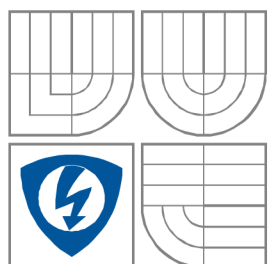


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A
KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV RADIOELEKTRONIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF RADIO ELECTRONICS

PROGRAM PRO VÝPOČET VÝKONOVÉ BILANCE
OPTICKÉHO BEZKABELOVÉHO SPOJE
PROGRAM FOR THE FREE SPACE OPTICAL LINK POWER BUDGED
CALCULATION

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

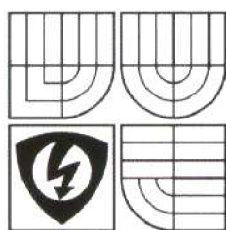
AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Jakub Vaculík

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

Ing. Petr Křivák

BRNO, 2008



VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

Ústav radioelektroniky

Bakalářská práce

bakalářský studijní obor
Elektronika a sdělovací technika

Student: Vaculík Jakub

Ročník: 3

ID: 89060

Akademický rok: 2007/08

NÁZEV TÉMATU:

Program pro výpočet výkonové bilance optického bezkabelového spoje

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Prostudujte metodiku návrhu optického bezkabelového spoje. Svou pozornost věnujte útlumům jednotlivých prvků spoje a přenosového prostředí. Také se stručně seznamte se zdroji a detekčními prvky optického záření používanými v optických komunikacích. Vytvořte vývojový diagram programu pro výpočet energetické bilance optického spoje.

Na základě předešlé studie navrhnete program pro výpočet výkonové bilance optických spojů kabelových i bezkabelových. Program by měl poskytovat číselné i grafické zhodnocení parametrů navrženého spoje. Součástí práce je i vypracování nápovědy pro orientaci v programu ve formě brožurky a vzorové uvedení výkonové bilance spoje.

Výsledkem bakalářské práce by měla být jedna z úloh laboratorních cvičení. Tedy bude obsahovat stručný návod seznamující studenty s potřebnou teorií, vzorovým vypracováním protokolu a výsledky pro ověření návrhu. Podrobnosti ohledně programu pro návrh optických spojů budou upřesněny vedoucím.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] KASAP, S.O. Optoelectronics and Photonics: Principles and Practices. New Jersey: Prentice Hall, 2001. 340 s. ISBN 0-201-61087-6

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

[3] 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

[4] 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

Termín zadání: 11.2.2008

Termín odevzdání: 6.6.2008

Vedoucí projektu: Ing. Petr Křivák



prof. Dr. Ing. Zbyněk Raida
předseda oborové rady



UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být 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.

LICENČNÍ SMLOUVA POSKYTOVANÁ K VÝKONU PRÁVA UŽÍT ŠKOLNÍ DÍLO

uzavřená mezi smluvními stranami:

1. Pan/paní

Jméno a příjmení: Jakub Vaculík
Bytem: Louky 436, Uherské Hradiště 686 01
Narozen/a (datum a místo): 13. května 1984 v Uherském Hradišti

(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 bezkabelového 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.

* hodíci 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: 6. června 2008

.....
Nabyvatel

.....
Autor

Anotace

Se zvyšujícími se nároky na přenosovou kapacitu podnikových i přístupových sítí se jeví jako vhodné řešení optické sítě.

Světelný paprsek je velmi lákavý pro použití k přenosu dat. Přenášená data můžeme reprezentovat pomocí světelných impulsů. Pro praktickou realizaci potřebujeme ovšem celý optický přenosový systém, složený z vysílače, přenosového média a přijímače. Úkolem přenosového média je dopravit světelný paprsek od jeho zdroje k detektoru s co možná nejmenšími ztrátami. K tomuto účelu se používá optické vlákno nebo optický bezkabelový spoj FSO.

Optická kabelová přípojka k Internetu je pro většinu domácností i podniků zatím nedosažitelná, jsou velmi nákladné a zatím běžně neřizují v nabídce provozovatelů a poskytovatelů připojení (alespoň ne v našich podmínkách). Existuje ovšem možnost, jak se vyhnout optickým vláknovým sítím, a přesto dosáhnout vysoké propustnosti a bezpečnosti komunikace: prostřednictvím optiky bez kabelů. Z hlediska náročnosti nasazení představují jen zlomek nákladů s pokládkou optických kabelů, ovšem lze je využít jen na krátkou vzdálenost. Bezdrátová optika umožňuje nejen rychlou, ale i ekologickou komunikaci, což je ve světě stále populárnějších rádiových sítí, přepřínajících zejména některé části spektra, velice příjemná zpráva.

Klíčová slova: bezkabelový spoj , bilance, laser dioda, fotodioda, atmosféra, turbulence

Abstrakt

With increasing demands for transit capacity of data networks as well as communication network optical networks seem to be the suitable solution.

Light beam is attractive to use for data transmission . Transmitted data can be expressed by means of light impuls.. For execution of the project we need the whole optical telecommunal system which consists of transmitter, transmission link and receiver. The target of transmission link is to transfer optical beam from its resource to detector with minimal losses. The optical fibre or optical freespace optical link FSO are used for this purpose.

Connection to internet by optical fibre is out of reach for most households and plants, it is very expensive and so far it isn't in the offer of network operators and service providers. (at least in our condition). But there is still the possibility to obviate optical fibre networks and reach high permeability and safety of communication by means of freespace optical links. It is much easier to implement, but only for short distance. FSO enables quick and even ecological communication which is in the world of more famous radio frequency networks very pleasant message.

Keywords: free space link, budged, laser diode, photodiode, atmosphere, turbulence

Prohlášení

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma Program na výpočet výkonové bilance optického bezkabelového 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 6. června 2008

.....
podpis autora

Poděkování

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

V Brně dne 6. června 2008

.....
podpis autora

OBSAH

1. ÚVOD	10
2.OPTICKÉ KABELOVÉ SPOJE	11
2.1 OPTICKÉ VLÁKNO A KABELY	11
2.1.1 Princip přenosu	12
2.1.2 Konstrukce optických kabelů	12
2.1.3 Druhy optických vláken	13
2.1.4 Klíčové přenosové parametry optických vláken	15
3. BEZKABELOVÉ LASEROVÉ SPOJE.....	18
3.1 JAK PRACUJE FSO (FREE SPACE OPTICS, FSO).....	19
3.2 PŘENOSOVÁ RYCHLOST.....	19
3.3 BEZPEČNOST PAPERSKU	19
3.4 BEZPEČNOST DAT.....	19
3.5 SPOLEHLIVOST A DOSTUPNOST	20
3.6 VÝHODY OPROTI MIKROVLNNÝM SPOJŮM.....	21
4. VYSÍLACÍ LASEROVÉ DIODY	22
5. PŘIJÍMACÍ FOTODIODY	24
5.1 HLAVNÍ KATALOGOVÉ PARAMETRY FOTODIOD:	24
5.2 PIN FOTODIODY	24
5.3 APD FOTODIODY	25
5.4 SROVNÁNÍ FOTODIOD.....	25
6. BILANCE OPTICKÉHO SPOJE	26
7. PROGRAM	31
7.1 PŘEDSTAVA	31
7.1.1 Skladba Programu.....	31
7.1.2 Požadavky na program.....	31
7.1.3 Vývojový diagram.....	31
7.2 MATEMATICKÝ POPIS SIMULACE.....	32
7.3 UŽIVATELSKÉ PROSTŘEDÍ	32
7.3.1 Jednotlivé části programu	33
8. ZÁVĚR	41
9. POUŽITÁ LITERATURA.....	42
10. PŘÍLOHY	43

Seznam obrázků

OBR. 2.1 ZNÁZORNĚNÍ NUMERICKÉ APERTURY.....	12
OBR. 2.2 KONSTRUKČNÍ ŘEŠENÍ OPTICKÝCH VLÁKEN	12
OBR. 2.3 PROPOJOVÁNÍ OPTICKÝCH VLAKEN	13
OBR. 2.4 MNOHOVIDOVÉ VLÁKNO SE STUPŇOVITÝM INDEXEM LOMU	13
OBR. 2.5 MNOHOVIDOVÉ VLÁKNO S GRADIENTNÍM INDEXEM LOMU	14
OBR. 2.6 JEDNOVIDOVÉ OPTICKÉ VLÁKNO.....	14
OBR. 2.7 SROVNÁNÍ JEDNOBODOVÝCH VLÁKEN V ZÁVISLOSTI ÚTLUMŮ NA VLNOVÉ DÉLCE.....	15
OBR. 4.1 UKÁZKA KATALOGOVÉHO LISTU LASEROVÝCH DIOD.....	23
OBR. 5.2 UKÁZKA KATALOGOVÉHO LISTU KŘEMÍKOVÝCH FOTODIOD.....	25
OBR. 6.1 MÍSTA ÚTLUMU A ZESÍLENÍ V ENERGETICKÉ BILANCE FSO	26
OBR. 6.2 ZNÁZORNĚNÍ VÝZNAMU VELIČINY LO (POMOCNÉ DÉLKY)	28
OBR. 6.3 ÚTLUM ČISTÉ ATMOSFÉRY V ZÁVISLOSTI NA VLNOVÉ DÉLCE	29
OBR. 7.1 VÝVOJOVÝ DIAGRAM PROGRAMU	31
OBR. 7.2 HLAVNÍ PANEL	33
OBR. 7.3 OKNO PRO ULOŽENÍ (OTEVŘENÍ)	33
OBR. 7.4 OKNO PRO TISK.....	34
OBR. 7.5 OKNO O APLIKACI.....	34
OBR. 7.6 POLE PRO ZADÁVÁNÍ VSTUPNÍCH PARAMETRŮ FSO ZÁLOŽKA VYSÍLACÍ APERTURA	35
OBR. 7.7 OKNO PARAMETRY LASER DIODY A VOS	36
OBR. 7.8 ZÁLOŽKA PŘIJÍMACÍ APERTURA PRO ÚTLUM VAZBY POS/FD	36
OBR. 7.9 ZÁLOŽKA PŘIJÍMACÍ APERTURA PŘI POUŽITÍ KONCENTRÁTORU VE VAZBĚ POS/FD	36
OBR. 7.10 ZÁLOŽKA PROSTŘEDÍ.....	37
OBR. 7.11 ZÁLOŽKA REZERVY	38
OBR. 7.12 POLE S OBRÁZKY.....	39
OBR. 7.13 POLE PARAMETRŮ BILANCE FSO	39
OBR. 7.14 POLE GRAFICKÉHO ZNÁZORNĚNÍ	40
OBR. 7.15 CELKOVÝ POHLED NA PROGRAM	40

Seznam tabulek

TAB. 2.1 PARAMETRY JEDNOVIDOVÉHO VLÁKNA PODLE DOPORUČENÍ ITU-T G.652	14
TAB. 6.1 TYPICKÉ HODNOTY PRO STRUKTURNÍ PARAMETR INDEXU LOMU.....	30
TAB. 5.1 VÝZNAM JEDNOTLIVÝCH ZNAČEK	32
TAB. 7.1 HODNOTY ÚTLUMU ATMOSFÉRY.....	37
TAB. 7.2 HODNOTY ÚTLUMU ČISTÉ ATMOSFÉRY.....	37
TAB. 7.3 HODNOTY SNR_0 PRO CHYBOVOST BER	38

1. Úvod

V dnešní době se neustále rostou nároky na rychlost datové komunikace. Technologické procesy zaznamenávají velmi rychlou expanzi, úměrně s tím se zvyšují požadavky na kvalitu a rychlost přenosu dat. Lidé čím dál více používají internet a počítače komunikující se světem. Přestávají stačit dosud používané drátové a mikrovlnné datové spoje a kvůli zvýšení přenosové rychlosti se postupně přechází k optickému principu přenosu.

Optický přenos má mnoho výhod. Jednou z nich je již zmíněná vysoká přenosová rychlost, žádná potřeba přidělení kmitočtového pásma oproti mikrovlnným spojům a bezpečnost dat. V dnešní době je ale připojení ke kabelové optické síti pro běžného spotřebitele stále velmi nákladné. Je to z důvodu nákladného a složitého položení kabelu. Kabelovou přípojku na optickou síť tedy mají pouze větší podniky a instituce. Dalším řešením optického přenosu je optický bezkabelový spoj. Jeho výhodou je relativně snadná montáž, kde odpadají náklady na pokládku kabelu. Jedná se pouze o hlavice vysílací a přijímací, které jsou na sebe zaměřeny a přenos probíhá v atmosféře. Nevýhodou těchto spojů je dosažení spoje pouze na kratší vzdálenosti tj. do několika km. Po trase dochází k náhodným atmosférickým vlivům, které signál oslabují.

V mé práci bych se chtěl seznámit s kabelovými a bezkabelovými spoji a zaměřit se na bezkabelové optické spoje jejich parametry a faktory, ovlivňující energetickou bilanci spoje. Cílem práce by mělo být vytvoření programu, který dokáže navrhnout optický bezkabelový spoj, pro uživatelem zadané parametry spoje. Program bude sloužit k zjednodušení návrhů těchto spojů, měl by mít přehledné uživatelské rozhraní, které bude zaručovat lehkou orientaci v programu. Návrh spoje pomocí programu by měl být přesný a měla by být možnost výtisku výsledku energetické bilance optického bezkabelového spoje.

Optické spoje

Optický princip přenosu, používaný u optických vláken, počítá s tím že vlákno se chová jako světlovod a světelný paprsek vede. Optický přenos je ovšem možný i tehdy, kdy světelný paprsek není veden optickým vláknem, ale šíří se volně vzduchem. V praxi se za tímto účelem používají nejčastěji spoje laserové, protože laserový paprsek lze dosti přesně nasměrovat. Přenosová cesta, která takovýmto způsobem vzniká, je svou bytostnou podstatou jednosměrná. Proto se pro vytvoření obousměrné, plně duplexní přenosové cesty musí používat dva proti sobě orientované kanály.

2. Optické kabelové spoje

2.1 Optické vlákno a kabely

Historie vláknové optiky se datuje více jak 200 let zpět. Již v roce 1840 Daniel Collodon a Jacques Babinet prokázali, že světlo může být vedeno podél tryskající vody. Na začátku dvacátého století bylo zjištěno, že ohnuté skleněné tyčky vedou světlo. V roce 1930 Heinrich Lamm poprvé demonstroval přenos obrazu pomocí svazku optických vláken a tak to šlo dále až k dnešním optickým vláknům.

Světelný paprsek je velmi lákavý pro použití k přenosu dat. Přenášená data můžeme reprezentovat pomocí světelných impulsů (přítomnost impulsu může představovat např. $\log 1$, zatímco jeho nepřítomnost $\log 0$). Pro praktickou realizaci potřebujeme ovšem celý optický přenosový systém, složený ze zdroje, přenosového média a přijímače.

Úkolem přenosového média je dopravit světelný paprsek od jeho zdroje k detektoru s co možná nejmenšími ztrátami. K tomuto účelu se používá optické vlákno (optical fiber), s tenkým jádrem (core) obaleným vhodným pláštěm (cladding). Optické vlákno je válcový dielektický vlnovod zhotovený z nízkoztrátového materiálu (nejčastěji z taveného křemenného skla vysoké chemické čistoty). Jádro vlnovodu má nepatrně vyšší hodnotu indexu lomu než jeho plášť, což zajišťuje šíření záření podél osy vlákna. Jádro má průměr v řádu jednotek až desítek mikrometrů (8-10, 50, 62,5 nebo 100), a je vyrobené nejčastěji z různých druhů skla, eventuelně i z plastu. Podle průběhu indexu lomu jádra a pláště a podle průměru jádra dochází k různým způsobům šíření optického signálu (jeho tzv. vidů) vláknem.

Optické vlákno je vždy simplexní spoj, tj. na jedné straně je vysílač a na druhé straně přijímač. Pro duplexní spoje (což je téměř vždy) je nutná dvojice vláken (pro každý směr jedno vlákno).

Pro počítačové sítě jsou optická vlákna atraktivní především pro vysokou přenosovou rychlost, kterou umožňují dosáhnout s poměrně nízkými náklady. Jde tedy o technologii velmi perspektivní (a to nejen pro počítačové sítě).

Kromě velké přenosové rychlosti je další velkou výhodou optických vláken jejich naprostá necitlivost vůči elektromagnetickému rušení (což je velmi důležité např. v průmyslových aplikacích). Výhodou je také velká bezpečnost proti odposlechu, malý průměr a malá hmotnost optických kabelů.

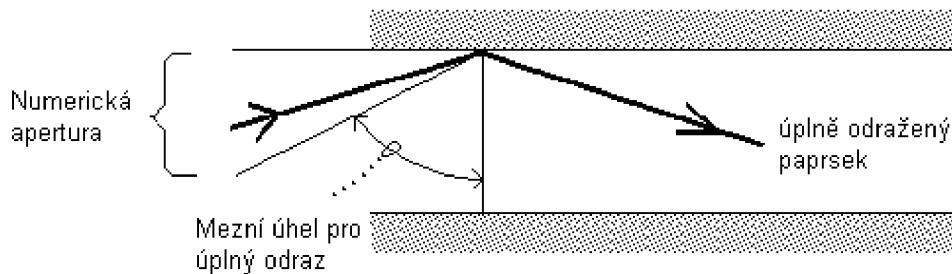
2.1.1 Princip přenosu

Pro pochopení způsobu, jakým je světelný paprsek optickým vláknem veden, je nutné si nejprve uvědomit jeden základní poznatek z oblasti fyziky:

"Dopadá-li světelný paprsek na rozhraní dvou prostředí s různými optickými vlastnostmi (např. na rozhraní mezi jádrem a pláštěm), v obecném případě se část tohoto paprsku odráží zpět do původního prostředí, a část prostupuje do druhého prostředí. Záleží však na úhlu, pod kterým paprsek dopadá na rozhraní (dáno též optickými vlastnostmi obou prostředí). Je-li tento úhel větší než určitý mezní úhel, dochází k úplnému odrazu paprsku zpět do původního prostředí"

V důsledku opakovaných úplných odrazů, které probíhají bez jakýchkoli ztrát, pak světelný paprsek sleduje dráhu jádra optického vlákna – tedy, je tímto jádrem veden.

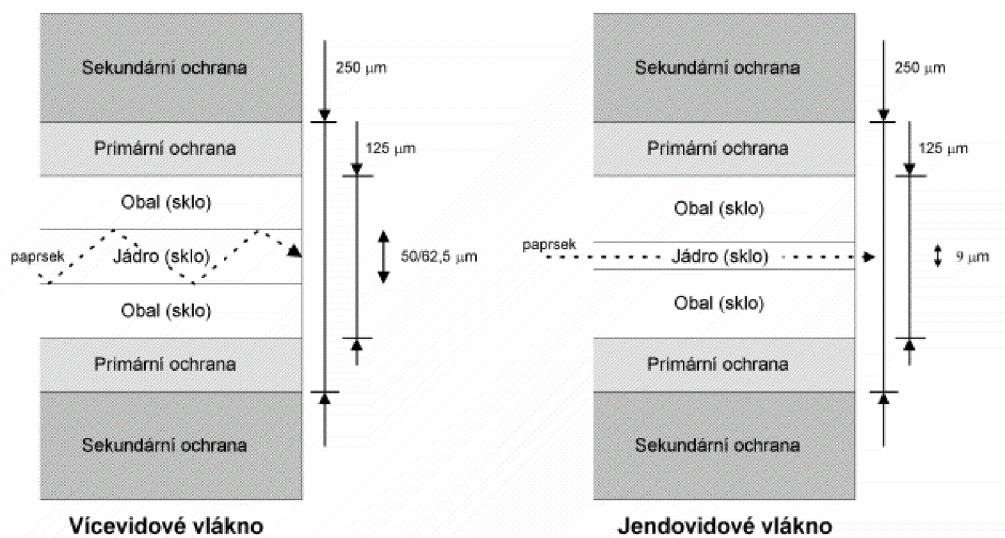
Rozmezí úhlů, pod kterými může světelný paprsek dopadat na optické vlákno tak, aby byl veden, definuje tzv. numerickou aperturu. (viz obr. 2.1)



Obr. 2.1 Znárodnění numerické apertury

2.1.2 Konstrukce optických kabelů

Optická vlákna jsou velmi citlivá na mechanické namáhání a ohyby. Jejich ochranu proto musí zabezpečovat svým konstrukčním řešením optický kabel, který kromě jednoho či více optických vláken obvykle obsahuje i vhodnou výplň, zajišťující potřebnou mechanickou odolnost. (viz obr. 2.2)

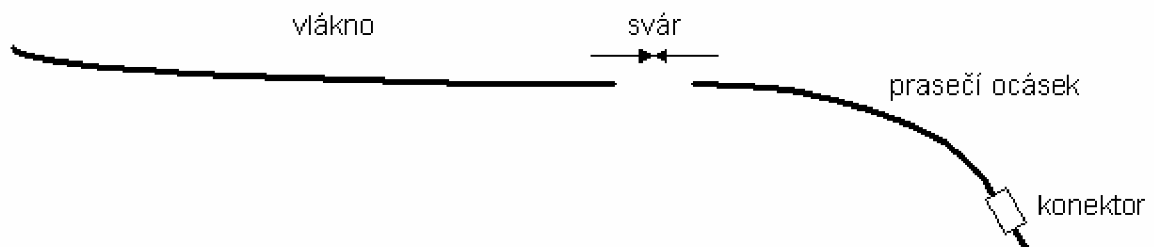


Obr. 2.2 Konstrukční řešení optických vláken

Na obrázku (Obr. 2.2) je znázorněna ochrana optických vláken. Optická vlákna jsou nejprve obalena tzv. primární ochranou, která zajišťuje pružnost vlákna. Bez primární ochrany je vlákno velice křehké. Sekundární ochrana, pak zvyšuje ochranu vlákna. S odstraněnou sekundární ochranou se běžně setkáváme u optických propojovacích kabelů.

S optickými kabely, které mají odstraněnou sekundární ochranu se v běžných podmínkách obtížně pracuje, proto jsou populární optická vlákna s tzv. těsnou sekundární ochranou (průměr $900\ \mu\text{m} = 0,9\ \text{mm}$), která integruje primární i sekundární ochranu. Takové kabely jsou o něco dražší (proto se nehodí na propojování velkých vzdáleností), ale na druhou stranu je možné na tyto kabely přímo nasadit optické konektory.

Pokud se použijí kabely s primární ochranou, tak se používají továrně připravené optické konektory nasazené na kus optického vlákna, tzv. prasečí ocásky (pigtail). Prasečí ocásek se pak navaňuje na propojovací kabely. (viz obr 2.3)

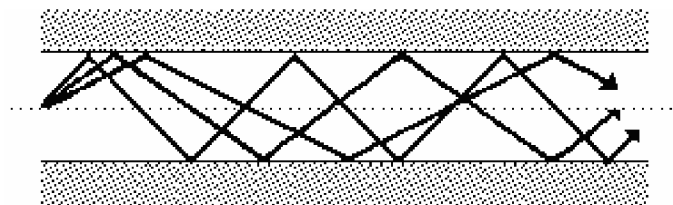


Obr. 2.3 Propojování optických vláken

2.1.3 Druhy optických vláken

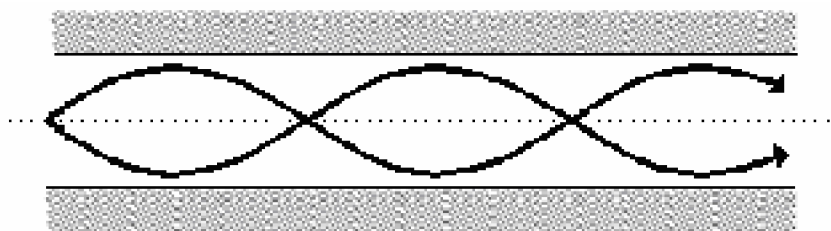
2.1.3.1 Mnohavidová vlákna

Způsob, jakým optické vlákno paprsek vede, záleží také na tom, jak se mění optické vlastnosti (konkrétně tzv. index lomu - refraction index) na přechodu mezi jádrem vlákna a jeho pláštěm. Mění-li se skokem a je-li průměr jádra dostatečně velký (50-100 mikrometrů), jde o vlákno, schopné vést různé vlny světelných paprsků tzv. vidy (modes). Jde tedy o mnohovidové vlákno (multimode fiber), v tomto případě se stupňovitým indexem lomu (step index fiber). (viz obr 2.4)



Obr. 2.4 Mnohovidové vlákno se stupňovitým indexem lomu

Pokud se index lomu na přechodu mezi jádrem vlákna a jeho pláštěm nemění skokem, ale plynule, jde o mnohovidové vlákno s tzv. gradientním indexem lomu (graded index fiber), které přenášené vidy ohýbá. (viz obr 2.5)



Obr. 2.5 Mnohovidové vlákno s gradientním indexem lomu

Výhodou mnohovidových vláken je relativně nízká cena, snazší spojování, velká numerická apertura a možnost buzení luminiscenční diodou.

2.1.3.2 Jednovidová vlákna

Nejvyšších přenosových rychlostí (až Gigabity/sekundu na vzdálenosti do 1 km) lze dosáhnout na tzv. jednovidových vláknech (single mode fiber), které přenáší jen jediný vid.(viz obr 2.6)



Obr 2.6 Jednovidové optické vlákno

Schopnosti vést jediný vid bez odrazů i ohybů se dosahuje buďto velmi malým průměrem jádra (řádově jednotky mikrometrů), nebo velmi malým poměrným rozdílem indexů lomu jádra a jeho pláště. V každém případě jsou jednovidová vlákna dražší než mnohovidová, lze je ovšem použít pro přenosy na delší vzdálenosti (až 100 km bez opakovače). Pro své buzení však již vyžadují laserové diody.

Pro konkrétní představu jsou níže (Tab. 2.1) uvedeny parametry jednovidového optického vlákna podle doporučení ITU-T G.652, které je v současnosti nejužívanějším typem v dálkových komunikacích:

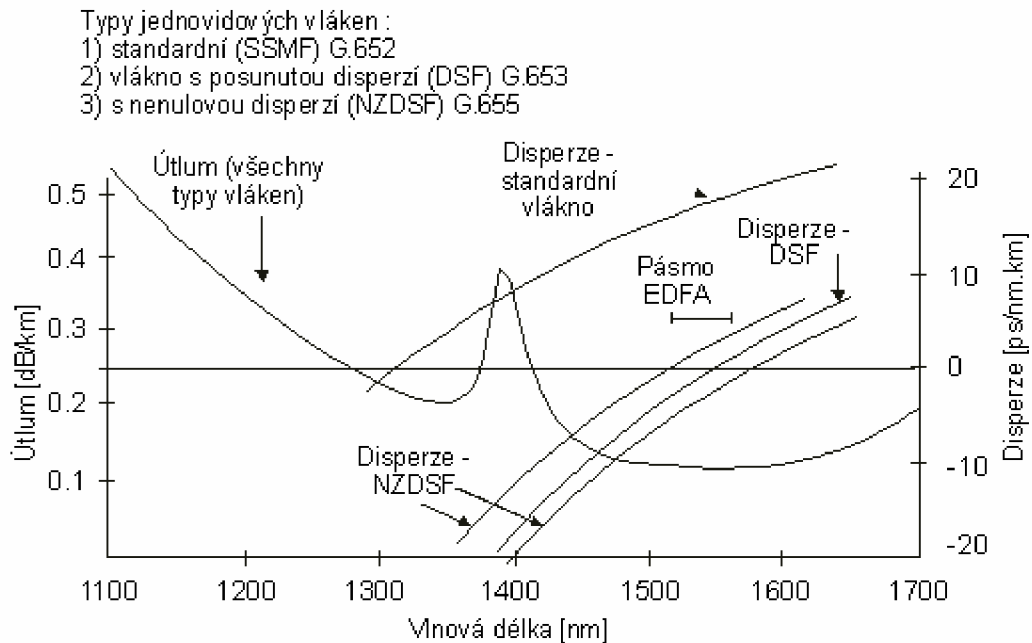
Tab. 2.1 Parametry jednovidového vlákna podle doporučení ITU-T G.652

Průměr vidového pole na 1310 nm (přibližně udává průměr jádra vlákna)	$(8,6 - 9,5) \mu\text{m} \pm 0,9 \mu\text{m}$
Průměr pláště:	$125 \mu\text{m} \pm 2,0 \mu\text{m}$
Nekruhovost pláště:	max. 2,0 %
Odchylka středu vidového pole od středu pláště vlákna	max. 1,0 μm
Index lomu (ve spektrální oblasti 1300 nm – 1600 nm)	1,46 - 1,49
Rozdíl hodnoty indexu lomu v jádře a v plášti:	řádově 0,01

2.1.4 Klíčové přenosové parametry optických vláken

2.1.4.1 Měrný útlum vlákna

Technologie výroby vláken se neustále zlepšuje a tak se podařilo dosáhnout extrémě nízkých hodnot útlumu. Z obrázku (Obr 2.7) je vidět jeho obvyklý spektrální průběh pro kvalitní jednovidová vlákna používaná v telekomunikacích. Absolutní minimum je v oblasti 1550 nm a má hodnotu přibližně 0,2 dB/km. Toto absolutní minimum útlumu je ze strany kratších vlnových délek omezeno. Rayleighovým rozptylem a ze strany větších vlnových délek infračervenou absorpcí. Křivka na obr. 2.7 tedy zachycuje útlum vlákna, vyčištěného ode všech absorbujících příměsí a představuje limit. V okolí 1400 nm je pás zvýšeného útlumu, který je způsobován absorpcí světla na O-H iontech, přítomných ve vlákne. Proto je třeba vlákna chránit různými ochranami před kontaktem s vodou a před zvýšenou vlhkostí, aby do vláken nedifundovalo více O-H iontů a útlum se tak nezhoršil. Absorpční pás odděluje od absolutního minima útlumu jedno lokální minimum, situované kolem 1310 nm. Této oblasti se říká druhé přenosové okno, kdežto oblast absolutního minima útlumu je tzv. třetí přenosové okno.



Obr. 2.7 Srovnání jednobodových vláken v závislosti útlumů na vlnové délce

S přibývajícím vzdáleností od zdroje postupně klesá výkon přenášeného signálu (podobně jako u metalických vedení). Označuje se "alfa" a vyjadřuje se v dB/km.

Je způsoben následujícími vlivy:

a) Vlastní absorpce - na vlastních molekulách optického materiálu, např.: křemenného skla SiO_2 . Absorbční maxima jsou v oblasti UV (40 až 400 nm) a IR (2000 nm až 100 μm). Z tohoto důvodu jsou optické systémy provozovány v okolí tří vlnových délek: 850 nm, 1300 nm, 1500 nm

- b) Nevlastní absorpce - absorpce světla na nečistotách (molekuly kovů, které mohou do materiálu vlákna vniknout v důsledku špatné vnější ochrany).
- c) Lineární rozptyl - materiál jádra a pláště není ideálně homogenní. Na těchto nehomogenitách se v důsledku lomů a odrazů "tríští" paprsky do všech směrů a tato část energie se ztrácí. Toto je hlavní složka útlumu optických vláken, jeho velikost se zvětšuje se čtvrtou mocninou vlnové délky.
- d) Nelineární rozptyl - u části optického záření dochází ke změně jeho vlnové délky (kvantová teorie elmagetického záření). Z hlediska pracovní vlnové délky je tato část energie ztracena.
- e) Ztráty mikroohyby - řádově mm a menší. Jsou kritické pro jednovidová vlákna, eliminují se vhodnou konstrukcí optického kabelu.
- f) Ztráty makroohyby - řádově desítky mm. Minimální katalogová hodnota, nesmí být překročena minimální hodnota doporučeného ohybu kabelu při montáži.

2.1.4.2 Disperze optického vlákna

Po útlumu je disperze asi nejdůležitější vlastností optických vláken z hlediska telekomunikací. Optické vlákno je disperzní prostředí, tzn. má různé vlastnosti pro různé vlnové délky a vidy optického záření. Vyvoláme-li na vstupu vlákna světelný impuls, tento impuls se obecně rozloží do mnoha vidů a každý vid má ještě nenulovou spektrální šířku - skládá se z několika složek o různé vlnové délce. Různé vidy mají různé rychlosti šíření vláknem, což je tzv. vidová disperze, ale i různé spektrální složky téhož vidu se šíří různou rychlostí a tomu se říká disperze chromatická.

Tento parametr charakterizuje vlákno z hlediska maximální přenosové rychlosti. Je možné ho demonstrovat na průběhu pravoúhlého impulsu podél délky vlákna, podél trasy se mění tvar tohoto impulsu tak, že se zmenšuje jeho špičková velikost a zvětšuje se jeho šířka. Tzn., že na konci trasy může být signál znehodnocen do míry nepoužitelnosti. Na konci se jednotlivé impulsy mohou prolínat, tzn., že není možné rozlišit přesně stav $\log 1$ a $\log 0$.

- a) U mnohovidových vláken převažuje tzv. vidová disperze, každý paprsek dorazí díky rozdílnosti délek drah na konec vlákna v rozdílných časových okamžicích. Impuls získaný z výkonů jednotlivých paprsků se liší od průběhu impulsů na vstupu.
- b) Chromatická disperze - je způsobena rozdílnou rychlostí šíření dílčích složek zdroje světla (rozdílné vlnové délky). Na konci vlákna se jednotlivé složky spektra skládají s časovými rozdíly, tzn. s jiným časovým průběhem než na začátku vlákna.
- c) I v jednovidových vláknech ovšem existují dvě různé polarizace vidu a to vede na polarizační vidovou disperzi (PMD - Polarisation Mode Dispersion). Polarizační disperze má sice obvykle menší hodnoty než chromatická disperze, vyvolává však mezisymbolovou interferenci podobně jako ona a dá se těžko vykompenzovat. Vlákna renomovaných výrobců už v současnosti mají koeficient polarizační vidové disperze typicky $0,1 \text{ ps/km}^{1/2}$, což je hodnota dostatečně malá, aby dovolila přenosy rychlostí 10 Gbit/s na vzdálenost několika set kilometrů.

2.1.4.3 Šířka přenosového pásma

S disperzí souvisí parametr šířky přenosového pásma, pro optické vlákno je definován mezním kmitočtem hranice propustného pásma, při které dochází k poklesu přenosové charakteristiky o 3 dB.

V katalogích je uváděn pojem "součinitel šířky přenosového pásma BxL. Ten udává šířku pásma vztahenou na 1 km délky kabelu - vlákna v MHz.km. Z toho vyplývá, že se zvětšující se délkou kabelu se šířka pásma zmenšuje, údaj BxL = 500 MHz.km znamená, že při délce optické trasy 10 km je možno uvažovat s šířkou pásma jen 50 MHz.

2.1.4.4 Souhrnné parametry optických vláken

Mnohovidová vlákna se skokovou změnou indexu lomu:

- měrný útlum: 2,6 až 50 dB/km při vlnové délce 850 nm
- šířka pásma: 6 až 50 MHz.km
- použití: krátké trasy (mezi místnostmi, budovami, ...) s malým nárokem na šířku pásma,
- výhodou je nízká cena

Mnohovidová vlákna s gradientní změnou indexu lomu:

- měrný útlum: 2 až 10 dB/km při vlnové délce 850 nm
0,5 dB/km pro $\lambda = 1300$ nm
0,25 dB/km pro $\lambda = 1500$ nm
- šířka pásma: 300 MHz. až 1,5 GHz.
- použití: aplikace v lokálních počítačových sítích (LAN)

Jednovidová vlákna, skoková změna indexu lomu:

- měrný útlum: 0,35 dB/km při vlnové délce 1300 nm
0,2 dB/km pro $\lambda = 1550$ nm
- šířka pásma: při $\lambda = 1300$ nm je mnohem větší než 100 GHz.km
- použití: dlouhé trasy a velké přenosové rychlosti v telekomunikacích, buzení polovodičovým laserem pro zmenšení disperze

3. Bezdrátové laserové spoje



Optická přípojka k Internetu je pro většinu domácností i podniků zatím nedosažitelná, ale stejnou kapacitu nám mohou nabídnout bezdrátové optické spoje. Z hlediska náročnosti nasazení představují jen zlomek práce s pokládkou optických kabelů, ovšem lze je využít jen na krátkou vzdálenost. Bezdrátová optika umožňuje nejen rychlou, ale i ekologickou komunikaci, což je ve světě stále populárnějších rádiových sítí, přepínajících zejména některé části spektra, velice příjemná zpráva.

Se zvyšujícími se nároky na přenosovou kapacitu podnikových i přístupových sítí se jeví jako konečné řešení optické sítě. Nicméně pevné optické přípojky k Internetu jsou velice drahé a zatím běžně nefigurují v nabídce provozovatelů a poskytovatelů přístupu (alespoň ne v našich končinách). Existuje ovšem možnost, jak se vyhnout optickým vláknovým sítím, a přesto dosáhnout vysoké propustnosti a bezpečnosti komunikace: prostřednictvím optiky bez kabelů.

Tato oblast, jejíž počátky se datují do první poloviny 60. let, prožívá v poslední době velký rozmach. Proč najednou takový zájem o tuto technologii? Zcela jistě lze hledat souvislosti mezi stále plnějšími frekvencemi pro mikrovlnné spoje a rychle se zvyšujícími nároky na přenosové rychlosti. Určitě by se i vám líbilo mít nikým a ničím nerušené bezdrátové spoje s přenosovou kapacitou blízkou rychlosti světla a neplatit žádné poplatky ČTÚ.

Pojďme se tedy podívat podrobněji na problematiku těchto bezdrátových laserových spojů (Free Space Optics, FSO).

Optickým bezdrátovým spojením (FSO) se obvykle rozumí digitální plně duplexní spoj umožňující širokopásmové komunikační přenosy vzduchem při použití neviditelných paprsků světla. Vedle datových spojů lze tyto spoje s výhodou použít i pro přenos hlasu či obrazu, což lze využít při jednosměrném analogovému či digitálnímu přenosu multimediálních signálů. Bez nadsázky můžeme říci, že tato technologie v sobě skrývá přenosovou kapacitu optických sítí i jednoduchost a rychlost instalace bezdrátových spojů.

3.1 Jak pracuje FSO (Free Space Optics, FSO)

Bezdrátový optický spoj (FSO – Free Space Optics) pracuje na základě přenosu signálu mezi dvěma laserovými vysílači a přijímači (umístěnými na střeše nebo u okna) volným prostorem, nikoli optickým kabelem, i když modulovaný optický signál se generuje na vysílající straně v obou případech podobně.

Optický signál je pomocí vysílací přenosové optiky vyslán do atmosféry. Na straně přijímače se světelný paprsek zachytí, volitelně se zesílí a převede se na elektrický signál. Komunikace v obou směrech probíhá identicky a přijímač i vysílač běžně sdílejí jedno zařízení. Pro přenos vzduchem se používají následující vlnové délky: v infračerveném spektru kolem 1550 nm a v pásmu 780–850 nm.

FSO nabízí kapacitu srovnatelnou s optickým kabelem na vzdálenost v řádu kilometrů (produkty na trhu nabízejí propustnost typicky od 155 Mbit/s, přes 622 Mbit/s až po 10 Gbit/s), vysokou bezpečnost a navíc jednoduchou a rychlou instalaci. Protože FSO předpokládá z principu přímou viditelnost (mezi vysílačem a přijímačem nesmí být v čáře jejich pomyslného vodorovného vzdušného spojení žádná trvalá překážka), je dosah signálu omezen na několik kilometrů (od desítek metrů do typicky 4 km, maximálně 5–7 km). Konkrétní maximální délka spoje závisí na klimatických podmínkách a samozřejmě také na výkonu laserového systému.

3.2 Přenosová rychlost

Jelikož je rychlost šíření světla vzduchem vyšší než přes vláknovou infrastrukturu, je možné bezdrátové optické spoje nazvat optickou komunikací rychlostí světla. Musíme však brát v úvahu návazné prvky, které přece jenom určité snížení přenosové rychlosti způsobí. Ale i tak lze realizovat obrovské datové toky v řádech Gigabitů (v případě produktů LightPointe se jedná **až o 2,5 Gbit/s**). Každá jednotka je tvořena kombinovaným optickým vysílačem a přijímačem, takže se navíc jedná o obousměrné plně duplexní spojení.

3.3 Bezpečnost paprsku

Intenzita vyzařovaného laserového paprsku je natolik nízká, že nepředstavuje ohrožení zdraví či majetku. Bezpečnost laserového paprsku je u výrobců garantována testy a certifikáty. Použité lasery jsou většinou třídy 1M, což je označení pro **paprsky očím naprosto bezpečné**. Navíc jsou vlnové délky v řádech stovek nanometrů zcela mimo frekvenční pásma podléhající regulaci, proto při instalaci nevznikají žádné legislativní překážky.

3.4 Bezpečnost dat

Vedle bezpečnosti s ohledem na zdraví či majetek poskytují bezdrátové laserové spoje i **vynikající možnosti pro zajištění bezpečnosti přenášených dat**. Přenos laserovým svazkem totiž umožňuje realizovat kvantové kryptografické protokoly, které garantují bezpečnou komunikaci, založenou na principech kvantové teorie a odposlech takto přenášených signálů je prakticky vyloučen.

3.5 Spolehlivost a dostupnost

Čím kratší vzdálenost, tím vyšší spolehlivost – to je základní pravidlo bezdrátových laserových spojů. Realizovat spolehlivé spoje na delší vzdálenosti totiž znemožňuje **útlum světla v atmosféře**, který se razantně zvyšuje smogem, deštěm, sněžením a především mlhou. Jelikož je závislost na povětrnostních podmínkách podstatnou nevýhodou těchto spojů, snaží se výrobci aplikovat do svých produktů stále nové a **nové metody pro zvýšení spolehlivosti**. Není samozřejmě možné se zde podrobně zabývat všemi, pojďme se ale podívat alespoň na některé. Jednou z nich je např. **vícesvazkové šíření signálu**, které je odolnější jak vůči atmosférickým vlivům tak i vůči zaclonění paprsku např. přelétajícím ptákem. Zpravidla se používají 4 svazky.

Významný je také **zvýšení délky nosné vlny** (drtivá většina současných spojů používá vlnovou délku 850 nm) Díky výhodnějším podmínkám pro bezpečnou práci v pásmu 1550 nm lze podstatně zvýšit výkon laserového vysílače a přesto zachovat paprsek zdraví neškodný.

Pro přijímače se vedle běžně používaných křemíkových PIN diod, které jsou dostatečně rychlé, se používají tzv **APD diody**. Tyto mají až stonásobnou citlivost oproti PIN diodám, avšak musí být stabilizována jejich teplota, musí pracovat při větším napětí, atd. U profesionálních systémů jsou však čím dál častěji používané, neboť – jak udávají samotní výrobci – výsledek stojí za investice. Spolehlivost s ohledem na vlivy počasí je pak dokonce lepší než 99,995 %.

Dalšího zvýšení spolehlivosti výrobci dosahují také použitím velkých apertur vysílacích soustav. Dochází tak ke snížení optické intenzity na výstupu, což dále zvyšuje odolnost svazku vůči zaclonění.

Velmi důležitým hlediskem je **zajištění směrové stability spoje**. Je třeba si uvědomit, že na vzdálenost kilometru znamená i chvění vysílače velké odchylky paprsku (Při vychýlení vysílače o 2 mrad se paprsek na vzdálenosti 5 km vychýlí o 10 m). Proto bývají držáky velice robustní a předimenzované, aby se tomuto vlivu zamezilo. Někdy však ani nejpevnější uchycení nemusí stačit, neboť budova, na kterou je zařízení instalováno se může pohybovat. Na střeších výškových budov mohou výkyvy dosáhnout i několika centimetrů. Někteří přední výrobci začínají do svých zařízení aplikovat další prostředek pro zvýšení spolehlivosti, tzv. **Autotracking** systém, což je systém aktivního zaměřování, který automaticky upravuje směr paprsku dle potřeby.

Jak vidíte, bezdrátové optické spoje prošly opravdu obrovským vývojem, stále však platí, že základem je vhodné dimenzování dosahu bezdrátového optického spoje. Přestože výrobci udávají garantované dosahy v některých případech až 7 km, doporučuje se – zejména v oblastech náchylných na mlhy - realizovat pouze spoje na relativně krátké vzdálenosti (kolem 500 m). Tak lze zajistit dostupnost 99,99 %. Neoddiskutovatelnou podmínkou spolehlivého spoje je snad ještě více, než u mikrovlnných systémů naprostá přímá viditelnost.

3.6 Výhody oproti mikrovlnným spojům

- vysoké přenosové rychlosti (až 2.5 Gbit/s) - vysoká přenosová rychlost umožňuje plnohodnotné nasazení těchto systémů ve všech typech přenosových sítí
- žádné vzájemné rušení - vysoce směrový paprsek zaručuje vysokou prostorovou selektivitu přenosového signálu, proto nehrozí interference s jinými spoji
- žádná potřeba kmitočtového přidělu - pásmo optické nosné vlny leží mimo oblast působnosti ČTÚ, proto při instalaci a provozu spoje nevznikají legislativní překážky a optická síť je tak naprosto nezávislá na omezeném a regulovaném spektru a kmitočtové licenci
- transparentnost pro používané protokoly a navazující sítě - Ethernet, Fast Ethernet, Gigabit Ethernet, SONET/SDH, ATM, FDDI atd.
- přenositelnost a flexibilita řešení - frekvenční nezávislost umožňuje případné přesunutí spoje na jiné lokality bez přeladění
- interní i externí umístění - některá zařízení lze umístit jak vně budov, tak i uvnitř např. za okno a chránit tak samotné jednotky před atmosférickými vlivy
- bezpečnost přenášených dat - lze používat výše zmiňované kryptografické protokoly
- příznivý poměr cena/výkon - tato pojítka jsou zvláště u vysokých přenosových kapacit podstatně cenově přístupnější než kapacitou srovnatelná rádiová pojítka

Jak vidíte, přednosti bezdrátových laserových spojů tedy ocení zejména ti, kteří požadují vysoké přenosové rychlosti na relativně krátké vzdálenosti. Při použití klasických mikrovlnných systémů pro takovéto aplikace můžete narazit na problém frekvenčního přidělu. Prostě se může stát, že v daných lokalitách již nejsou volné frekvence. Naproti tomu FSO nezamořují své okolí, neboť operují s velmi úzkým světelným paprskem, nevznikají žádné postranní laloky a použité frekvence nejsou regulovány ani zpoplatňovány.

4. Vysílací laserové diody

Laserové diody vyzařují optický výkon z relativně malé plošky eliptického tvaru. Lineární rozměry této plošky jsou řádu 10^{-6} m a poměr hlavní a vedlejší poloosy bývá 4:1. Vyzařovaný svazek má eliptickou stopu s různou úhlovou šířkou svazku v rovině hlavní a vedlejší poloosy. V rovině vedlejší poloosy je úhlová šířka svazku větší než v rovině hlavní poloosy a je rovna přibližně 30° . Kruhová symetrie svazku se dosahuje speciální vysílací optickou soustavou.

Polovodičové lasery (laserové diody, LD) jsou na optickém výstupu pouzdra opatřeny buď okénkem (pro záření do volného prostoru) nebo (jsou-li určeny pro záření do vlákna) tzv. „pigtailem“ – částí optického vlákna, do které je výkon LD s určitými ztrátami zaveden.

LD mohou pracovat v kontinuálním nebo impulsním režimu. Pracuje-li LD v kontinuálním režimu, bývá hodnota optického výkonu 0,1 mW až 100 mW při. V impulsním režimu lze dosáhnout výkonu řádové hodnoty 100 W při šířce impulsu 100 ns. Musíme brát v potaz i životnost diody, v praxi ji nevyužíváme při maximálním výkonu, ale volíme hodnotu nižší (uvažujte 50-75%). Prahová hodnota budícího proudu např. u kontinuálně pracující LD s optickým výkonem 10 mW je přibližně 40 mA. Doba náběhu komunikačních LD bývá menší než 1 ns.

4.1 Hlavní katalogové parametry laserových diod

- výkon – P_{LD} [mW],
- budící proud (forward current) I_F [mA],
- prahový proud (threshold current) I_{th} [mA],
- šířka spektrální čáry (spectral line-width) [nm],
- typ pouzdra a zapojení vývodů,
- případně některé další parametry v závislosti na typu, jako například průměr jádra optického vlákna u pigtailovaných diod

Příklad katalogových parametrů je na Obr. 4.1.

4.2 Využití Laser diod

Použití LD je velmi rozsáhlé. V některých případech slouží jako optické budící zdroje jiných pevnolátkových laserů. Známé je použití LD v laserových tiskárnách, čtečkách čárového kódu apod. Velmi významné je použití LD v komunikacích. Doba náběhu komunikačních LD je menší než 1 ns. LD pracují v typických spektrálních oknech: 850 nm, 1300 nm a 1550 nm. Hlavní výhody LD spočívají v jejich snadné přímé modulaci budícím proudem. Šířka pásma přenosu může dosáhnout řádové hodnoty několik GHz. LD mají malé rozměry (lineární rozměry pouzdra obvykle nejsou větší než několik mm). Dobrá cenová dostupnost je nabízena u LD pracujících ve spektrálním okně 850 nm.

MOCVD Diode Lasers – 850 to 1550 nm						
CW Operated Types						
Type Number	Std. Pkg. See Photo and Diag. Ref.	Typical Characteristics, T=22°C				Fiber Optic Core Dia. (µm)
		Forward Current I_F (mA)	Power Po (mW)	Spectral Line-width (nm)	Threshold Current I_{th} (mA)	
MOCVD GaAlAs Double Heterojunction Types – 850 nm						
C86090E	(F)	300	100	4	150	–
C86094E	(Y)	250	50	4	150	–
MOCVD InAlGaAs Quantum Well Types – 850 nm						
C86046E	(R)	40	10	1	20	–
C86101E	(F)	40	10	1	20	–
MOCVD InGaAs Quantum Well Types – 905 nm						
C86135E	(R)	125	40	1	60	–
C86136E	(F)	125	40	1	60	–
MOCVD InGaAs Quantum Well Types – 980 nm						
C86121D-19 _{2,4}	(M)	100	10	<1	30	6.2
C86121E-19 _{2,4}	(M)	150	20	<1	30	6.2
C86121D-20 _{2,4}	(M)	100	10	<1	30	3.8
C86121E-20 _{2,4}	(M)	150	20	<1	30	3.8
C86121F-20 _{2,4}	(M)	175	30	<1	30	3.8
C86123E	(R)	100	50	<1	30	–
C86123F	(R)	160	100	<1	30	–
C86129F-20 _{2,4}	(V)	175	30	<1	30	3.8
MOCVD InGaAs Quantum Well Types – 1060 nm						
C86125E	(R)	150	50	2	60	–
C86126E-19 _{2,4}	(M)	150	10	2	60	6.2
MOCVD InGaAsP Quantum Well Types – 1300 nm						
C86141E	(R)	100	30	3	25	–
MOCVD InGaAsP Quantum Well Types – 1550 nm						
C86139E	(R)	100	30	4	25	–

Obr. 4.1 Ukázka katalogového listu laserových diod

5. Příjmací Fotodiody

Při konstrukci přijímače máme možnost volby mezi dvěma typy přijímacího prvku a to volbu fotodiody PIN a nebo lavinové fotodiody APD.

5.1 Hlavní katalogové parametry fotodiód

- typ pouzdra (standard package),
- průměr aktivní plochy fotodiody D_{PD} (photo sensitivity diameter) [mm nebo μm],
- proudová citlivost S_i při dané vlnové délce (responsivity) [A/W] (napěťová citlivost S_u [V/W] je pak dána zatěžovacím odporem),
 - definuje jako proud (napětí) na jejím výstupu vztažený k jednotce optického výkonu, který na fotodiodu dopadá:
 - je spektrálně závislá. Např. u křemíkových PIN fotodiód se dosahuje maximální citlivosti ($0,6 \text{ A}\cdot\text{W}^{-1}$) pro délku vlny 900 nm.
- proud za tmy I_d (dark current) [nA]
- spektrální proudová hustota šumu I_n [$\text{fA}/\text{Hz}^{-1/2}$] (spectral noise current density) pro výpočet úrovní šumů,
- kapacita přechodu C_d [pF] (capacity),
- doba odezvy t_r [ns] (response time),
- optický výkon ekvivalentní šumu NEP_1 [$\text{fW}/\text{Hz}^{-1/2}$] (noise equivalent power)
 - NEP určuje střední výkon harmonicky modulovaného optického výkonu, při kterém je střední hodnota napětí na fotodiodě rovna standardní odchylce šumového napětí.
 - Veličina NEP se často vztahuje na jednotku šířky pásma přenosu B_m . Protože výkon šumu je přímo úměrný $\sqrt{B_m}$
- doporučené předpětí [V] (bias voltage).

5.2 PIN fotodiody

Jsou fotodiody, které mají rozšířenou ochuzenou vrstvu (vrstva „I“ mezi vrstami „P“ a „N“), která zvětšuje aktivní plochu pro oblast příjmu fotonů. Vrstva „I“ zmenšuje kapacitu přechodu, ale zároveň zvyšuje průletovou dobu fotonů což negativně ovlivňuje dobu náběhu t_r a tím šířku pásma B_m a přenosovou rychlost. Dosažitelné hodnoty doby náběhu t_r jsou desítky ps což odpovídá přenosové rychlosti desítky Gbit/s. Typická citlivost fotodiód PIN je $0,6 \text{ A}/\text{W}$ pro délku vlny 900 nm.

Vyrábí se z materiálů:

AlGaAs/GaAs - 850 nm;

InGaAs/InP - 1300 nm až 1550 nm;

HgCdTe/CdTe - 3000 nm až 17000 nm;

InGaAsP/InP a GaAlAsSb/GaSb - 920 nm až 1700 nm

5.3 APD fotodiody

APD lavinové fotodiody vznikly dalším rozšířením ochuzené vrstvy „I“. Tím došlo ke zvýšení citlivosti fotodiody, ale na druhou stranu je nutné přiložit vyšší napětí U . Díky tomu dochází ve fotodiode k lavinovému jevu, který způsobí vnitřní zesílení ($G_{FD} = 100$). Uvolněné elektrony po interakci s fotony jsou urychlovány relativně vysokým přiloženým napětím ($U = 100$ V) a strhávají k uvolnění další elektrony. Díky tomu poskytují zisk dříve než dojde k zesílení v elektronických obvodech (zvyšuje se citlivost fotodiody přibližně 100x). Nevýhodou je, že mechanismus zesílení je zdrojem šumu, vyžaduje zdroje s relativně velkými a stabilními hodnotami napětí (řádově stovky voltů). Zesílení fotodiody je citlivé na změny teploty a napětí. APD fotodiody vyžaduje komplikovanější elektronické obvody

5.4 Srovnání fotodiód

Hlavní rozdíl z hlediska použití je, že lavinová fotodiody má na rozdíl od fotodiód PIN zesílení signálu (běžně 10x – 100x) již v optické části. Toto zesílení však přináší i své nevýhody a to hlavně vysoké napájecí napětí (běžně 100 – 200 V) a teplotní nestabilitu. Z tohoto důvodu většinou volíme křemíkovou fotodiody typu PIN.

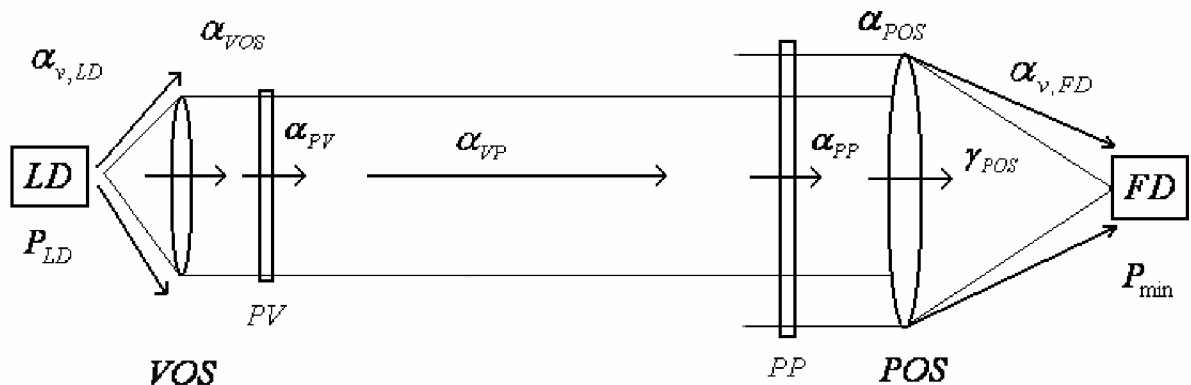
Si PINs – Large Area, Fast Response

Typical Characteristics @ T = 22°C

Part #	Standard Package	Photo Sens. Diam. (mm)	Resp. @ 900 nm (A/W)	Dark Curr.: I_d (nA)	Spect. Noise Curr. Dens.: I_n (fA/√Hz)	Cap. @ 100 kHz: C_d (pF)	Resp. Time t_r (ns)	NEP @ 900 nm (fW/√Hz)	Bias Volt for These Specs. (V)
FFD-040B	Y	1	0.58	1	18	1.8	2	31	15
FFD-100	B	2.5	0.58	2	25	8.5	3.5	44	15
FFD-200	C	5.1	0.58	4	36	30	5	62	15

Obr. 5.2 Ukázka katalogového listu křemíkových fotodiód

6. Bilance optického spoje



Obr. 6.1 Místa útlumu a zesílení v energetické bilance FSO

Energetická bilance FSO vyjadřuje shrnutí všech faktorů, které ovlivňují kvalitu bezkabelového optického 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_{vz} , rezervu spoje na atmosférické přenosové prostředí ρ_{atm} , minimální hodnotu poměru signálu k šumu SNRo, minimální detekovatelný výkon fotodiody P_{min} , citlivost přijímacího systému P_0 a úroveň přijímaného výkonu, při které dochází k saturaci přijímače P_{max} . Útlumová rovnice pro výpočet rezervy spoje znázorňuje vztah (6.1) [3].

$$\alpha_M = \alpha_{LD} - \alpha_{v,LD} - \alpha_{VOS} - \alpha_{KK} - \alpha_{VP} + \gamma_{PC} - \alpha_{POS} - \alpha_{v,FD} - \alpha_{vz} - \rho_{atm} - \alpha_{ber} \quad (6.1)$$

Účinnost vazby „laserová dioda-vysílací optická soustava“ $\alpha_{v,LD}$

- závisí na úhlové šířce a rozložení svazku vyzařovaném LD a na numerické apertuře vysílací optické soustavy. V decibelové míře se $\alpha_{v,LD}$ vypočte podle vztahu (6.2) [3]

$$\alpha_{v,LD} = \left| 10 \log \frac{P_{VOS}}{P_{LD}} \right| \quad (6.2)$$

kde P_{vos} je výkon dopadající na aperturu vysílací optické soustavy.

- 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 a v jehož kruhové stopě je obsažen stejný výkon jako v eliptické stopě původního svazku, pološířka svazku se značí w .

Účinnost vazby „laserová dioda-vysílací optická soustava původního svazku $\alpha_{v,LD}$ lze taky spočítat ze vztahu (6.3)

$$\alpha_{v,LD} = 10 \log \left(1 - e^{-\frac{r^2}{w^2}} \right) \quad (6.3)$$

kde

$$w = f \sqrt{\operatorname{tg} \left(\frac{\varphi_x}{2} \right) \operatorname{tg} \left(\frac{\varphi_y}{2} \right)} \quad (6.4)$$

kde w je pološířka ekvivalentního svazku, φ_x, φ_y jsou vyzařovací úhly laser diody v osách x a y , r je průměr čočky VOS a f je vzdálenost laser diody od čočky VOS

V praxi je možno předpokládat, že útlum vazby $\alpha_{v,LD}$ je přibližně 1,5 dB [3].

Útlum šířením: α_{VP}

- vzniká vlivem rozbíhavosti a sbíhavosti světelných paprsků šířících s volným prostředím
- Divergence je příčinou poklesu hustoty energie se vzdáleností od zdroje a je to jediný základní mechanismus útlumu.
- lze použít vztah:(6.5) [3]

$$\alpha_{VP} = -\gamma_{POS} + 10 \log \left(\frac{4\pi L_{VP}}{\lambda} \right)^2 - \gamma_{POS} \quad (6.5)$$

kde L_{VP} je vzdálenost hlavic, λ je vlnová délka, γ_{POS} je zisk vysílací soustavy, γ_{POS} je zisk přijímací soustavy

nebo vztah (6.6) [3] pro výpočet pomocí *pomocné délky*:

$$\alpha_{VP} = \left| 20 \log \frac{L_0}{L_0 + L_{VP}} \right| \quad (6.6)$$

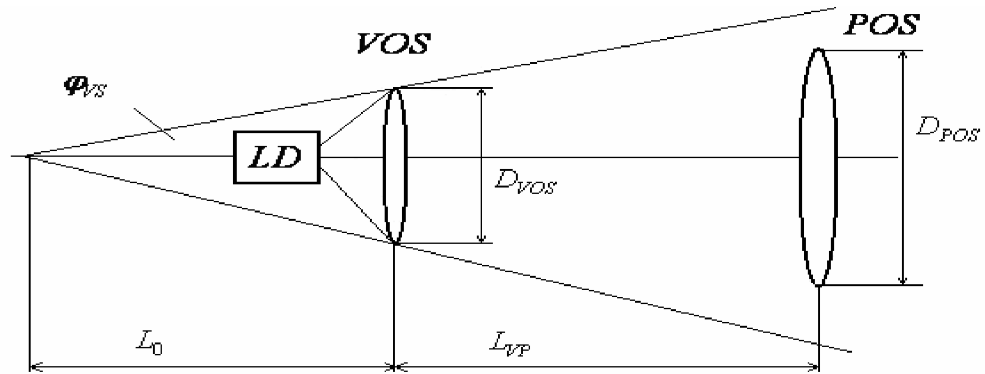
kde L_{VP} je vzdálenost mezi hlavicemi spoje a L_0 je tzv. *pomocná délka* (viz obr. 6.2).

- o tento vztah je výhodnější a v práci s ním budeme dále pracovat.

Pomocná délka: L_0

- k vyjádření L_0 je třeba znát průměr vysílací optické soustavy D_{VOS} a úhlovou šířku vysílaného svazku φ_{VS}
- vypočítá se pomocí vztahu (6.7) [3]:

$$L_0 \approx \frac{D_{VOS}}{\varphi_{VS}} \quad (6.7)$$



Obr. 6.2 Znáornění významu veličiny L_0 (pomocné délky)

Zesílení přijímací optické soustavy γ_{POS}

- závisí na poměru ploch přijímací a vysílací apertury, rozložení intenzity v Gausově svazku a umístění středu přijímací apertury v ose Gausově svazku..
- je dáno vztahem (6.8) [3]:

$$\gamma_{POS} = \left| 20 \log \frac{D_{POS}}{D_{VOS}} \right| + 3dB \quad (6.8)$$

Účinnost vazby „přijímací optická soustava-fotodiody“ $\alpha_{v,FD}$

- za předpokladu konstantního ozáření přijímací apertury závisí na poměru aktivní plochy fotodiody A_{FD} a velikosti skvrny A_{spot} , kterou v přijímací optické soustavě vytváří přijaté světlo.
- Pro $A_{FD} \geq A_{spot}$ je $\alpha_{v,FD} = 0dB$ [3]
- Pro výpočet lze použít vztah (6.3), kde za r dosadíme průměr aktivní plochy fotodiody a za w dosadíme průměr spotu, který dopadá na fotodiodu.

Rezerva spoje na atmosférické přenosové prostředí ρ_{atm}

- lze odvodit z dlouhodobého pozorování útlumu atmosférického přenosového prostředí.
- Atmosférické přenosové prostředí má značný vliv na kvalitu přenosu. Je prostředím obecně *nestacionárním a nehomogenním* (předpokládá se, že také dielektrickým, lineárním, nedisperzním, izotropním), jeho vliv na parametry přenosového kanálu má náhodný charakter
- Ztráty v atmosféře jsou způsobeny dodatečným útlumem v atmosféře těmito jevy
 - o Molekulární absorpce
 - Útlum vzniká při shodě kmitočtu vysílaného záření s rezonančním kmitočtem nějakého prvku obsaženého v atmosféře.(molekuly vody, oxidu uhličitého nebo ozónu). Čím vyšší je koncentrace tohoto prvku, tím vyšší je útlum
 - o Rozptyl na pevných částicích
 - Útlum vzniká v důsledku přítomnosti pevných částic v atmosféře (kapičky vody,prachové částice nebo větší molekuly plynu).

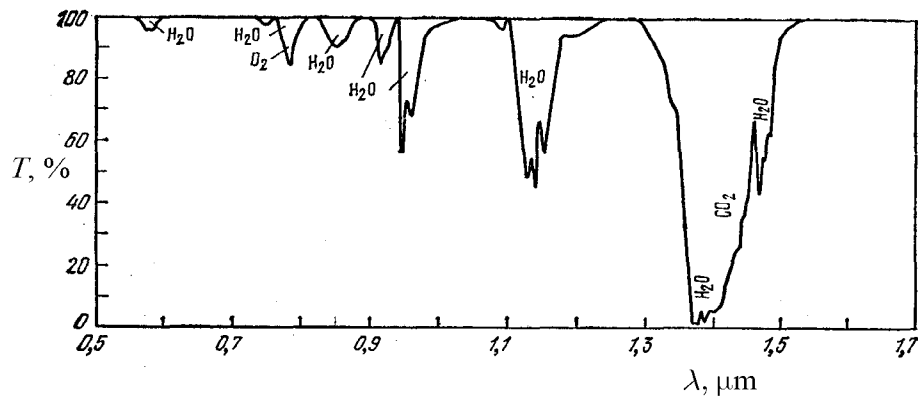
- Rozptyl turbulentní fluktuací optické hustoty atmosféry
 - Útlum vzniká vlivem atmosférické turbulence, což je soustavné mísení teplých a studených mas vzduchu. To má za následek změny optických vlastností vzduchu včetně indexu lomu.
- Krátkodobé přerušování svazku (např. letícím hmyzem, ptákem apod.)
- celkový útlum způsobený atmosférickými vlivy je součtem příspěvků od každého jevu, přičemž hodnoty jsou vztaženy na metr délky
- Možno zvolit $\rho_{atm} \cong 6 \text{ dB/km}$ [3]

Základními veličinami pro definujícími vliv přenosového prostředí na kvalitu přenosu FSO jsou:

- koeficient útlumu $\alpha_{1,atm}$ [dB/km], resp koeficient extinkce α_e [km^{-1}],
- index lomu prostředí n [-] a
- strukturní parametr indexu lomu C_n^2 [$\text{m}^{-2/3}$].

Tyto veličiny jsou závislé na souřadnicích prostoru, času a vlnové délce.

Na Obr. 6.3 [5] je spektrální závislost propustnosti „čisté“ a „klidné“ atmosféry



Obr. 6.3 Útlum čisté atmosféry v závislosti na vlnové délce

Útlum vlivem turbulence

V atmosféře se nachází nehomogenní oblasti různých tvarů a velikostí, s různým indexem lomu. Tím dochází k útlumu vlivem turbulence. Pro výpočet turbulencí se využívá statistických metod.

Pro odhad útlumu turbulencí platí přibližný vztah (6.9) [6]

$$\alpha_{\text{turb}} = \sqrt{1 + \frac{2\pi}{\lambda} (\sigma_{\text{I,rel}}^2)^{-2/5}} \quad (6.9)$$

kde

$$\sigma_{\text{I,rel}}^2 = KC_n^2 \left(\frac{2\pi}{\lambda} \right)^{7/6} L_{12}^{11/6} \quad (6.10)$$

kde C_n^2 je strukturní parametr indexu lomu, $\sigma_{\text{I,rel}}^2$ je relativní variance optické intenzity v místě příjmu, platí pro ni vztah (6.10) [6], λ je vlnová délka optické nosné vlny, K je konstanta charakterizující optickou vlnu ($K=1,23$ pro rovinnou vlnu a $K=0,5$ pro sférickou vlnu)

Tab. 6.1 Typické hodnoty pro strukturní parametr indexu lomu

C_n^2 [$\text{m}^{-2/3}$]	míra turbulence
10^{-16}	Klidná atmosféra
10^{-15}	Slabá
10^{-14}	Střední
10^{-13}	Silná
10^{-12}	Velmi silná

Minimální hodnota SNR_0

- 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 $v_f = 10$ Mbit/s bývá hodnota minimálního detekovatelného výkonu přijímače $P_{\min} = -43$ dBm [3].

Citlivost přijímacího systému P_0

- je to minimální úroveň přijatého optického výkonu P_0 , která je nutná k dosažení stanovené hodnoty BER
- vyjádří se ze vztahu (6.11) [3]:

$$P_0 = P_{\min} + SNR_0 \quad (6.11)$$

Úroveň přijímaného výkonu, při které dochází k saturaci přijímače P_{\max}

Oblast dynamiky přijímacího systému Δ_p

- oblast dynamiky přijímacího systému je vzhledem vysoké míře fluktuací přijímaného výkonu významnou veličinou
- je definovaná výrazem (6.12) [3]:

$$\Delta_p = P_{\max} - P_0 \quad (6.12)$$

- její hodnota v decibelové míře bývá $\Delta_p = 30$ dB

Útlum vyvolaný nedokonalostí vzájemného zamíření hlavice spoje α_r

- je způsoben různými vlivy: nezkušeností obsluhy při zaměřování, mechanickými deformacemi úchytu hlavice při aretaci, teplotními deformacemi konzol a pod.
- Empiricky bylo zjištěno, že útlum α_r nepřevyšuje hodnotu 1,5 dB [3].

7. Program

7.1 Představa

Cílem je vytvoření programu pro výpočet výkonové bilance optického spoje. Od programu se očekává, aby měl přehledné a spolehlivé uživatelské rozhraní pro jednoduché zadávání parametrů spoje a následné sledování jejich vlivu na výsledek. Za pomoci programu by uživatel měl být schopen navrhnout optický spoj, kdy úroveň signálu u přijímače bude větší než citlivost přijímače a menší než maximální detekovatelný výkon. Úkolem programu je vykreslit výkonový diagram.

7.1.1 Skladba Programu

Uživatelské prostředí bude rozděleno do čtyř oblastí

- 1) Oblast pro načtení vstupních hodnot od uživatele
- 2) Oblast pro vypsání vstupních hodnot do schématu
- 3) Oblast pro zobrazení vypočtených hodnot optické bilance
- 4) Grafické znázornění výkonového diagramu

7.1.2 Požadavky na program

- správný a spolehlivý výpočet parametrů optického spoje
- grafické znázornění výkonového diagramu
- možnost uložení a načtení parametru optického spoje
- tisk výkonového diagramu a parametrů optického spoje

7.1.3 Vývojový diagram



Obr. 7.1 Vývojový diagram programu

7.2 Matematický popis simulace

V matematickém popisu jsem se držel teoretické části výpočtu výkonové bilance optického spoje (viz kapitola 6. Bilance optického spoje) Liší se jen ve značení veličin vzhledem k obtížnému značení programovacím jazyku Delphy 6 Výkonová rovnice má tedy tvar dle vztahu(7.1):

$$L_M = L_{LD} - L_{VLD} - L_{VOS} - L_{KK} - L_{VP} + A_{PC} - L_{POS} - L_{VFD} - L_{rz} - L_{atm} - L_{ber} \quad (7.1)$$

Tab. 5.1 Význam jednotlivých značek

značka	parametr	jednotka
L_M	α_M Rezerva spoje	dB
P_{LD}	P_{LD} Výkon vysílací laserové diody	dBm
L_{VLD}	α_{VLD} Útlum vazby LD/VOS	dB
L_{VOS}	α_{VOS} Útlum na VOS	dB
L_{KK}	α_{KK} Útlum krycích skel a interferenčním filtru	dB
L_{VP}	α_{VP} Útlum šířením	dB
A_{PC}	γ_{PC} Zisk POS	dB
L_{POS}	α_{POS} Útlum na POS	dB
L_{rz}	α_{rz} Rezerva na zaměrování	dB
L_{atm}	α_{atm} Rezerva na atmosféru	dB
L_{ber}	α_{ber} Rezerva na chybovost	dB

7.3 Uživatelské prostředí

Po spuštění programu se objeví okno (Obr. 7.12), které je rozdělené do čtyř částí.

Jednou částí je pole pro zadávání vstupních parametrů, kam uživatel zadává parametry optického spoje FSO, pro který chce návrh uskutečnit.

Hodnoty které uživatel zadává do jednotlivých kolonek v poli pro zadávání vstupních parametrů FSO se automaticky vypisují do pole s obrázkou (Obr. 7.9) nad tímto polem. Pole s obrázkou slouží pro zvýšení přehlednosti a názornosti návrhu FSO. Obrázky znázorňují optický bezkabelový spoj, který je popsán parametry jejich rozměry a jednotkami.

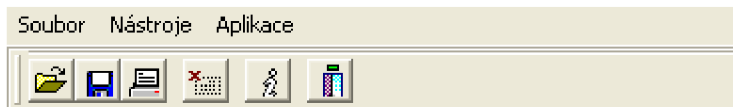
V pravém dolním poli je tabulka, kde jsou vypsány parametry energetické bilance optického spoje FSO (Obr. 7.11).

Nad tabulkou parametrů bilance optického spoje se nachází Pole grafického znázornění (Obr 7.14). V grafu je znázorněn útlumový diagram. U každého bodu grafu je pro přehlednost vypsána hodnota útlumu. Je zde taky znázorněna hodnota maximálního a minimálního detekovatelného výkonu fotodiody díky kterým můžeme okamžitě určit správnost návrhu optického bezkabelového spoje.

Další důležitou částí je hlavní panel. Horní lišta obsahuje čtyři záložky a šest ikon. (Obr. 7.2)

7.3.1 Jednotlivé části programu

Hlavní panel:



Obr. 7.2 Hlavní panel



- ikona Otevřít

- po stisku ikony se zobrazí okno pro otevření souboru (viz Obr. 7.3)
- prostřednictvím okna uživatel může načíst dřívější uložení parametrů spoje



- ikona Uložit

- stiskem ikony se otevře okno pro uložení souboru (viz Obr. 7.3)
- v okně pro uložení lze zobrazené parametry energetické bilance uložit na zvolené umístění.



- ikona Tisk

- po stisku ikony se objeví okno pro tisk (viz Obr. 7.4)



- ikona Výpočet

- stiskem klávesy se provede výpočet parametrů FSO a vykreslení grafu.



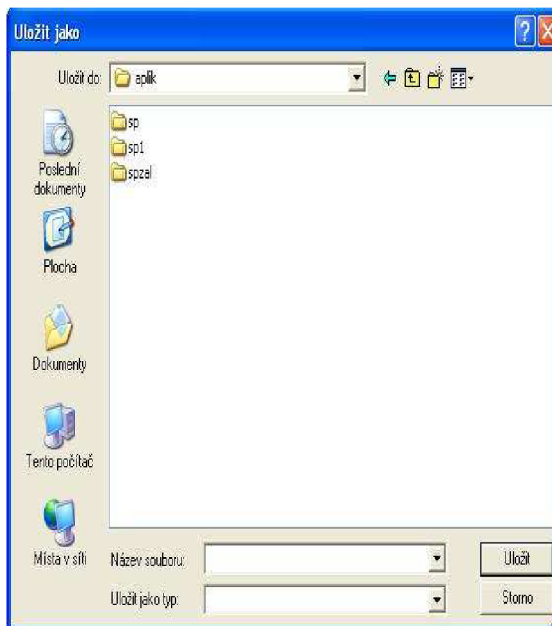
- ikona O aplikaci

- stiskem klávesy se objeví okno O aplikaci (viz Obr. 7.5)



- ikona Konec

- stiskem ikony se ukončí program



Obr. 7.3 Okno pro uložení (otevření)

Pole pro zadávání vstupních parametrů FSO:

- pole slouží pro zadávání vstupních parametrů optického spoje FSO pro který chceme realizovat výpočet energetické bilance FSO.
- do kolonek pro jednotlivé parametry lze zadávat pouze čísla
- program používá jako s desetinný oddělovač tečku, proto je program opatřen ošetřením aby nedošlo k záměně a následnému špatnému výpočtu. Jakmile se do kolonky vepíše čárka, tak se změní v tečku a navíc se nedá napsat vícekrát.
- pole tvoří čtyři záložky:
 - Vysílací apertura
 - Přijímací apertura
 - Prostředí
 - Rezervy
- každá záložka obsahuje názvy jednotlivých parametrů, jejich jednotky a kolonky pro zadávání číselných údajů.
- jednotlivé hodnoty vstupních parametrů FSO se po zadání okamžitě vypisují do pole s obrázky k příslušnému parametru.

Záložka Vysílací apertura:

Obr. 7.6 Pole pro zadávání vstupních parametrů FSO záložka vysílací apertura

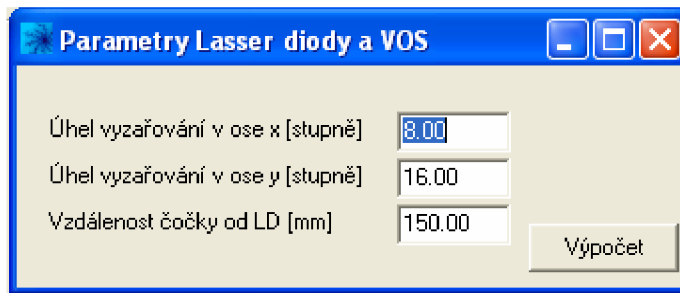
V této záložce (viz Obr. 7.6) se zadávají parametry vysílací optické soustavy. Všechny parametry lze zadávat ručně, hodnotu parametru *Útlum vazby LD/VOS* lze také vypočítat pomocí tlačítka *Rozšířené*, prostřednictvím kterého se otevře okno *Parametry Laser diody* viz Obr. 7.7. V okně jsou rozšiřovací údaje o Laser diodě a vysílací optické soustavě, ze kterých se při stisknutí tlačítka *vypočet* pomocí vzorce (7.2) a (7.3) [6] vypočte hodnota útlumu vazby LD/VOS a dosadí do kolonky *Útlum vazby LD/VOS* v záložce *Vysílací apertura*.

$$\alpha_{v,LD} = 10 \log \left(1 - e^{-2 \frac{r^2}{w^2}} \right) \quad (7.2)$$

kde

$$w = f \sqrt{\operatorname{tg} \left(\frac{\varphi_x}{2} \right) \operatorname{tg} \left(\frac{\varphi_y}{2} \right)} \quad (7.3)$$

kde w je , φ_x, φ_y jsou vyzařovací úhly laser diody v osách x a y , r je průměr čočky VOS a f je vzdálenost laser diody od čočky VOS

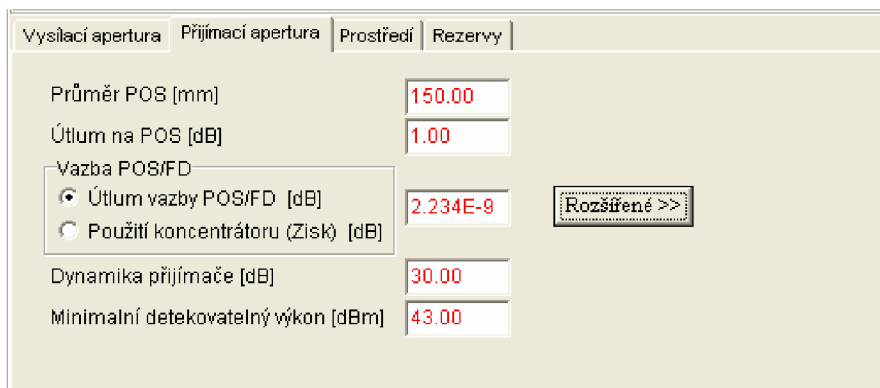


Obr. 7.7 Okno Parametry Laser diody a VOS

Záložka Přijímací apertura:



Obr. 7.8 Záložka Přijímací apertura pro útlum vazby POS/FD



Obr. 7.9 Záložka Přijímací apertura při použití koncentrátoru ve vazbě POS/FD

Záložka obsahuje parametry, které popisují a definují přijímací optickou soustavu. Opět všechny hodnoty můžeme zadat ručně. U položky *Vazba POS/FD* je možnost zaškrtnout, že program bude počítat s útlumem vazby POS/FD, nebo že program bude počítat se zařazeným koncentrátorem a tudíž se ziskem (viz Obr. 7.8 a 7.9.) Pokud je zaškrtnuto *Útlum vazby POS/FD*, potom je možnost zadat ručně hodnotu útlumu, nebo použít tlačítko *rozšířené* a tím otevřít okno *Parametry Fotodiody a POS*. Po zadání hodnot stisku tlačítka *Výpočet* se spočítá pomocí vzorce (7.4) hodnota útlumu vazby POS/FD a zapíše se do kolonky *Útlum vazby POS/FD* v záložce *Přijímací apertura*.

$$\alpha_{v,FD} = 10 \log \left(1 - e^{-2 \frac{r^2}{w^2}} \right) \quad (7.4)$$

kde D_{spot} je průměr spotu a D_{POS} je průměr čočky přijímací optické soustavy.

Záložka Prostředí:

The screenshot shows the 'Prostředí' (Environment) tab with the following parameters:

- Vzdálenost hlavic [m]: 700.00
- Útlum na krycích sklech [dB]: 3.00
- Rezerva na atmosféru [dB/km]: čistá obloha >> 0.75
- Útlum atmosféry vlivem turbulencí [dB]: 3.000
- Útlum atmosféry v závislosti na vlnové délce [dB/km]: 1550 nm >> 0.48

Obr. 7.10 Záložka Prostředí

Popisuje stav atmosféry pomocí jednotlivých parametrů. U položky *rezerva na atmosféru* je na výběr z pěti možností stavu atmosféry. Pro vybranou možnost se přiřadí odpovídající hodnota útlumu, která jí přísluší. viz tab 7.1

Tab. 7.1 Hodnoty útlumu atmosféry

Stav atmosféry	Hodnota útlumu atmosféry α_{atm} [dB/km]
silná mlha	340
střední mlha	59,5
slabá mlha nebo silný déšť	10,5
opar	5,0
čistá obloha	0,75

U položky *Útlum čisté atmosféry v závislosti na vlnové délce* jsou na výběr vlnové délky použité laser diody. viz tab 7.2 Vybrané možnosti se přiřadí odpovídající hodnota útlumu.

Tab. 7.2 Hodnoty útlumu čisté atmosféry

Vlnová délka λ [nm]	Hodnota útlumu čisté atmosféry α_{part} [dB/km]
650	1,58
808	1,05
830	1,49
850	0,90
915	2,44
1060	0,61
1300	1,49
1550	0,35

Výsledný útlum v atmosféře se vypočte ze vzorce (7.5) a zapíše se do pole *Energetická bilance spoje* do kolonky *Rezerva na atmosféru*.

$$\alpha_{\text{atmc}} = \alpha_{\text{turb}} + (\alpha_{\text{atm}} + \alpha_{\text{part}})L_{\text{VP}} \quad (7.5)$$

kde α_{atm} je útlum atmosféry vlivem počasí, α_{part} je útlum čisté atmosféry, α_{turb} je útlum vlivem turbulencí v atmosféře, L_{vp} je vzdálenost mezi hlavicemi spoje.

Záložka Rezervy:

The screenshot shows a software window with four tabs: 'Vysílací apertura', 'Přijímací apertura', 'Prostředí', and 'Rezervy'. The 'Rezervy' tab is active. It contains three input fields: 'Rezerva na zaměřování [dB]' with a value of 1.00, 'Rezerva na chybovost BER' with a dropdown menu showing '10 e-6', and '>> SNR0 [dB]' with a value of 13.5.

Obr. 7.11 Záložka Rezervy

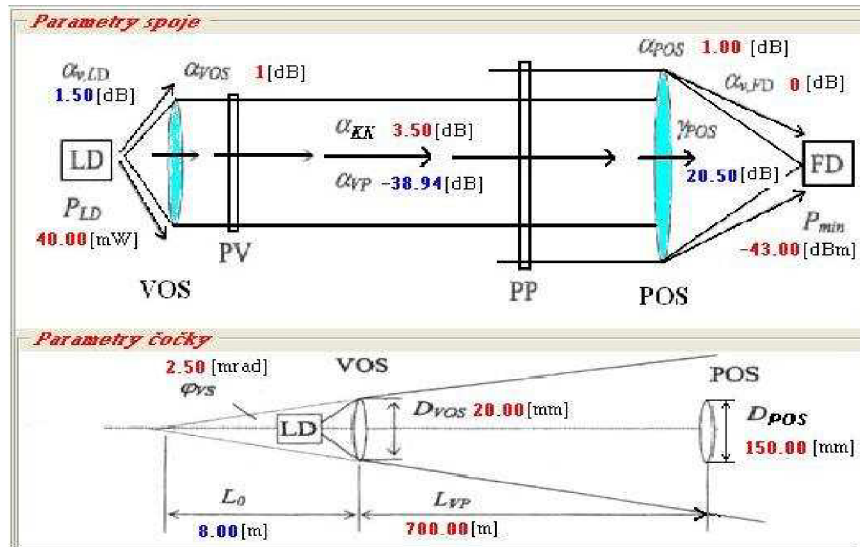
U položky *rezerva na chybovost* je na výběr ze čtyř možností chybovosti BER.. Pro vybranou možnost se přiřadí odpovídající hodnota útlumu, která ji přísluší. Viz tab 7.3

Tab. 7.3 Hodnoty SNR_0 pro chybovost BER

Chybovost BER	SNR_0 [dB]
10^{-3}	10,0
10^{-6}	13,5
10^{-9}	15,5
10^{-12}	16,6

Pole s obrázky:

- pole slouží pro názornému ukázání parametrů optického spoje
- pole obsahuje blokové schéma optického bezkabelového spoje FSO viz Obr. 7.12, blokové schéma s parametry čočky s jejich vstupními a výstupními parametry, jejich hodnotami a jednotkami.
- jednotlivé hodnoty vstupních parametrů jsou zapsány do obrázku automaticky ihned po zadání do kolonky v poli pro zadávání vstupních parametrů. Hodnoty vypočtených parametrů se do obrázku zapíše po stisknutí tlačítka pro výpočet.
- pro jednodušší zadávání parametrů spoje je možnost poklikání myši na konkrétní hodnotu v obrázku a kurzor se přepne do odpovídající kolonky v poli pro zadávání parametrů spoje.
- pro lepší orientaci ve zkratkách v obrázku stačí najet kurzorem myši na vybranou hodnotu a objeví se slovní popis veličiny.



Obr. 7.12 Pole s obrázky

Pole parametrů energetické bilance FSO:

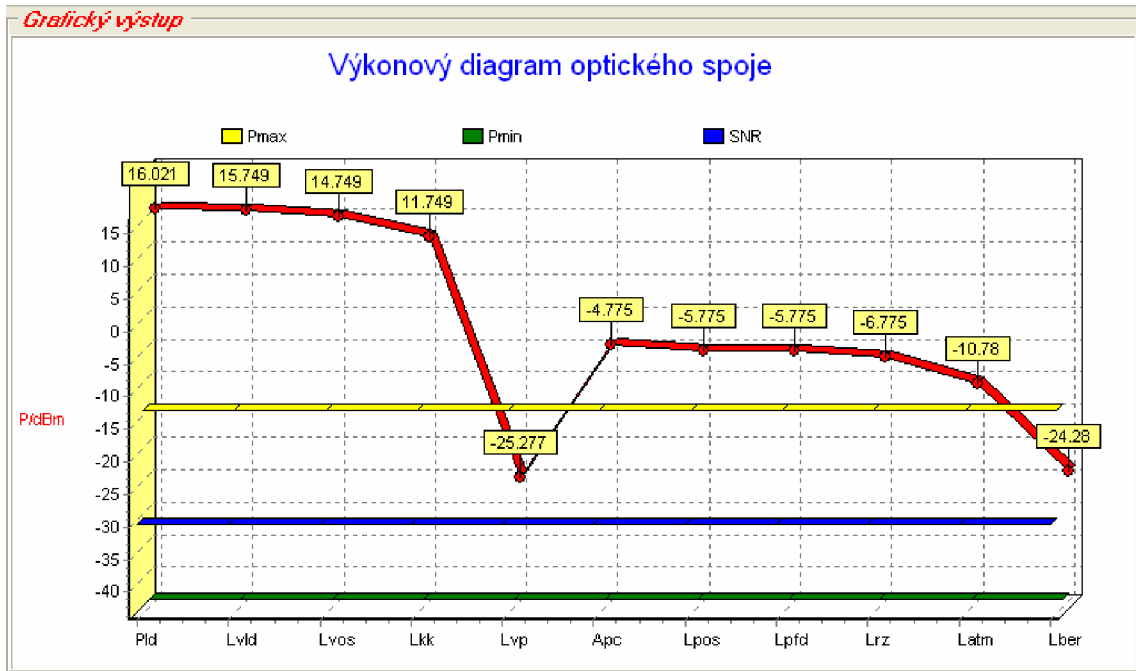
- obsahuje tabulku, kde jsou vypsány parametry energetické bilance spoje FSO, jejich názvy, hodnoty a jednotky

Energetická bilance spoje			
Parametr	Hodnota	Parametr	Hodnota
Výkon vysílače LD [dBm]	16.02	Pomocná délka [m]	8.00
Útlum vazby LD/VOS [dB]	1.50	Vzdálenost hlavíc [m]	700.00
Útlum na VOS [dB]	1.00	Průměr POS [mm]	150.00
Útlum na krycích sklech [dB]	3.50	Rezerva na zaměřování [dB]	1.50
Útlum šířením [dB]	-38.94	Rezerva na atmosféru [dB]	7.00
Zisk POS [dB]	20.50	Rezerva na chybovost [dB]	13.50
Útlum na POS [dB]	1.00	Dynamika přijímače [dB]	30.00
Průměr VOS [mm]	20.00	Min. detekovatelný výkon [dBm]	-43.00
Úhlová šířka svazku [mrad]	2.50	Max. detekovatelný výkon [dBm]	-13.00

Obr. 7.13 Pole parametrů bilance FSO

Pole grafického znázornění:

- pole obsahuje grafické znázornění útlumového diagramu FSO
- na ose X jsou jednotlivé složky útlumu a zesílení optického spoje v decibelové míře.
- každý bod v grafu je označen hodnotou, pro snadné odečítání z grafu.
- graf obsahuje úroveň maximálního, minimálního detekovatelného výkonu fotodiody a úroveň kdy je dostatečný odstup signálu ku šumu SNR, díky čemuž lze hned posoudit správnost navrhovaného spoje. viz Obr 7.14



Obr. 7.14 Pole grafického znázornění

Celkový pohled na program:

Energetická bilance spoje			
Parametr	Hodnota	Parametr	Hodnota
Výkon vysílací LD [dBm]	16.02	Pomocná délka [m]	10.00
Útlum vazby LD/VOS [dB]	0.27	Vzdálenost hlavice [m]	700.00
Útlum na VOS [dB]	1.00	Průměr POS [mm]	150.00
Útlum na krycích sídlech [dB]	3.00	Rezerva na zaměření [dB]	1.00
Útlum šíření [dB]	-37.03	Rezerva na atmosféru [dB]	4.00
Zisk POS [dB]	20.50	Rezerva na chybovost [dB]	13.50
Útlum na POS [dB]	1.00	Dynamika přijímače [dB]	30.00
Průměr VOS [mm]	20.00	Min. delekovatelny výkon [dBm]	-43.00
Úhlová šířka svazku [mrad]	2.00	Max. delekovatelny výkon [dBm]	-13.00

Obr. 7.15 Celkový pohled na program

8. Závěr

V této práci jsem se věnoval problematice optických spojů, jak kabelových tak bezkabelových. Přiblížil jsem jejich princip, parametry, výhody i nevýhody.

Dále jsem v mé práci vytvořil program, umožňující získat představu o energetické bilanci optického bezkabelového směrového spoje a takový spoj navrhnout. Díky programu můžeme snadno pozorovat vlivy jednotlivých parametrů FSO na energetickou bilanci FSO a tím ladit návrh optického bezkabelového spoje. Program pro výpočet bezkabelového optického spoje má jednoduché, přehledné uživatelské rozhraní. Pomocí programu lze navrhnout relativně přesně optický bezkabelový spoj. Svůj program jsem vytvořil v programovacím jazyce Delphi 6.

Zadávání hodnot v programu je ošetřeno proti zápisu nelogických hodnot. Tzn. lze zapisovat pouze číselné hodnoty. Program počítá s tečkou jako znakem pro oddělení desetinných míst. Program jsem ošetřil tak, že při zapsání čárky se zadaný znak změní v tečku a nelze desetinný znak zapsat dvakrát. Další výhodou programu jsou graficky znázorněné parametry optického bezkabelového spoje přímo v obrázku. Pokud uživatel pokliká na název parametru v obrázku, tak se kurzor objeví v příslušné kolonce pro určený parametr. Zadaná hodnota parametru se zapíše do obrázku. U některých parametrů lze vybrat z předdefinovaných možností. Program vytvoří kompletní výpis všech parametrů energetické bilance optického bezkabelového spoje i s přehledným výkonovým diagramem s popsány osami. Díky grafickému znázornění lze snadno určit jestli navržený spoj vyhovuje. Tento výsledek je možné pomocí programu snadno vytisknout. .

K programu jsem vypracoval nápovědu pro orientaci v programu ve formě manuálu, který je uveden v praktické části této bakalářské práce. Dále v elektronické podobě přikládám vypracovanou brožuru. Pomocí mého programu jsem vypracoval laboratorní úlohu pro výpočet energetické bilance bezkabelového optického spoje, která je v příloze č.1, kde jsem ověřil správnost výpočtu.

Součástí práce je přiložený zdrojový text programu, použité komponenty a samotný program, což umožní další modifikaci programu podle požadavků..

9. Použitá literatura

- [1] KASAP,S.O.: *Optoelectronics and Photonic: Principles and Practices*. New Jersey: Prentice Hall, 2001. 340 s. ISBN 0-201-61087-6
- [2] SALEH,B.E.A., TEICH, M.C.: *Základy fotoniky*, Praha: MATFYZPRESS, 1994. ISBN 80-85863-00-6
- [3] Wilfert, O., *Optoelektronika*, VUT, Brno, 2002
- [4] Teixeira,S.,Pacheco,X.:*Mistrovství v Delphy 6*, Computer Press, Praha, 2002
- [5] WILFERT, O., NĚMEČEK, J. The Transmitting Optical System of the Atmosphere Optical Link. In Proceedings of the International Konference RADIOELEKTRONIKA 96. Brno: VUT v Brně, . s. 204-207, ISBN 80-214-061
- [6] 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

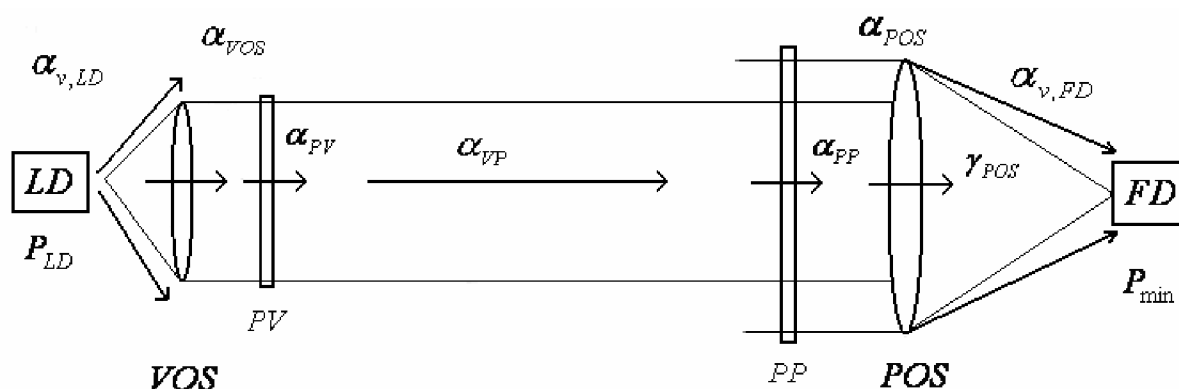
10. Přílohy

PŘÍLOHA 1
PŘÍLOHA 2

VYPRACOVANÁ LABORATORNÍ ÚLOHA
CD S PROGRAMEM A ZDROJOVÝMI TEXTY VČETNĚ
VYPRACOVANÉ ÚLOHY A MANUÁLU K PROGRAMU SP

Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií VUT v Brně		Předmět: Bakalářská práce	
Jméno studenta: Jakub Vaculík	Skupina:	Dne:	
Číslo a název úlohy: POČÍTAČOVÉ ŘEŠENÍ ENERGETICKÉ BILANCE OPTICKÉHO SMĚROVÉHO SPOJE			

1. Teoretické poznatky



Obr. 1 Místa útlumu a zesílení v energetické bilanci FSO

Energetická bilance FSO 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 hlavice spoje α_{tz} , rezervu spoje na atmosférické přenosové prostředí ρ_{atm} , minimální hodnotu poměru signálu k šumu SNRo, minimální detekovatelný výkon fotodiody P_{min} , citlivost přijímacího systému P_0 a úroveň přijímaného výkonu, při které dochází k saturaci přijímače P_{max} . Základní útlumová rovnice pro výpočet energetické bilance bezkabelového spoje je vyjádřena vztahem (1).

$$\alpha_M = P_{LD} - \alpha_{v,LD} - \alpha_{VOS} - \alpha_{KK} - \alpha_{VP} + \gamma_{POS} - \alpha_{POS} - \alpha_{v,FD} - \alpha_{tz} - \rho_{atm} - \alpha_{ber} \quad (1)$$

Účinnost vazby „laserová dioda-vysílací optická soustava“ $\alpha_{v,LD}$

- závisí na úhlové šířce a rozložení svazku vyzařovaném LD a na numerické apertuře vysílací optické soustavy. V decibelové míře se $\alpha_{v,LD}$ vypočte podle vztahu (1)

$$\alpha_{v,LD} = \left| 10 \log \frac{P_{VOS}}{P_{LD}} \right| \quad (1)$$

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: α_{VP}

- vzniká vlivem rozbíhavosti a sbíhavosti světelných paprsků šířících s volným prostředím
- Divergence je příčinou poklesu hustoty energie se vzdáleností od zdroje a je to jediný základní mechanismus útlumu.
- lze použít vztah:(2)

$$\alpha_{VP} = -\gamma_{POS} + 10 \log \left(\frac{4\pi L_{VP}}{\lambda} \right)^2 - \gamma_{POS} \quad (2)$$

kde L_{VP} je vzdálenost hlavic, λ je vlnová délka, γ_{POS} je zisk vysílací soustavy, γ_{POS} je zisk přijímací soustavy

- nebo vztah (3) pro výpočet pomocí *pomocné délky*:

$$\alpha_{VP} = \left| 20 \log \frac{L_0}{L_0 + L_{VP}} \right| \quad (3)$$

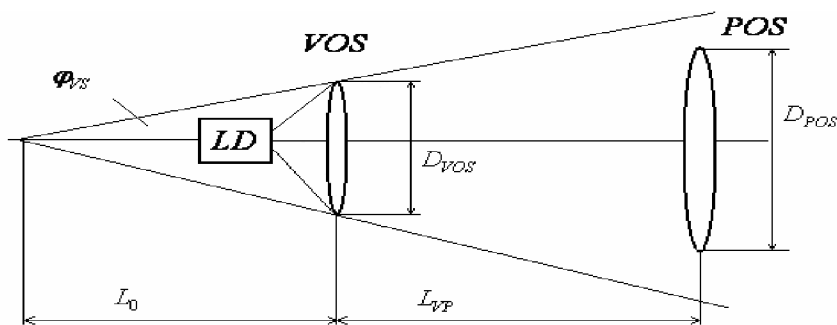
kde L_{VP} je vzdálenost mezi hlavicemi spoje a L_0 je tzv. *pomocná délka* (viz obr. 2).

- o tento vztah je výhodnější a v práci s ním budeme dále pracovat.

Pomocná délka: L_0

- k vyjádření L_0 je třeba znát průměr vysílací optické soustavy D_{VOS} a úhlovou šířku vysílaného svazku φ_{VS}
- vypočítá se pomocí vztahu (4):

$$L_0 \approx \frac{D_{VOS}}{\varphi_{VS}} \quad (4)$$



Obr. 2 Znárodnění významu veličiny L_0 (pomocné délky)

Zesílení přijímací optické soustavy γ_{POS}

- závisí na poměru ploch přijímací a vysílací apertury, rozložení intenzity v Gausově svazku a umístění středu přijímací apertury v ose Gausově svazku..
- je dáno vztahem (5):

$$\gamma_{POS} = \left| 20 \log \frac{D_{POS}}{D_{VOS}} \right| + 3dB \quad (5)$$

Účinnost vazby „přijímací optická soustava-fotodiody“ $\alpha_{v,FD}$

- za předpokladu konstantního ozáření přijímací apertury závisí na poměru aktivní plochy fotodiody A_{FD} a velikosti skvrny A_{spot} , kterou v přijímací optické soustavě vytváří přijaté světlo.
- Pro $A_{FD} \geq A_{spot}$ je $\alpha_{v,FD} = 0dB$

Rezerva spoje na atmosferické přenosové prostředí ρ_{atm}

- lze odvodit z dlouhodobého pozorování útlumu atmosférického přenosového prostředí.
- Ztráty v atmosféře jsou způsobeny dodatečným útlumem v atmosféře těmito jevy
 - o Molekulární absorpce
 - Útlum vzniká při shodě kmitočtu vysílaného záření s rezonančním kmitočtem nějakého prvku obsaženého v atmosféře.(molekuly vody, oxidu uhličitého nebo ozónu). Čím vyšší je koncentrace tohoto prvku, tím vyšší je útlum
 - o Rozptyl na pevných částicích
 - Útlum vzniká v důsledku přítomnosti pevných částic v atmosféře (kapičky vody,prachové částice nebo větší molekuly plynu).
 - o Rozptyl turbulentní fluktuací optické hustoty atmosféry
 - Útlum vzniká vlivem atmosférické turbulence, což je soustavné mísení teplých a studených mas vzduchu. To má za následek změny optických vlastností vzduchu včetně indexu lomu.
- celkový útlum způsobený atmosférickými vlivy je součtem příspěvků od každého jevu,přičemž hodnoty jsou vztaženy na metr délky
- Možno zvolit $\rho_{atm} \cong 6dB / km$

Minimální hodnota SNR_0

- 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 $v_r = 10$ Mbit/s bývá hodnota minimálního detekovatelného výkonu přijímače $P_{min} = -43$ dBm.

Citlivost přijímacího systému P_0

- je to minimální úroveň přijatého optického výkonu P_0 , která je nutná k dosažení stanovené hodnoty BER
- vyjádří se ze vztahu (6):

$$P_0 = P_{min} + SNR_0 \quad (6)$$

Úroveň přijímaného výkonu, při které dochází k saturaci přijímače P_{\max}

Oblast dynamiky přijímacího systému Δ_p

- oblast dynamiky přijímacího systému je vzhledem vysoké míře fluktuací přijímaného výkonu významnou veličinou
- je definovaná výrazem (7):

$$\Delta_p = P_{\max} - P_0 \quad (7)$$

- její hodnota v decibelové míře bývá $\Delta_p = 30\text{dB}$

Útlum vyvolaný nedokonalostí vzájemného zamíření hlavic spoje α_z

- je způsoben různými vlivy: nezkušeností obsluhy při zaměřování, mechanickými deformacemi úchytu hlavice při aretaci, teplotními deformacemi konzol a pod.
- Empiricky bylo zjištěno, že útlum α_z nepřevyšuje hodnotu 1,5 dB.

2. Zadání

- 2.1. Navrhněte základní uspořádání optického směrového spoje, aby jeho dosah byl 800 m, přenosová rychlost 10 Mb/s a chybovost menší než 10^{-6} .
- 2.2. Ověřte správnost návrhu v programu SP.

3. Použité přístroje a pomůcky

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

4. Pracovní postup

Ad 2.1 Pomocí vztahů uvedených v teoretickém úvodu vypočtete útlumy a zisky jednotlivých prvků optického spoje. Sestrojte výkonový úroňový diagram. Ve výkonovém úroňovém diagramu zkontrolujte výsledek energetické bilance: přijímaný optický výkon nesmí být větší než P_{\max} a nesmí být menší než P_0 .

Ad 2.2 Zadejte parametry spoje do programu SP a ověřte váš výpočet.

Za dané parametry považujte:

$\alpha_{v,LD} = 1,5 \text{ dB}$; $\alpha_{POS} = \alpha_{VOS} = 1 \text{ dB}$; $\alpha_{PP} = \alpha_{PV} = 0,6 \text{ dB}$ ($\alpha_{KK} = \alpha_{PV} + \alpha_{PP}$); $\alpha_{v,FD} = 0 \text{ dB}$;
 $D_{VOS} = 20 \text{ mm}$; $D_{POS} = 150 \text{ mm}$; $f_{VOS} = 44 \text{ mm}$; $L_{VP} = 700 \text{ m}$; $\varphi_{VS} = 2,5 \text{ mrad}$; $P_{\max} = -5 \text{ dBm}$

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:

$$\lambda = (800 - 1000) \text{ nm},$$

$$P_0 = (10 - 50) \text{ mW}.$$

Použijte vysílací laserové diody i přijímací fotodiody volte typu R nebo podobné.

Ostatní veličiny odhadněte podle doporučení uvedených v části „teoretické poznatky“. Další veličiny, které se vyskytují v programu SP a nejsou uvedené v části „teoretické poznatky“ zanedbejte.

V závěru věnujte pozornost hlavním aspektům vámi navrženého spoje. Zdůvodněte zvolený výkon laserové diody, uveďte dynamiku spoje, při které bude spoj pracovat se zadanou chybovostí a uveďte celkovou rezervu spoje. Pokud tato rezerva vyjde menší než 15 dB, uveďte, jak by se dala zvýšit.

5. Řešení

Ad 2.1 Ruční výpočet

Výkon vysílací laserové diody P_{LD}	Volím	$P_{LD} = 45 \text{ mW}$
$P_{LD[\text{dB}]} = 10\log(P_{LD}) = 10\log(45)$		$P_{LD[\text{dB}]} = 16,53 \text{ dB}$
Útlum vazby „laserová dioda-vysílací optická soustava“		$\alpha_{i,LD} = 1,5 \text{ dB}$
Útlum na vysílací optické soustavě α_{VOS}		$\alpha_{VOS} = 1 \text{ dB}$
Útlum na krycích sklech α_{KK}		$\alpha_{KK} = 1,2 \text{ dB}$
$\alpha_{KK} = \alpha_{PV} + \alpha_{PP} = 0,6 + 0,6$		

Pomocná délka L_0

$$L_0 \approx \frac{D_{VOS}}{\varphi_{VS}} = \frac{20 \cdot 10^{-3}}{2,5 \cdot 10^{-3}} = 8 \text{ m}$$

Útlum šířením α_{VP}

$$\alpha_{VP} = \left| 20 \log \frac{L_0}{L_0 + L_{VP}} \right| = \left| 20 \log \frac{8}{8 + 800} \right| = 40,09 \text{ dB} \quad \alpha_{VP} = 40,09 \text{ dB}$$

Zesílení přijímací optické soustavy γ_{POS}

$$\gamma_{POS} = \left| 20 \log \frac{D_{POS}}{D_{VOS}} \right| + 3 \text{ dB} = \left| 20 \log \frac{150 \cdot 10^{-3}}{20 \cdot 10^{-3}} \right| + 3 \text{ dB} = 20,5 \text{ dB} \quad \gamma_{POS} = 20,05 \text{ dB}$$

Útlum nedokonalostí vzájemného zamíření hlavic spoje α_{rz}

$$\alpha_{rz} = 1,5 \text{ dB}$$

Rezerva na atmosféru ρ_{atm} Volíme $\rho_{atm} = 6 \text{ dB/km}$

$$\rho_{atm} = 6 \text{ dB/km} \cdot L_{VP} = 6 \cdot 10^{-3} \cdot 800 = 4,8 \text{ dB} \quad \rho_{atm} = 4,8 \text{ dB}$$

Rezerva na chybovost

$$\text{Pro chybovost spoje } BER = 10^{-6} \text{ je} \quad SNR_0 = 13,5 \text{ dB.}$$

Minimální detekovatelný výkon (P_{\min})

Pro fotodiodu PIN a přenosovou rychlost $v_f = 10 \text{ Mbit/s}$ bývá hodnota minimálního detekovatelného výkonu přijímače

$$P_{\min} = -43 \text{ dBm}$$

Maximální detekovatelný výkon (P_{\max})

$$P_{\max} = -5 \text{ dB}$$

Citlivost přijímacího systému P_0

$$P_0 = P_{\min} + SNR_0 = -43 + 13,5 = -29,5 \text{ dB} \quad P_0 = -29,5 \text{ dB}$$

Dynamika přijímače Δ_p

$$\Delta_p = P_{\max} - P_0 = -5 - (-29,5) = 24,5 \text{ dB} \quad \Delta_p = 24,5 \text{ dB}$$

Ad 2.2 Řešení pomocí programu SP

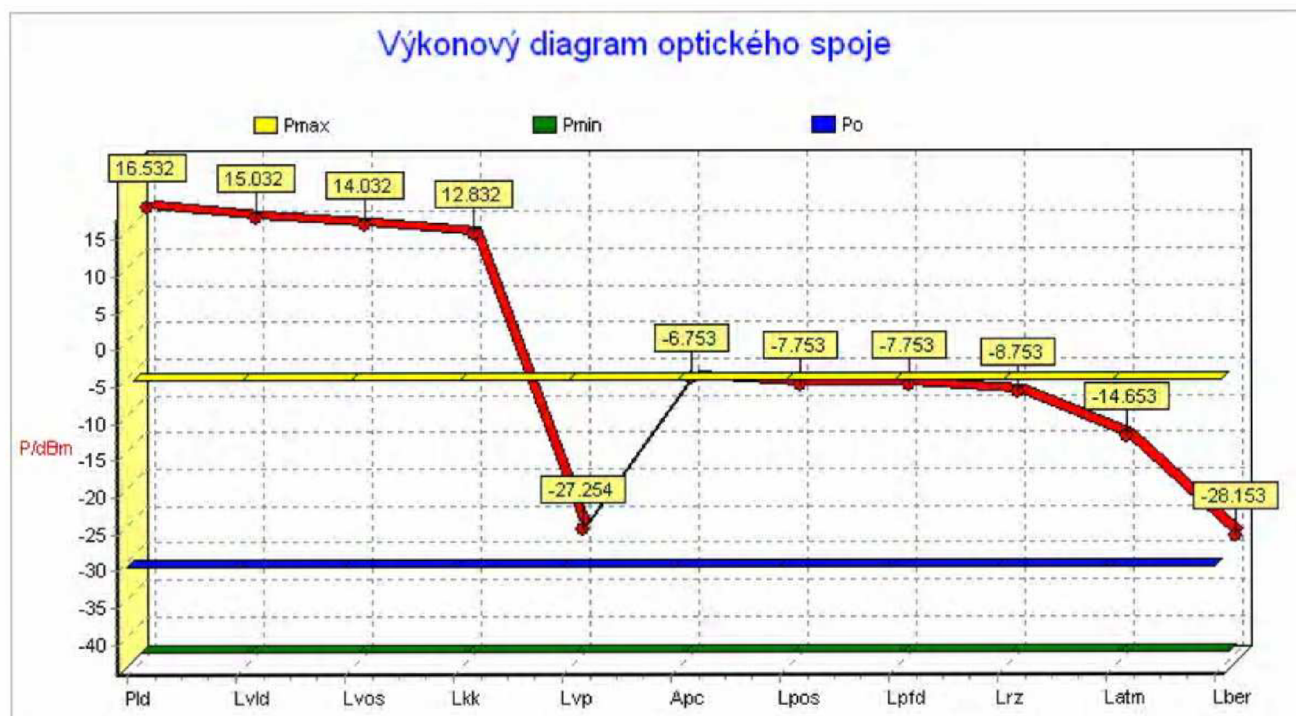
Výpis

4.6.2008 13:05:34

Energetická bilance optického bezkabelového spoje

Výkon vysílací laserové diody (Pld)	45.00	[mW]
Výkon vysílací laserové diody (Pld)	16.53	[dBm]
Útlum vazby LD/VOS (Lvid)	1.500E+0	[dB]
Útlum na VOS (Lvos)	1.00	[dB]
Útlum na krycích sklech (Lkk)	1.20	[dB]
Průměr VOS (Dvos)	20.00	[mm]
Úhlová šířka svazku (Flsv)	2.50	[mrad]
Pomocná délka (Lo)	8.00	[m]
Vzdálenost hlavíc (Lv)	800.00	[m]
Útlum šířením (Lvp)	-40.09	[dB]
Průměr POS (Dpos)	150.00	[mm]
Zisk POS (Apc)	20.50	[dB]
Útlum na POS (Lpos)	1.00	[dB]
Útlum vazby POS/FD (Lpfd)	0.000E+0	[dB]
Rezerva na zaměřování (Lrz)	1.00	[dB]
Rezerva na atmosféru (Latm)	5.90	[dB]
Rezerva na chybovost (Lber)	13.50	[dB]
Minimální detekovatelný výkon (Pmin)	-43.00	[dBm]
Dynamika přijímače (Drx)	24.50	[dB]
Maximální detekovatelný výkon (Pmax)	-5.00	[dBm]
Citlivost přijímacího systému (Po)	-29.50	[dB]

Graf



6. Závěr

V této úloze jsme navrhovali optický směrový spoj pro vzdálenost 800m s využitím laserové diody jako vysílače a PIN diody jako přijímače. Oba tyto prvky jsme zvolili s přihlédnutím na jejich vlastnosti pomocí katalogového listu. Navržený spoj jsme realizovali pomocí programu Optos, pomocí kterého jsme získali Bilanční graf. Při srovnání útlumu šíření vypočteného a odečteného z grafu neshledávám žádný rozdíl, který by se mohl stát podstatnou závadou optického spoje. Z výkonové bilance je patrné, že na přijímací straně je ještě dostatečná výkonová rezerva. Při řešení problému optického spoje je jedním z nejdůležitějších parametrů volba přijímací fotodiody. Pokud použijeme diodu s malou aktivní plochou tak bude sice rychlá, ale bude u ní docházet k velkým ztrátám nepřesným zaměřením. Naopak u diody s velkou aktivní plochou budou ztráty zaměřením minimální, ale dioda bude pomalá.