

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

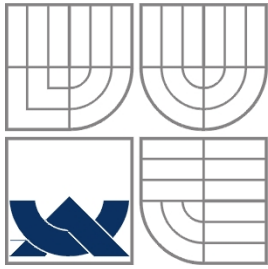
PROGRAM PRO VÝPOČET VÝKONOVÉ BILANCE OPTICKÉHO SPOJE

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

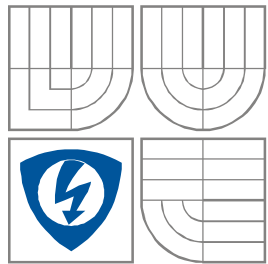
AUTOR PRÁCE
AUTHOR

MARTIN KOVÁČ

BRNO 2008



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

PROGRAM PRO VÝPOČET VÝKONOVÉ BILANCE OPTICKÉHO SPOJE

PROGRAM FOR THE OPTICAL LINK POWER BUDGET CALCULATION

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Martin Kováč

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

Ing. Petr Křivák

BRNO, 2008

LICENČNÍ SMLOUVA

POSKYTOVANÁ K VÝKONU PRÁVA UŽÍT ŠKOLNÍ DÍLO

uzavřená mezi smluvními stranami:

1. Pan/paní

Jméno a příjmení: Martin Kováč
Bytem: Sportovní 807, Ratíškovice 69602
Narozen/a (datum a místo): 18. září 1984 v Hodoníně
(dále jen „autor“)

a

2. Vysoké učení technické v Brně

Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií
se sídlem Údolní 53, Brno, 602 00
jejímž jménem jedná na základě písemného pověření děkanem fakulty:
prof. Dr. Ing. Zbyněk Raida, předseda rady oboru Elektronika a sdělovací technika
(dále jen „nabyvatel“)

Čl. 1

Specifikace školního díla

1. Předmětem této smlouvy je vysokoškolská kvalifikační práce (VŠKP):

- disertační práce
 - diplomová práce
 - bakalářská práce
 - jiná práce, jejíž druh je specifikován jako
- (dále jen VŠKP nebo dílo)

Název VŠKP: Program pro výpočet výkonové bilance optického spoje

Vedoucí/ školitel VŠKP: Ing. Petr Křivák

Ústav: Ústav radioelektroniky

Datum obhajoby VŠKP: _____

VŠKP odevzdal autor nabyvateli*:

- v tištěné formě – počet exemplářů: 2
- v elektronické formě – počet exemplářů: 2

2. Autor prohlašuje, že vytvořil samostatnou vlastní tvůrčí činností dílo shora popsané a specifikované. Autor dále prohlašuje, že při zpracovávání díla se sám nedostal do rozporu s autorským zákonem a předpisy souvisejícími a že je dílo dílem původním.

3. Dílo je chráněno jako dílo dle autorského zákona v platném znění.

4. Autor potvrzuje, že listinná a elektronická verze díla je identická.

* hodící se zaškrtněte

Článek 2

Udělení licenčního oprávnění

1. Autor touto smlouvou poskytuje nabyvateli oprávnění (licenci) k výkonu práva uvedené dílo nevýdělečně užít, archivovat a zpřístupnit ke studijním, výukovým a výzkumným účelům včetně pořizování výpisů, opisů a rozmnoženin.
2. Licence je poskytována celosvětově, pro celou dobu trvání autorských a majetkových práv k dílu.
3. Autor souhlasí se zveřejněním díla v databázi přístupné v mezinárodní síti
 - ihned po uzavření této smlouvy
 - 1 rok po uzavření této smlouvy
 - 3 roky po uzavření této smlouvy
 - 5 let po uzavření této smlouvy
 - 10 let po uzavření této smlouvy
(z důvodu utajení v něm obsažených informací)
4. Nevýdělečné zveřejňování díla nabyvatelem v souladu s ustanovením § 47b zákona č. 111/ 1998 Sb., v platném znění, nevyžaduje licenci a nabyvatel je k němu povinen a oprávněn ze zákona.

Článek 3

Závěrečná ustanovení

1. Smlouva je sepsána ve třech vyhotoveních s platností originálu, přičemž po jednom vyhotovení obdrží autor a nabyvatel, další vyhotovení je vloženo do VŠKP.
2. Vztahy mezi smluvními stranami vzniklé a neupravené touto smlouvou se řídí autorským zákonem, občanským zákoníkem, vysokoškolským zákonem, zákonem o archivnictví, v platném znění a popř. dalšími právními předpisy.
3. Licenční smlouva byla uzavřena na základě svobodné a pravé vůle smluvních stran, s plným porozuměním jejímu textu i důsledkům, nikoliv v tísní a za nápadně nevýhodných podmínek.
4. Licenční smlouva nabývá platnosti a účinnosti dnem jejího podpisu oběma smluvními stranami.

V Brně dne: 4. června 2008

.....
Nabyvatel

.....
Autor

Abstrakt

Cílem této práce je prostudovat metodiku návrhu optického kabelového a bezkabelového spoje a naprogramovat aplikaci, která zjistí jejich energetickou bilanci. Energetická bilance je nejdůležitější částí návrhu optického kabelového či bezkabelového spoje, jelikož nám říká, jestli bude možné spoj vůbec realizovat, popřípadě kolik bude nutno použít optických opakovačů a zesilovačů. Bakalářská práce má celkem tři části. První část se zabývá metodikou návrhu optického kabelového (útlumové a disperzní omezení) a popisem jednotlivých prvků, které je nutné použít (např. vysílací laserová dioda, optické vlákno). Druhá část popisuje metodiku návrhu optického bezkabelového spoje a atmosférické přenosové prostředí (útlum šířením, útlum atmosférou a útlum vyvolaný turbulencemi v atmosféře). A konečně třetí část už je samotná realizace programu pro výpočet výkonové bilance optického spoje v kompilátoru C++ Builder 6, vývojový diagram, použité rovnice a obrázky (jak program vypadá, jak se ovládá a jak může vypadat jeho výstup).

Klíčová slova

Optický bezkabelový spoj, optický kabelový spoj, energetická bilance spoje, výkonová bilanční rovnice, útlumový diagram optického spoje.

Abstract

Goal of this work is to study methodic of designing optical fiber and wireless link and to program an application which will be able to calculate power budget of specified link. Power budget of the link is the most important part of designing an optical fiber or wireless link because it tells us if it's even possible to realize such connection or how many optical repeaters and amplifiers are needed. The bachelor thesis has three parts. The first part describes designing of optical fiber link (limitation by attenuation and dispersion) and various components that are needed (laser diode, optical fiber etc.). The second part describes designing of optical wireless link and atmospheric transfer environment (attenuation by beam spreading, attenuation by atmosphere and by turbulences in atmosphere). And finally the third part which is realization of the program for the optical link power budget calculation in compiler C++ Builder 6, flowchart, used equations and pictures (how does the application look like, how is it controlled and how the output may look like).

Keywords

Optical fiber link, optical wireless link, power budget of the link, power balance equation, power level diagram.

Bibliografická citace dle ČSN ISO 690

KOVÁČ, M. *Program pro výpočet výkonové bilance optického spoje*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2008. 36 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Petr Křivák.

Prohlášení

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma Program pro výpočet výkonové bilance optického spoje jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

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

V Brně dne 4. června 2008

.....
podpis autora

Poděkování

Děkuji vedoucímu bakalářské práce Ing. Petru Křivákovi za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé bakalářské práce.

V Brně dne 4. června 2008

.....
podpis autora

OBSAH

1. ÚVOD.....	- 1 -
2. OPTICKÝ KABELOVÝ SPOJ.....	- 2 -
2.1. PRINCIP ŠÍŘENÍ SVĚTLA V OPTICKÝCH VLÁKNECH	- 2 -
2.2. ÚTLUM A DISPERZE OPTICKÝCH VLÁKEN	- 4 -
2.3. OPTICKÉ VLÁKNOVÉ ZESILOVAČE	- 6 -
2.4. NÁVRH OPTOVLÁKNOVÉHO SPOJE	- 9 -
3. OPTICKÝ BEZKABELOVÝ SPOJ	- 15 -
3.1. ATMOSFÉRICKÉ PŘENOSOVÉ PROSTŘEDÍ.....	- 15 -
3.2. SKLADBA A ENERGETICKÁ BILANCE SPOJE	- 19 -
4. NÁVRH VLASTNÍHO PROGRAMU.....	- 25 -
4.1. VÝVOJOVÝ DIAGRAM	- 25 -
4.2. PŘEDSTAVENÍ VLASTNÍHO PROGRAMU	- 26 -
5. ZÁVĚR.....	- 32 -
SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	- 33 -
SEZNAM ZKRATEK.....	- 34 -
SEZNAM SYMBOLŮ.....	- 35 -
PŘÍLOHY.....	- 36 -

TABULKY A OBRÁZKY

Obr. 1.1.	Průřez optickým vláknem	2 -
Obr. 1.2.	Navázání vlákna na optický zdroj	3 -
Obr. 1.3.	Představa modové disperze	5 -
Obr. 1.4.	Spektrální závislost koeficientu útlumu a koeficientu materiálové disperze ..	5 -
Obr. 1.5.	Znázornění principu funkce OVZ.	6 -
Obr. 1.6.	Energetické hladiny EDFA.	7 -
Obr. 1.7.	Výkonový úrovnový diagram optického spoje	11 -
Obr. 1.8.	Závislost citlivosti přijímače na přenosové rychlosti.....	11 -
Obr. 1.9.	Závislost maximální délky optického vlákna na přenosové rychlosti.	12 -
Obr. 1.10.	Graf závislosti maximální délky vlákna na přenosové rychlosti	13 -
Obr. 2.1.	Atmosférická okna	16 -
Obr. 2.2.	Atm. vrstvy se znázorněním zemského povrchu a umístěním OBS.	16 -
Obr. 2.3.	Fluktuace optické intenzity vlivem turbulence atmosféry	18 -
Obr. 2.4.	Příklad zařazení optického bezkabelového spoje do komunikační sítě	19 -
Obr. 2.5.	Model komunikace a místo OBS v modelu komunikace.....	19 -
Obr. 2.6.	Závislost relativní citlivosti detektoru na vlnové délce.	21 -
Obr. 2.7.	Spektrální závislost záření pozadí.....	21 -
Obr. 2.8.	Místa útlumu a zesílení v energetické bilanci OBS	22 -
Obr. 2.9.	Diagram energetické bilance OBS.	22 -
Obr. 2.10.	Znázornění významu veličiny L_0 (pomocné délky)	23 -
Obr. 3.1.	Vývojový diagram programu „fOTON“	25 -
Obr. 3.2.	Nový projekt.	26 -
Obr. 3.3.	Výběr typu požadovaného spoje	26 -
Obr. 3.4.	Zadávání hodnot do programu pro OBS	27 -
Obr. 3.5.	Tlačítka „=“ slouží pro kontrolu vypočtených hodnot.....	27 -
Obr. 3.6.	Energetická bilance OBS.	28 -
Obr. 3.7.	Graf útlumu šířením, atmosférou a turbulencemi	29 -
Obr. 3.8.	Zadávání parametrů OKS.....	29 -
Obr. 3.9.	Obsah souboru „laser.txt“	30 -
Obr. 3.10.	Energetická bilance OKS.	31 -
Tab. 1.1.	Tab. typických hodnot numerických apertur jednotlivých druhů vláken	3 -
Tab. 1.2.	Příklady hodnot BER pro vybrané hodnoty SNR	9 -
Tab. 1.3.	Typy vláken a jejich typické parametry	13 -
Tab. 2.1.	Přehled číselných hodnot V_M a $\alpha_{I,APP}$	17 -
Tab. 2.2.	Tabulka stavů APP podle míry turbulence	18 -
Tab. 2.3.	Dělení optického bezkabelového spoje podle dosahu.....	19 -
Tab. 2.4.	Dělení optického bezkabelového spoje podle přenosové rychlosti.....	20 -

1. ÚVOD

Dnešní doba jde rychle kupředu. Rozvoj nových technologií nabírá čím dál větší tempo. Internet je už snad v každé běžné domácnosti. Stejně tak nároky na nové technologie se více a více zvyšují. Přenosová rychlost řádu 10 Mb/s, která byla před rokem dostatečná nebo i rychlá, dnes vyhovuje jen málokomu. Kromě rychlosti se v moderní době požaduje spolehlivost, dostupnost a popřípadě mobilita. Nejlépe tato kritéria splňuje přenos dat po optických vláknech. Ty jsou bohužel ještě pořád velmi drahá na normální domácí použití, a proto stále hledáme jiná alternativní řešení.

Česká republika je na jednom z předních míst v rozšířnosti sítí s wi-fi technologiemi. Nicméně to je dáno i nepříliš vstřícným chováním našeho vedoucího telefonního operátora. Z takového množství wi-fi sítí plynou i jejich hlavní nevýhody jako je omezený dosah a hlavně zarušenost pásma 2,4 GHz. Máme sice ještě pásmo 5 GHz, ale je jen otázkou času, kdy nebude také dostačovat. Ve větších městech je tato situace skoro kritická.

Nabízí se ale ještě jedno řešení. Toto řešení spojuje to nejlepší z přenosu dat po optických vláknech a wi-fi technologie, navíc eliminuje spoustu jejich nevýhod. Jedná se o přenos dat po optickém bezkabelovém spoji. Výhody jsou nasnadě. Rychlost daleko vyšší než wi-fi (a po dokonalém zvládnutí technologie si troufám říct, že velice blízká optickým vláknům), relativně levná instalace oproti optickým spojům, kde nejdražší částí je pokládka optických vláken a vlákna samotná. Poslední hlavní výhoda je vysoká směrovost spoje, čímž prakticky odpadá možnost zarušení pásma (zde je ovšem nutno počítat s přelety ptáků a mlhou – největší nepřítel tohoto řešení).

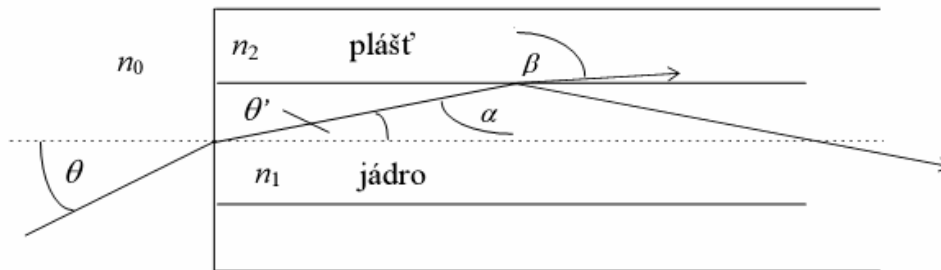
Hlavní směr dalšího vývoje v této oblasti je v současné době zaměřen na výzkum nových metod zvyšujících dostupnost optických bezkabelových spojů nasazených do městské počítačové sítě. Pokračuje vývoj spojů určených ke komunikaci mezi satelity (projekt SILEX podporovaný ESA). Rozvíjí se optická kryptografie s využitím optických bezkabelových spojů s dosahem několika desítek kilometrů pracujících s technikou distribuce kvantových stavů fotonů (QKD). Aktivita v oblasti optických bezkabelových spojů jsou podporovány projekty na úrovni Evropské Unie.

2. OPTICKÝ KABELOVÝ SPOJ

2.1. PRINCIP ŠÍŘENÍ SVĚTLA V OPTICKÝCH VLÁKNECH

První, kdo demonstroval totální vnitřní odraz jako základ optiky vedených vln, byl Tyndall (1820 – 1893). Vlnovou teorii (teorii LP modů) rozpracoval Gloge (1971).

Předpokládejme optické vlákno se skokovým profilem indexu lomu:



Obr. 1.1. Průřez optickým vláknem (podle [1])

(n_0 – index lomu vzduchu, n_1 – index lomu jádra, n_2 – index lomu pláště, θ – úhel dopadu světla na čelo vlákna, θ' – úhel lomu světla v jádru, α – úhel dopadu světla na rozhraní jádro/plášť, β – úhel lomu světla v plášti)

Pro rozhraní vzduch/jádru platí

Snellův zákon: [2]

$$\frac{\sin \theta}{\sin \theta'} = \frac{n_1}{n_0}. \quad (1.1)$$

Podmínkou šíření světla ve vlákně je vznik totálního odrazu na rozhraní jádro/plášť. Předně musí být splněna nerovnost $n_1 > n_2$. Největší úhel dopadu na rozhraní jádro/plášť, při kterém dochází k totálnímu odrazu označme α_{\max} . (při totálním odrazu je $\beta = \pi/2$ a $\sin \beta = 1$)

Platí:

$$\sin \alpha_{\max} = \cos \theta'_{\max} = \frac{n_2}{n_1}, \quad (1.2)$$

$$\sin \theta'_{\max} = \sqrt{1 - \cos^2 \theta'_{\max}}, \quad (1.3)$$

$$\sin \theta_{\max} = \frac{n_1}{n_0} \sqrt{1 - \cos^2 \theta'_{\max}} = \frac{n_1}{n_0} \sqrt{1 - \frac{n_2^2}{n_1^2}} \approx (n_1^2 - n_2^2)^{\frac{1}{2}} \approx (2n_1 \Delta)^{\frac{1}{2}}, \quad (1.4)$$

kde $\Delta = n_2 - n_1$ je rozdíl v indexech lomu jádra a pláště, přičemž $n_1 \cong n_2$; $\Delta \ll 1$; θ_{\max} je tzv. aperturní (příjmový) úhel vlákna.

Veličina $\sin\theta_{\max}$ se definuje jako numerická apertura optického vlákna a je mírou schopnosti vlákna přijmout optický výkon.

Podle technologie výroby a provozu se optická vlákna dělí na:

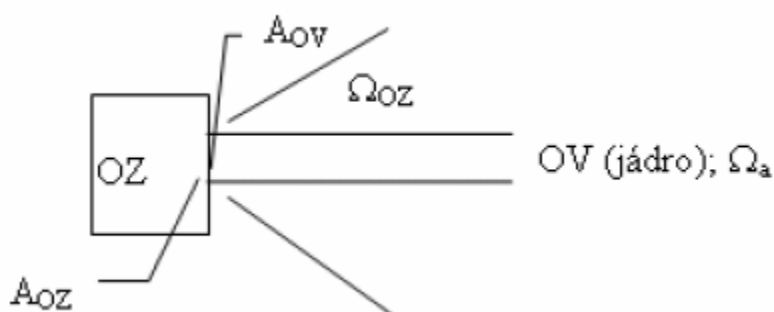
- mnohomodové vlákno se skokovou změnou indexu lomu (SI)
- gradientní vlákno s postupnou změnou indexu lomu (GI)
- jednomodové vlákno (SM)
- vlákno zachovávající polarizaci
- nelineární vlákno

Tab. 1.1. Tabulka typických hodnot numerických apertur jednotlivých druhů vláken

typ vlákna	numerická apertura
mnohomodové	0,3
gradientní	0,3
jednomodové	0,055

NAVÁZÁNÍ OPTICKÉHO VÝKONU DO VLÁKNA:

Pro představu problému navázání výkonu do vlákna je uveden následující obrázek



Obr. 1.2. Navázání vlákna na optický zdroj (podle [7])
(OZ – optický zdroj, A_{OZ} – výstupní apertura zdroje, A_{OV} – vstupní apertura vlákna, Ω_{OZ} – prostorový úhel vyzařování OZ, Ω_a – prostorový příjmový úhel vlákna)

Výkon optického zdroje lze vyjádřit vztahem

$$P = L_{OZ} \Omega_{OZ} A_{OZ}, \quad (1.5)$$

kde L_{OZ} je zář optického zdroje. Výkon zavedený do OV je

$$P_{OV} = L_{OZ} \Omega_a A, \quad (1.6)$$

kde $A = A_{OZ} \cap A_{OV}$ a $\Omega_a = \pi\theta_a^2$ je prostorový příjmový úhel vlákna.

Účinnost vazby navázání výkonu do vlákna $\alpha_{OZ/OV}$ se vyjádří vztahem

$$\alpha_{OZ/OV} = \frac{P_{OV}}{P_{OZ}} = \frac{\Omega_a}{\Omega_{OZ}} \frac{A}{A_{OZ}}. \quad (1.7)$$

Vazba je účinnější, když $A_{OV} \geq A_{OZ}$; pak platí přibližně

$$\alpha_{OZ/OV} = \frac{\Omega_a}{\Omega_{OZ}} \approx \frac{\pi\theta_a^2}{2\pi} \approx 0,5(NA)^2. \quad (1.8)$$

(Bylo předpokládáno, že OZ vyzařuje do poloprostoru jako dokonalá difúzní plocha.)

2.2. ÚTLUM A DISPERZE OPTICKÝCH VLÁKEN

Světlovodná vlákna se vyrábějí z křemenného skla, jehož vlastnosti lze charakterizovat *koeficientem útlumu* a *disperze*. Na grafech je vidět spektrální závislost obou koeficientů. Významná jsou tři okna propustnosti: 850 nm, 1300 nm 1550 nm. Spektrální okno 850 nm nemá z hlediska útlumu ani z hlediska disperze významné pozitivní vlastnosti, ale je charakteristické dobrou cenovou dostupností příslušných pasivních i aktivních prvků. Spektrální okno 1300 nm je charakteristické nejnižším dosažitelným koeficientem disperze a spektrální okno 1550 nm nejnižším dosažitelným koeficientem útlumu. V obou oknech 1300 nm i 1550 nm se používají hlavně jednomodová vlákna, pro okno 850 nm je typické použití multimodových vláken.

Příčiny útlumu jsou: Rayleighův rozptyl v oblasti kratších vlnových délek, rezonanční absorpce na OH skupinách a infračervená absorpce v oblasti delších vlnových délek (rozlišuje se útlum absorpcí a útlum rozptylem).

Příčiny disperze jsou:

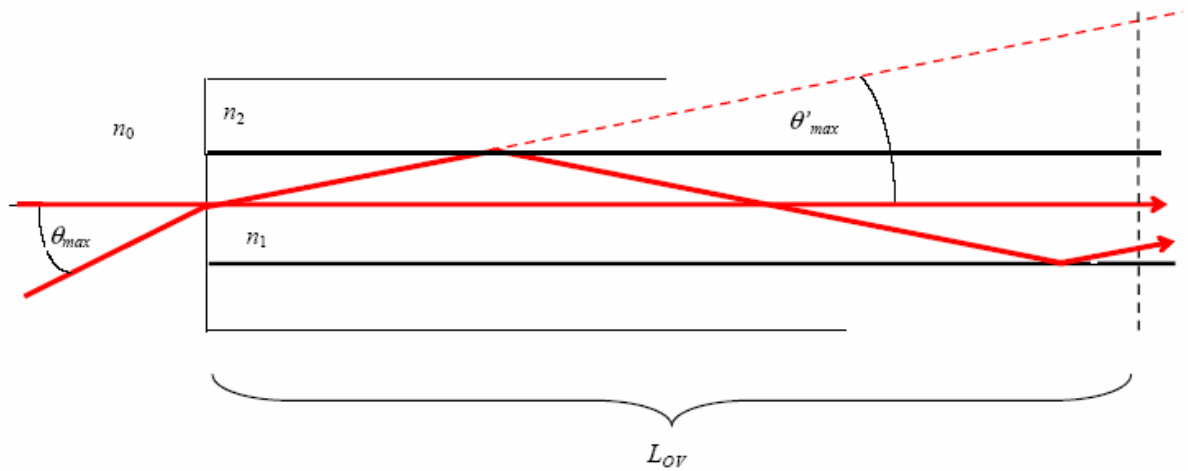
- multimodovost (mnohosměrovost šíření),
- spektrální závislost grupové rychlosti šíření jednotlivých modů,
- spektrální závislost indexu lomu,
- závislost indexu lomu na intenzitě záření.

Podle příčin rozlišujeme disperzi:

- modovou,
- vlnovodnou,
- materiálovou a
- nelineární disperzi.

(Společný projev materiálové a vlnovodné disperze se označuje jako chromatická disperze.)

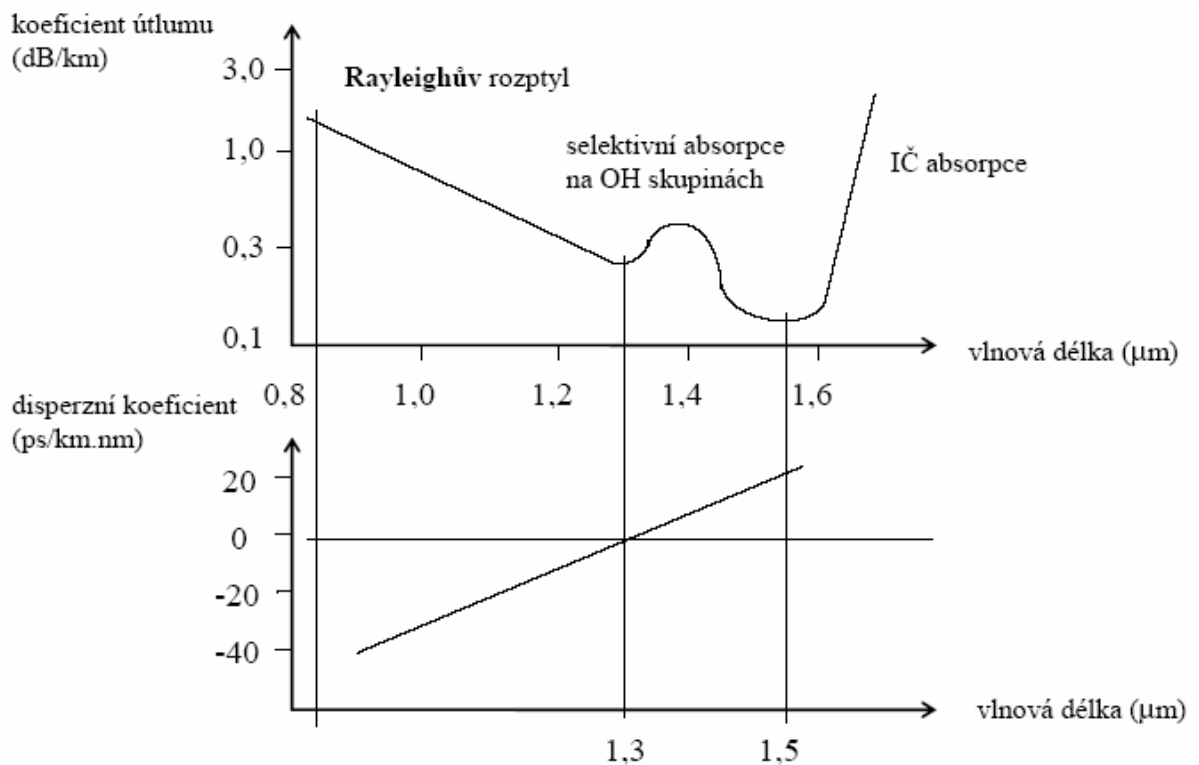
Představu modové disperse umožňuje následující obrázek. (L_{OV} je celková délka vlákna.)



Obr. 1.3. Představa modové disperse (podle [7])

Časová diference signálu na konci vlákna:

$$\Delta t = \frac{n_1}{c_0} \frac{L_{OV}}{\cos \theta'_{\max}} - \frac{n_1}{c_0} L_{OV} = \frac{L_{OV}}{c_0} \frac{n_1 \Delta}{n_2}. \quad (1.9)$$



Obr. 1.4. Spektrální závislost koeficientu útlumu a koeficientu materiálové disperse (podle [7])

Koeficient útlumu $\alpha_{l,OV}$ je definován (v [dB.km⁻¹]):

$$\alpha_{l,OV} = \frac{-1}{L_{OV}} \cdot 10 \log \frac{P_2}{P_1}, \quad (1.10)$$

kde L_{OV} je délka vlákna v km, P_1 je optický výkon na vstupu vlákna a P_2 je optický výkon na výstupu vlákna.

Citlivost přijímače se definuje středním počtem fotonů na jeden bit \bar{n}_0 nebo odpovídajícím výkonem nutným k dosažení požadované přenosové chybovosti BER (obvykle 10^{-9}).

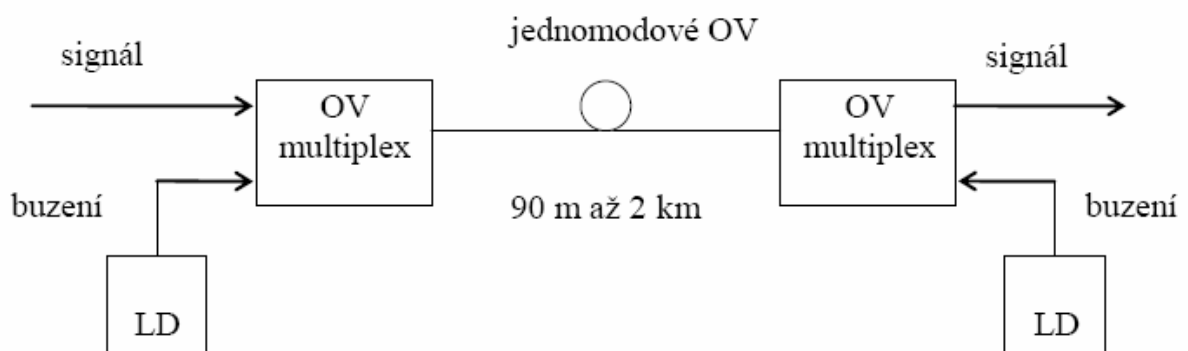
$$P_{0,P} = \hbar \omega \bar{n}_0 \nu_l, \quad (1.11)$$

kde ν_l je přenosová rychlost v bit/s, \bar{n}_0 je střední počet fotonů na jeden bit, \hbar je modifikovaná Planckova konstanta (také redukováná hodnota Planckovy konstanty) a ω je úhlová frekvence světelné vlny.

2.3. OPTICKÉ VLÁKNOVÉ ZESILOVAČE

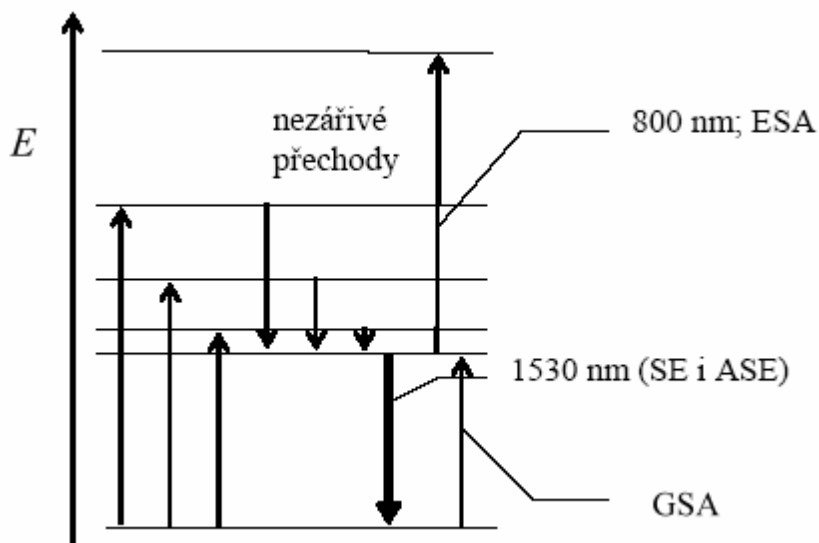
Pro kompenzaci útlumu nebo disperze se využívají dva důležité prvky optické vláknové techniky a sice optovláknové zesilovače a optické opakovače.

První demonstraci optovláknového laseru publikoval v roce 1961 Elias Snitzer (1060 nm). Erbium dotované vláknové zesilovače (EDFA) pro 1550 nm představila v roce 1985 univerzita v Southaptonu. Praseodymem dotované vláknové zesilovače (PDFFA) pro 1300 nm byly oživeny v roce 1991. Pro čerpání optovláknových zesilovačů (OVZ) byly vyvinuty LD: 820 nm, 980 nm, 1480 nm.



Obr. 1.5. Znárodnění principu funkce OVZ. (podle [7])

Erbiem dotované vláknové zesilovače (EDFA; křemenné sklo: Er^{3+})



Obr. 1.6. Energetické hladiny EDFA (čerpání je možné na vlnových délkách 820 nm, 980 nm a 1480 nm). (podle [7])

EDFA pracuje jako tříhladinový systém. Přehled základních jevů:

Zesiluje se jak koherentní signál, tak spontánně emitované fotony, což je příčinou šumu ASE (Amplified Spontaneous Emission). Spontánně emitované fotony indukují emisi dalších fotonů.

Existuje jev GSA (Ground State Absorption), tj. jev, při kterém jsou na základní hladině absorbovány jak fotony budící vlny, tak fotony signální vlny (i fotony šumu ASE). Ionty Er^{3+} jsou excitovány na horní laserovou hladinu přímo, jako kdyby se jednalo o dvouhladinový systém. Podmínka zesilování: zesilování při stimulované emisi musí převýšit zeslabování vlivem jevu GSA. Z této podmínky plynou požadavky na čerpací energii a optimální délku vlákna.

Existuje jev ESA (Excited State Absorption), při kterém je část čerpací energie pohlcena absorpcí fotonů částicemi na excitované hladině.

Při buzení na vlnové délce 820 nm existuje ESA (zvažuje se účinný průřez absorpce ze základní a excitované hladiny). Při buzení na vlnové délce 1480 nm proces ESA se neprojevuje, ale jedná se o nevýhodný kvazi-dvouhladinový systém (zvažuje se průřez absorpce GSA a průřez stimulované emise). Optimální buzení je na vlnové délce 980 nm. (Absence jevu ESA a „kvazi-dvouhladinovosti“.)

Základní vlastnosti a použití OVZ

Základní vlastnosti OVZ:

- vysoké zesílení (40 dB); výkon čerpání 12 mW; výkon vstupního signálu 100 nW
- nízký šum (šumové číslo $F = 3$ dB)
- polarizační nezávislost zesílení
- velká šířka pásma přenosu
- nízké vazební ztráty

Použití OVZ:

- opakovače
- výkonové zesilovače (výstupní signál 100 mW)
- nízkošumové předzesilovače

Existence čistě optických zesilovačů přináší ještě jednu významnou přednost oproti opto-elektronické "regeneraci" - jde o to, že v případě regenerace musí být celé zařízení uzpůsobeno používanému průběhu signálu, aby jej mohlo regenerovat. Při změně průběhu přenášeného signálu je pak nutné regenerační zesilovač vhodně upravit. Naproti tomu při zesílení signálu v čistě optickém zesilovači je jeho tvar a průběh irelevantní, takže při jeho změně není třeba nic dělat. Dokonce i když je přenášeno více "barev" světla současně - každá z nich by obecně vyžadovala samostatnou regeneraci, ale zesílena může být společně. [9]

OPTICKÉ OPAKOVAČE

Opakovač se skládá z přijímače, zesilovače a světlo emitující diody (LED) nebo infra-diody (IRED). Optický signál nejprve převede na elektronický a po z restaurování opět na optický, který je vyslán dále do optického vlákna. Výroba vyžaduje mnohem vyšší přesnost a kvalitu k minimalizaci vnitřního šumu elektronických obvodů. Opakovače patří do první (fyzické) vrstvy referenčního modelu OSI, protože pracují přímo s elektrickým signálem. [8]

Opakovač (repeater) je důležitý hlavně z hlediska optické disperze, kdy dochází k časovému posuvu signálu a následnému zkreslení oproti původnímu signálu.

2.4. NÁVRH OPTOVLÁKNOVÉHO SPOJE

Při návrhu optovláknového spoje musíme brát ohled zejména na útlum přenosové trasy, citlivost přijímače, poměr signálu k šumu a chybovost spoje.

CITLIVOST PŘIJÍMAČE A CHYBOVOST SPOJE

Základním prvkem optického přijímače je fotodioda, která s určitou pravděpodobností (η) mění dopadající fotony (n) na fotoelektrony (m); $m = \eta n$; (n je počet fotonů, m je počet fotoelektronů).

Tato pravděpodobnost je určena převážně několika druhy šumů:

- šum fotonový (šum signálových fotonů, šum pozadí, šum proudu za tmy),
- šum fotoelektronový (fluktuační kvantové účinnosti η) a
- šum zesilovacího procesu (fluktuační G).

Elektronické obvody přijímače jsou zdrojem dalších šumů, které je vhodné charakterizovat veličinou, měřenou na výstupu přijímače (např. variancí elektrického proudu).

Chybovost: (střední pravděpodobnost výskytu chyby na jeden bit)

$$BER \approx \frac{1}{2} \left[1 - \operatorname{erf} \left(\frac{Q}{\sqrt{2}} \right) \right], \quad (1.12)$$

kde $Q \approx \sqrt{SNR}$

a chybová funkce je vyjádřena vztahem

$$\operatorname{erf}(z) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^z e^{-x^2} dx. \quad (1.13)$$

Např. pro $Q = 6$ je $BER = 10^{-9}$ a dále platí

$$SNR \approx Q^2 = 36 \Leftrightarrow 15,6dB.$$

Příklady hodnot BER pro vybrané hodnoty SNR jsou uvedeny v následující tabulce.

Tab. 1.2. Příklady hodnot BER pro vybrané hodnoty SNR

SNR [dB]	≈ 10	$\approx 13,5$	$\approx 15,6$	$\approx 16,9$
BER [-]	10^{-3}	10^{-6}	10^{-9}	10^{-12}

NÁVRH SPOJE

Předpokládejme digitální optovláknový spoj s IM/DD/OOK modulací. Známe-li citlivost přijímače, výkon vysílače, útlum optického vlákna a optických vazeb (konektorů), můžeme určit maximální délku spoje. Musíme rovněž přihlídnout k disperzi vlákna. Dva základní požadavky jsou:

a) Přijímaný výkon musí být větší nebo alespoň roven citlivosti přijímače:

$$P_P \geq P_{0,P}.$$

Doporučuje se $P_P - P_{0,P} = 6$ dB.

b) Časové rozšíření přijímaného impulsu nesmí překročit předepsanou část intervalu pro jeden bit:

$$\sigma_T \leq T.$$

Doporučuje se $\sigma_T = 0,25T = \frac{1}{4v_1}$ (kde v_1 – přenosová rychlost).

Při návrhu spoje se hovoří o dvojitým omezení: útlumovém a disperzním.

Útlumové omezení

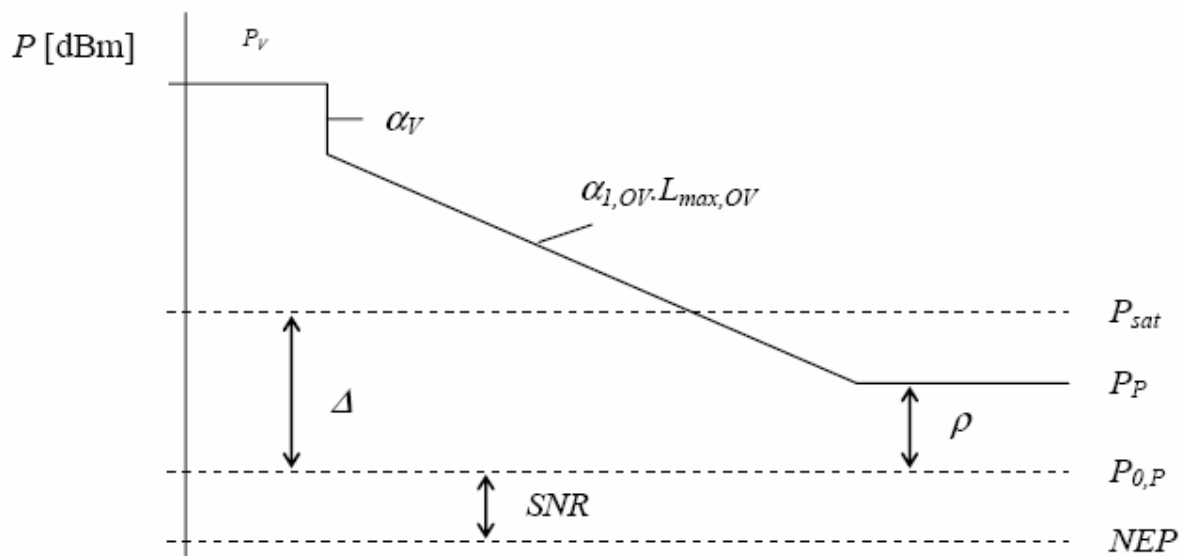
Při analýze útlumového omezení se porovnává:

- výkon vysílače P_V ,
- koeficient útlumu vlákna $\alpha_{l,OV}$,
- vazební ztráty a ztráty konektorů α_V ,
- citlivost přijímače $P_{0,P}$.

Je-li $L_{max,OV}$ maximální délka optického vlákna, platí (v decibelové míře; absolutní veličiny jsou v dBm, relativní veličiny jsou v dB)

$$P_V - \alpha_V - \rho - \alpha_{l,OV} L_{max,OV} = P_{0,P} \text{ (výkonová bilanční rovnice),} \quad (1.14)$$

kde ρ je doporučená rezerva ($\rho = P_P - P_{0,P} = 6$ dB).

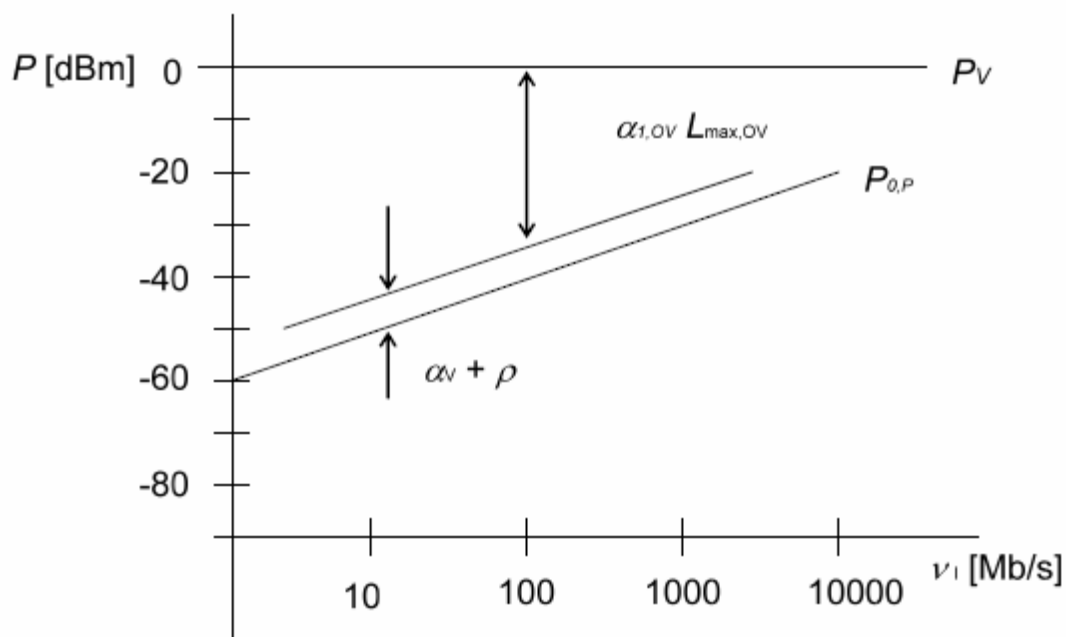


Obr. 1.7. Výkonový úroňový diagram optického spoje (energetická bilance spoje; stacionární model spoje). (podle [7])

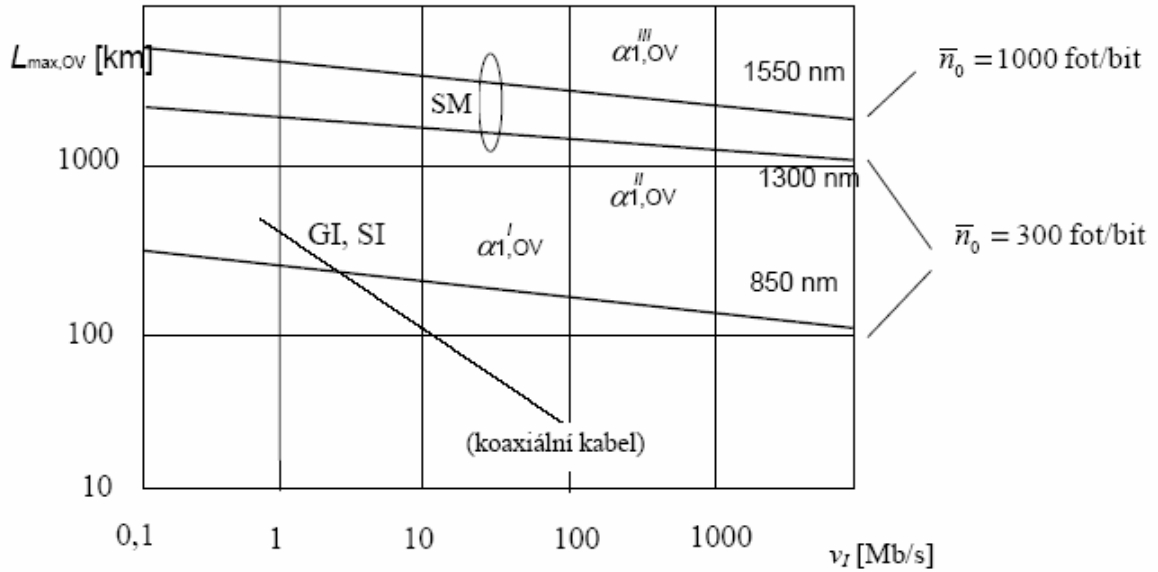
Maximální délku optického vlákna lze po dosažení vyjádřit vztahem

$$L_{max,OV} = \frac{1}{\alpha_{1,OV}} \left(P_V - \alpha_V - \rho - 10 \log \frac{\bar{n}_0 \hbar \omega \nu_1}{10^{-3}} \right) = L_0 - \frac{10}{\alpha_{1,OV}} \log \nu_1, \quad (1.15)$$

kde konstanta $L_0 = \frac{1}{\alpha_{1,OV}} (P_V - \alpha_V - \rho - 30 - 10 \log \bar{n}_0 \hbar \omega)$.



Obr. 1.8. Závislost citlivosti přijímače na přenosové rychlosti a důsledky pro celkovou výkonovou bilanci (podle [7]).



Obr. 1.9. Závislost maximální délky optického vlákna na přenosové rychlosti (veličiny α_V a ρ byly zanedbány, výkon vysílače se předpokládá $P_V = 0$ dBm).

$$\begin{aligned}
 GI : \alpha'_{1,OV} &= 2,5 \text{ dB} \cdot \text{km}^{-1} @ \lambda_0 = 850 \text{ nm}; \\
 SM : \alpha''_{1,OV} &= 0,35 \text{ dB} \cdot \text{km}^{-1} @ \lambda_0 = 1300 \text{ nm}; \\
 SM : \alpha'''_{1,OV} &= 0,16 \text{ dB} \cdot \text{km}^{-1} @ \lambda_0 = 1550 \text{ nm}.
 \end{aligned}$$

Disperzní omezení

Předpokládejme pouze *modovou disperzi*:

$$\sigma_{1,T} = \frac{\sigma_T}{L_{OV}} = \frac{\Delta \cdot n_1}{2c_0} \approx 20 \text{ ns / km @ SI}$$

$$\sigma_{1,T} = \frac{\sigma_T}{L_{OV}} = \frac{\Delta^2 \cdot n_1}{4c_0} \approx 0,2 \text{ ns / km @ GI}$$

Po dosažení doporučené maximální hodnoty σ_T : $\sigma_{1,T} = \frac{\sigma_T}{L_{OV}} = \frac{1}{4L_{OV}v_1} = \frac{\Delta \cdot n_1}{2c_0}$, resp.

$$\sigma_{1,T} = \frac{\sigma_T}{L_{OV}} = \frac{1}{4L_{OV}v_1} = \frac{\Delta^2 \cdot n_1}{4c_0} \text{ je}$$

$$L_{OV}v_1 = \frac{c_0}{2n_1\Delta} \approx 10 \text{ km} \cdot \text{Mb} \cdot \text{s}^{-1} @ \text{SI},$$

$$L_{OV}v_1 = \frac{c_0}{n_1\Delta^2} \approx 2 \text{ km} \cdot \text{Gb} \cdot \text{s}^{-1} @ \text{GI}.$$

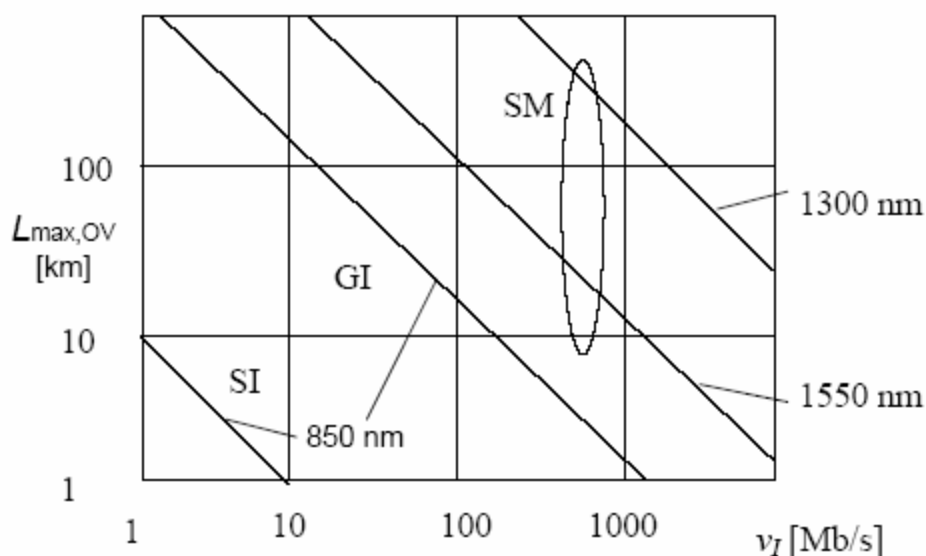
(Veličina $L_{OV}v_I$ je pokládána za vhodný parametr ohodnocující míru disperzního omezení optického vlákna. Délka vlákna je nepřímým úměrná přenosové rychlosti.)

Pro jednomodové vlákno a laser se šířkou spektrální čáry 1 nm je

$$L_{OV}v_I \approx 250 \text{ km.Gb.s}^{-1} @ SM (\lambda = 1300 \text{ nm}),$$

$$L_{OV}v_I \approx 15 \text{ km.Gb.s}^{-1} @ SM (\lambda = 1550 \text{ nm}),$$

Při analýze disperzního omezení se vychází z parametru $L_{OV}v_I$, který nabývá různé hodnoty pro různé typy vláken.

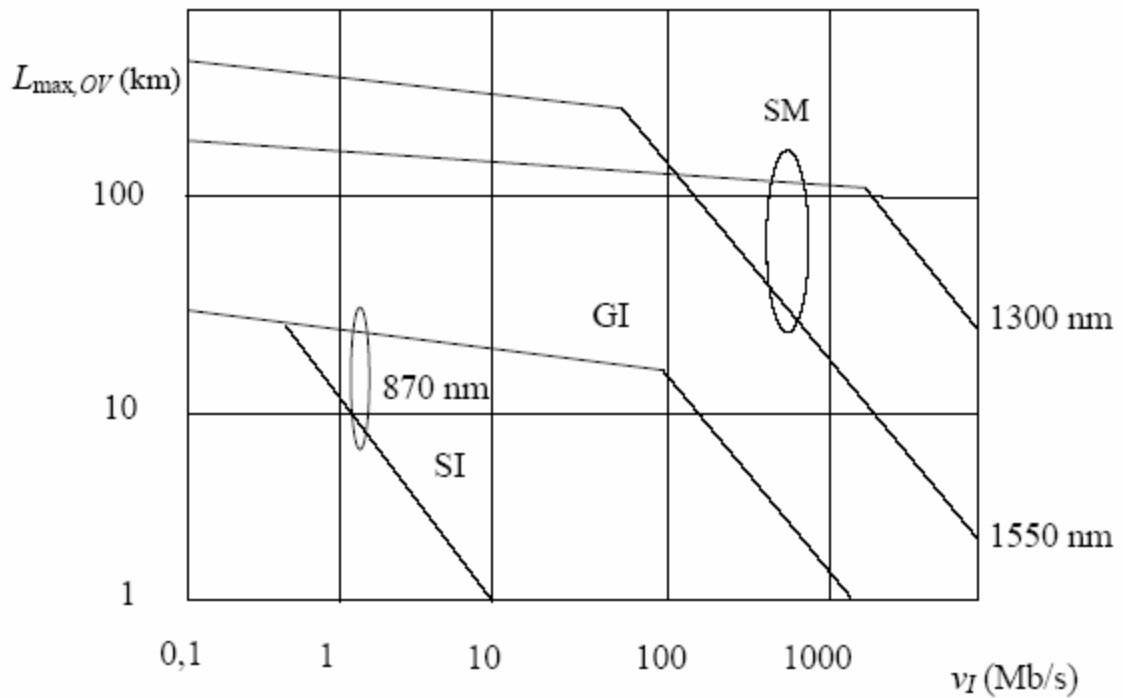


Obr. 1.10. Graf závislosti maximální délky vlákna na přenosové rychlosti (podle [7]).

Tab. 1.3. Typy vláken a jejich typické parametry (D_λ – koeficient chromatické disperze, σ_λ – šířka spektrální čáry laseru)

Typ vlákna	Parametry vlákna	Parametr $L_{OV}v_I$
SI	$n_1 = 1,46$ $\Delta = 0,01$	10 km.Mb.s^{-1}
GI	$n_1 = 1,46$ $\Delta = 0,01$	2 km.Gb.s^{-1}
SM	$D_\lambda = 1 \text{ ps.km}^{-1}.\text{nm}^{-1}$; 1300 nm $\sigma_\lambda = 1 \text{ nm}$ $D_\lambda = 17 \text{ ps.km}^{-1}.\text{nm}^{-1}$; 1550 nm $\sigma_\lambda = 1 \text{ nm}$	250 km.Gb.s^{-1} 15 km.Gb.s^{-1}

Sjednocením grafů z předcházejících dvou obrázků se získá graf závislosti maximální délky vybraných typů vláken na přenosové rychlosti při *disperzním a současně útlumovém omezení* (viz následující obrázek):



Obr. 1.11. Graf závislosti maximální délky vybraných typů vláken na přenosové rychlosti při *disperzním a současně útlumovém omezení* (podle [7]).

3. OPTICKÝ BEZKABELOVÝ SPOJ

3.1. ATMOSFÉRICKÉ PŘENOSOVÉ PROSTŘEDÍ

Optickým bezkabelovým spojem (OBS) se zde rozumí plně duplexní spoj, který k přenosu informace v atmosférickém přenosovém prostředí využívá optickou nosnou vlnu obsahující jeden nebo více vlnově dělených kanálů, jejichž optický výkon je soustředěn do jednoho nebo více úzkých svazků. V nejjednodušším případě je spoj navržen pro přenos signálu s digitální intenzitní modulací (IM/OOK). Jedná se o optické spoje provozované jak v uzavřené místnosti, tak ve volném ovzduší (troposféře) nebo v kosmickém prostoru.

Atmosférické přenosové prostředí má značný vliv na kvalitu přenosu. Je to obecně prostředí nestacionární a nehomogenní (předpokládá se, že také dielektrické, lineární, nedisperzní, izotropní) a jeho vliv na kvalitativní parametry přenosového kanálu má náhodný charakter.

Základními veličinami pro modelování vlivu APP na kvalitu přenosu OBS jsou

- koeficient útlumu $\alpha_{1,atm}$, resp. koeficient extinkce α_e ,
- index lomu prostředí n a
- strukturní parametr indexu lomu C_n^2 .

Bouguerův zákon: (pro ohodnocení extinkce v atmosférickém přenosovém prostředí) [1]

$$dI(\lambda) = -\alpha(\lambda)I(\lambda)dz, \quad (2.1)$$

kde $dI(\lambda)$ je zeslabení optické intenzity na spektrální složce λ při průchodu záření vrstvou atmosféry o tloušťce dz . $\alpha(\lambda)$ je koeficient zeslabení v $[m^{-1}]$.

Integrací dostaneme:

$$I_2(\lambda) = I_1(\lambda) \cdot e^{-\alpha(\lambda)\Delta z}, \quad (2.2)$$

kde I_1 je optická intenzita na začátku vrstvy a I_2 je optická intenzita na konci vrstvy tloušťky Δz . Předpokladem je konstantní hodnoty extinkce na celé vrstvě Δz .

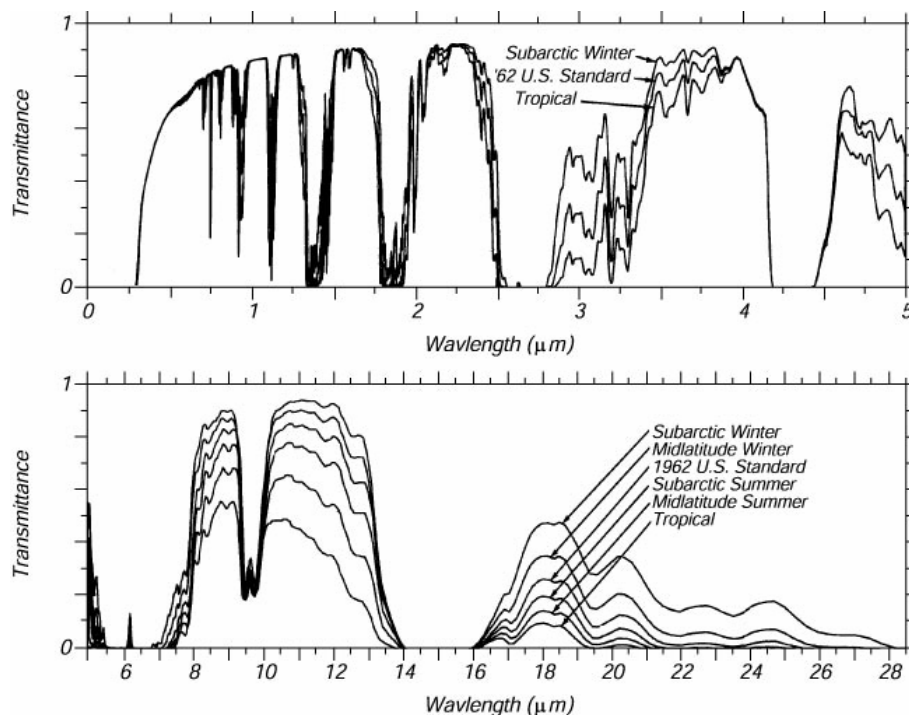
Spektrální propustnost $T_\lambda(\lambda)$ je definována jako:

$$T_\lambda(\lambda) = \frac{I_2(\lambda)}{I_1(\lambda)}. \quad (2.3)$$

Spektrálně střední hodnota propustnosti je:

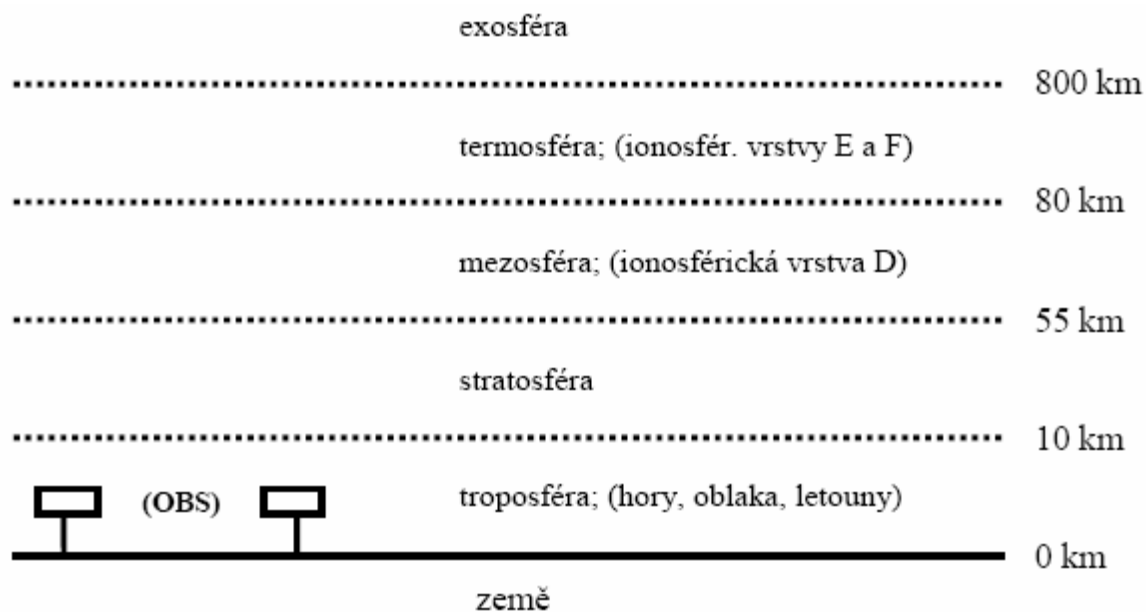
$$T \approx \frac{1}{\lambda_2 - \lambda_1} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} T_\lambda(\lambda) d\lambda \approx \frac{1}{\lambda_2 - \lambda_1} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} e^{-\alpha(\lambda)\Delta z} d\lambda. \quad (2.4)$$

Pokud je navíc $\alpha(\lambda) = \alpha = \text{konst}$ na intervalu $(\lambda_1 \div \lambda_2)$, je $T = e^{-\alpha\Delta z}$.



Obr. 2.1. Atmosférická okna (ilustrativní obrázek – závisí na složení atmosféry v konkrétním místě, relativní propustnost je uvedena pro šest modelů atmosféry a meteorologickou viditelnost 23 km)

Zemská atmosféra se skládá z několika charakteristických vrstev:



Obr. 2.2. Atmosférické vrstvy se znázorněním zemského povrchu a umístěním OBS. (podle [7])

Z obrázku je patrné, že atmosférické přenosové prostředí je součástí troposféry, která je charakteristická tím, že vodní pára zde podléhá kondenzaci, tvoří se zde mlhy a oblaka, projevuje se déšť a sníh, vznikají bouřky, větry a turbulence (větrné víry).

Hlavní negativní jevy, ke kterým dochází při šíření svazku jsou:

- extinkce optické intenzity vlivem
 - absorpce a/nebo rozptylu na molekulách a/nebo aerosolech
 - turbulence troposféry
- fluktuace (kolísání) optické intenzity vlivem
 - turbulence troposféry
 - deště nebo sněhu
 - deformace tvaru svazku
- přerušování svazku letícím ptákem

Střední koeficient extinkce lze vyjádřit jako součet:

$$\alpha = \alpha_{abs} + \alpha_{r,m} + \alpha_{r,\dot{c}} + \alpha_{fluk}, \quad (2.5)$$

kde α_{abs} je člen odpovídající absorpci na molekulách, $\alpha_{r,m}$ je člen odpovídající rozptylu na molekulách (Rayleighův rozptyl), $\alpha_{r,\dot{c}}$ je člen odpovídající rozptylu na částicích (Mieův rozptyl) a α_{fluk} je člen odpovídající střednímu zeslabení intenzity vlivem fluktuací. Pro energetickou bilanci spoje lze každý člen extinkce vyjádřit konkrétním způsobem.

Koeficient útlumu:

$$\alpha_{1,APP} = \frac{-1}{L_{APP}} \cdot 10 \log \frac{I_2}{I_1}. \quad (2.6)$$

Vztah mezi koeficientem extinkce v $[\text{km}^{-1}]$ a koeficientem útlumu v $[\text{dB}/\text{km}]$ je:

$$\alpha^{[\text{km}^{-1}]} = 0,23 \alpha_{1,APP}^{[\text{dB}/\text{km}]}. \quad (2.7)$$

Tab. 2.1. Přehled číselných hodnot V_M a $\alpha_{1,APP}$

V_M [km]	$\alpha_{1,APP}$ [dB.km ⁻¹]	stav atmosféry
< 0,05	> 340	silná mlha
0,2 – 0,5	85 – 34	střední mlha
1,0 – 2,0	14 – 7,0	slabá mlha nebo silný déšť
2,0 – 4,0	7,0 – 3,0	opar
10 – 23	1,0 – 0,5	čistá

Veličina *meteorologická viditelnost* V_M , která je definovaná jako vzdálenost, při níž propustnost APP nabývá hodnoty $T = 0,02 = 2\%$ (při $\lambda = 555 \text{ nm}$).

Pomalé změny přijímaného výkonu vyvolané mlhou nelze analyticky vyjádřit. Vyhodnocení takového procesu se dělá empiricky. Analytický model existuje pouze pro rychlé fluktuace vyvolané deštěm, sněhem nebo vzdušnou turbulencí. Pro modelování vzdušných turbulencí (jinak čisté atmosféry) se používá následující postup:

V atmosféře se předpokládá existence vzdušných vírů (nehomogenit indexu lomu) ve tvaru koulí o průměru $l \in (l_0; L_0)$. Vlastnosti atmosféry dovolují jen určité rozměry vzdušných vírů (řádově od mm do km). V takové atmosféře platí:

Kolmogorův zákon „dvou třetin“:

$$\langle [n(A,t) - n(B,t)]^2 \rangle_{čas} = C_n^2 \rho^{\frac{2}{3}}, \quad (2.8)$$

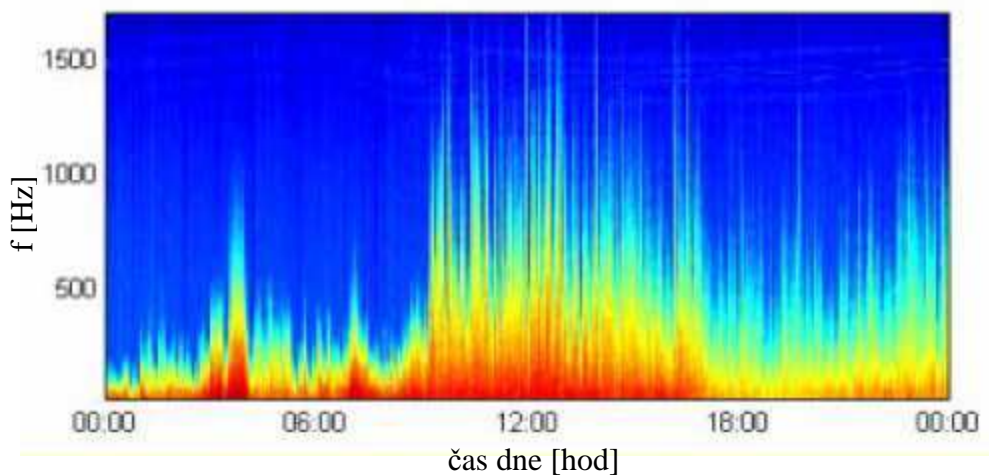
kde výraz na levé straně se nazývá „strukturní funkce indexu lomu“, A, B jsou body prostoru, t je čas, ρ je vzdálenost bodů AB , C_n^2 je strukturní parametr indexu lomu [$m^{-2/3}$].

Tab. 2.2. Tabulka stavů atmosférického přenosového prostředí podle míry turbulence

$C_n^2 [m^{-2/3}]$	míra turbulence
10^{-16}	slabá
10^{-15}	střední
10^{-14}	silná

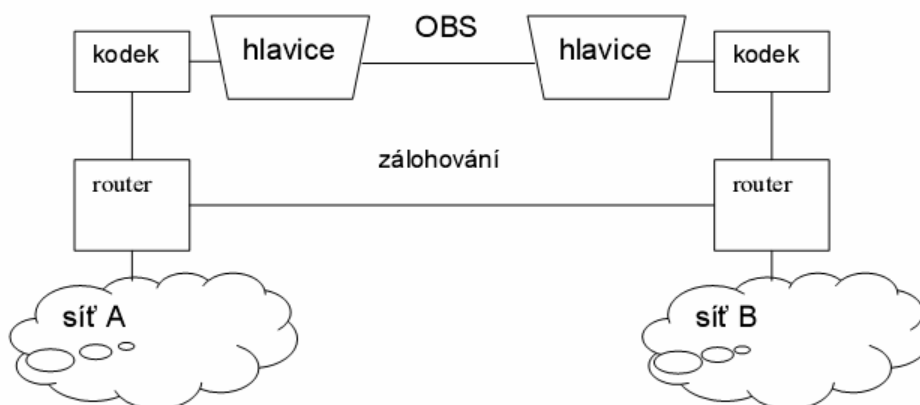
Útlum vlivem turbulence:

$$\alpha_{turb} = 2 \sqrt{23,17 \left(\frac{2\pi}{\lambda} \right)^{\frac{7}{6}} C_n^2 L_{12}^{\frac{11}{6}}}, \quad (2.9)$$



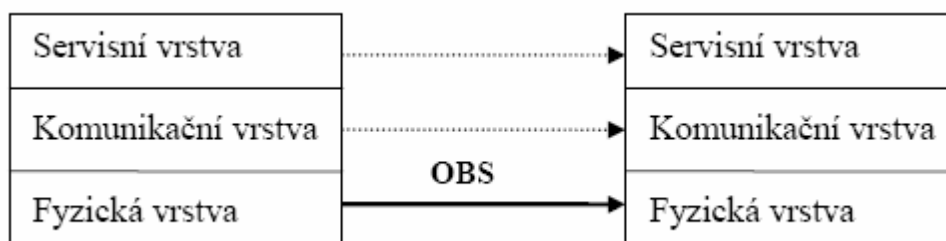
Obr. 2.3. Fluktuace optické intenzity vlivem turbulence atmosféry (podle [10])

3.2. SKLADBA A ENERGETICKÁ BILANCE SPOJE



Obr. 2.4. Příklad zařazení optického bezkabelového spoje do komunikační sítě.
(podle [1])

(„kodek“ je zařízení pro kódování a dekódování signálu, „router“ je směrovač, kterým se volí optimální cesta signálu, zálohování spoje je uskutečňováno pomocí mikrovlnné technologie)



Obr. 2.5. Model komunikace a místo optického bezkabelového spoje v modelu komunikace (podle [7])

Optický bezkabelový spoj ze dvou hlavic pracujících mezi sebou duplexním způsobem. Každá hlavice je připojena (duplexně) k osobnímu počítači, serveru nebo ústředně. Hlavice jsou vybaveny vysílacím a přijímacím systémem pro komunikaci mezi sebou v atmosférickém přenosovém prostředí a vysílacím a přijímacím systémem pro komunikaci mezi hlavicí a nejbližším síťovým počítačem. Tato komunikace se uskutečňuje v optickém vláknu nebo metalickém kabelu.

Tab. 2.3. Dělení optického bezkabelového spoje podle dosahu

charakter dosahu	vzdálenost hlavic
velmi krátký	(0 – 10) m
krátký	(10 – 100) m
střední	(100 – 1000) m
dlouhý	více než 1 km

ROZDĚLENÍ OPTICKÝCH SPOJŮ:

- Podle druhu přenášeného signálu:
 - analogové
 - digitální
- Podle způsobu přenosu:
 - koherentní
 - nekoherentní

Tab. 2.4. Dělení optického bezkabelového spoje podle přenosové rychlosti

charakter rychlosti	přenosová rychlost
nízká	nižší než 1 Mbit/s
střední	(1 – 10) Mbit/s
vysoká	více než 10 Mbit/s

Vysílací systém

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 (VOS).

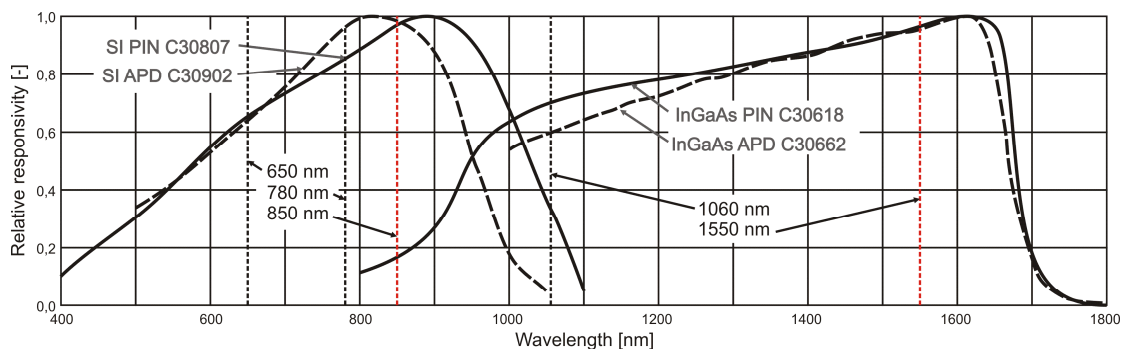
Prostorové tvarování optického svazku vystupujícího z LD zabezpečuje vysílací optická soustava (např. povrstvený plankonvexní dublet). Svazek prochází optickým průzorem (PV), sloužícím jako ochrana proti nečistotám přítomným v atmosféře. Optický průzor nesmí vyvolat deformaci svazku nebo jeho nadměrný útlum. Směrování optické osy VS zabezpečuje směrovací systém ovládaný mechanicky nebo elektronicky. K hrubému nastavení směru slouží dalekohled pevně spojený s 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.

Pro potřeby OBS není nutné provádět kruhovou symetrizaci svazku a svazek je tvarován (kolimován) osově symetrickou optickou soustavou. Při energetické bilanci se přiřazuje původnímu svazku tzv. „energeticky ekvivalentní svazek“ definovaný jako kruhově symetrický *Gaussův svazek*, který má na ose svazku stejnou intenzitu jako původní svazek a v jehož kruhové stopě je obsažen stejný výkon jako v eliptické stopě původního svazku.

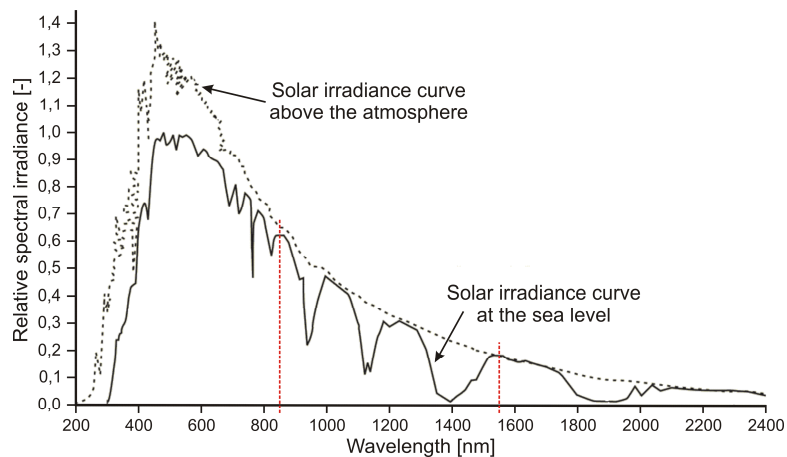
Přijímací systém

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

Přijímaný optický výkon prochází optickým průzorem (PP). Soustředění optického výkonu na aktivní plochu fotodiody zabezpečuje přijímací optická soustava POS (např. Fresnelova čočka). Směrování optické osy PS zabezpečuje zaměřovací systém ovládaný mechanicky nebo elektronicky. Součástí zaměřovacího zařízení je dalekohled pevně spojený s PS. Ke snížení vlivu záření pozadí je v PS použit interferenční filtr navržený s ohledem na vlnovou délku záření.



Obr. 2.6. Závislost relativní citlivosti detektoru na vlnové délce.

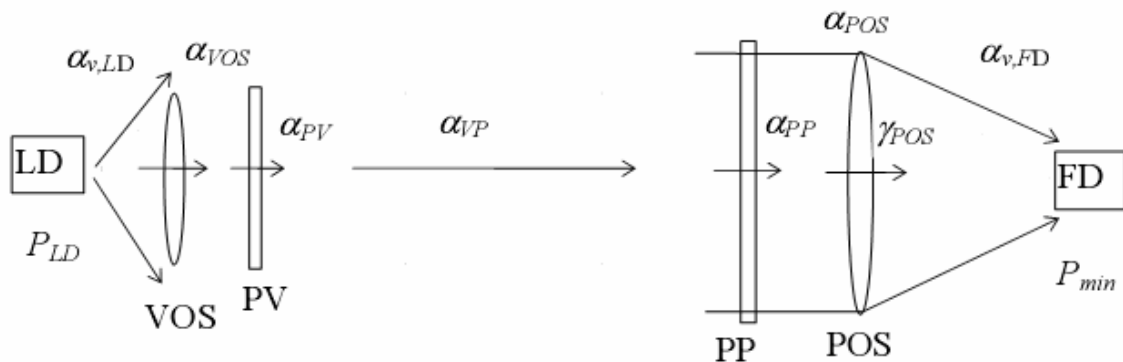


Obr. 2.7. Spektrální závislost záření pozadí. (rušivé signály na daných vlnových délkách)

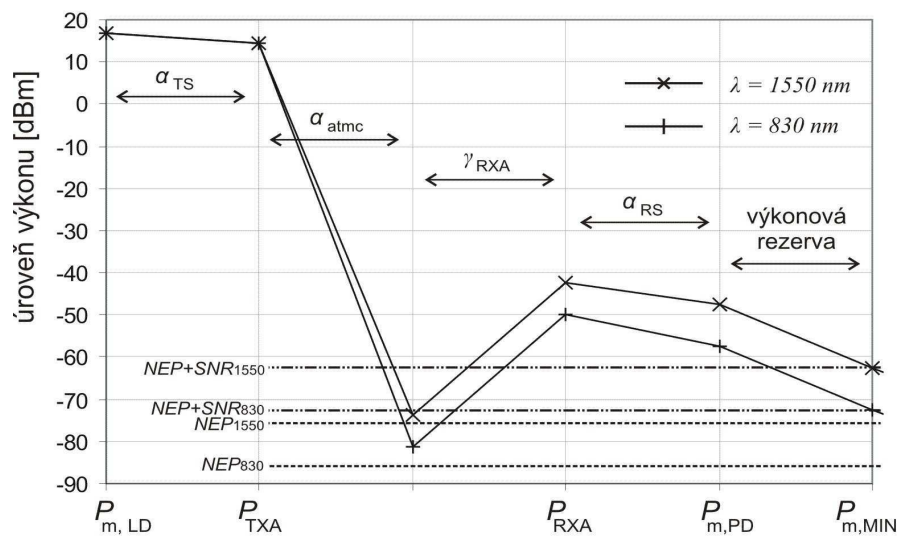
Spektrální zář oblohy je zobrazena na Obr. 2.7. a ukazuje, že i zde jsou některé vlnové délky vhodnější než jiné. Vidíme například, že záření pozadí na vlnových délkách okolo 1550 nm je přibližně o 60-70% nižší než u vlnových délek v okolí 850 nm.

Energetická bilance optického bezkabelového spoje zahrnuje:

- výkon laserové diody P_{LD}
- účinnost vazby „laserová dioda – vysílací optická soustava“ $\alpha_{v,LD}$
- propustnosti vysílací a přijímací optické soustavy α_{VOS} a α_{POS}
- propustnost optických průzorů α_{PV} a α_{PP}
- útlum šířením α_{VP}
- zesílení přijímací optické soustavy γ_{POS}
- účinnost vazby „přijímací optická soustava – fotodioda“ $\alpha_{v,FD}$
- útlum vyvolaný nedokonalostí vzájemného zamíření hlavic spoje α_z
- rezervu spoje na atmosférické přenosové prostředí ρ_{atm}
- minimální hodnotu poměru signálu k šumu SNR_0
- minimální detekovatelný výkon fotodiody P_{min}
- citlivost přijímacího systému P_0
- úroveň přijímaného výkonu, při kterém dochází k saturaci přijímače P_{max}



Obr. 2.8. Místa útlumu a zesílení v energetické bilanci optického bezkabelového spoje. (podle [1])



Obr. 2.9. Diagram energetické bilance OBS.

$P_{m,LD}$ – střední výkon emitovaný laserovou diodou, P_{TXA} – střední výkon na výstupu z vysílací hlavičky, P_{RXA} – úroveň středního výkon dopadajícího na čočku přijímací hlavičky, $P_{m,PD}$ – střední výkon dopadající na přijímací fotodiodu, $P_{m,MIN}$ – minimální úroveň výkonu na fotodiodě potřebná pro „bezchybný“ chod spoje, NEP – úroveň vlastního šumu na přijímací fotodiodě, SNR – požadovaný odstup signál šum odpovídající dané chybovosti spoje BER , α_{TS} – útlum vysílací části, α_{atmc} – útlum šířením atmosférickým přenosovým prostředím, γ_{RXA} – zisk na přijímací čočce, α_{RS} – útlum přijímací části.

Výkonová bilanční rovnice OBS:

$$P_{m,PD} = P_{m,LD} - \alpha_{TS} - \alpha_{RS} - \alpha_{atmc} + \gamma_{RXA}. \quad (2.10)$$

Účinnost vazby $\alpha_{v,LD}$ závisí na úhlové šířce a rozložení svazku vyzařovaném laserovou diodou a na numerické apertuře vysílací soustavy. V decibelové míře se $\alpha_{v,LD}$ vyjádří jako:

$$\alpha_{v,LD} = \left| 10 \log \frac{P_{VOS}}{P_{LD}} \right|, \quad (2.11)$$

kde P_{VOS} je výkon dopadající na aperturu vysílací optické soustavy. V praxi je možno předpokládat, že útlum vazby $\alpha_{v,LD}$ je přibližně 1,5 dB.

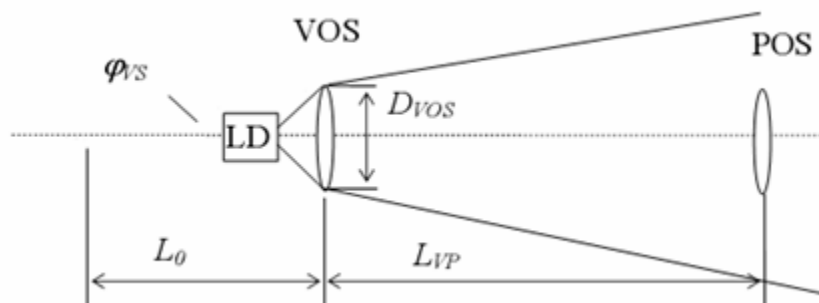
Útlum šířením je určen výrazem:

$$\alpha_{VP} = \left| 20 \log \frac{L_0}{L_0 + L_{VP}} \right|, \quad (2.12)$$

kde L_{VP} je vzdálenost mezi hlavicemi spoje a L_0 je tzv. **pomocná délka**. K vyjádření L_0 je třeba znát průměr vysílací optické soustavy D_{VOS} a úhlovou šířku svazku φ_{VS} :

Pomocná délka:

$$L_0 \approx \frac{D_{VOS}}{\varphi_{VS}}. \quad (2.13)$$



Obr. 2.10. Znárodnění významu veličiny L_0 (pomocné délky) (podle [1])

Zesílení přijímací optické soustavy je dáno poměrem ploch přijímací a vysílací apertury, rozložením intenzity v Gaussově svazku a umístěním středu přijímací apertury v ose Gaussova svazku. V decibelové míře je:

$$\gamma_{POS} = \left| 20 \log \frac{D_{POS}}{D_{VOS}} \right| + 3dB. \quad (2.14)$$

Účinnost vazby „přijímací optická soustava – fotodioda“ $\alpha_{v,FD}$ závisí (za předpokladu konstantního ozáření přijímací apertury) na poměru aktivní plochy fotodiody A_{FD} a velikosti skvrny A_{spot} , kterou v ohniskové rovině přijímací optické soustavy vytváří přijaté světlo. Pro $A_{FD} \geq A_{spot}$ je $\alpha_{v,FD} = 0$ dB.

Rezerva spoje na atmosférické přenosové prostředí ρ_{atm} je odvozena z dlouhodobého měření útlumu atmosférického přenosového prostředí. Např. je možno zvolit $\rho_{1,atm} \cong 6$ dB/km.

Minimální hodnota poměru signálu k šumu SNR_0 se stanovuje v závislosti na typu modulace a požadované chybovosti BER . Pro intenzitní modulaci typu OOK a chybovost spoje $BER = 10^{-6}$ je $SNR_0 = 13,5$ dB.

Minimální detekovatelný výkon přijímače P_{min} závisí na přenosové rychlosti, typu použité fotodiody a šumových parametrech předzesilovače. Pro fotodiodu PIN a přenosovou rychlost $v_I = 10$ Mbit/s bývá hodnota minimálního det. výkonu přijímače $P_{min} \cong -43$ dBm.

Citlivost přijímacího systému je definována jako minimální úroveň přijatého výkonu P_0 , která je nutná k dosažení stanovené hodnoty SNR_0 a vyjádří se jako $P_0 = P_{min} + SNR_0$.

Posledním důležitým parametrem energetické bilance optického bezkabelového spoje je úroveň přijímaného výkonu, při které dochází k **satraci přijímače P_{max}** . **Oblast dynamiky** přijímacího systému Δ_P je pak definovaná výrazem $\Delta_P = P_{max} - P_0$. Oblast dynamiky přijímacího systému je vzhledem k vysoké míře fluktuací přijímaného výkonu (vliv šumu atmosférického přenosového prostředí) významnou veličinou. Její hodnota pro optickou oblast v decibelové míře bývá $\Delta_P = 30$ dB.

Útlum vyvolaný nedokonalostí vzájemného zamíření hlavic spoje α_z je způsoben:

- nezkušeností obsluhy při zaměřování
- mechanickými deformacemi úchytu hlavice při aretaci
- teplotními deformacemi konzol apod.

Empiricky bylo zjištěno, že útlum α_z nepřevyšuje hodnotu 1,5 dB.

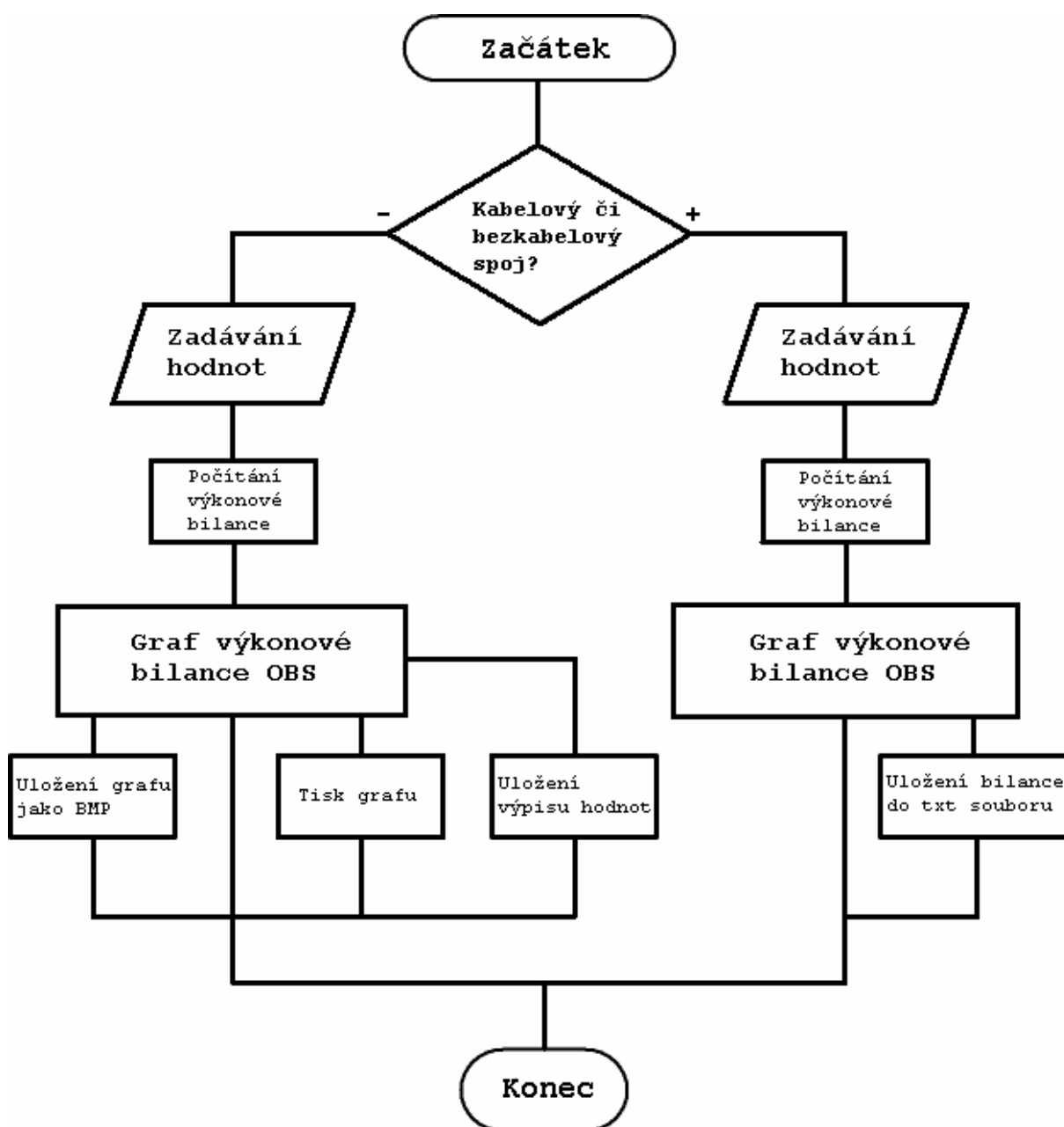
ZÁSADNÍ VÝHODY OBS OPROTI RÁDIOVÝM SPOJŮM

- 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) a
- není nutné zakopávat do země nebo zavěšovat nad zemí optický kabel.

4. NÁVRH VLASTNÍHO PROGRAMU

4.1. VÝVOJOVÝ DIAGRAM

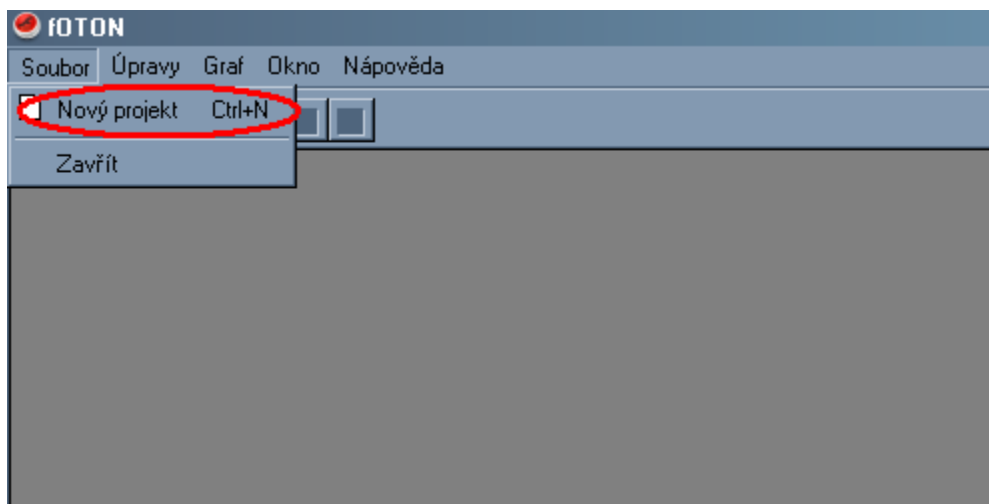
Před programováním jakékoliv aplikace je důležité zhotovit si tzv. „vývojový diagram“. Jedná se o takovou základní kostru programu a pomáhá nám uvědomit si, jak máme při vlastním programování postupovat.



Obr. 3.1. Vývojový diagram programu „fOTON“.

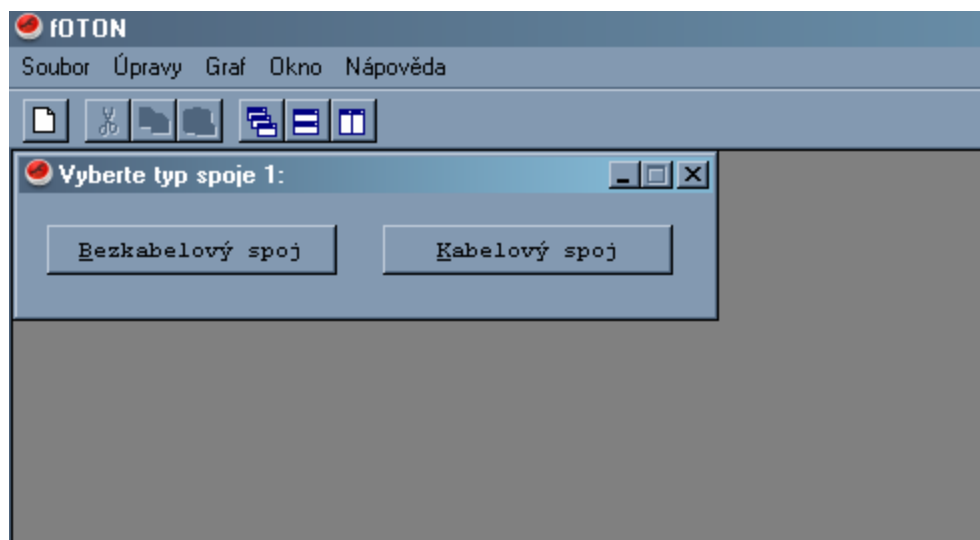
4.2. PŘEDSTAVENÍ VLASTNÍHO PROGRAMU

Po spuštění programu vybereme z nabídky „Soubor“ položku „Nový projekt“ nebo jen klepneme na ikonku s bílým papírem.



Obr. 3.2. Nový projekt.

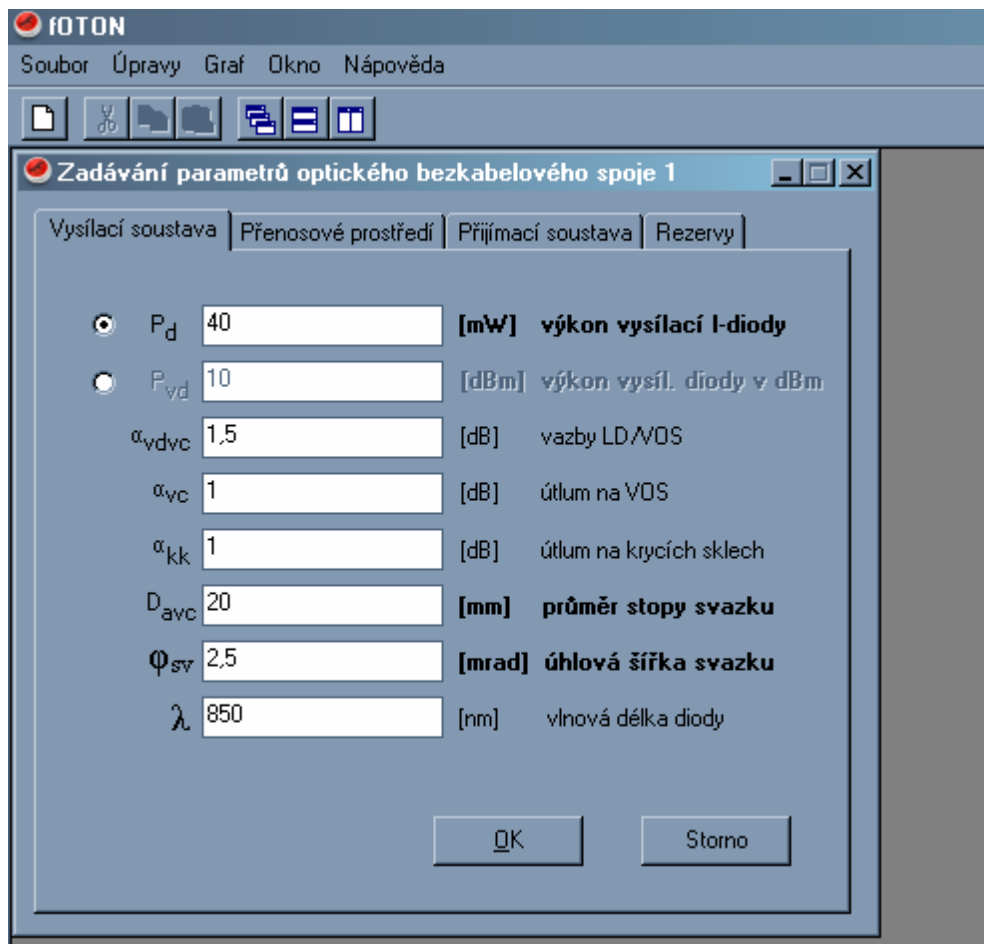
Tím se otevře nové okno, ze kterého už lze vybrat typ spoje, jehož výkonovou bilanci chceme spočítat.



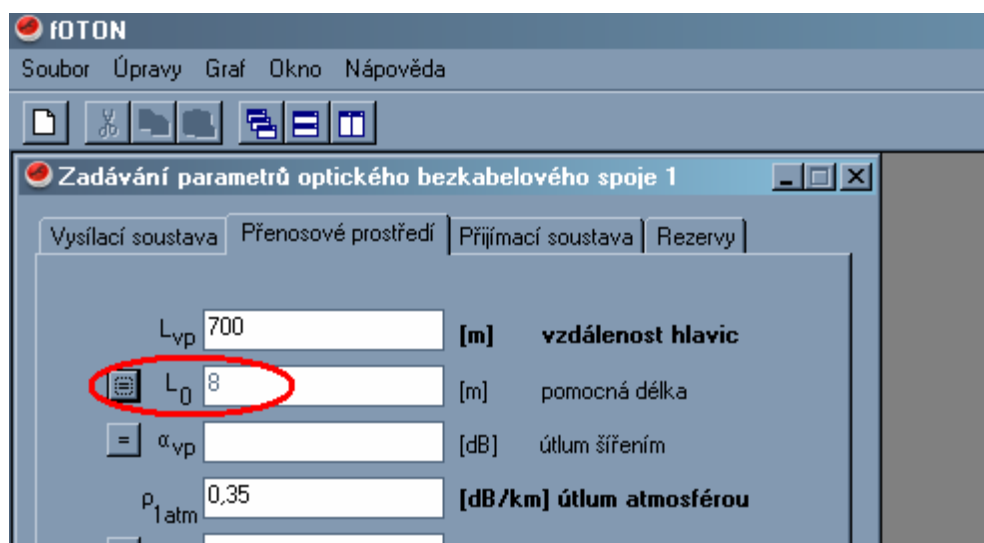
Obr. 3.3. Výběr typu požadovaného spoje.

Po výběru typu spoje následuje zadávání hodnot jednotlivých útlumů, výkonu vysílače, vzdálenosti apod.

OPTICKÝ BEZKABELOVÝ SPOJ

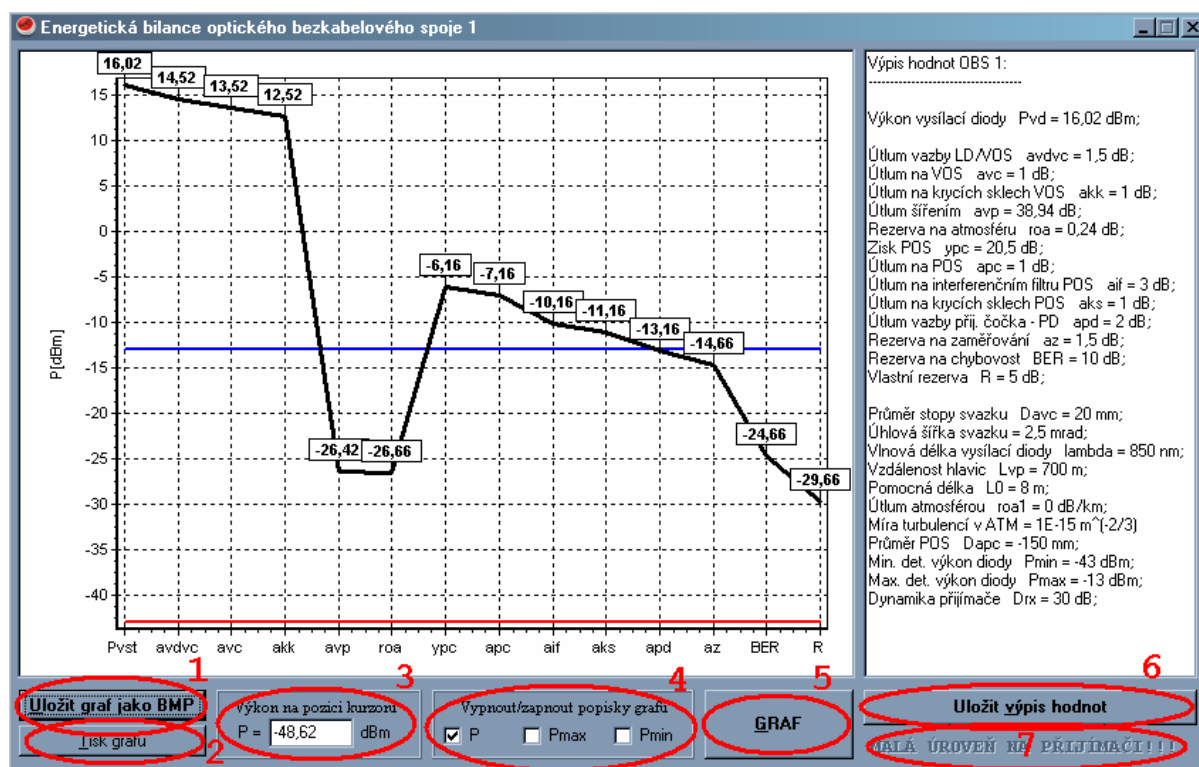


Obr. 3.4. Zadávání hodnot do programu pro OBS.



Obr. 3.5. Tlačítka „=” slouží pro kontrolu vypočtených hodnot (není nutné na ně klikat).

Energetickou bilanci OBS zobrazíme stiskem tlačítka „OK“. Objeví se v novém okně spolu s výpisem hodnot a ovládacími tlačítky.



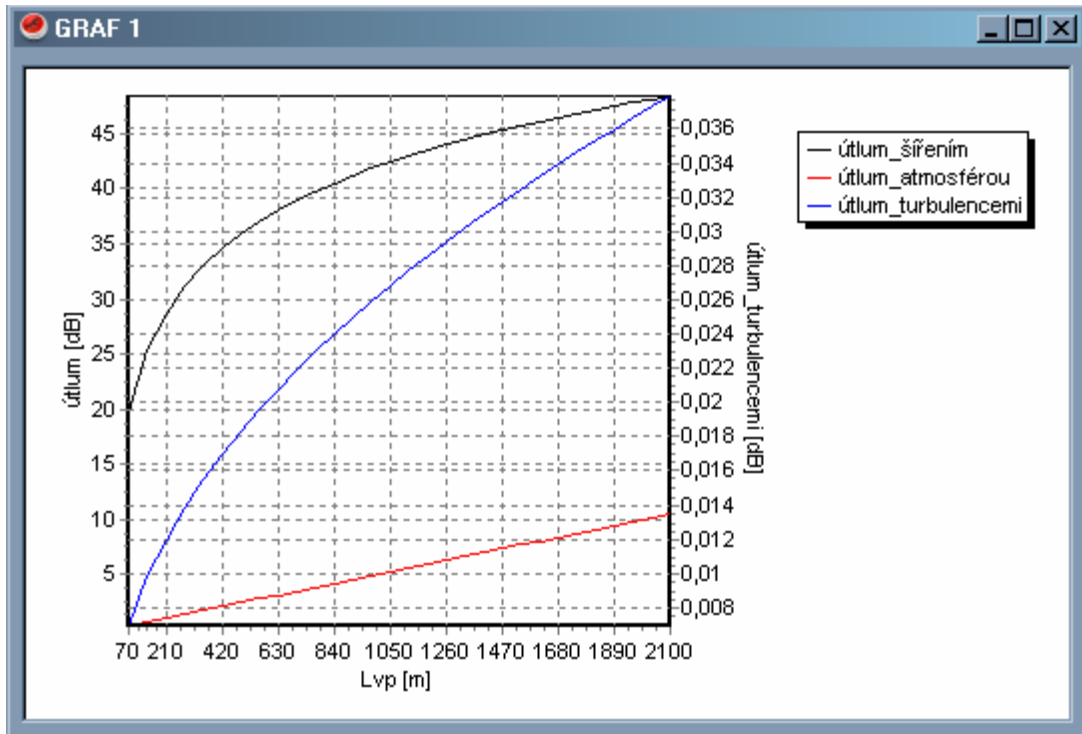
Obr. 3.6. Energetická bilance OBS.

Na Obr. 3.6. je vidět energetická bilance OBS. Největší část okna zabírá samotný graf bilance. Černě je křivka útlumu, modře maximální detekovatelný výkon diody a červeně minimální detekovatelný výkon diody. Vpravo je výpis hodnot počítaného spoje (jsou zde jak hodnoty zadané, tak i vypočítané).

Spodní část obsahuje ovládací prvky a tlačítka. (jsou zakroužkována červeně spolu s číslem)

Bližší popis jednotlivých částí:

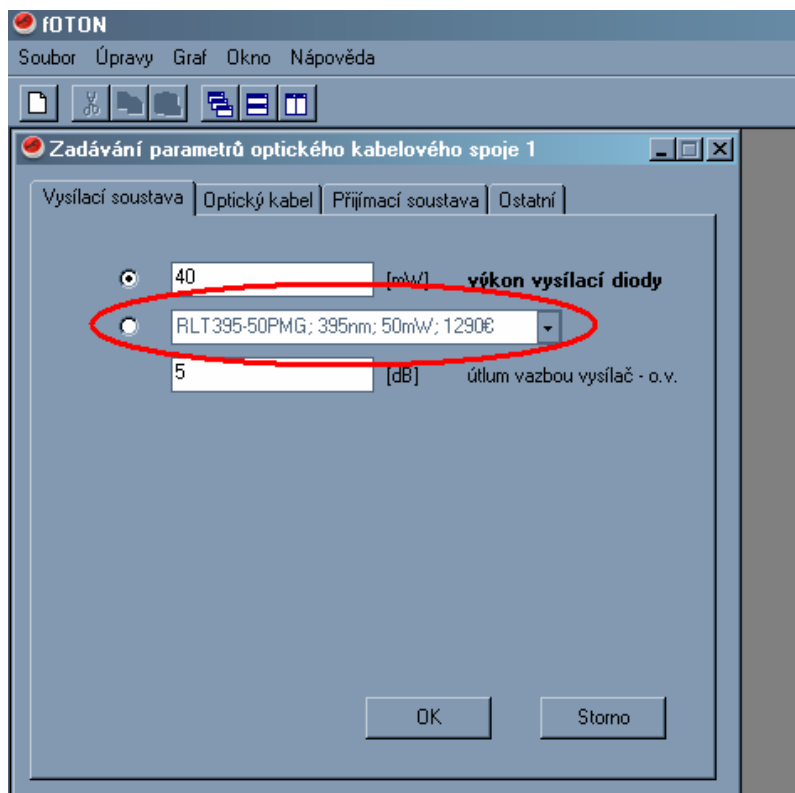
- 1 – Uložení grafu do bitmapy (jako obrázek) společně s výběrem cesty.
- 2 – Tisk grafu (bez podrobnějších možností).
- 3 – Výkon na pozici kurzoru (zobrazuje výkon na aktuální pozici myši v grafu).
- 4 – Vypnout/zapnout popisky grafu (možnost vypnout/zapnout popisky s hodnotami).
- 5 – GRAF (zobrazení útlumu šířením, atmosférou a turbulencemi pro 10% - 300% L_{vp}).
- 6 – Uložení výpisu hodnot do textového souboru spolu s výběrem cesty.
- 7 – Malá úroveň na přijímači (rozsvítí se červeně pokud je na přijímači malá úroveň výkonu).



Obr. 3.7. Graf útlumu šířením, atmosférou a turbulencemi pro 10% - 300% L_{vp} .

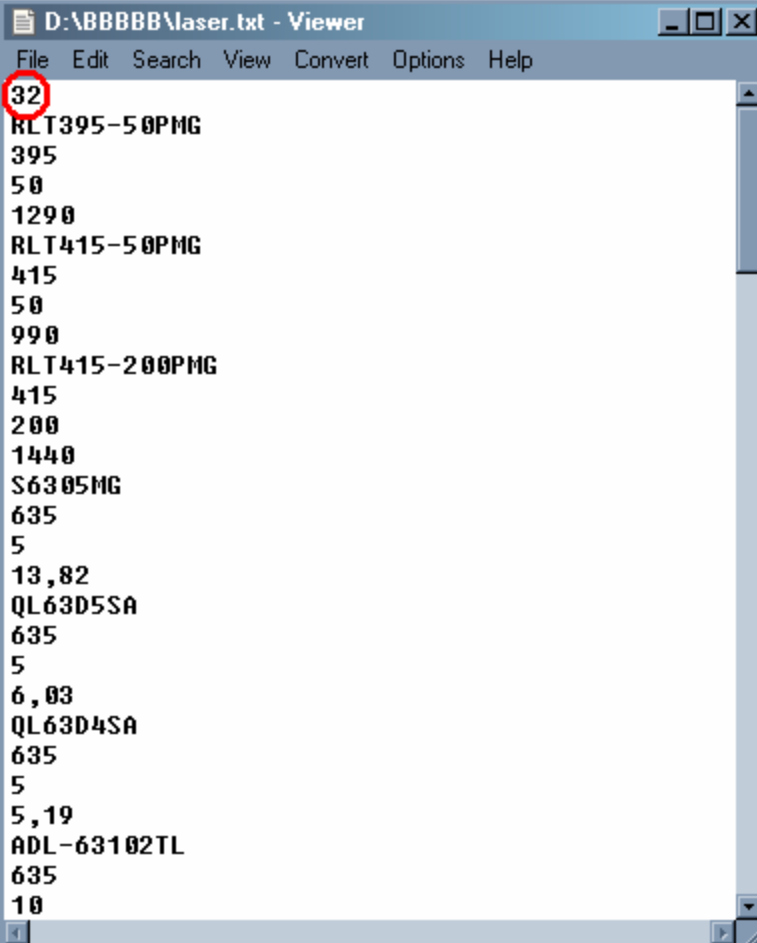
OPTICKÝ KABELOVÝ SPOJ

Takto vypadá zadávání parametrů pro optický kabelový spoj.



Obr. 3.8. Zadávání parametrů OKS.

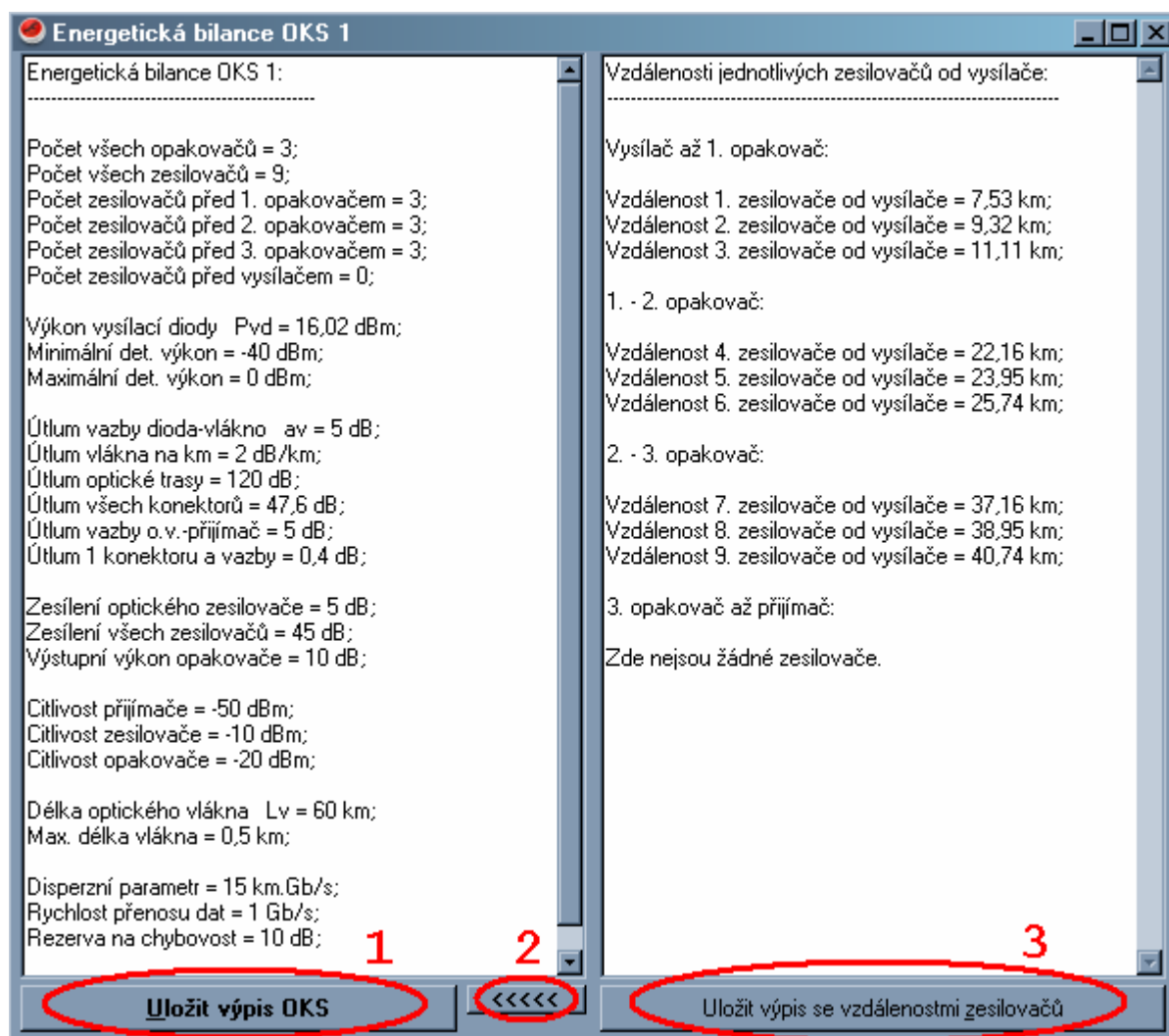
V červeném kroužku na Obr. 3.8. je vyjížděcí menu, které obsahuje různé typy laserů načítaných z textového souboru „laser.txt“. Tento soubor lze samozřejmě upravit i uživatelem, musíme však dbát na správnou hodnotu úplně prvního čísla v tomto souboru, které udává celkový počet laserů. Po přidání nového laseru nebo odebrání je totiž nutno ručně zadat správnou hodnotu počtu laserů.



```
D:\BBBBBB\laser.txt - Viewer
File Edit Search View Convert Options Help
32
RLT395-50PMG
395
50
1290
RLT415-50PMG
415
50
990
RLT415-200PMG
415
200
1440
S6305MG
635
5
13,82
QL6305SA
635
5
6,03
QL6304SA
635
5
5,19
ADL-63102TL
635
10
```

Obr. 3.9. Obsah souboru „laser.txt“ (zakroužkovaná je hodnota počtu laserů, pak následuje název laseru, vlnová délka v nm, výkon v mW a cena v eurech laseru)

Po stisku tlačítka „OK“ v zadávání parametrů optického kabelového spoje vyskočí samotné okno energetické bilance OKS. Jedná se o textový výpis. Jsou zde vypočteny jednotlivé útlupy na trase a nutný počet optických opakovačů a optovláknových zesilovačů, aby spoj spolehlivě pracoval.



Obr. 3.10. Energetická bilance OKS.

Bližší popis jednotlivých tlačítek:

- 1 – Uložení výpisu OKS do textové souboru (otevře se okno s výběrem cesty).
- 2 – „<<<<<<“ toto tlačítko slouží pro skrytí nebo odkrytí okna s výpisem vzdáleností.
- 3 – Uložení výpisu se vzdálenostmi zesilovačů (uloží do vlastního souboru, nikoliv do výpisu OKS)

5. ZÁVĚR

Tato bakalářská práce se zabývá návrhem optických kabelových a bezkabelových spojů a problematikou s tím spojenou. Optické bezkabelové spoje mají obrovskou budoucnost hlavně v metropolitních sítích, kde jsou velké problémy se zaručením přenosového pásma různých wireless technologií a odposloucháváním. Tyto úskalí řeší optické bezkabelové spoje už ve své podstatě. Vysílají v bezlicenčních pásmech, jelikož se jedná o světlo laseru a díky vysoké směrovosti svazku je téměř nemožné je odposlouchávat. Muselo by tím dojít k přerušení svazku a to se dá lehce monitorovat. V budoucnosti by po zvládnutí této technologie mohlo dojít k nahrazení optických kabelových spojů, alespoň na kratší vzdálenosti.

Na nahrazení optického kabelového spoje na delší vzdálenosti si ovšem budeme muset ještě dlouho počkat. Hlavně díky své přenosové rychlosti, která je opravdu bezkonkurenční. Nicméně součásti optovláknových spojů jsou stále příliš drahé na běžné domácí použití, a tak se optické spoje využívají převážně v páteřních sítích. V poslední době došlo v tomto odvětví ke značnému pokroku, ať už snížením útlumu některých typů vláken na 0,1 dB/km nebo vynálezem EDFA (erbium doped fiber amplifier) zesilovačů, které zesilují optický signál bez nutnosti převést ho na elektrický a zpět.

Cílem této práce bylo naprogramovat aplikaci pro výpočet energetické bilance optického kabelového a bezkabelového spoje pracující v operačním systému Windows XP. Pro tento úkol byl zvolen všeobecně známý a používaný programovací jazyk C, konkrétně vývojové prostředí kompilátoru C++ Builder 6, které umožňuje objektově orientované programování. Výstupem tohoto programu je pro bezkabelový spoj graf energetické bilance, který zároveň zjišťuje, jestli je spoj možno vůbec realizovat a pro kabelový spoj textový soubor s počtem použitých optovláknových zesilovačů (s jejich vzdáleností od vysílače) a opakovačů s ohledem na útlumové a disperzní omezení.

Simulace bezkabelového spoje v tomto programu pomůže ušetřit finanční prostředky, které tak mohou být využité pro jiné účely, protože umožní zjistit případné nedostatečné rezervy spoje, aniž bychom jej museli fakticky stavět. Z grafického znázornění jsme už lehce schopni určit, kde je potřeba něco změnit nebo upravit, zvýšit výkon apod. Z energetické bilance kabelového spoje jsme schopni určit, kolik je potřeba použít optovláknových zesilovačů a kde je umístit při daném útlumu vlákna a kolik bude potřeba optických opakovačů při dané přenosové rychlosti.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] WILFERT, O.: *Optoelektronika*, Skriptum FEKT VUT Brno
- [2] SALEH, B.E.A., TEICH, M.C.: *Základy fotoniky*, MATFYZPRESS Praha 1994
- [3] KASAP, S.O. *Optoelectronics and Photonic: Principles and Practices*. New Jersey: Prentice Hall, 2001. 340 s. ISBN 0-201-61087-6
- [4] WILFERT, O., NĚMEČEK, J. *The Transmitting Optical System of the Atmosphere Optical Link*. In Proceedings of the International Conference RADIOELEKTRONIKA 96. Brno: VUT v Brně, . s. 204 - 207, ISBN 80-214-061
- [5] WILFERT, O., PROKEŠ, A. *Metodika výpočtu útlumového diagramu optického směrového spoje*. In Sborník přednášek celostátní konference s mezinárodní účastí TELEKOMUNIKACE'97. Brno: VUT, 1997, s. 154-156, ISBN 80-214-088
- [6] WILFERT, O. *Optické bezkabelové spoje*. Habilitační práce. Brno 2004.
- [7] WILFERT, O. *Fotonika a optické komunikace*. Skriptum FEKT VUT Brno
- [8] <http://cs.wikipedia.org/wiki/Repeater>
- [9] <http://www.earchiv.cz/b00/b1200005.php3>
- [10] WILFERT, O. *Nové metody optických komunikací ve volném prostoru*. Elektronická prezentace VUT v Brně. Brno 2006.

SEZNAM ZKRATEK

OBS	optický bezkabelový spoj
OKS	optický kabelový spoj
APP	atmosférické přenosové prostředí
OZ	optický zdroj
OV	optické vlákno
OVZ	optovláknový zesilovač
LD	laserová dioda
VS	vysílací systém
VOS	vysílací optická soustava
PV	optický průzor vysílače
PP	optický průzor přijímače
POS	přijímací optická soustava
FD	fotodioda
PS	přijímací systém
PZ	předzesilovač

SEZNAM SYMBOLŮ

n	[-]	index lomu prostředí
θ_{\max}	[rad]	aperturní (příjmový) úhel vlákna
\bar{n}_0	[-]	střední počet fotonů na jeden bit
\hbar	[J.s]	modifikovaná Planckova konstanta
ω	[rad.s ⁻¹]	úhlová frekvence světelné vlny
v_l	[bit/s]	přenosová rychlost
α	[dB;dB/km]	útlum
ρ	[dB]	rezerva
Δ	[dB;-]	dynamika
C_n^2	[m ^{-2/3}]	strukturní parametr indexu lomu
$\alpha_e(\lambda)$	[km ⁻¹]	koeficient extinkce
I	[W/m ²]	optická intenzita
P	[W]	výkon
γ	[dB]	zesílení
SNR_0	[dB]	minimální hodnota poměru signálu k šumu
L	[m]	délka
D	[m]	průměr
φ	[rad]	úhlová šířka svazku
BER	[-]	chybovost
A	[-]	aktivní plocha, apertura
Δt	[s]	časová diference
P_0	[dBm]	citlivost
c_0	[m/s]	rychlost světla
σ	[s]	časové rozšíření impulsu
Ω	[sr]	prostorový úhel
NA	[-]	numerická apertura
F	[-]	šumové číslo
η	[-]	fluktuace kvantové účinnosti
G	[-]	fluktuace
T	[s]	perioda signálu
f	[Hz]	frekvence signálu
λ	[m]	vlnová délka
NEP	[dB]	výkon šumu
D_λ	[ps.km ⁻¹ .nm ⁻¹]	koeficient chromatické disperze
σ_λ	[m]	šířka spektrální čáry laseru
$T_\lambda(\lambda)$	[-]	spektrální propustnost
V_M	[m]	meteorologická viditelnost

Přílohy

Příloha č.1: Vzorový protokol „*Počítačové řešení energetické bilance optického bezkabelového a kabelového spoje*“.

Datum měření:

Jméno a příjmení:

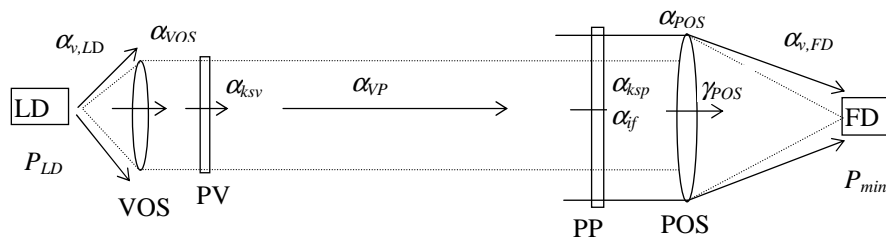
Název úlohy: **1. POČÍTAČOVÉ ŘEŠENÍ ENERGETICKÉ BILANCE OPTICKÉHO BEZKABELOVÉHO A KABELOVÉHO SPOJE**

Ústav radioelektroniky FEKT VUT v Brně

1. Teoretické poznatky

OPTICKÝ BEZKABELOVÝ SPOJ

Energetická bilance OBS zahrnuje (viz Obr.1): výkon laserové diody P_{LD} , útlum vazby „laserová dioda - vysílací optická soustava“ $\alpha_{v,LD}$, útlumy na vysílací a přijímací optické soustavě α_{VOS} a α_{POS} , útlumy na krycích sklech $\alpha_{k,sv}$ a $\alpha_{k,sp}$, útlum na interferenčním filtru α_{if} , útlum šířením α_{VP} , zisk přijímací optické soustavy γ_{POS} , útlum vazby „přijímací čočka - fotodioda“ $\alpha_{v,FD}$, útlum vyvolaný nedokonalostí vzájemného zamíření hlavic spoje α_z , rezervu spoje na atmosférické přenosové prostředí ρ_{atm} , požadovanou minimální hodnotu poměru signálu k šumu SNR_0 , minimální detekovatelný výkon fotodiody P_{min} , citlivost přijímače systému P_0 a úroveň přijímaného výkonu, při které dochází k saturaci přijímače P_{max} .



Obr.1. Místa útlumu a zesílení v energetické bilanci OSS

Útlum vazby $\alpha_{v,LD}$ závisí na úhlové šířce a rozložení svazku vyzařovaného LD a na numerické apertuře vysílací optické soustavy. V decibellové míře se $\alpha_{v,LD}$ vyjádří

$$\alpha_{v,LD} = \left| 10 \log \frac{P_{VOS}}{P_{LD}} \right|,$$

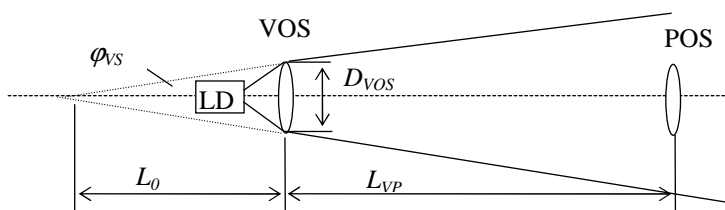
kde P_{VOS} je výkon dopadající na aperturu vysílací optické soustavy. V praxi je možno předpokládat, že útlum vazby $\alpha_{v,LD}$ je přibližně 1,5 dB.

Útlum šířením je určen výrazem

$$\alpha_{VP} = \left| 20 \log \frac{L_0}{L_0 + L_{VP}} \right|,$$

kde L_{VP} je vzdálenost mezi hlavicemi spoje a L_0 je tzv. pomocná délka (viz obr.2). K vyjádření L_0 je třeba znát průměr vysílací optické soustavy D_{VOS} a úhlovou šířku vysílaného svazku φ_{VS} :

$$L_0 \approx \frac{D_{VOS}}{\varphi_{VS}}.$$



Obr.2. Znázornění významu veličiny L_0 (pomocné délky)

Zisk přijímací optické soustavy je dán poměrem ploch přijímací a vysílací apertury, rozložením intenzity v Gaussově svazku a umístěním středu přijímací apertury v ose Gaussova svazku. V decibelové míře je

$$\gamma_{POS} = \left| 20 \log \frac{D_{POS}}{D_{VOS}} \right| + 3 \text{dB}.$$

Útlum vazby „přijímací optická soustava - fotodioda“ $\alpha_{v,FD}$ závisí (za předpokladu konstantního ozáření přijímací apertury) na poměru aktivní plochy fotodiody A_{FD} a velikosti skvrny A_{spot} , kterou v ohniskové rovině přijímací optické soustavy vytváří přijaté světlo. Pro $A_{FD} \geq A_{spot}$ je $\alpha_{v,FD} = 0 \text{ dB}$.

Rezervu spoje na atmosférické přenosové prostředí ρ_{atm} lze odvodit z dlouhodobého měření útlumu atmosférického přenosového prostředí (APP). Podle dosavadních výsledků je jednotková rezerva spoje na APP $\rho_{l,atm} \cong 6 \text{ dB/km}$.

Požadovaná minimální hodnota SNR_0 se stanovuje v závislosti na typu modulace a požadované chybovosti BER . Pro intenzitní modulaci typu OOK a chybovost spoje $BER = 10^{-6}$ je $SNR_0 = 13,5 \text{ dB}$. Minimální detekovatelný výkon přijímače P_{min} závisí na přenosové rychlosti, typu použité fotodiody a šumových parametrech předzesilovače. Pro fotodiodu PIN a přenosovou rychlost $v_l = 10 \text{ Mbit/s}$ bývá hodnota minimálního detekovatelného výkonu přijímače $P_{min} \cong -43 \text{ dBm}$. Citlivost přijímacího systému je definovaná jako minimální úroveň přijatého optického výkonu P_0 , která je nutná k dosažení stanovené hodnoty SNR_0 a vyjádří se $P_0 = P_{min} + SNR_0$.

Posledním důležitým parametrem energetické bilance OSS je úroveň přijímaného výkonu, při které dochází k saturaci přijímače P_{max} . Oblast dynamiky přijímacího systému Δ_p je pak definovaná výrazem $\Delta_p = P_{max} - P_0$. Oblast dynamiky přijímacího systému je vzhledem k vysoké míře fluktuací přijímaného výkonu (vliv šumu APP) významnou veličinou. Její hodnota v decibelové míře bývá $\Delta_p \cong 30 \text{ dB}$ ($\approx D_{rx}$).

Útlum vyvolaný nedokonalostí vzájemného zamíření hlavic spoje α_z je způsoben různými vlivy: nezkušeností obsluhy při zamířování, mechanickými deformacemi úchytu hlavice při aretaci, teplotními deformacemi konzol a pod. Empiricky bylo zjištěno, že útlum α_z nepřevyšuje hodnotu 1,5 dB.

OPTICKÝ KABELOVÝ SPOJ

Energetická bilance OKS zahrnuje: výkon laserové diody P_{LD} , útlum vazby „vysílač – optické vlákno“ $\alpha_{v,OV}$, útlum konektoru a vazby $\alpha_{v,k}$, útlum v optickém vláknu α_{ov} , útlum vazbou „optické vlákno – přijímač“ $\alpha_{v,op}$, zisk případných optovláknových zesilovačů a opakovačů γ_{OVZ} , rezervu na chybovost spoje ρ_{BER} , minimální detekovatelný výkon přijímače P_{min} , citlivost přijímače systému $P_{0,P}$ a úroveň přijímaného výkonu, při které dochází k saturaci přijímače P_{max} .

Předpokládejme digitální optovláknový spoj s IM/DD/OOK modulací. Známe-li citlivost přijímače, výkon vysílače, útlum optického vlákna a optických vazeb (konektorů), můžeme určit maximální délku spoje. Musíme rovněž přihlídnout k disperzi vlákna. Dva základní požadavky jsou:

a) Přijímaný výkon musí být větší nebo alespoň roven citlivosti přijímače:

$$P_P \geq P_{0,P}.$$

Doporučuje se $P_P - P_{0,P} = 6$ dB.

b) Časové rozšíření přijímaného impulsu nesmí překročit předepsanou část intervalu pro jeden bit:

$$\sigma_T \leq T.$$

Doporučuje se $\sigma_T = 0,25T = \frac{1}{4v_1}$ (kde v_1 – přenosová rychlost).

Při návrhu spoje se hovoří o dvojím omezení: útlumovém a disperzním.

Útlumové omezení

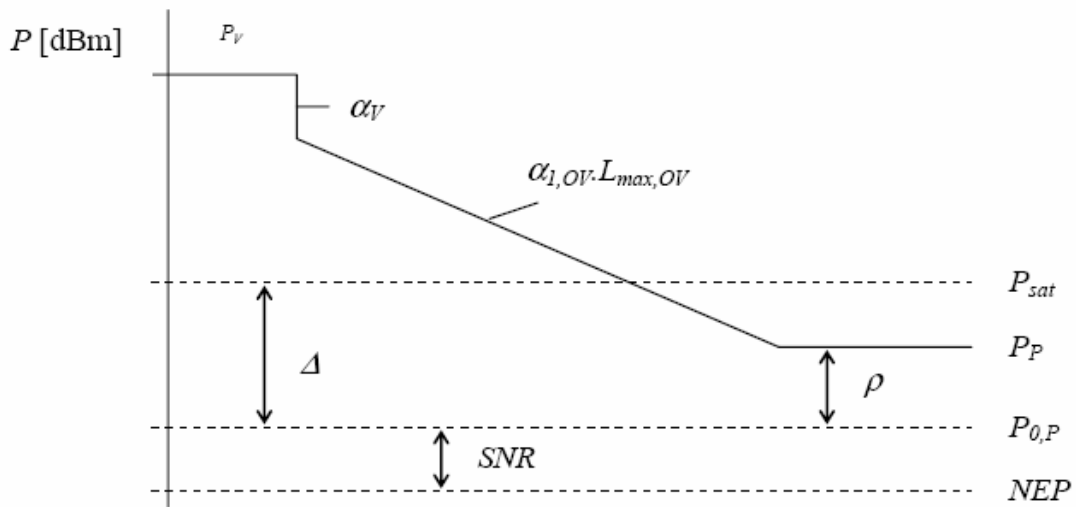
Při analýze útlumového omezení se porovnává:

- výkon vysílače P_V ,
- koeficient útlumu vlákna $\alpha_{l,OV}$,
- vazební ztráty a ztráty konektorů α_V ,
- citlivost přijímače $P_{0,P}$.

Je-li $L_{max,OV}$ maximální délka optického vlákna, platí (v decibelové míře; absolutní veličiny jsou v dBm, relativní veličiny jsou v dB)

$$P_V - \alpha_V - \rho - \alpha_{l,OV} L_{max,OV} = P_{0,P} \text{ (výkonová bilanční rovnice),}$$

kde ρ je doporučená rezerva ($\rho = P_P - P_{0,P} = 6$ dB).



Obr. 3. Výkonový úrovnňový diagram optického spoje

Hodnoty útlumu pro různé typy vláken a pro různé vlnové délky:

$$GI : \alpha'_{1,OV} = 2,5 \text{ dB.km}^{-1} @ \lambda_0 = 850 \text{ nm};$$

$$SM : \alpha''_{1,OV} = 0,35 \text{ dB.km}^{-1} @ \lambda_0 = 1300 \text{ nm};$$

$$SM : \alpha'''_{1,OV} = 0,16 \text{ dB.km}^{-1} @ \lambda_0 = 1550 \text{ nm}.$$

Disperzní omezení

Předpokládejme pouze *modovou disperzi*:

$$\sigma_{1,T} = \frac{\sigma_T}{L_{OV}} = \frac{\Delta \cdot n_1}{2c_0} \approx 20 \text{ ns / km @ SI}$$

$$\sigma_{1,T} = \frac{\sigma_T}{L_{OV}} = \frac{\Delta^2 \cdot n_1}{4c_0} \approx 0,2 \text{ ns / km @ GI}$$

Po dosažení doporučené maximální hodnoty σ_T : $\sigma_{1,T} = \frac{\sigma_T}{L_{OV}} = \frac{1}{4L_{OV}v_1} = \frac{\Delta \cdot n_1}{2c_0}$, resp.

$$\sigma_{1,T} = \frac{\sigma_T}{L_{OV}} = \frac{1}{4L_{OV}v_1} = \frac{\Delta^2 \cdot n_1}{4c_0} \text{ je}$$

$$L_{OV}v_1 = \frac{c_0}{2n_1\Delta} \approx 10 \text{ km.Mb.s}^{-1} @ \text{SI},$$

$$L_{OV}v_1 = \frac{c_0}{n_1\Delta^2} \approx 2 \text{ km.Gb.s}^{-1} @ \text{GI}.$$

(Veličina $L_{OV}v_1$ je pokládána za vhodný parametr ohodnocující míru disperzního omezení optického vlákna. Délka vlákna je nepřímou úměrnou přenosové rychlosti.)

Pro jednomodové vlákno a laser se šířkou spektrální čáry 1 nm je

$$L_{OV}v_1 \approx 250 \text{ km.Gb.s}^{-1} @ SM (\lambda = 1300 \text{ nm}),$$

$$L_{OV}v_1 \approx 15 \text{ km.Gb.s}^{-1} @ SM (\lambda = 1550 \text{ nm}),$$

Při analýze disperzního omezení se vychází z parametru $L_{OV}v_1$, který nabývá různé hodnoty pro různé typy vláken.

Tab. 1. Typy vláken a jejich typické parametry (D_λ – koeficient chromatické disperze, σ_λ – šířka spektrální čáry laseru)

Typ vlákna	Parametry vlákna	Parametr $L_{OV}v_1$
SI	$n_1 = 1,46$ $\Delta = 0,01$	10 km.Mb.s^{-1}
GI	$n_1 = 1,46$ $\Delta = 0,01$	2 km.Gb.s^{-1}
SM	$D_\lambda = 1 \text{ ps.km}^{-1}.\text{nm}^{-1}$; 1300 nm $\sigma_\lambda = 1 \text{ nm}$ $D_\lambda = 17 \text{ ps.km}^{-1}.\text{nm}^{-1}$; 1550 nm $\sigma_\lambda = 1 \text{ nm}$	250 km.Gb.s^{-1} 15 km.Gb.s^{-1}

2. Zadání

- Navrhněte základní uspořádání optického bezkabelového spoje, aby jeho dosah byl 700 m, přenosová rychlost 10 Mb/s a chybovost menší než 10^{-6} .
- Navrhněte základní uspořádání optického kabelového spoje pro jednomodové vlákno a vlnovou délku 1550 nm, aby jeho dosah byl 150 km, přenosová rychlost 0,4 Gbit/s a chybovost menší než 10^{-9} .
- Ověřte správnost návrhu v programu fOTON a pro OBS vytiskněte jeho energetickou bilanci a graf závislosti útlumu šířením, atmosféry a turbulencemi na vzdálenosti hlavic pro $L_{vp} = 700 \text{ m}$.

3. Použité přístroje a pomůcky

- osobní počítač (program fOTON)
- katalog komerčně vyráběných prvků

4. Pracovní postup

OPTICKÝ BEZKABELOVÝ SPOJ

Pomocí vztahů uvedených v teoretickém úvodu vypočítejte útlupy a zisky jednotlivých prvků optického spoje. Sestrojte výkonový diagram. Ve výkonovém diagramu spoje zkontrolujte výsledek energetické bilance.

Zadejte parametry spoje do programu fOTON a ověřte váš výpočet.

Za dané parametry považujte:

$\alpha_{v,LD} = 1,5$ dB; $\alpha_{POS} = \alpha_{VOS} = 1$ dB; $\alpha_{ksv} = \alpha_{ksp} = 0,6$ dB; $\alpha_{v,FD} = 0$ dB; $D_{VOS} = 20$ mm;
 $D_{POS} = 150$ mm; $L_{VP} = 700$ m; $\varphi_{VS} = 2,5$ mrad

V přijímacím systému použijte jako detektor křemíkovou PIN fotodiodu s integrovaným předzesilovačem (Silicon PIN photodiode with preamplifier module)

Ve vysílacím systému použijte vhodnou laserovou diodu $\lambda = (800 - 1000)$ nm,

$P_{LD} = (10 - 50)$ mW

Pouzdra vysílací laserové diody i přijímací fotodiody volte typu R.

Ostatní veličiny odhadněte podle doporučení uvedená v části „teoretické poznatky“. Další veličiny, které figurují v programu fOTON a nejsou uvedené v části „teoretické poznatky“ zanedbejte.

OPTICKÝ KABELOVÝ SPOJ

Pomocí vztahů uvedených v teoretickém úvodu vypočtete, kolik optických zesilovačů a opakovačů je potřeba umístit na optickou trasu a v jakých vzdálenostech, aby bylo splněno útlumové i disperzní omezení a citlivosti jednotlivých prvků.

Zadejte parametry spoje do programu fOTON a ověřte váš výpočet.

Za dané parametry považujte:

$\alpha_{v,ov} = 5$ dB; $L_{max} = 0,5$ km; $\alpha_{v,k} = 0,4$ dB; $\alpha_{v,op} = 5$ dB; $P_{0,P} = -30$ dB; $\gamma_{OVZ} = 10$ dB

Ve vysílacím systému použijte vhodnou laserovou diodu:

$P_{LD} = (10 - 50)$ mW

Ostatní veličiny nechte tak, jak jsou uvedené v programu.

VZOROVÉ ŘEŠENÍ

OPTICKÝ BEZKABELOVÝ SPOJ

$$L_0 \approx \frac{D_{VOS}}{\varphi_{VS}} = \frac{20\text{mm}}{2,5\text{mrad}} = 8\text{m}$$

$$\alpha_{VP} = \left| 20 \log \frac{L_0}{L_0 + L_{VP}} \right| = \left| 20 \log \frac{8}{8 + 700} \right| = 38,9\text{dB}$$

$$\rho_{\text{atm}} = L_{VP} * \rho_{1,\text{atm}} = 700 \text{ m} * 0,006 \text{ dB/m} = 4,2 \text{ dB}$$

$$\gamma_{POS} = \left| 20 \log \frac{D_{POS}}{D_{VOS}} \right| + 3\text{dB} = \left| 20 \log \frac{150\text{mm}}{20\text{mm}} \right| + 3\text{dB} = 20,5\text{dB}$$

$$P_{\min} = -43 \text{ dBm}, P_{\max} = -13 \text{ dBm}$$

$$P_{LD} = 20 \text{ mW} \Rightarrow 13,01 \text{ dB} \text{ (výkon vysílací laserové diody - zvolíme)}$$

$$L_{v,LD} = P_{LD} - \alpha_{v,LD} + \alpha_{VOS} + \alpha_{ksv}) = 13,01 - 1,5 = 11,51 \text{ dB}$$

$$L_{VOS} = L_{v,LD} - \alpha_{VOS} = 11,51 - 1 = 10,51 \text{ dB}$$

$$L_{ksv} = L_{VOS} - \alpha_{ksv} = 10,51 - 0,6 = 9,91 \text{ dB}$$

$$L_{VP} = L_{ksv} - \alpha_{VP} = 9,91 \text{ dB} - 38,94 \text{ dB} = -29,03 \text{ dB}$$

$$L_{\text{atm}} = L_{VP} - \rho_{\text{atm}} = -29,03 \text{ dB} - 4,2 \text{ dB} = -33,23 \text{ dB}$$

$$A_{POS} = L_{\text{atm}} + \gamma_{POS} = -33,23 \text{ dB} + 20,5 \text{ dB} = -12,73 \text{ dB}$$

$$L_{POS} = A_{POS} - \alpha_{POS} = -12,73 - 1 = -13,73 \text{ dB}$$

$$L_{if} = L_{POS} - \alpha_{if} = -13,73 - 0 = -13,73 \text{ dB}$$

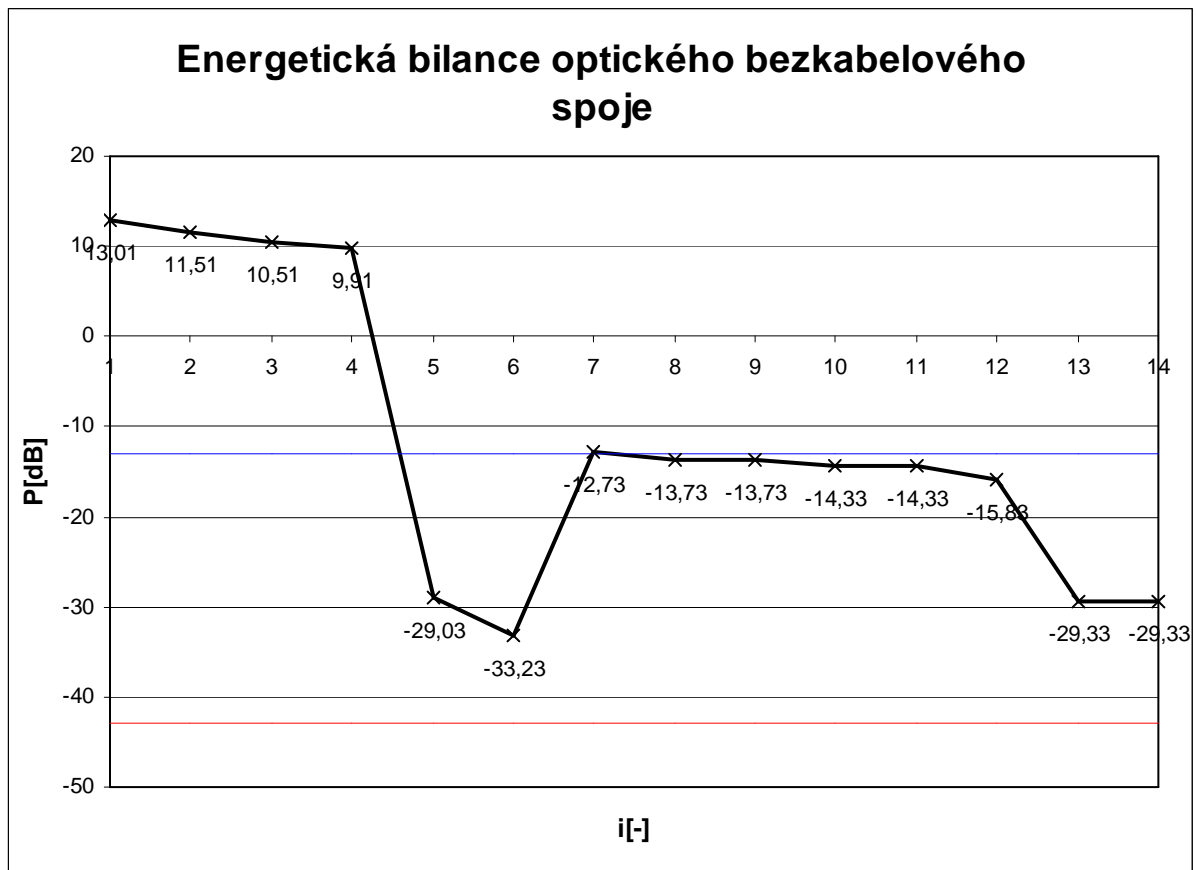
$$L_{ksp} = L_{if} - \alpha_{ksp} = -13,73 - 0,6 = -14,33 \text{ dB}$$

$$L_{v,FD} = L_{ksp} - \alpha_{v,FD} = -14,33 - 0 = -14,33 \text{ dB}$$

$$L_z = L_{v,FD} - \alpha_z = -14,33 - 1,5 = -15,83 \text{ dB}$$

$$BER = L_z - \rho_{BER} = -15,83 - 13,5 = -29,33 \text{ dB}$$

$$R = BER - \rho_R = -29,33 - 0 = -29,33 \text{ dB}$$



OPTICKÝ KABELOVÝ SPOJ

Disperzní omezení:

$L_{VO}v_1$ pro jednomodové vlákno a vlnovou délku 1550 nm je $15 \text{ km} \cdot \text{Gb} \cdot \text{s}^{-1}$.

Maximální délka optického vlákna při rychlosti $0,4 \text{ Gb} \cdot \text{s}^{-1}$:

$$L_{MD} = \frac{L_{VO}}{v_1} = \frac{15 \text{ km} \cdot \text{Gb} \cdot \text{s}^{-1}}{0,4 \text{ Gb} \cdot \text{s}^{-1}} = 37,5 \text{ km}$$

Počet opakovačů na vzdálenost 150 km:

$$pocetOP = \frac{L_{ov}}{L_{MD}} - 1 = \frac{150 \text{ km}}{37,5 \text{ km}} - 1 = 4 - 1 = 3$$

Celkem je nutno použít 3 opakovače.

Opakovače jsou od vysílače ve vzdálenostech: 37,5 km; 75 km a 112,5 km.

Útlumové omezení:

Útlum optické trasy je:

$$\alpha_{trasa} = L_{VO} \cdot \alpha_{vo} = 150 \text{ km} \cdot 0,2 \text{ dB} / \text{km} = 30 \text{ dB}$$

Útlum způsobený konektory a jejich vazbou:

$$pocetUV = \frac{L_{VO}}{L_{max}} = \frac{150km}{0,5km} = 300 \quad (\text{počet úseků } 0,5 \text{ km vlákna})$$

$$\alpha_{kon} = (pocetUV - 1) \cdot \alpha_{v,k} = 299 \cdot 0,4dB = 119,6dB$$

Celkový útlum optické trasy:

$$\alpha_{trasacelk} = \alpha_{trasa} + \alpha_{kon} = 30db + 119,6dB = 149,6dB$$

Útlum na úsecích mezi opakovači:

$$\alpha_{mezi} = \frac{\alpha_{trasacelk}}{pocetOP + 1} = \frac{149,6dB}{3 + 1} = 37,4dB$$

Počet zesilovačů:

$$P_{LD} = 20 \text{ mW} \Rightarrow \mathbf{13,01 \text{ dBm}} \text{ (zvolíme)}$$

1. úsek:

$$pocetOVZ_1 = \frac{\alpha_{mezi} - (P_{LD} - \alpha_{v,ov} - P_{0,OP})}{\gamma_{OVZ}} = \frac{37,4dB - (13,01dBm - 5dB - (-20dBm))}{10dB} = 0,94 \Leftrightarrow 1$$

2. úsek:

$$pocetOVZ_2 = \frac{\alpha_{mezi} - (P_{vyst,OP} - P_{0,OP})}{\gamma_{OVZ}} = \frac{37,4dB - (10dBm - (-20dBm))}{10dB} = 0,74 \Leftrightarrow 1$$

3. úsek:

$$pocetOVZ_3 = \frac{\alpha_{mezi} - (P_{vyst,OP} - P_{0,OP})}{\gamma_{OVZ}} = \frac{37,4dB - (10dBm - (-20dBm))}{10dB} = 0,74 \Leftrightarrow 1$$

4. úsek:

$$pocetOVZ_4 = \frac{\alpha_{mezi} - (P_{vyst,OP} - P_{0,P} - \alpha_{v,op} - \rho_{BER})}{\gamma_{OVZ}} =$$

$$= \frac{37,4dB - (10dBm - (-30dBm) - 5dB - 15,6dB)}{10dB} = 1,8 \Leftrightarrow 2$$

Celkem je nutno použít 5 zesilovačů.

Vzdálenosti zesilovačů od vysílače:

1. zesilovač:

$$l_1 = \frac{P_{LD} - \alpha_{v,ov} - P_{0,OVZ}}{\alpha_{ov} + \frac{\alpha_{kon}}{L_{ov}}} = \frac{13,01dBm - 5dB - (-10dBm)}{0,2dB/km + \frac{119,6dB}{150km}} = 18,06km$$

2. zesilovač:

$$l_2 = \frac{P_{vyst,OP} - P_{0,OVZ}}{\alpha_{ov} + \frac{\alpha_{kon}}{L_{ov}}} + L_{MD} = \frac{10dBm - (-10dBm)}{0,2dB/km + \frac{119,6dB}{150km}} + 37,5 = 57,55km$$

3. zesilovač:

$$l_3 = \frac{P_{vyst,OP} - P_{0,OVZ}}{\alpha_{ov} + \frac{\alpha_{kon}}{L_{ov}}} + 2 \cdot L_{MD} = \frac{10dBm - (-10dBm)}{0,2dB/km + \frac{119,6dB}{150km}} + 2 \cdot 37,5 = 95,05km$$

4. zesilovač:

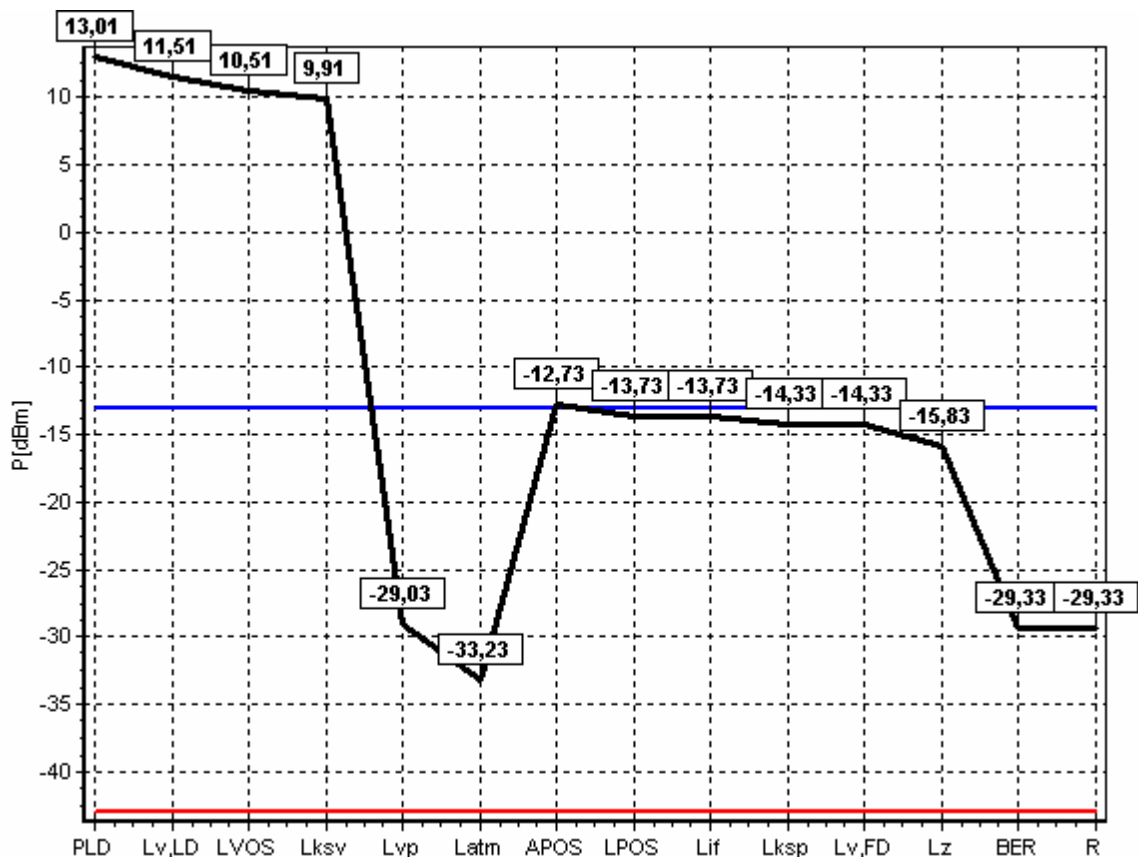
$$l_4 = \frac{P_{vyst,OP} - P_{0,OVZ}}{\alpha_{ov} + \frac{\alpha_{kon}}{L_{ov}}} + 3 \cdot L_{MD} = \frac{10dBm - (-10dBm)}{0,2dB/km + \frac{119,6dB}{150km}} + 3 \cdot 37,5 = 132,55km$$

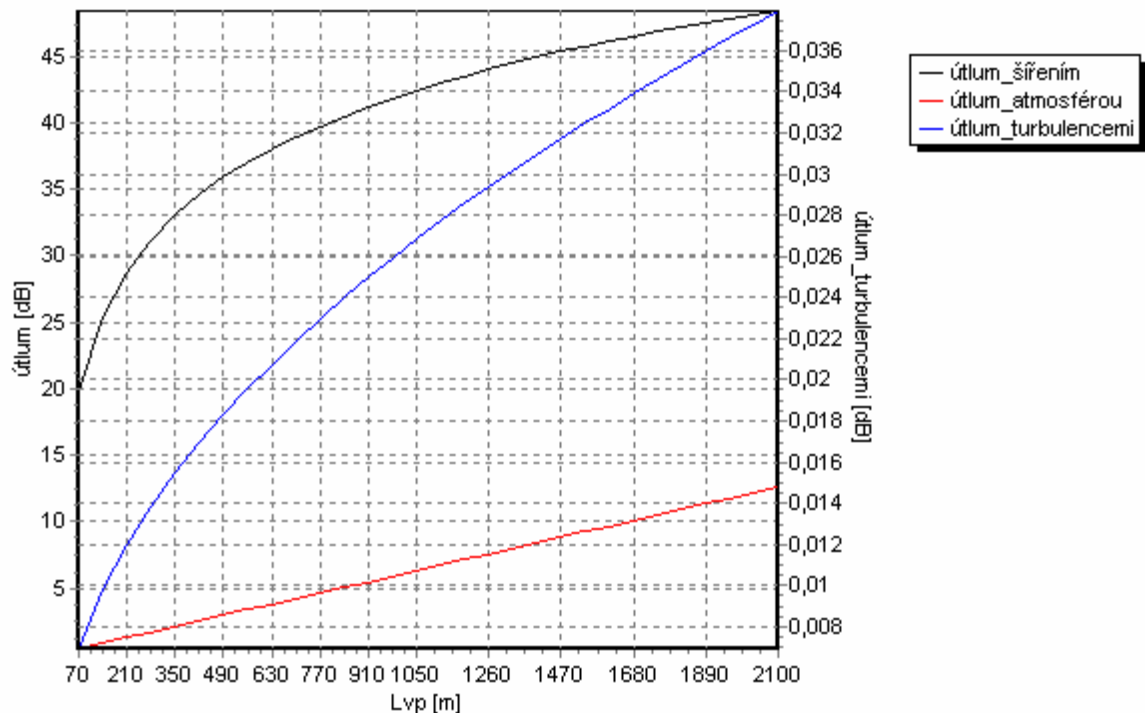
5. zesilovač:

$$l_5 = l_4 + \frac{P_{0,OVZ} + \gamma_{OVZ} - P_{0,OVZ}}{\alpha_{ov} + \frac{\alpha_{kon}}{L_{ov}}} = 132,55km + \frac{-10dBm + 10dB - (-10dBm)}{0,2dB/km + \frac{119,6dB}{150km}} = 142,58km$$

ŘEŠENÍ V PROGRAMU fOTON

OPTICKÝ BEZKABELOVÝ SPOJ





Výpis hodnot OBS 1:

Výkon vysílací diody $PLD = 13,01 \text{ dBm}$;

Útlum vazby LD/VOS $a_{v,LD} = 1,5 \text{ dB}$;

Útlum na VOS $a_{VOS} = 1 \text{ dB}$;

Útlum na krycích sklech VOS $a_{ksv} = 0,6 \text{ dB}$;

Útlum šířením $a_{vp} = 38,94 \text{ dB}$;

Rezerva na atmosféru $r_{oa} = 4,2 \text{ dB}$;

Zisk POS $\gamma_{POS} = 20,5 \text{ dB}$;

Útlum na POS $a_{POS} = 1 \text{ dB}$;

Útlum na interferenčním filtru POS $a_{if} = 0 \text{ dB}$;

Útlum na krycích sklech POS $a_{ksp} = 0,6 \text{ dB}$;

Útlum vazby přij. čočka - PD $a_{v,FD} = 0 \text{ dB}$;

Rezerva na zaměřování $a_z = 1,5 \text{ dB}$;

Rezerva na chybovost $BER = 13,5 \text{ dB}$;

Vlastní rezerva $R = 0 \text{ dB}$;

Průměr VOS $D_{VOS} = 20 \text{ mm}$;

Úhlová šířka svazku $f_{sv} = 2,5 \text{ mrad}$;

Vlnová délka vysílací diody $\lambda = 850 \text{ nm}$;

Vzdálenost hlavic $L_{vp} = 700 \text{ m}$;

Pomocná délka $L_0 = 8 \text{ m}$;

Útlum atmosférou $r_{oa1} = 0,01 \text{ dB/km}$;

Míra turbulencí v ATM $= 1E-15 \text{ m}^{(-2/3)}$

Průměr POS DPOS = -150 mm;
 Min. det. výkon diody $P_{min} = -43$ dBm;
 Max. det. výkon diody $P_{max} = -13$ dBm;
 Dynamika přijímače $Drx = 30$ dB;

OPTICKÝ KABELOVÝ SPOJ

<p>Energetická bilance OKS 1: ----- Počet všech opakovačů = 3; Počet všech zesilovačů = 5; Počet zesilovačů před 1. opakovačem = 1; Počet zesilovačů před 2. opakovačem = 1; Počet zesilovačů před 3. opakovačem = 1; Počet zesilovačů před vysílačem = 2;</p> <p>Výkon vysílací diody $PLD = 13,01$ dBm; Minimální det. výkon $P_{min} = -14,4$ dBm; Maximální det. výkon $P_{max} = 0$ dBm;</p> <p>Útlum vazby dioda-vlákno $a_{v,ov} = 5$ dB; Útlum vlákna na km $a_{ov} = 0,2$ dB/km; Útlum optické trasy $a_{trasa} = 30$ dB; Útlum všech konektorů $a_{kon} = 119,6$ dB; Útlum vazby o.v.-přijímač $a_{v,op} = 5$ dB; Útlum 1 konektoru a vazby $a_{v,k} = 0,4$ dB;</p> <p>Zesílení optického zesilovače $y_{OVZ} = 10$ dB; Zesílení všech zesilovačů $y_{OVZ+} = 50$ dB; Výstupní výkon opakovače $P_{vyst,OP} = 10$ dB;</p> <p>Citlivost přijímače $P_{0,P} = -30$ dBm; Citlivost zesilovače $P_{0,OVZ} = -10$ dBm; Citlivost opakovače $P_{0,OP} = -20$ dBm;</p> <p>Délka optického vlákna $L_{ov} = 150$ km; Max. délka vlákna $L_{max} = 0,5$ km;</p> <p>Disperzní parametr $L_{ov1} = 15$ km.Gb/s; Rychlost přenosu dat $v_1 = 0,4$ Gb/s; Rezerva na chybovost $BER = 15,6$ dB;</p>	<p>Vzdálenosti jednotlivých zesilovačů od vysílače: ----- Vysílač až 1. opakovač: vzdálenost 1. zesilovače od vysílače = 18,06 km;</p> <p>1. - 2. opakovač: vzdálenost 2. zesilovače od vysílače = 57,55 km;</p> <p>2. - 3. opakovač: vzdálenost 3. zesilovače od vysílače = 95,05 km;</p> <p>3. opakovač až přijímač: vzdálenost 4. zesilovače od vysílače = 132,55 km; vzdálenost 5. zesilovače od vysílače = 142,58 km;</p>
--	---