost, že doba trvání úniku je delší než τ^* v případě, že únik má hloubku větší než M_1. Podmíněná doplňková distribuční funkce $E_{\tau|\alpha}$ může být odhadnuta z

$$E_{\tau|\alpha}\left(\tau^* \middle| M_1\right) \approx \frac{n_{\tau_i \geq \tau^*}}{N}, \tag{6.6}$$

kde $n_{\tau_i \geq \tau^*}$ je počet úniků delších než τ^*, a N celkový počet úniků během dostatečně dlouhé doby. Kombinací rovnice (6.2) a (6.5) dostáváme vztah

$$\begin{aligned} P\left(\tau \geq \tau^* \wedge a_{1,atm} \geq M_1\right) &= P\left(\tau \geq \tau^* \middle| a_{1,atm} \geq M_1\right) \cdot P\left(a_{1,atm} \geq M_1\right) = \\ &= E_{\tau|\alpha}\left(\tau^* \middle| M_1\right) \cdot E_{\alpha}\left(M_1\right) \end{aligned} \tag{6.7}$$

vyjadřující pravděpodobnost, že v daný okamžik bude doba trvání úniku delší než τ^* a jeho hloubka větší než M_1. Rozlišení monitorovacích zařízení zachycuje pouze dlouhodobé akce, tedy výpadky způsobené aerosoly v atmosféře.

Obr. 6.6 ukazuje podmíněnou distribuční funkci (6.18) pro lokalitu Brno. Podle očekávání tato funkce závisí na uvažované hodnotě linkové rezervy M_1. Tabulky 6.3a-c shrnují pozorování extrémních délek trvání úniků τ [hod] s různou velikostí linkové rezervy M_1 pro lokalitu Brno.

Tabulka 6.3a

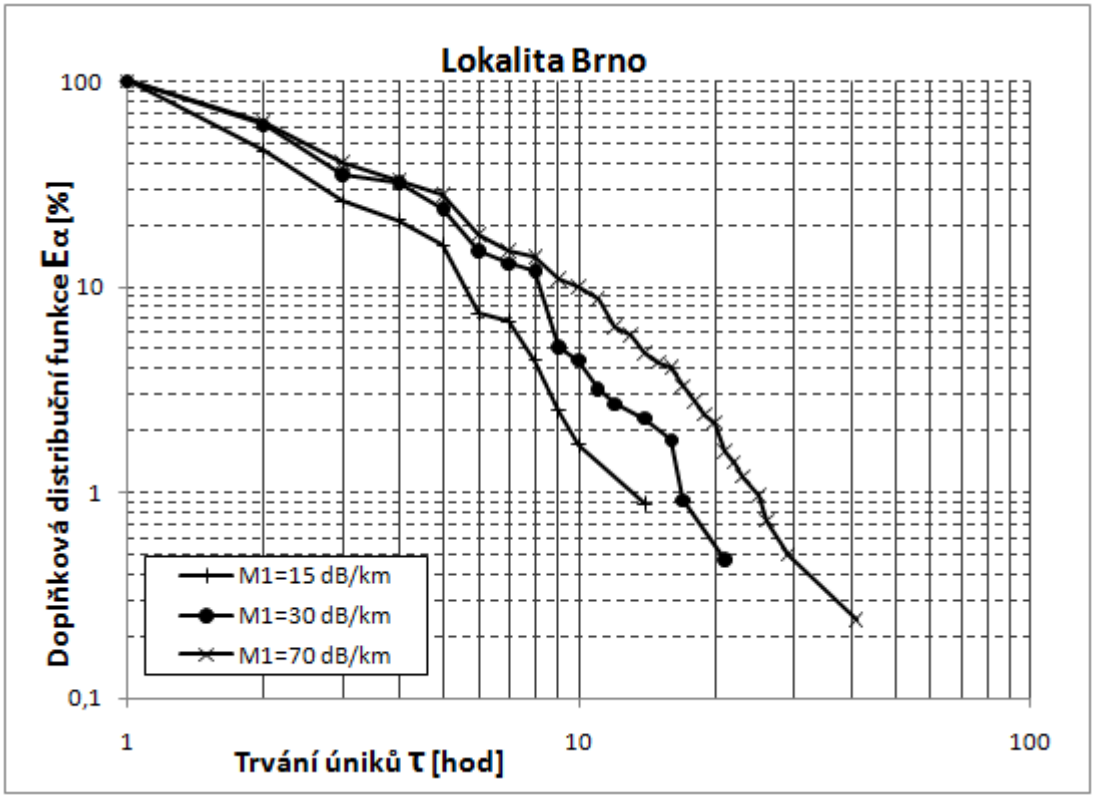
lokalita Brno	
pro M_1 = 15 dB/km	
τ [hod]	E_α[%]
1	100
2	46
3	26
4	21
5	16
6	7,4
7	6,8
8	4,4
9	2,5
10	1,7
14	0,88

Tabulka 6.3b

lokalita Brno	
pro M_1 = 30 dB/km	
τ [hod]	E_α[%]
1	100
2	61
3	35
4	32
5	24
6	15
7	13
8	12
9	5,1
10	4,4
11	3,2
12	2,7
14	2,3
16	1,8
17	0,92
21	0,47

Tabulka 6.3c

lokalita Brno			
pro M_1 = 70 dB/km			
τ [hod]	E_α[%]	τ [hod]	E_α[%]
1	100	15	4,3
2	63	16	4,1
3	40	17	3,3
4	33	18	2,8
5	28	19	2,4
6	18	20	2,2
7	15	21	1,6
8	14	22	1,4
9	11	23	1,2
10	10	25	0,97
11	8,7	26	0,73
12	6,4	29	0,5
13	5,8	41	0,24
14	4,8		



Obr. 6.6 Podmíněná doplňková distribuční funkce doby trvání úniků pro různé hodnoty M_1 v lokalitě Brno.

7 Simulační program Atmos

Dle zadání diplomové práce byl vypracován projekt, který slouží pro modelováním optického bezkabelového spoje s možnými variantami útlumů, které nastávají v atmosféře. Po zadání vstupních parametrů OBS a parametrů charakterizujících atmosférické přenosové prostředí se v počítačovém prostředí Matlab vyhodnotí kvalita přijátého optického signálu v námi zvolené lokalitě ČR.

7.1 Úvod do programu Atmos

Program Atmos je simulační prostředí, které bylo vyvinuto studentem Petrem Přikrylem, v rámci diplomové práce: Model atmosférického prostředí pro optické bezkabelové spoje.

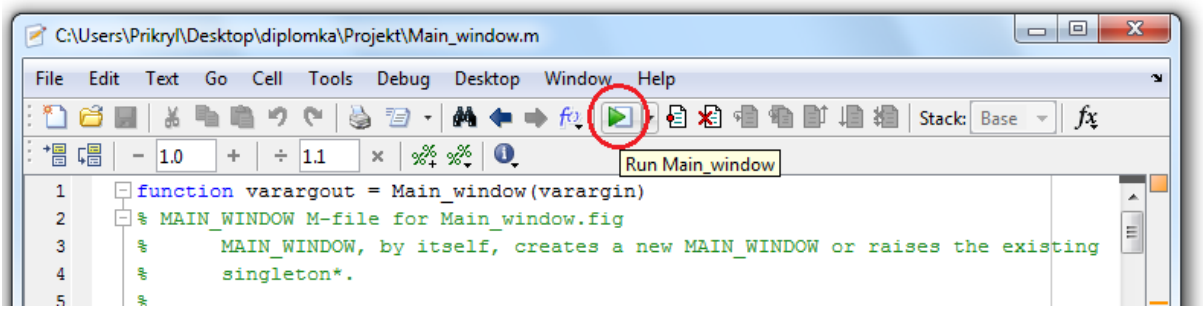
Program Atmos slouží pro návrh, simulaci a analýzu vlivu atmoférického prostředí na kvalitu optického bezkabelového spoje. Velice efektivně a podrobně dokáže modelovat chování optického bezkabelového spoje při změně statických parametrů spoje nebo parametrů atmosférických vlivů ve vybraných lokalitách ČR. Mezi tyto lokality patří Brno, Náměšť, Přerov, Milešovka a Kopisty.

Základním kamenem programu Atmos je jeho grafické prostředí, navrženo v programu Matlab, díky kterému se stává práce v něm efektivnější, rychlejší a přehlednější. Tato vlastnost nabádá k použití programu Atmos všude tam, kde je třeba ověřit chování reálného optického bezkabelového spoje v různých extrémních atmosférických podmínkách (např. chování spoje při silné atmosférické turbulenci apod.). S tím také souvisí, že někdy nemůžeme na reálném optickém spoji ověřit chování, které ani nemusí nastat, ale díky programu Atmos si jej můžeme nasimulovat, abychom znali výsledek chování reálného optického bezkabelového spoje v určité situaci a mohli díky této znalosti předcházet nežádoucím stavům.

7.2 Spuštění programu Atmos

Pro správné fungování programu Atmos musí být na osobním počítači nainstalován program Matlab (verze 7.10.0), ve kterém byl tento projekt vyvíjen. Program Atmos se spouští m-filem *Main_window.m*.

Pomocí tlačítka Run (viz obr. 7.1) se spustí program Atmos a vygeneruje se úvodní okno programu s názvem "Zadání parametrů optického bezkabelového spoje".



Obr. 7.1 Spuštění programu Atmos

7.3 Program Atmos: Zadání parametrů optického bezkabelového spoje

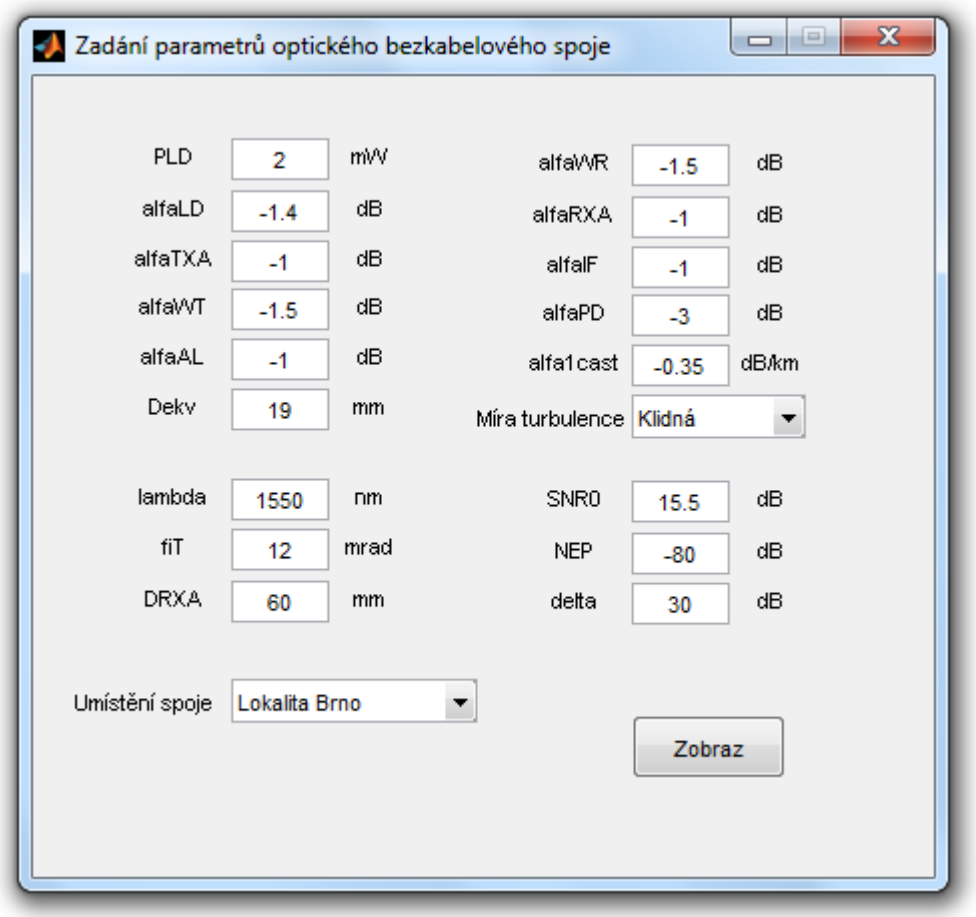
Toto okno slouží pro nastavení stacionárních parametrů optického bezkabelového spoje, atmosférických podmínek přenosového prostředí a zvolení aktualní lokality, ve které chceme optický bezkabelový spoj simulovat. Pro základní nasimulování spoje jsou již hodnoty parametrů spoje přednastaveny, ale pokud parametry spoje chceme pozměnit dle našich požadavků, postupujeme následovně.

7.3.1 Zadávání parametrů

Zadávání jednotlivých parametrů provádíme patřičným kliknutím myši do políčka Edit boxu a vepsáním číselné hodnoty parametru pomocí klávesnice. Pokud požadovaná hodnota obsahuje desetinné číslo, použijeme k oddělení cifer desetinou tečku „ . “.

Po ukončení zadávání aktuálních hodnot parametrů spoje a volbě atmosférických podmínek zvolíme patřičnou lokalitu, pro kterou chceme optický bezkabelový spoj simulovat.

Jako poslední krok stlačíme tlačítko „Zobraz“ a program Atmos vytvoří nové okno „Komplexní model spoje“ ve kterém se námi navržený spoj vygeneruje. Ukázka úvodního okna programu Atmos „Zadání parametrů optického bezkabelového spoje“ je na obrázku 7.2.



Obr. 7.2 Program Atmos: Zadání parametrů optického bezkabelového spoje

7.3.2 Popis parametrů

Na obrázku 7.1 je zobrazeno úvodní okno programu Atmos, tedy Zadání parametrů optického bezkabelového spoje. Pro názornost a nezaměnitelnost nastavovaných parametrů spoje, je vhodný popis jednotlivých parametrů, jejichž číselné hodnoty se vpisují do Edit boxů za nimi.

Vysvětlení parametrů:

1. ***PLD*** - *Výkon vysílací laserové diody*
   Hodnotu výkonu laserové diody zadaváme v mW.

2. ***alfaLD*** - Útlum vazby laserové diody a vysílací čočky
   Hodnotu útlumu vazby zadáváme v dB.

3. ***alfaTXA*** - Útlum vzniklý na vysílací optické soustavě
   Hodnotu útlumu zadáváme v dB.

4. ***alfaWT*** - Útlum vzniklý na krycím skle vysílací hlavice
   Hodnotu útlumu zadáváme v dB.

5. ***alfaAL*** - Útlum vzniklý špatným zaměřením paprsku spoje
   Hodnotu útlumu zadáváme v dB.

6. ***Dekv*** - Průměr svazku vysílací optické soustavy
   Hodnotu průměru zadáváme v mm.

7. ***lambda*** - Vlnová délka vysílaného spektra laserové diody
   Hodnotu vlnové délky laserové diody zadáváme v nm.

8. ***fiT*** - Úhlová šířka svazku paprsku laserové diody
   Hodnotu úholvé šířky zadáváme v mrad.

9. ***DRXA*** - Průměr plochy přijímací optické soustavy
   Hodnotu průměru zadáváme v mm.

10. ***alfaWR*** - Útlum vzniklý na krycím skle přijímací hlavice
    Hodnotu útlumu zadáváme v dB.

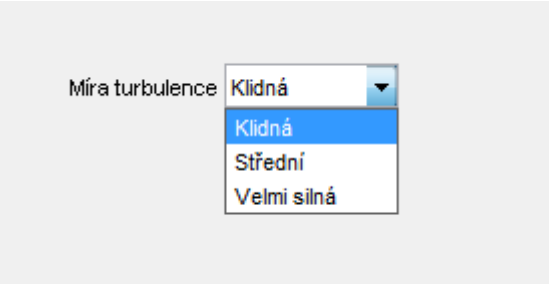
11. ***alfaRXA*** - Útlum vzniklý na přijímací optické soustavě
    Hodnotu útlumu zadáváme v dB.

12. ***alfaIF*** - Útlum vzniklý na interferenčním filtru
    Hodnotu útlumu zadáváme v dB.

13. ***alfaPD*** - Útlum vazby přijímací čočky a fotodiody
    Hodnotu útlumu vazby zadáváme v dB.

14. ***alfa1cast*** - Koeficient útlumu "čiste atmosféry"
    Hodnotu útlumu vazby zadáváme v dB/km.

15. ***Míra turbulence*** - strukturní parametr indexu lomu C_n^2
    Zde máme na výběr možnosti: Klidná, Střední, Velmi silná, viz obr. 7.3.



Obr. 7.3 Míra turbulence - výběr možností

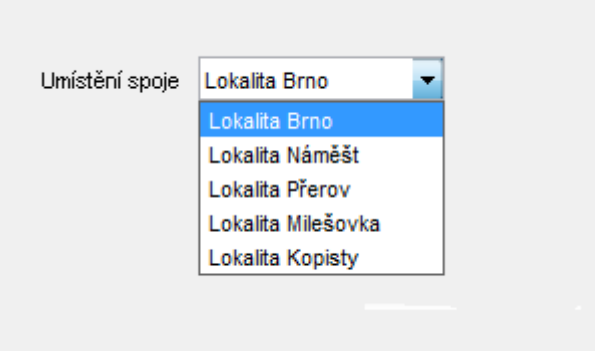
Klidná míra turbulencí: $C_n^2 = 10^{-16}\ m^{-2/3}$
Střední míra turbulencí: $C_n^2 = 10^{-14}\ m^{-2/3}$
Velmi silná míra turbulencí: $C_n^2 = 10^{-12}\ m^{-2/3}$

16. ***SNR0*** - Odstup přenášeného signálu / šumu okolí
    Hodnotu odstupu signál / šum zadáváme v dB.

17. ***NEP*** - Úroveň vlastního šumu přijímací fotodiody
    Hodnotu vlastního šumu zadáváme v dB.

18. ***delta*** - dynamický rozsah přijímače
    Hodnotu dynamického rozsahu zadáváme v dB.

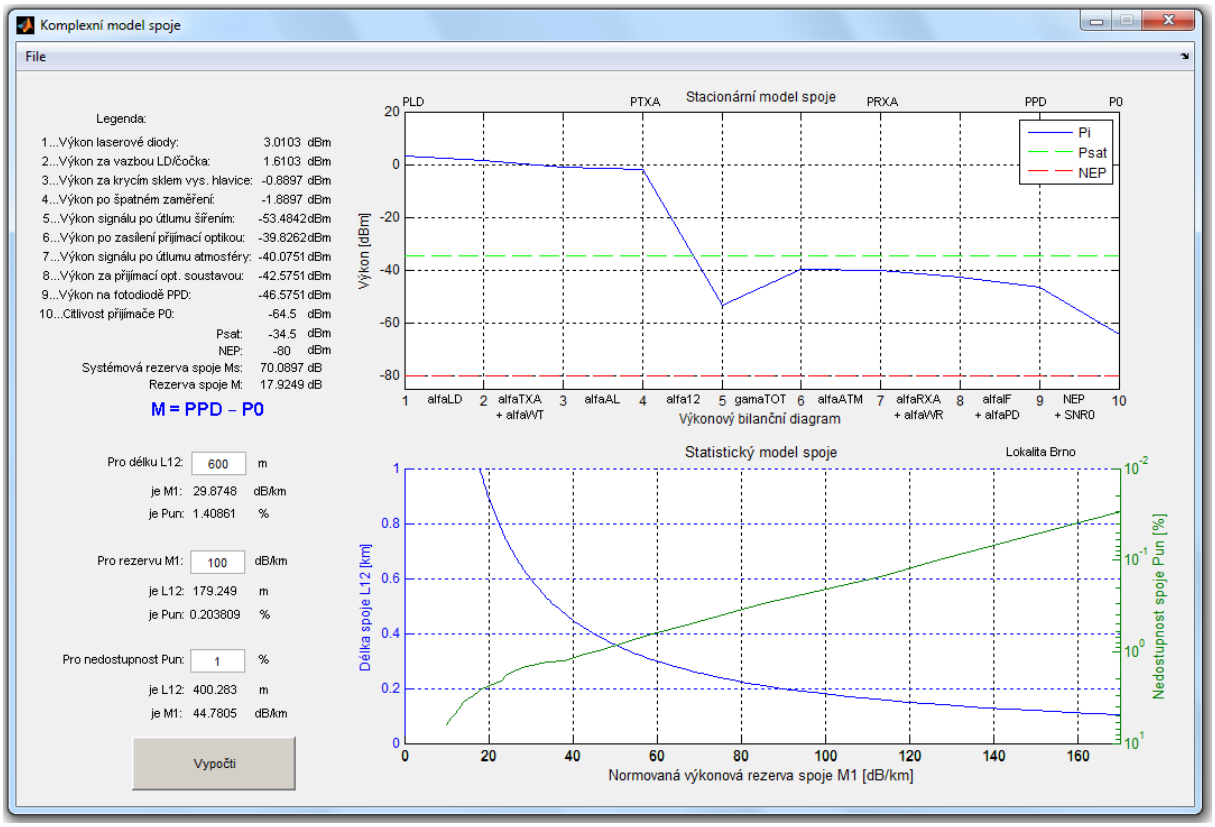
19. ***Umístění spoje*** - lokalita pro kterou chceme OBS spoj simulovat
    Zde máme na výběr možnosti: Lokalita Brno, Lokalita Náměšť, Lokalita Přerov, Lokalita Milešovka, Lokalita Kopisty, viz obr. 7.4.



Obr. 7.4 Umístění spoje - výběr možností

7.4 Program Atmos: Komplexní model spoje

Toto okno je generováno až po stlačení tlačítka „Zobraz“ v okně "Zadání parametrů optického bezkabelového spoje" a slouží pro zobrazení simulace námi navrženého optického bezkabelového spoje. Tomuto oknu vévodí graf Stacionárního modelu spoje, tedy Výkonový bilanční diagram a Statistický model spoje, který simuluje spoj v závislosti na zvolené lokalitě umístění spoje. Ukázka okna programu Atmos „Komplexní model spoje“ je na obrázku 7.5.



Obr. 7.5 Program Atmos: Komplexní model spoje

7.4.1 Zadávání délky L_{12} pro modelovaný spoj

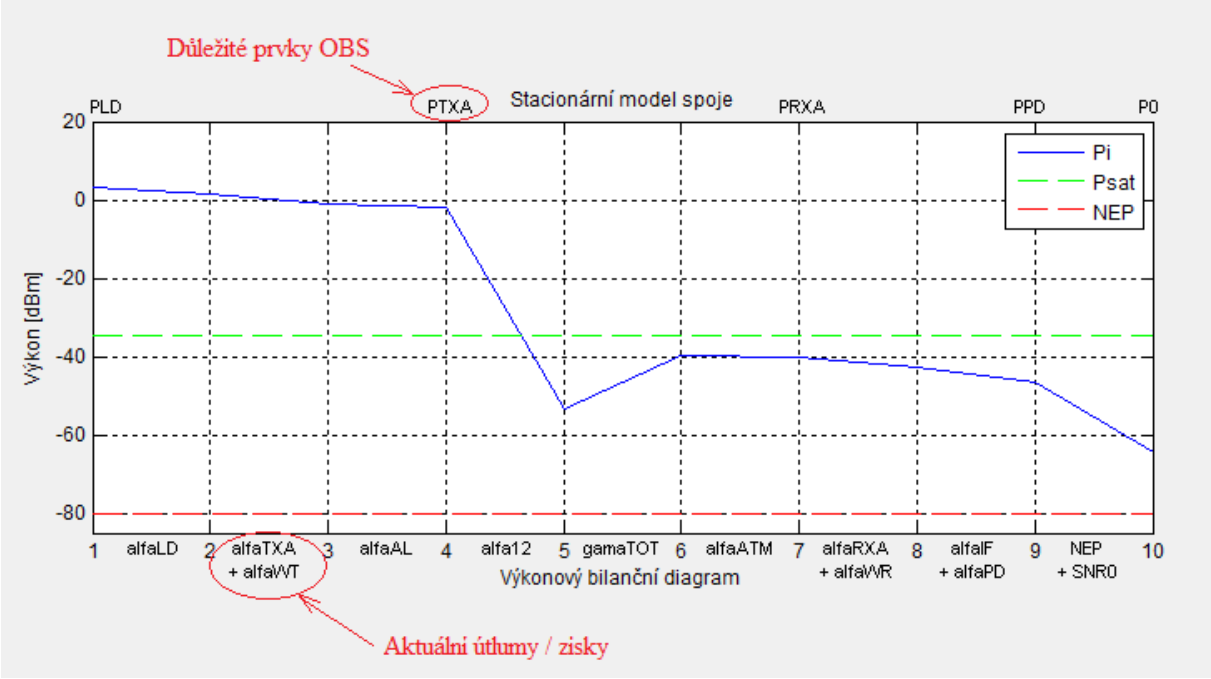
Pro efektivnější simulaci a analýzu spoje se zadává délka L_{12} optického bezkabelového spoje až v tomto okně. Délka L_{12} je implicitně nastavena na 600 m a pro tuto vzdálenost vysílací a přijímací hlavice je ze základu vypočítán stacionární i statistický model spoje.

Pokud zadaný parametr chceme změnit, klikneme myší do Edit boxu délky L_{12}, zadáme klavesnicí hodnotu délky spoje v metrech a stlačíme tlačítko "Vypočti". Nyní se dle nastavené hodnoty přepočítá stacionární model se všemi dílčími výkony spoje i statistický model.

7.4.2 Stacionární model spoje

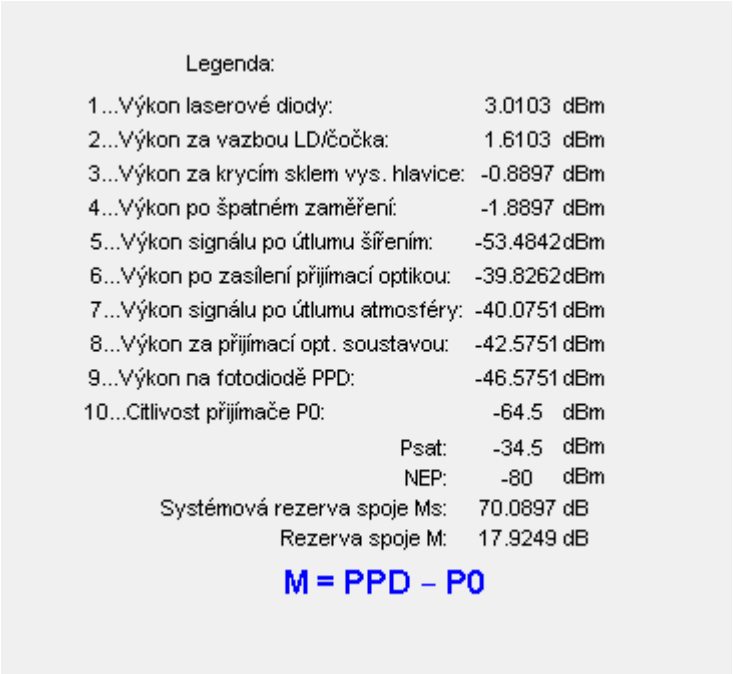
Vyhodnocení zadaných parametrů spoje je zobrazeno v grafu s názvem Stacionární model spoje. Jsou zde zobrazeny úbytky výkonu signálu spoje, který postupně prochází jednotlivými prvky přenosové trasy. Nejdůležitější prvky jsou vyznačeny u horní osy grafu.

Mezi jednotlivými kroky jsou zde vepsány i aktualní útlumy / zisky, které se na snižování / zvyšování výkonu spoje podílejí. V grafu je taktéž uvedena uroveň vlastního šumu přijímací fotodiody *NEP* a práh saturace přijímací fotodoidy P_{SAT}. Názorná ukázka je na obrázku 7.6.



Obr 7.6 Stacionárního modelu spoje

Přehled všech dílčích výkonů na prvcích OBS spoje je uveden v legendě, která se nachází nalevo od grafu Stacionárního modelu spoje. Mezi nejvýznamější vypočítanou hodnotu navrženého OBS spoje zajisté patří "Rezerva spoje M", nazývaná též rezerva spoje na počasí, která nám garantuje, do jaké míry může během dne kolísat atmosférický útlum, aby spoj stále bezchybně fungoval. Tato rezerva lze v praxi odvodit z dlouhodobého měření útlumu atmosféry v dané lokalitě. Na obrázku 7.7 je zobrazena legenda patřící grafu stacionárnímu modelu spoje, kde jsou zobrazeny aktuální výkony pro namodelovaný spoj.



Obr. 7.7 Legenda s aktuálními výkony na prvcích modelovaného spoje

7.4.3 Statistický model spoje

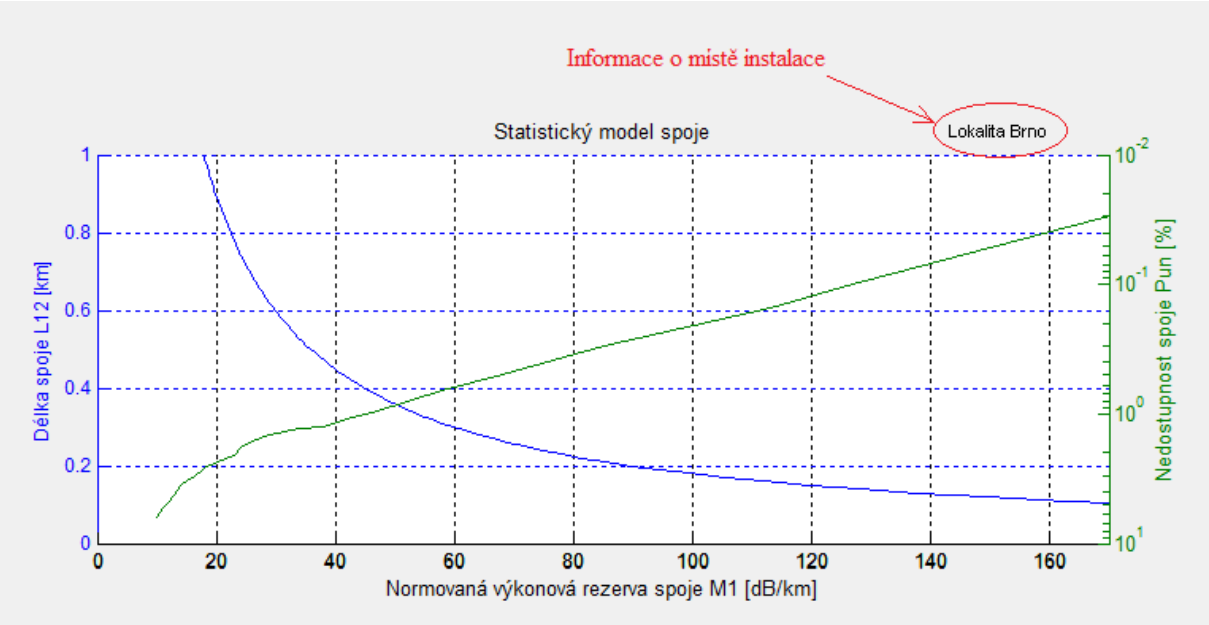
Spodní polovina okna Komplexního modelu spoje je věnována statistickému modelu optického bezkabelového spoje. Statistický model je založen na znalosti statistických parametrů atmosféry v dané lokalitě.

V programu Atmos jsou nadefinovány statistické parametry atmosféry pro lokalitu Brno, Náměšť, Přerov, Milešovka a Kopisty. Tyto parametry jsou zjištěny na základě dlouholetých sledování atmosférických podmínek v těchto lokalitách.

Díky těmto parametrům můžeme modelovat odhad nedostupnosti spoje pro danou lokalitu. Odhad nedostupnosti OBS je založen na syntéze stacionárního modelu spoje a statistického modelu spoje.

Z vypočtené systémové rezervy M_S a vysílací vzdálenosti L_{12} se určí normalizovaná výkonová rezerva spoje M_1. Hodnota M_1 také představuje největší hodnotu atmosférického útlumu $\alpha_{1,atm}$. Díky dlouholetým sledováním daných lokalit lze z normalizované výkonové rezervy spoje M_1 odhadnout nedostupnost spoje P_{un}.

Na obrázku 7.8 je zobrazen statistický model spoje pro lokalitu Brno. Modrá křivka znázorňuje spoj s aktualní systémovou rezervou (M_S = 70 dB), zelená křivka znázorňuje nedostupnosti spoje P_{un}. Nad pravým horním rohem grafu je zobrazeno pro jakou lokalitu je statistický model simulován.

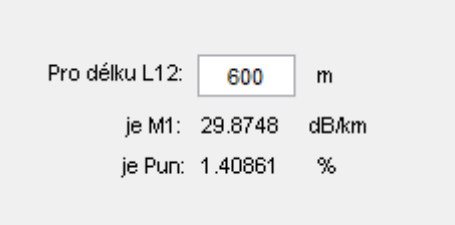


Obr. 7.8 Statistický model spoje pro lokalitu Brno

Pro simulaci optického bezkabelového spoje s různou délkou L_{12}, normalizovanou výkonovou rezervou spoje M_1 a nedostupností spoje P_{un} slouží kalkulační okénka, které se nacházejí nalevo od grafu Statistického modelu spoje.

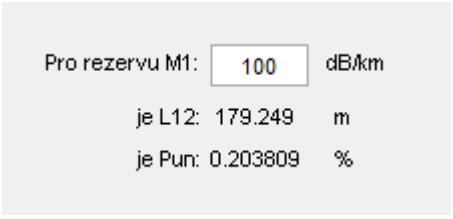
První kalkulační okénko slouží jak pro změnu délky spoje L_{12} (viz výše kapitola 7.4.1), tak i pro aktuální přepočet hodnot M_1 a P_{un} pro právě modelovaný stacionární spoj. Pro délku spoje L_{12} = 600 m, se systémovou rezervou spoje M_S = 70 dB, tedy bude normalizovaná výkonová rezerva spoje M_1 = 29,87 dB/km a odhadovaná nedostupnost spoje P_{un} = 1,4 %.

Pokud bychom chtěli simulovat hodnoty M_1 a P_{un} pro jinou délku L_{12}, klikneme myší do Edit boxu Pro délku L_{12}, zadáme klavesnicí hodnotu vzdálenosti modelovaného spoje v metrech a stlačíme tlačítko "Vypočti". Změněné hodnoty M_1 a P_{un} jsou nyní aktualní pro námi navolenou délku L_{12}. Kalkulační okénko pro délku L_{12} je zobrazeno na obrázku 7.9.



Obr 7.9 Kalkulační okénko pro délku L_{12}

Následující kalkulační okénko slouží pro simulaci statistického modelu, u kterého bude proměnný parametr normalizovaná výkonová rezerva spoje M_1. Po zadání hodnoty M_1 a znalosti systémové rezervy spoje M_S, se po stlačení tlačítka "Vypočti" přepočítají optimální hodnoty délky spoje L_{12} a očekávané nedostupnosti spoje P_{un}, aby splňovali podmínku zadané hodnoty normalizované výkonové rezervy spoje M_1. Ukázka kalkulačního okénka pro proměnný parametr normalizované výkonové rezervy spoje M_1 je na obr. 7.10.



Obr 7.10 Kalkulačního okénko pro proměnný parametr M_1

Poslední kalkulační okénko slouží pro simulaci statistického modelu, u kterého bude proměnný parametr odhadovaná nedostupnost spoje P_{un}. Ze znalosti statistického modelu pro danou lokalitu kalkulátor po stlačení tlačítka "Vypočti" vypočítá hodnotu normalizované výkonové rezervy spoje M_1. Následně díky znalosti systémové rezervy spoje M_S a hodnoty normalizované výkonové rezervy spoje M_1 dopočítá i optimální délku spoje L_{12}. Ukázka kalkulačního okénka pro proměnný parametr odhadované nedostupnosti spoje P_{un} je na obr. 7.10.

Obr 7.10 Kalkulačního okénko pro proměnný parametr P_{un}

Tímto jsou tedy vysvětleny všechny funkce programu Atmos. V příloze diplomové práce je vypracován návrh a výpočet energetické bilance spoje pomocí tabulkového programu Excel a následně pro stejné parametry spoje namodelován i optický bezkabelový spoj v programu Atmos. Cílem těchto dvou metod výpočtů stejného OBS spoje je ukázka efektivnosti a přehlednosti, s jakou program Atmos analyzuje změny námi zadaných statických parametrů spoje. Porovnat se také může přesnost výsledků obou metod, ale principiálně by měli hodnoty všech výsledků být totožné.

8 Závěr

Hlavním cílem diplomové práce bylo seznámení s optickým bezkabelovým spojem, jeho parametry a možnými útlumy přenášeného signálu v atmosféře, tedy vyhodnocení vlivu koeficientu extinkce, atmosférických turbulencí, odhadu nedostupnosti spoje a také pravděpodobnosti přerušení spoje. Nedílnou součástí těchto útlumů jsou i šumy, které mohou způsobit rozpad optického bezdrátového spoje.

V této diplomové práci byl navržen OBS, u kterého byla výpočítána výkonová bilance spoje. Z tohoto návrhu byl vypracován projekt, který se zabývá modelováním optického bezkabelového spoje s možnými variantami útlumů, které nastávají v atmosféře. Tento projekt byl vyvinut v prostředí Matlab a slouží pro odhad nedostupnosti signálu v různých lokalitách ČR.

Byl vytvořen program Atmos, který pracuje s námi zvolenými stacionárními parametry spoje. Program Atmos z těchto hodnot vypočítá všechny útlumy, které se mohou na trase nacházet. Dále z těchto hodnot vypočítá potřebné výkony v určitých místech trasy a následně vytvoří graf výkonové bilance spoje. OBS je ze základu navržen na délku spoje L_{12} = 600 m, ale dle libosti může být před další simulací délka změněna, aby mohli být pozorovány změny patřičných výkonů i charakteristika výkonové bilance spoje. Vzniká tedy stacionární model spoje.

Další část tohoto programu se zabývá statistickým modelem spoje pro námi zvolenou lokalitu ČR, mezi které patří Brno, Náměšť, Přerov, Milešovka a Kopisty. Tento model který již pracuje se známými výkonovými hodnotami vytvoří graf, který slouží k odhadnutí nedostupnosti spoje P_{un}, využívající znalostí dlouholetého sledování atmosférických podmínek v těchto lokalitách.

Ze znalosti systémové rezervy spoje M_S, lze následně vypočítat pomocí kalukačních okének optimální parametry normalizované výkonové rezervy spoje M_1 a odhadované nedostupnosti spoje P_{un} v zavislosti na délce spoje L_{12}. Taktéž můžeme vypočítat optimální parametry délky spoje L_{12} a odhadované nedostupnosti spoje P_{un} v zavislosti na normalizované výkonové rezervě spoje M_1. Poslední kalkulační okénko slouží pro vypočet optimálních parametrů délky spoje L_{12} a normalizované výkonové rezervě spoje M_1 v závislosti na odhadované nedostupnosti spoje P_{un}.

Cíle této diplomové práce tedy byly splněny a vyvinutý program Atmos v prostředí Matlab je plně funkční. Návrh OBS s výkonovou bilancí spoje a simulace stejného OBS v programu Atmos se nachazí v přílohách uložených na konci této diplomové práce.

Seznam použité literatury

[1] 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.

[2] 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

[3] ANDREWS, L., PHILLIPS, R., HOPEN, C. *Laser Beam Scintillation with Applications.* Washington: Spie Press, 2001.

[4] WILFERT, O. *Optické bezkabelové spoje.* Habilitační práce. Brno: FEKT VUT v Brně, 2004.

[5] 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

[6] LAO – průmyslové systémy s.r.o., *Laser diode datasheets*, http://www.lao.cz

[7] KOPP, R., KOLKA, Z. *Dostupnost optických bezkabelových spojů.* Elektrorevue [online], 2006, č. 51 [cit. 30.11.2006], http://www.elektrorevue.cz/clanky/06051/index.html

[8] WILFERT, O. *Nové metody optických komunikací ve volném prostoru*. Elektronická prezentace. Brno: FEKT VUT v Brně, 2004.

[9] CÍSAŘ, D. *Vliv atmosférických turbulencí na intenzitní profil laserového svazku.* Bakalářská práce. Brno: FEKT VUT v Brně, 2009.

[10] WILLEBRAND, H., BAKSHEESH S. G. *Free-Space Optics: Enabling Optical Connectivity in Today's Networks.* SAMS, Indiana, USA, 2002.

[11] 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.

[12] SALEH, B.E.A., TEICH, M.C. *Základy fotoniky.* Praha: Matfyzpress Praha, 1994. ISBN 80-85863-00-6.

[13] LAMBERT, S.G., CASEY, W.L., Laser Communication in Space. Artech House, London, 1995.

[14] KIM, I. I., MITCHELL, M., KOREVAAR, E. Measurement of scintillation for free-space laser communication at 785 nm and 1550 nm. In *Proc. Optical Wireless Communications II. Conference 3850.* SPIE, 1999, p. 49 - 62.

[15] AL NABOULSI, M., SIZUN, H., DE FORNEL, F. Propagation of optical and infrared waves in the atmosphere. In *Proc. of the XXVIIIth URSI General Assembly*. New Delhi, 2005.

[16] WILFERT, O. *Fotonika a optické komunikace*. Elektornické skriptum. Brno: FEKT VUT v Brně, 2007.

Seznam použitých zkratek a symbolů

Seznam zkratek

APD	lavinová fotodioda (avalanches photodetector)
BER	chybovost (bit error rate)
FWHM	šířka svazku pro 50% maximální intenzity (full width - half maximum)
IF	interferenční filtr (interferential filter)
IM	intenzitní modulace (intensity modulation)
LD	laserová dioda (laser diode)
LED	elektroluminescenční dioda (light emitting diode)
NEP	úroveň vlastního šumu přijímače (noise equivalent power)
OBS	optické bezkabelové spoje
OOK	typ modulace (on-off keying)
PD	fotodetektor (photodetector)
PIN	fotodioda typu PIN
RXA	apertura přijímače (receiver apertue)
SNR	poměr signálu k šumu (signal to noise ratio)
TXA	apertura vysílače (transmitter aperture)
UV	ultrafialové optické zářené (ultra violet)
WR	krycí sklo přijímače (receiver window)
WT	krycí sklo vysílače (transmitter window)

Seznam symbolů

α_{12}	útlum šířením
$\alpha_{1,atm}$	atmosférický koeficient útlumu
α_{1cast}, α_{1part}	koeficient útlum rozptylem na částicích v atmosféře
α_{add}	přídavný atmosférický útlum
α_{al}	útlum zaměřením spoje
α_{atm}	útlum průchodem atmosférou
α_{cast}	útlum rozptylem na částicích v atmosféře
α_{e}	koeficient extinkce atmosféry
α_{geom}	geometrický útlum
α_{WT}	útlum krycím skle vysílače
α_{WR}	útlum krycím skle přijímače
α_{IF}	útlum interferenčního filtru
α_{KS}	útlum koncentrátoru
α_{LD}	útlum vazby LD – vysílací čočka
α_{RS}	útlum na přijímací soustavě
α_{RXA}	útlum na přijímací čočce
α_{tot}	celkový útlum šířením atmosférou
α_{turb}	útlum turbulencí
α_{TS}	útlum na vysílací soustavě
α_{TXA}	útlum na vysílací čočce
β_0	Rytovova variance
c	rychlost světla ve vakuu
Cn^2	strukturní parametr indexu lomu
Δ	dynamika spoje
$Dekv$	průměr energeticky ekvivalentního svazku na TXA
D_{RXA}	průměr přijímací apertury
D_{TXA}	průměr vysílací apertury
exp	exponent
f_{TXA}	ohnisková vzdálenost čočky vysílače
γ_{RXA}	geometrický zisk
γ_{tot}	celkový zisk na přijímací čočce
γ_{add}	dodatečný zisk na přijímací čočce

I_0	intenzita záření v ose svazku
$I_{(0,RXA)}$	optická intenzita ve středu svazku na přijímací čočce
$I_{(0,TXA)}$	optická intenzita ve středu svazku na vysílací čočce
φ_t , φ_{x1}	divergence výstupního svazku
L_0	pomocná délka
L_{12}	délka spoje
λ	vlnová délka
M	výkonová rezerva spoje
M_S	systémová rezerva spoje
M_1	normovaná rezerva spoje
n	počet bitů
n_{ch}	počet chybných bitů
P_{LD}	hodnota maximálního výkonu laserové diody
P_{RXA}	optický výkon dopadající na přijímací čočku
P_{TXA}	vysílaný optický výkon za vysílací čočkou
P_{SAT}	saturační úroveň fotodetektoru
P_0	minimální detekovatelný výkon
$P_{m,LD}$	střední hodnota výkonu emitovaného laserovou diodou
$P_{m,PD}$	střední hodnota výkonu dopadajícího na fotodetektor
Pun	pravděpodobnost nedostupnosti spoje
q	koeficient pro určování extinkce
θ	úhel divergence svazku laserové diody
θ_{x1}	vyzařovací úhel
$R_{(z)}$	poloměr křivosti vlnoplochy
ρ_0	poloměr svazku
$\sigma^2_{r,I}$	relativní variance optické intenzity
Σ	vlnoplocha
T	čas
T	celková doba měřeného období
T	propustnost atmosféry
$T_{(\lambda)}$	spektrální propustnosti atmosféry
T_{un}	doba nedostupnosti spoje
τi	doba úniku

V_m	meteorologická viditelnost
w_0	položířka svazku v krčku
$w_{(z)}$	položířka svazku
x	kartézská souřadnice x
z	kartézská souřadnice z

Seznam příloh

Příloha A: Návrh a výpočet energetické bilance spoje
Příloha B: Modelování spoje v programovém prostředí Matlab

Příloha A: Návrh a výpočet energetické bilance spoje

Pro tuto práci byl navržen OBS, který se stal základem pro realizaci programu Atmos v prostředí Matlab.

Spoj je vypracován pro systémovou rezervu M_S = 70 dB. Tomuto požadavku se podřídili jednotlivé části spoje. Zdrojem je vysílací laserová dioda s výkonem 2mW, tedy 3,01 dB. Pro spoj byla zvolena vlnová délka 1550 nm, protože na této vlnové délce se nachází atmosférické okno, tudíž jsou minimalizovány útlumy v atmosféře zpusobené molekulami.

Útlumy jednotlivých částí systému, jako jsou vazba laserové diody, útlum čočkou, krycím sklem, špatným zaměřením paprsku, průchodem IF filtrtem apod. byly zvoleny dle typických hodnot, běžně se vyskytujících a používaných v odborné literatuře.

Délka spoje byla zvolena 600 metrů, tomu byl přizpůsoben i vzhled atmosféry. Pro jenoduchost byla volena klidná, čistá atmosféra, kde útlumy turbulencemi a časticemi nejsou tak velké. Bitová chybovost spoje byla navržena $BER = 10^{-9}$, čemuž odpovídá požadovaný odstup signál/šum SNR = 15,5 dB.

Výkonová bilance spoje byla vypočítána dle rovnic, které jsou zmíněny v této práci a jsou čerpány z prací a vědeckých článků, které jsou uvedeny v seznamu literatury. Pro jednoduchost a přehlednost byl použit tabulkový program Excel, ve kterém byli provedeny potřebné výpočty a výsledný útlumový diagram celého navrženého spoje, obr. PA.1.

Zvolené parametry:

$P_{LD} = 2mW$	výkon vysílací laserové diody v mW
$\lambda = 1550 \cdot 10^{-9} m$	vlnová délka laserového spoje
$L_{12} = 600m$	vzdálenost hlavic vysílače a přijímače
$\alpha_{LD} = -1{,}4dB$	útlum vazby *LD* a vysílací čočky
$\alpha_{TXA} = -1{,}0dB$	útlum na vysílací optické soustavě
$\alpha_{WT} = -1{,}5dB$	útlum na krycím skle vysílače
$\alpha_{al} = -1{,}0dB$	útlum špatného zaměření paprsku spoje
$D_{ekv} = 19mm$	průměr svazku vysílací optické soustavy
$\Phi_t = 12mrad$	úhlová šířka svazku
$D_{RXA} = 60mm$	průměr plochy přijímací optické soustavy
$\alpha_{WR} = -1{,}5dB$	útlum na krycím skle přijímače
$\alpha_{RXA} = -1{,}0dB$	útlum na přijímací optické soustavě
$\alpha_{IF} = -1{,}0dB$	útlum na interferenčním filtru
$\alpha_{PD} = -3{,}0dB$	útlum vazby přijímací čočka a *PD*

$\alpha_{1cast} = -0{,}35 dB/km$ koeficient útlumu čisté atmosféry

$C_n^2 = 1 \cdot 10^{-16}\ m^{-2/3}$ strukturální parametr indexu lomu "klidné" turbulentní atmosféry

$SNR_0 = -15{,}5 dB$ odstup signál/šum pro $BER = 10^{-9}$

$NEP = -80 dB$ výkon ekvivalentní šumu na fotodiodě pro přenosovou rychlost 10 Mps/OOK modulaci

$\Delta = 30 dB$ dynamický rozsah přijímače

Vypočítané hodnoty:

$P_{mLD} = 10\log(P_{LD}) = 3{,}010 dBm$ výkon vysílací laserové diody v dBm

$L_0 = \frac{D_{ekv}}{\Phi_t} = 1{,}583 m$ pomocná délka

$\alpha_{12} = 20\log\left(\frac{L_0}{L_0 + L_{12}}\right) = -51{,}594 dB$ útlum šířením

$\gamma_{tot} = 3{,}67 + 10 \cdot \log\left|\left(\frac{D_{RXA}}{D_{ekv}}\right)\right| = 13{,}658 dB$ zisk přijímací optické soustavy

$\alpha_{cast} = \alpha_{1cast} \cdot L_{12} \cdot 10^{-3} = -0{,}210 dB$ útlum částicemi v čisté atmosféře

$\alpha_{TS} = \alpha_{LD} + \alpha_{TXA} + \alpha_{WT} = -3{,}900 dB$ celkový útlum vysílací optické soustavy

$\alpha_{RS} = \alpha_{WR} + \alpha_{RXA} + \alpha_{IF} + \alpha_{PD} = -6{,}500 dB$ celkový útlum přijímací optické soustavy

$\alpha_{tot} = \alpha_{TS} + \alpha_{RS} + \alpha_{al} = -11{,}400 dB$ celkový útlum spoje (nezavislý na L_{12})

$\rho_0 = \left[0{,}55 \cdot C_n^2 \cdot \left(2\frac{\pi}{\lambda}\right)^2 \cdot L_{12}\right]^{\frac{-3}{5}} \cdot 10^3 = 1443{,}689 mm$ poloměr koherence svazku

$\beta_0 = \left[0{,}5 \cdot C_n^2 \cdot \left(2\frac{\pi}{\lambda}\right)^{\frac{7}{6}} \cdot L_{12}^{\frac{11}{6}}\right]^{\frac{1}{2}} = 17{,}811 \cdot 10^{-3} m^{\frac{-2}{3}}$ konvenční Rytovova variance pro sférickou vlnu

$d_2 = \frac{2\pi \cdot \left(\frac{D_{RXA}}{1000}\right)^2}{\lambda \cdot 4 \cdot L_{12}} = 6{,}080$ poloměr apertury vůči Fresnelově zóně

$$\sigma_{12D} = \exp\left[\frac{0{,}51\cdot\beta_0{}^2\left(1+0{,}69\cdot\beta_0{}^{\frac{12}{5}}\right)^{\frac{-5}{6}}}{1+0{,}62\cdot\beta_0{}^{\frac{12}{5}}\cdot d_2+0{,}9\cdot d_2}+\frac{0{,}49\cdot\beta_0{}^2}{\left(0{,}56\cdot\beta_0{}^{\frac{12}{5}}+1+0{,}18\cdot d_2\right)^{\frac{7}{6}}}\right]-1=79{,}623\cdot10^{-6}$$ variance optické intenzity pro sférickou vlnu

$\alpha_{turb}=10\cdot\log\left(1-\sqrt{\sigma_{12D}}\right)=-0{,}038dB$ útlumu atmosféry vlivem turbulencí

$\alpha_{atm}=\alpha_{cast}+\alpha_{turb}=-0{,}248dB$ celkový útlum atmosféry

$P_1=P_{LD}=3{,}010dBm$ výkon vysílací laserové diody v dBm

$P_2=P_1+\alpha_{LD}=1{,}610dB$ výkon za vazbou *LD* a vysílací čočky

$P_3=P_2+\alpha_{TXA}+\alpha_{WT}=-0{,}890dB$ výkon za krycím sklem vysílače

$P_4=P_3+\alpha_{al}=-1{,}890dB$ výkon po špatném zaměření paprsku spoje

$P_5=P_4+\alpha_{12}=-53{,}484dB$ výkon signálu po útlumu šířením

$P_6=P_5+\gamma_{tot}=-39{,}826dB$ výkon po zesílení přijímací optickou soustavou

$P_7=P_6+\alpha_{atm}=-40{,}075dB$ výkon signálu po útlumu způsobeným částicemy a turbulencí v atmosféře

$P_8=P_7+\alpha_{RXA}+\alpha_{WR}=-42{,}575dB$ výkon za přijímací optickou soustavou

$P_9=P_8+\alpha_{IF}+\alpha_{PD}=-46{,}575dB$ výkon za vazbou přijímací čočkou a *PD*, tedy výkon na detektoru P_{PD}

$P_{10}=NEP+SNR_0=-64{,}500dB$ minimální detekovatelný výkon na *PD*

$P_{TXA}=P_{mLD}+\alpha_{TS}+\alpha_{al}=-1{,}890dB$ výkon v místě vysílací optické soustavě

$P_{RXA}=P_7=-40{,}075dB$ výkon v místě přijímací optické soustavě

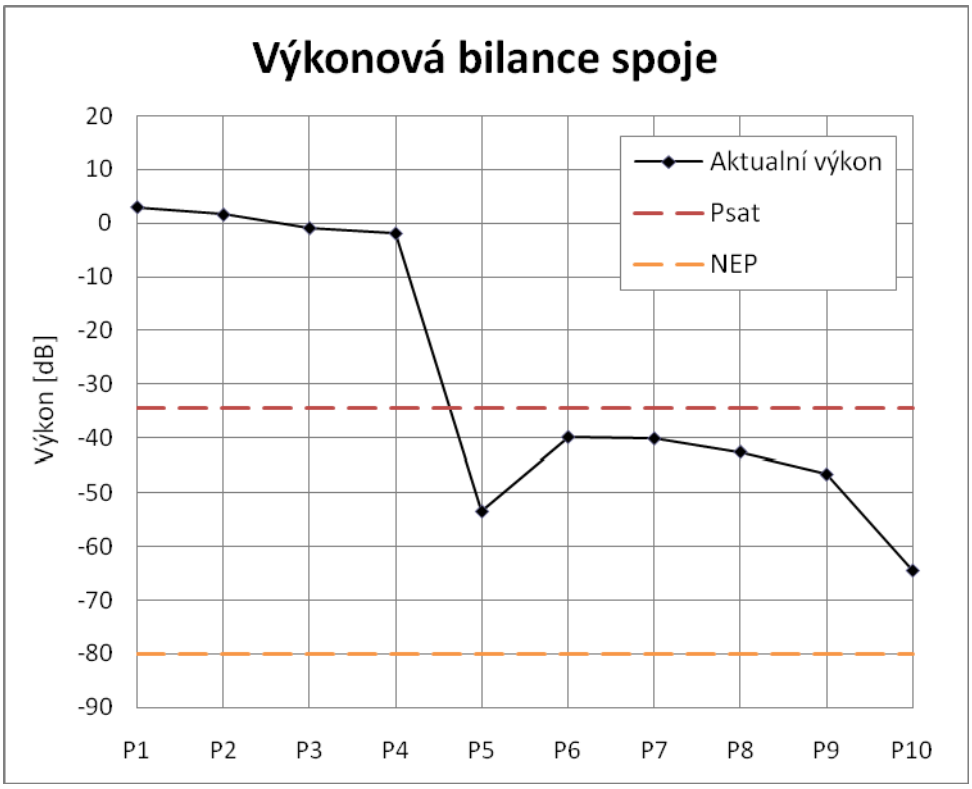
$P_{0RXA}=NEP+SNR_0-\alpha_{RS}=-58{,}000dB$ minimální detekovatelný výkon v místě přijímací optické soustavy

$M_S=P_{TXA}-P_{0RXA}+20\cdot\log\left(\frac{D_{RXA}}{\phi_t}\right)=70{,}090dB$ systémová rezerva spoje

$M=P_9-P_{10}=17{,}925dBm$ rezerva spoje na počasí

$P_{MIN}=P_{10}=-64{,}500dBm$ minimální detekovatelný výkon na *PD*

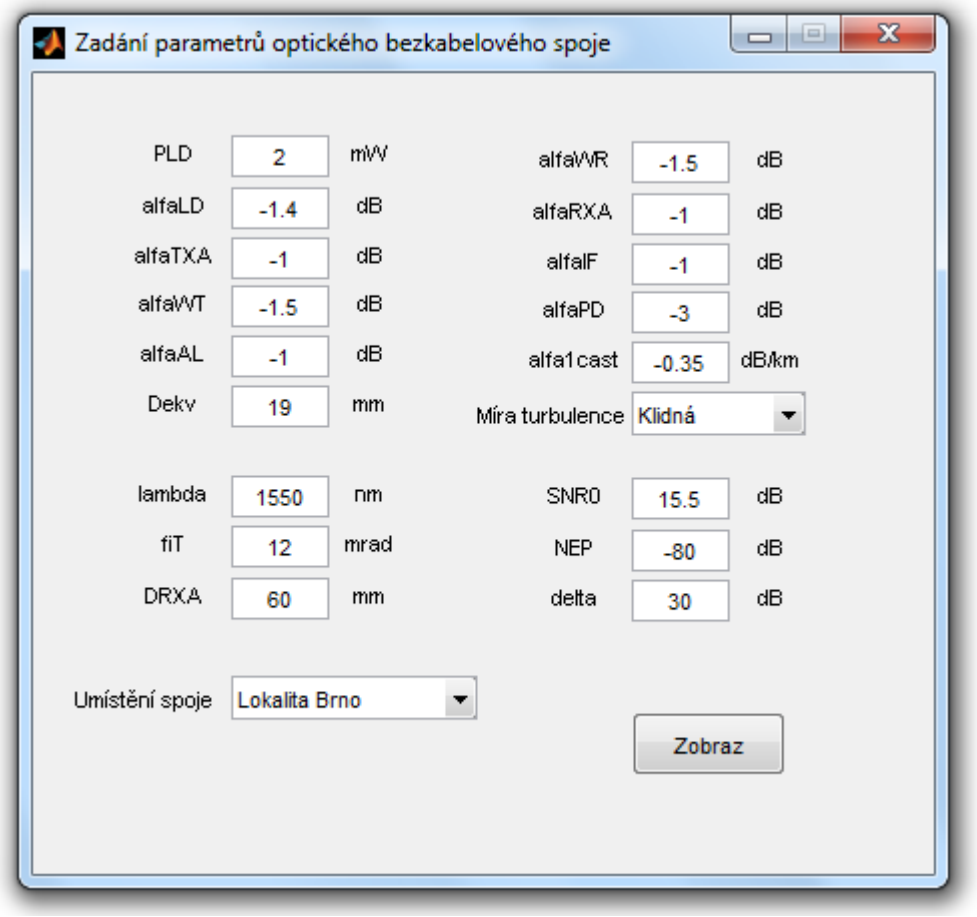
$P_{SAT}=P_{MIN}+\Delta=-34{,}500dBm$ maximální detekovatelný výkon na *PD*



Obr. PA.1 Výkonová bilance spoje.

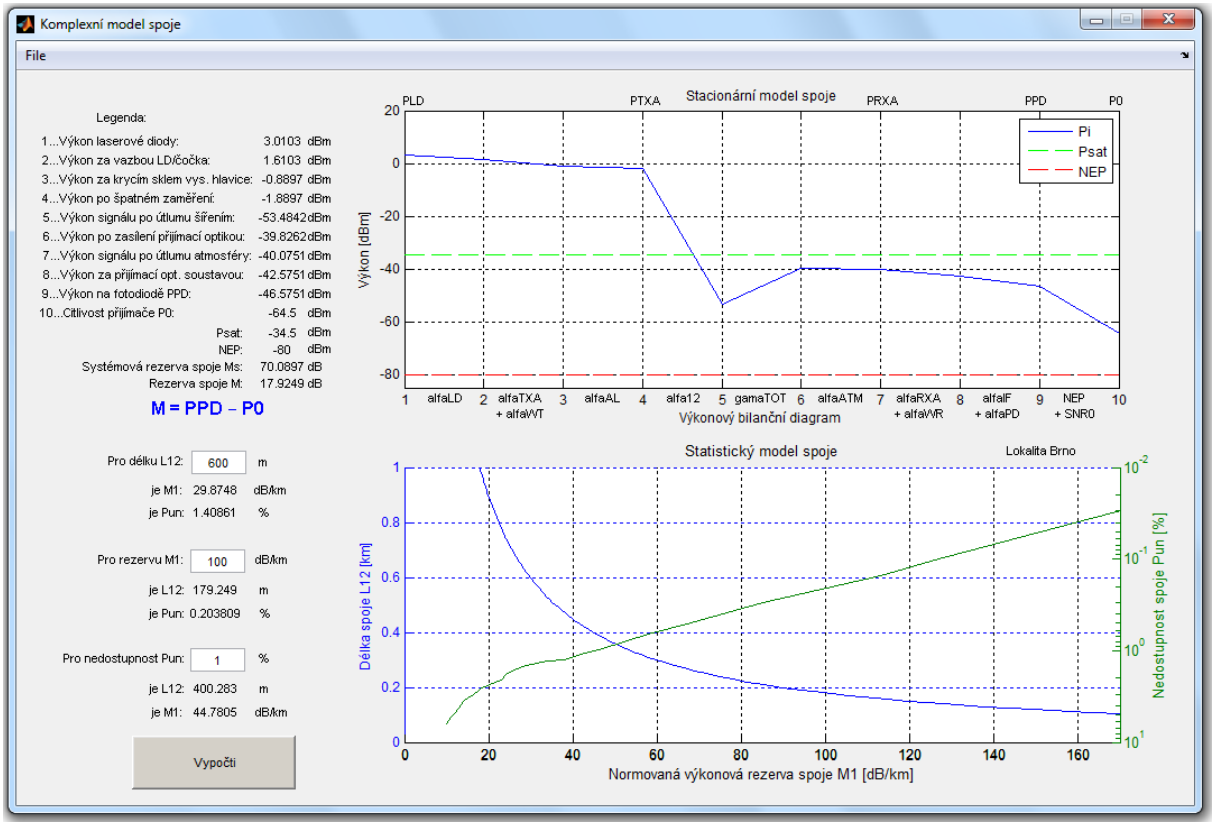
Příloha B: Modelování spoje v počítačovém prostředí Matlab

Po spuštění programu Atmos v prostředí Matlab nejprve zadáme vstupní hodnoty stacionárních parametrů optického bezkabelového spoje. Po zadání parametrů ještě zvolíme míru turbulence atmosférického prostředí a lokalitu. Dle předchozího návrhu tedy zadáme vstupní hodnoty pro simulaci, zvolíme "klidnou" míru turbulencí ($C_n^2 = 10^{-16}$ $m^{-2/3}$) a lokalitu Brno. Na obrázku PB.1 je zobrazeno úvodní okno programu Atmos, kde se zadávají vstupní parametry modelovaného optického bezkabelového spoje.



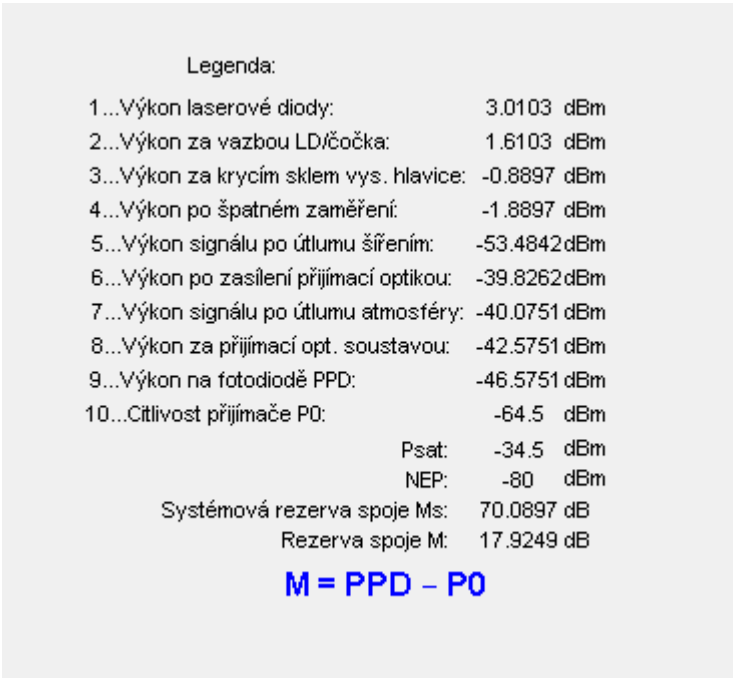
Obr. PB.1 Okno pro zadávání vstupních parametrů programu Atmos

Po stačení tlačítka "Zobraz", generuje program Atmos další okno s názvem Komplexní model spoje. Toto okno obsahuje Stacionární model námi navrženého spoje, tedy graf Výkonové bilance spoje, dále pak legendu se všemi vypočtenými úbytky výkonu vysílaného signálu a také pro nás velmi důležitou rezervu spoje na počasí M. Ve spodní části tohoto okna se nachází Statistický model spoje, který pro námi zvolenou lokalitu Brno zobrazuje odhadovanou nedostupnost spoje P_{un}. Na obrázku PB.2 je zobrazen komplexní model spoje pro lokalitu Brno.



Obr. PB.2 Komplexní model spoje pro lokalitu Brno

Na obrázku PB.3 jsou zobrazeny výsledky generované programem Atmos. Tyto výsledky můžeme porovnat s vypočítanými výsledky předchozí metody, kde jsme spoj počítali pomocí programu Excel.



Obr. PB.3 Zobrazení výsledků dílčích výkonů v programu Atmos

Závěrem lze tedy říci, že výsledné hodnoty výkonů signálu spoje, který postupně prochazí jednotlivými prvky přenosové trasy, jsou u obou metod totožné. Efektivita a přehlednost je ale na straně programu Atmos, kde rychlým zvolením jiné hodnoty kteréhokoliv parametru spoje program Atmos ihned spoj prepočítá a zobrazí změny.