UNIVERZITA PARDUBICE
Fakulta elektrotechniky a informatiky

Simulace a měření na optické trase

Jakub Provazník

Bakalářská práce
2012

Univerzita Pardubice
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Akademický rok: **2011/2012**

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení:	**Jakub Provazník**
Osobní číslo:	**I09047**
Studijní program:	**B2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor:	**Komunikační a mikroprocesorová technika**
Název tématu:	**Simulace a měření na optické trase**
Zadávající katedra:	**Katedra elektrotechniky**

Zásady pro vypracování:

Z jednotlivých kabelových délek vytvořte optickou přenosovou trasu v délce alespoň 3 km. Při jejím sestavování využijte optických svarů optických konektorů.
1. Na vytvořené optické trase proveďte praktická měření:
celkového útlumu trasy
útlumu všech spojů (konektorů a svarů)
útlum všech vláken jednotlivých kabelových délek
změření délky trasy
Využijte přímou metodu i metodu OTDR a porovnejte
1. Pomocí simulačního programu OPTSim proveďte simulaci přenosových parametrů optické přenosocé trasy v délce alespoň 3 km. Zpracujte výsledky ze simulační a praktické části a porovnejte.

Rozsah grafických prací:

Rozsah pracovní zprávy:

Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**

Seznam odborné literatury:

SALEH, Bahaa; TEICH, Malvin . Základy fotoniky. první vydání. Praha : Matfyzpress, 1994. 260 s. ISBN 80-85863-01-4.
DUTTA, Achyut; DUTTA, NIloy; FUJIWARA, Masahiko. WDM technologies : Optical networks. třetí vydání . [s.l.] : Elsevier Academic press, 2004. 336 s. ISBN 0-12-225263-2.
BAILEY, David ; WRIGHT, Edwin . Practical Fiber Optics. první vydání. Velká Británie : Elsevier Academic press, 2003. 260 s. ISBN 0750658002.

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Ladislav Štěpánek**
Katedra elektrotechniky

Datum zadání bakalářské práce: **12. prosince 2011**
Termín odevzdání bakalářské práce: **11. května 2012**

Univerzita Pardubice Česká republika

L.S.

prof. Ing. Simeon Karamazov, Dr.
děkan

Ing. Zdeněk Němec, Ph.D.
vedoucí katedry

V Pardubicích dne 30. března 2012

Prohlášení autora

Prohlašuji, že jsem tuto práci vypracoval samostatně. Veškeré literární prameny a informace, které jsem v práci využil, jsou uvedeny v seznamu použité literatury.

Byl jsem seznámen s tím, že se na moji práci vztahují práva a povinnosti vyplývající ze zákona č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména se skutečností, že Univerzita Pardubice má právo na uzavření licenční smlouvy o užití této práce jako školního díla podle § 60 odst. 1 autorského zákona, a s tím, že pokud dojde k užití této práce mnou nebo bude poskytnuta licence o užití jinému subjektu, je Univerzita Pardubice oprávněna ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které na vytvoření díla vynaložila, a to podle okolností až do jejich skutečné výše.

Souhlasím s prezenčním zpřístupněním své práce v Univerzitní knihovně.

Poděkování

Poděkování patří Ing. Ladislavu Štěpánkovi za jeho cenné rady a pomoc při tvorbě této bakalářské práce.

Anotace

Tato práce se věnuje měření parametrů optických přenosových tras. Zejména měření útlumu a vyhodnocování datového přenosu v prostředí OptSim. V první části práce jsou uvedené současné teoretické poznatky, které mají vliv na útlum a zkreslení signálu u optických vláken. Popsány jsou zde také metody svařování optických vláken a spojování pomocí konektorů. V poslední kapitole teoretické části jsou uvedeny detektory a vysílače optického signálu a možnosti jejich případného použití. V praktické části je demonstrována metoda měření OTDR, která se v praxi využívá pro vyhodnocování útlumu trasy a zjišťování poruch. V další kapitole jsou demonstrovány výsledky simulace v programu OptSim. Program OptSim je zaměřen na vyhodnocování optických tras a sítí z hlediska datového přenosu, proto jsou uvedeny například diagram oka, histogram na elektrickém signálu, okamžitá fázová odchylka a průběh optického signálu v čase.

Klíčová slova

Optoelektronické systémy, útlum, měření, OTDR, simulace, OptSim, Optická trasa, vlákno, svařování, konektor

Annotation

This thesis deals with measurement of parameters of optical transport routes. In particular, measurement of attenuation and evaluation of data transfer in program OptSim. In the first part present theoretical knowledge, which have influence on attenuation and distortion of signal at optical fibers is mentioned. There are also mentioned methods of welding of optical fibers and connection by using special connectors. In the last chapter of theoretical part detectors and transmitters of optical signal and possibility of their use are mentioned. In practical part is demonstrated method of measurement OTDR, which is in practice used for evaluating the attenuation of the line and detection of fault. In the next chapter there are demonstrated results in program OptSim. Program OptSim is focused on the evaluation of optical routes and networks in terms of data transfer, so that is why there are mentioned for example eye diagram, histogram on electrical signal, instantaneous phase deviation and course of the optical signal in time.

Keywords

Optoelectronic systems, attenuation measurement, OTDR, simulation, OptSim, optical line, fiber, welding, connector

Obsah

Seznam zkratek ... 8
Seznam obrázků ... 9
Seznam tabulek ... 10
Úvod ... 11
1 Optoelektronické systémy ... 12
1.1 Vlastnosti optických vláken ... 13
1.2 Útlum optických vláken ... 16
1.3 V praxi používané vlnové délky ... 17
1.4 Disperze v optických vláknech ... 18
1.5 Nelineární jevy při optickém přenosu ... 20
2 Technika spojování a vazební členy ... 21
2.1 Spoje nerozebíratelné ... 22
2.2 Spoje rozebíratelné ... 24
3 Zdroje a detektory záření ... 27
3.1 Luminiscenční a laserové diody ... 27
3.2 Detektory záření ... 28
4 Praktická část a optické simulace ... 31
4.1 Metoda OTDR ... 31
4.2 Popis měření pomocí metody OTDR ... 32
4.3 Naměřené hodnoty ... 33
4.4 Přímá metoda měření útlumu ... 39
4.5 Vyhodnocení výsledků ... 40
4.6 Simulace v programu OPTSim ... 42
4.7 Výsledky simulace v programu OptSim ... 42
5 Závěr ... 50
Literatura ... 51

Seznam zkratek

SM	Single Mode
MM	Multi Mode
LAN	Local area network
L – PAS	Lense Profile – AlignmentSwitch
LID	LocalInjection and Detection
LED	LightEmittingDiode
PIN	
APD	AvalanchePhotodiode
OTDR	OpticalTimeDomainReflectometry
LCD	LiquidCrystal Display
CCD	ChargeCoupledDevice
PMD	PolarizedModDispersion
BPSK	Binary Phase Shift Keying
NRZ	Non Return Zero

Seznam obrázků

Obrázek 1 – Příklad možného optoelektronického systému *13*
Obrázek 2 – Mnohovidové vlákno s konstantní změnou indexu lomu *13*
Obrázek 3 – Mnohovidové vlákno se skokovou změnou indexu lomu *14*
Obrázek 4 – Jednovidové vlákno se skokovou změnou indexu lomu *14*
Obrázek 5 – Šíření světla v jednovidovém paprsku (převzato z [8]) *15*
Obrázek 6 – Šíření světla v mnohovidových paprscích (převzato z [8]) *15*
Obrázek 7 – Spektrální útlumová charakteristika (převzato z [5]) *17*
Obrázek 8 – Vliv chromatické disperze na impuls (převzato z [5]) *19*
Obrázek 9 – Znázornění polarizační vidové disperze (převzato z [5]) *20*
Obrázek 10 – Technologie L–PAS (převzato z [8]) *22*
Obrázek 11 – Technologie LID (převzato z [8]) *23*
Obrázek 12– Složení optického konektoru (převzato z [8]) *25*
Obrázek 13 – Přehled některých používaných konektorů (převzato z [8]) *26*
Obrázek 14 – Struktura laseru (převzato z [11]) *28*
Obrázek 15 – Struktura fotodiody PIN (převzato z [12]) *29*
Obrázek 16 – Struktura lavinové fotodiody (převzato z [12]) *30*
Obrázek 17 – Blokové schéma OTDR (převzato z [10]) *31*
Obrázek 18 – Měření na OTDR délka impulzu 10 ns, vlnová délka 1310 nm *33*
Obrázek 19 – Tabulka poruch 10 ns, 1310 nm *34*
Obrázek 20 – Měření na OTDR délka impulzu 10 ns, vlnová délka 1550 nm *34*
Obrázek 21 – Tabulka poruch 10 ns, 1550 nm *35*
Obrázek 22 – Měření na OTDR délka impulzu 10 ns, vlnová délka 1625 nm *36*
Obrázek 23 – Tabulka poruch 10 ns, 1625 nm *36*
Obrázek 24 – Měření na OTDR délka impulzu 30 ns, vlnová délka 1310 nm *37*
Obrázek 25 – Tabulka poruch 30 ns, 1310 nm *38*
Obrázek 26 – Měření na OTDR délka impulzu 30 ns, vlnová délka 1550 nm *38*
Obrázek 27 – Tabulka poruch 30 ns, 1550 nm *39*
Obrázek 28 – Blokové schéma měření přímou metodou (převzato z [7]) *39*
Obrázek 29 – Blokové schéma optické trasy v programu OptSim *42*
Obrázek 30 – Porovnání spekter optického signálu (zleva: začátek trasy, 4 km, 100 km) . *42*
Obrázek 31 – Graf závislosti okamžité fázové odchylky fáze na čase *43*
Obrázek 32 – Graf závislosti frekvenční odchylky na čase *43*
Obrázek 33 – Průběh optického signálu v časové oblasti *44*
Obrázek 34 – Průběh elektrického signálu v čase *44*
Obrázek 35 – Graf spektra elektrického signálu *45*
Obrázek 36 – Porovnání diagramů oka, na trase dlouhé 4 km (vlevo) a 100 km (vpravo) *46*
Obrázek 37 – Histogram na diagramu oka *47*
Obrázek 38 – Blokové schéma BPSK *47*
Obrázek 39 – Porovnání signálu BPSK s disperzí (vlevo) a bez disperze (vpravo) *48*
Obrázek 40 – Blokové schéma kompenzace optima disperze *48*
Obrázek 41 – Porovnání diagramů oka na začátku trasy (vlevo) a na konci trasy (vpravo) *49*

Seznam tabulek

Tabulka 1 – parametry trasy, délka impulzu 10 ns, vlnová délka 1310 nm *33*
Tabulka 2 – parametry trasy, délka impulzu 10 ns, vlnová délka 1550 nm *35*
Tabulka 3 – parametry trasy, délka impulzu 10 ns, vlnová délka 1625 nm *36*
Tabulka 4 – parametry trasy, délka impulzu 30 ns, vlnová délka 1310 nm *37*
Tabulka 5 – parametry trasy, délka impulzu 30 ns, vlnová délka 1550 nm *39*
Tabulka 6 – Výsledky měření pomocí přímé metody *40*
Tabulka 7 – Porovnání celkové ztráty výkonu na jednotlivých vlnových délkách *40*
Tabulka 8 – Výsledné hodnoty z diagramu oka *46*

Úvod

V současné době se pro vysokorychlostní přenos používají optická vlákna. Proto je nutné mít k dispozici kvalitní diagnostiku. Měřením optické trasy můžeme zjistit příčiny omezující přenos. Potom můžeme příčiny poruch kompenzovat nebo je úplně vymezit a tím zlepšit přenosové parametry trasy.

Cílem této práce je čtenáře seznámit se základními koncepcemi optoelektronických systémů, možnostmi datového přenosu na příslušných vlnových délkách a omezujícími faktory datového přenosu. Úkolem je poskytnout celistvé informace o faktorech, které mají vliv na přenos jako je útlum, disperze, svary vlákna a konektorové spoje.

Dále tato práce obsahuje kapitoly měření metodou OTDR a Simulace v programu OptSim. Metoda OTDR má za cíl ukázat účinnost, rychlost a přesnost měření. Tato metoda umožňuje zjistit v krátké době útlum optické trasy, poruchy a reflexe na rozhraní dvou optických konektorů. Tyto parametry se dají měřit na několika vlnových délkách, které se v praxi požívají pro datový přenos. Cílem ukázky simulace v prostředí OptSim je seznámit čtenáře se základními vlastnostmi programu, které jsou především vyhodnocování datového přenosu, jako vyhodnocování času vzorkování a posunutí signálu vůči taktu.

V závěru práce je uveden souhrn poznatků z měření a simulací z hlediska parametrů ovlivňujících datový přenos.

1 Optoelektronické systémy

Optoelektronika využívá vzájemné interakce hmotného prostředí a elektromagnetického záření takových vlnových délek, při nichž hybnost fotonů přestává být zanedbatelná ve srovnání hybností elektronů a při nichž do popředí výrazně vystupuje kvantový charakter záření.

Při optickém přenosu je nosičem informace záření. Změny amplitudy, kmitočtu, fáze se mohou zobrazovat každá samostatně nebo v kombinaci s přenášenou informací.

Oblast optického záření je ze strany nižších kmitočtů ohraničena mikrovlnným zářením, z oblasti vyšších kmitočtů rentgenovým zářením. Oblast záření sahá od 100 nm do 1 mm vlnové délky a dělí se na 7 podoblastí:

- 3 ultrafialové (100 nm – 280nm; 280 nm – 315nm; 315 nm – 380nm),
- Oblast světelná (380 nm – 780 nm),
- 3 infračervené (780 nm – 1,4 µm; 1,4 µm – 3 µm; 3 µm – 1 mm).

Pro optický přenos informace má význam oblast vlnových délek mezi 0,5 až 1,6 µm. Především oblast kolem 1300 až 1600 nm vykazuje menší ztráty Rayleighovým rozptylem, minimum hodnot absorpčních ztrát a minimum hodnot materiálové disperze (Obrázek 7). Pro tuto infračervenou oblast existují výkonné zdroje a detektory záření a u materiálů používaných pro výrobu optických vláken je v této oblasti minimální útlum. V oblasti ultrafialového pak u většiny těchto materiálů útlum narůstá.

Přenos informace optickým vláknem umožňuje optické záření. Zvláštnosti přenosu vyplývají z odlišnosti mezi signálem světelným a elektrickým. Zásadně rozdílné jsou především nositelé signálu, kterými jsou u galvanické vazby elektricky nabité elektrony, zatímco u optické vazby neutrální fotony, které na sebe vzájemně nepůsobí. Připřenosu nevznikají elektromagnetická pole, která bývají v elektrických obvodech příčinou různých rušení. Optický spoj je tak odolný proti vnějším rušivým signálům a velice obtížně odposlouchatelný. Také nedochází ke zpětnému ovlivňování z výstupu na vstup. Mezi výhody se řadí úplné galvanické oddělení vstupu a výstupu.

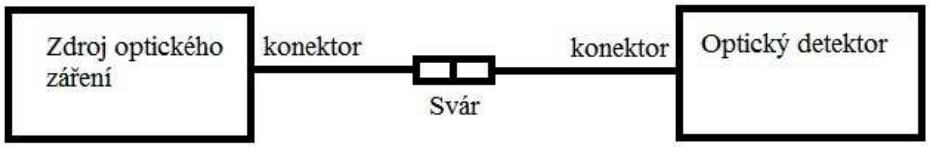
Optický spoj je tvořen modulovaným zdrojem záření, optickým prostředím a přijímačem záření. Vstupní a výstupní signál optického spoje je elektrický, a tak vysílací a přijímací část obsahuje optoelektronické prvky začleněné v elektronických obvodech pro zpracování přenášené informace.

Světelným zdrojem záření bývá laserová nebo luminiscenční dioda. Záření se moduluje v optickém modulátoru nebo v případě polovodičového zdroje změnou budícího proudu. Cílem vysílací a přijímací části optického systému je převést optický signál s co nejmenšími ztrátami z vysílače do optického prostředí a potom na přijímací stranu na fotodetektor. Přijímač potom přeměňuje světelný signál zpět na elektrický. Přitom musí přijímač zajistit optimální zpracování vzhledem poměru signál – šum.

Obvody pro převádění optického signálu převádějí signál na vhodnou formu pro přenos. Řadí se sem obvody pro kódování, sdružování, multiplexery, na přijímací straně analogicky obvod pro dekódování.

Optickým prostředím je nejčastěji optické vlákno. Optická vlákna mají různé vlastnosti podle technologie výroby. Přenosové vlastnosti vláken jsou také závislé na jejich konstrukci. Rozeznáváme základní tři typy konstrukcí:

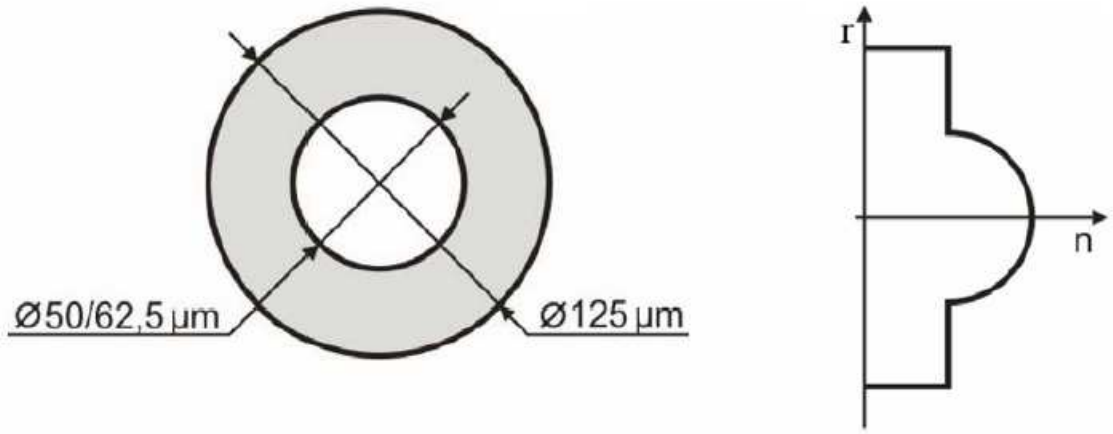
- jednovidové vlákno s konstantním indexem lomu jádra,
- mnohovidové s konstantním indexem lomu jádra,
- vlákno s proměnným indexem lomu jádra, které bývá označováno jako gradientní vlákno.



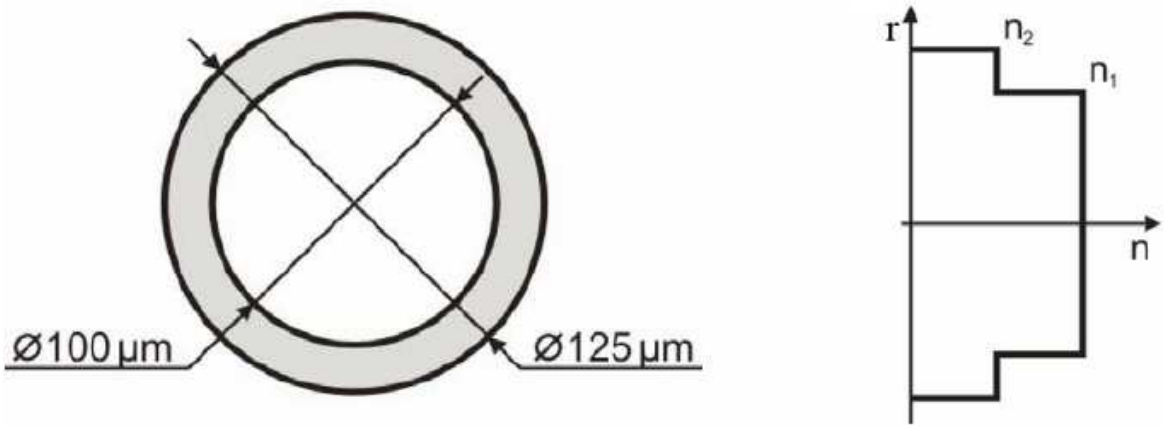
Obrázek 1 – Příklad možného optoelektronického systému

1.1 Vlastnosti optických vláken

Prvním typem vlákna jsoumnohovidová s konstantním indexem lomu jádra a skokovou změnou indexu lomu pláště (v literatuře označovaná MM – Multi Mode). Hlavní výhodou je jednoduchá výroba a manipulace, nevýhodou je větší útlum, disperze a malá přenosová kapacita. Vyznačují se relativně velkými průměry jádra a pláště. Vlákna tohoto typu jsou užívána při spojování na kratší vzdálenosti, především pro lokální sítě (LAN), krátké přenosy dat a automatizační účely.



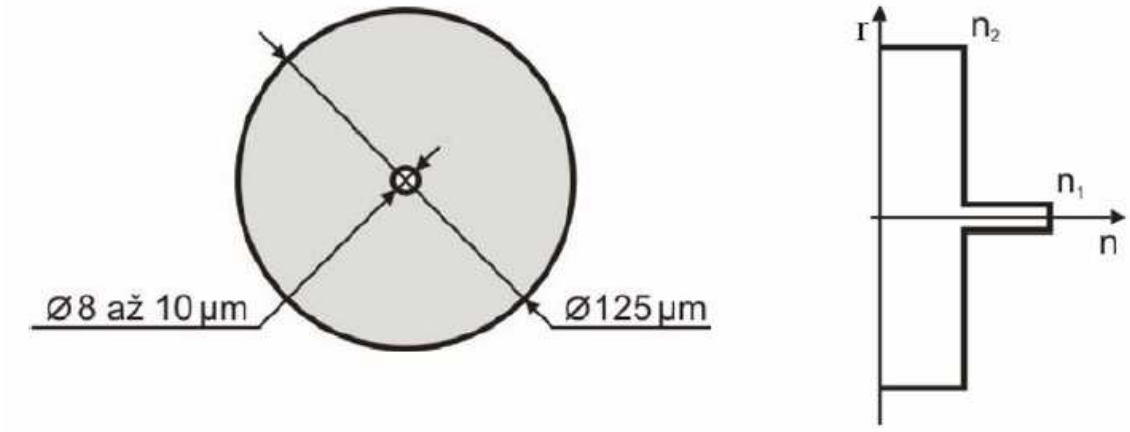
Obrázek 2 – Mnohovidové vlákno s konstantní změnou indexu lomu



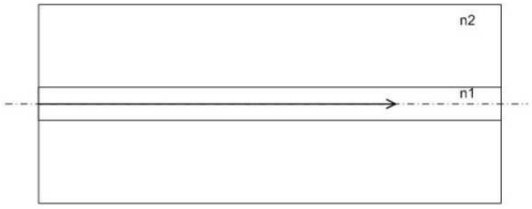
Obrázek 3 – Mnohovidové vlákno se skokovou změnou indexu lomu

Druhým typem vláken jsou mnohovidová vlákna s proměnným indexem lomu v příčném řezu vlákna. Tyto vlákna se vyznačují menší disperzí, menším útlumem, avšak výroba je složitější a díky tomu i spojování a konstruování vláken. Tento typ vlákna je tedy nejvhodnější pro telekomunikační spoje na kratší vzdálenosti.

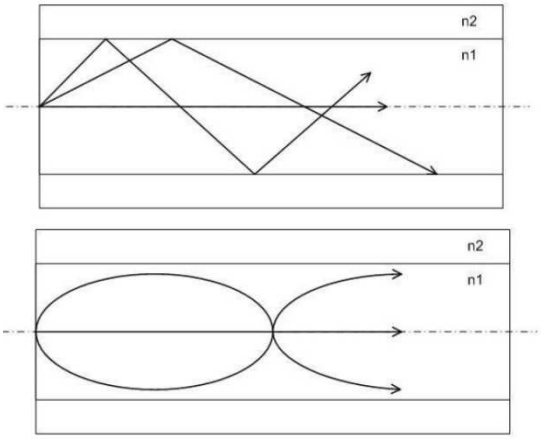
Posledním typem jsou vlákna jednovidová (Single Mode) s konstantním indexem lomu jádra a skokovou změnou indexu lomu pláště. Tato vlákna jsou běžně používaná na dálkové přenosy, protože se vyznačují malou disperzí, velmi malým útlumem a vysokou přenosovou kapacitou. Vláknem se šíří pouze jeden vid ve směru osy. K tomu je zapotřebí zmenšit průměr jádra na hodnotu rovnou jen několika vlnovým délkám světla, kdy průměr jádra je 7–9 µm a průměr pláště kolem 125 µm. Pokud se index lomu mění skokem, je používáno označení světlovody vrstvové. U těchto případů je přenos založen na principu totálního odrazu jádro – plášť. Dalším typem je světlovod se spojitě proměnným indexem lomu (gradientní světlovod), u kterého má dráha paprsku tvar eliptické nebo kruhové spirály.



Obrázek 4 – Jednovidové vlákno se skokovou změnou indexu lomu



Obrázek 5 – Šíření světla v jednovidovém paprsku (převzato z [8])



Obrázek 6 – Šíření světla v mnohovidových paprscích (převzato z [8])

1.2 Útlum optických vláken

Obecná definice útlumu: $A = 10 \log\left(\frac{P_1}{P_2}\right)$

Kde A – výsledný útlum
P_1 – výkon na vstupu
P_2 – výkon na výstupu

Ztráty absorpcí

Ztráty absorpcí jsou v ultrafialovém a viditelném spektru jsou způsobeny mezi atomárními úrovněmi a v infračerveném spektru přechody na molekulární úrovni základního materiálu, příměsí a nečistot. Jejich rezonance je na určitých frekvencích provázena tepelnými ztrátami. Při výrobě vláken se výrobce snaží zajistit nízký měrný útlum, a proto je zapotřebí nízká koncentrace iontů OH (vody) a iontů kovů.

Ztráty vyzařováním

Ztráty vyzařováním jsou způsobeny lomem šířících se paprsků na rozhraní dvou dielektrických prostředí s odlišnými vlastnostmi, kdy část energie proniká pryč z jádra.

Ztráty rozptylem

Sklo je amorfní materiál, a proto ztráty rozptylem jsou způsobeny absencí krystalové mřížky. Totiž molekuly jsou v amorfním materiálu nerovnoměrně rozložené a tvoří mikronehomogenity indexu lomu daného materiálu. V případě, že jsou tyto mikronehomogenity menšího rozsahu oproti vlnové délce, pak ztrátám říkáme Rayleighovy. Charakteristickým znakem těchto ztrát je všesměrovost.

K dalším ztrátám se řadí ztráty způsobené porušením čisté geometrie, porušení tvarů a rozměrů mezi jádrem a pláštěm. Dalšími problémy jsou v tomto směru trhlinky v materiálu jádra, mikroohyby a podobné poruchy přímočarosti osy světlovodu. K dalším důležitým vlastnostem, které mají vliv na útlum, je numerická apertura. Podstata této vlastnosti je schopnost navázání světelného paprsku do jádra optického vlákna.

Vztah pro numerickou aperturu:

$$\sin\Theta_a = n_1 \sin\overline{\Theta_c}$$

$$\sin\Theta_a = \sqrt{n_1(1-\cos^2\overline{\Theta_c})} = n_1\left[\sqrt{1-\left(\frac{n_2}{n_1}\right)^2}\right] = \sqrt{\left(n_1^2 - n_2^2\right)}$$

$$\Theta_a = \arcsin NA$$

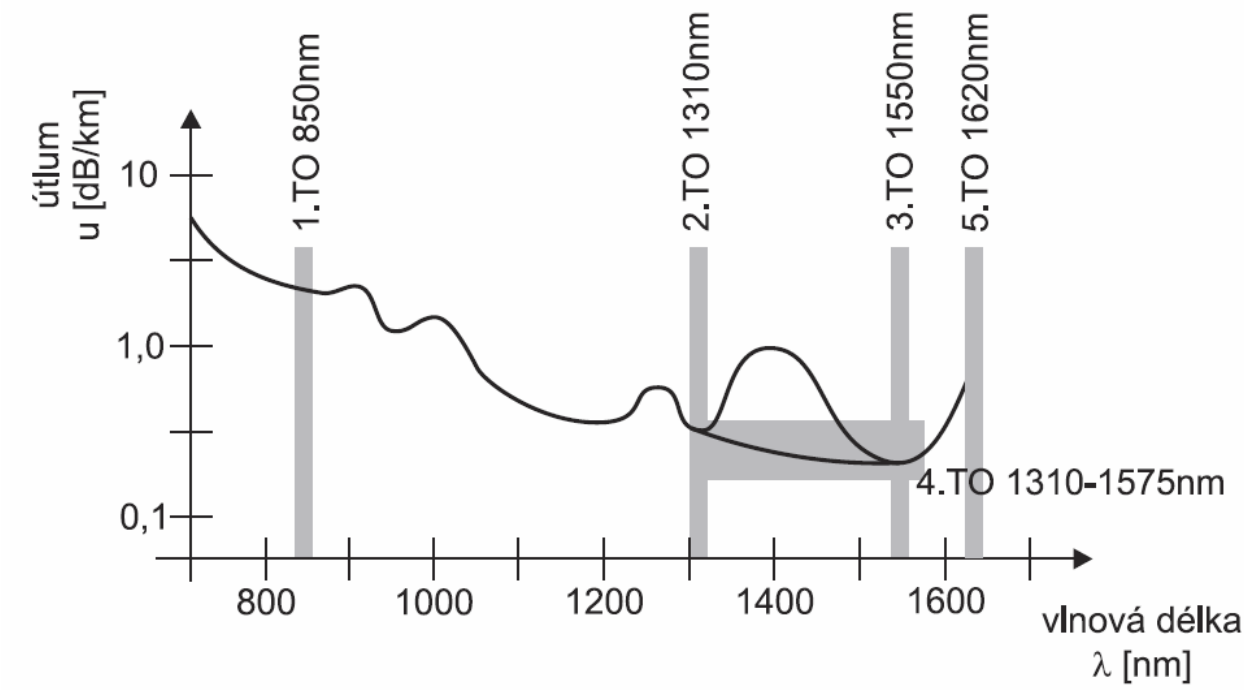
$$NA = \sqrt{\left(n_1^2 - n_2^2\right)}$$

kde Θ_a *– úhel dopadu*

Θ_c *– úhel lomu*

n_1 *– index lomu vlákna*

n_2 *– index lomu pláště*



Obrázek 7 – Spektrální útlumová charakteristika (převzato z [5])

1.3 V praxi používané vlnové délky

První okno (850nm)

Tato vlnová délka naleží do mnohovidového šíření. Charakteristika útlumu je zde silně klesající a hodnoty měrného útlumu jsou pro dálkové přenosy příliš vysoké. V praxi se využívá především u optických přístupových sítí, kvůli krátké přenosové délce.

Druhé okno (1280 – 1335 nm)

První pásmo využívané pro dálkové jednovidové i mnohovidové optické přenosy. Hodnota měrného útlumu je zde přibližně 0,35 dB na km.

Třetí okno (1530 – 1565 nm)

V tomto oknu se u standardního křemenného jednobodového vlákna dosahuje nejnižšího možného měrného útlumu. Toto pásmo je využíváno pro dálkové přenosy, jako transportní a globální sítě.

Čtvrté okno (1565 – 1625 nm)

Toto pásmo se nachází až za absolutním minimem měrného útlumu. Avšak vzhledem k natolik plochým parametrům se útlumové parametry liší velmi málo. Možnost jeho využití při dálkových přenosech s možností zdvojnásobit přenosovou kapacitu urychlil pokrok v technice WDM a optických zesilovačů.

Páté okno (1335 – 1530 nm)

Toto pásmo bylo dostupné až potom, kdy byly lépe zvládnuty techniky výroby optických vláken. Díky tomu bylo možné snížit počet eliminujících příměsí OH tak, že se ztratilo lokální maximum útlumu na vlnové délce 1380 nm. V praxi potom dochází ke spojení druhého až pátého okna a vytvoří se přenosový kanál o šířce pásma až 50 THz.

1.4 Disperze v optických vláknech

Disperze vln v optických vláknech je příčinou zkreslení přenášeného signálu a definuje se jako rozdíl šířky impulsu v polovině výšky na konci a na začátku vlákna. Frekvenční závislost indexu lomu, která vyvolá frekvenční závislost skupinové a fázové rychlosti šíření vlny v materiálu, z něhož je vyrobeno optické vlákno, je příčinou materiálové disperze. Disperze se řadí k nejdůležitějším parametrům optických vláken, určuje šíři přenášeného pásma a tím i přenosovou rychlost. Disperzi rozdělujeme na materiálovou, vlnovodovou a polarizační.

Materiálová disperze

Materiálová disperze se v optickém vlákně kombinuje s vlnovodovou disperzí, způsobenou změnami geometrie vidu a tím i změnami podélné skupinové i fázové rychlosti šířeními změně frekvence. Výsledný účinek se označuje jako disperze chromatická. Pokud se používá pro přenos mnohovidové vlákno, přidává se k chromatické disperzi ještě disperze vidová, která je způsobena rozdílnou rychlostí jednotlivých vidů. Samotná materiálová disperze je zapříčiněna rozdílnými rychlostmi šíření paprsků o různých vlnových délkách, což je způsobeno nelinearitou frekvenčního průběhu indexu lomu.

Časová odezva (materiálová disperze):

$$\sigma_t = |D_\lambda| \sigma_\lambda L$$

$$D_\lambda = -\frac{\lambda_0}{c_0} \frac{d^2 n}{d\lambda_0^2}$$

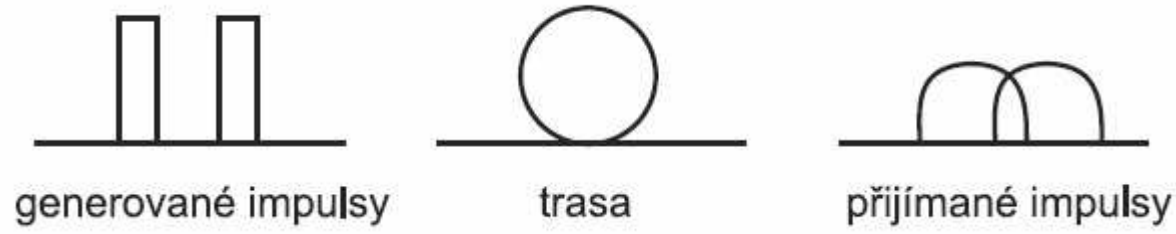
Kde L – délka optického vlákna

σ_λ – časová šířka optického impulzu

D_λ – koeficient materiálové disperze

d – průměr vlákna

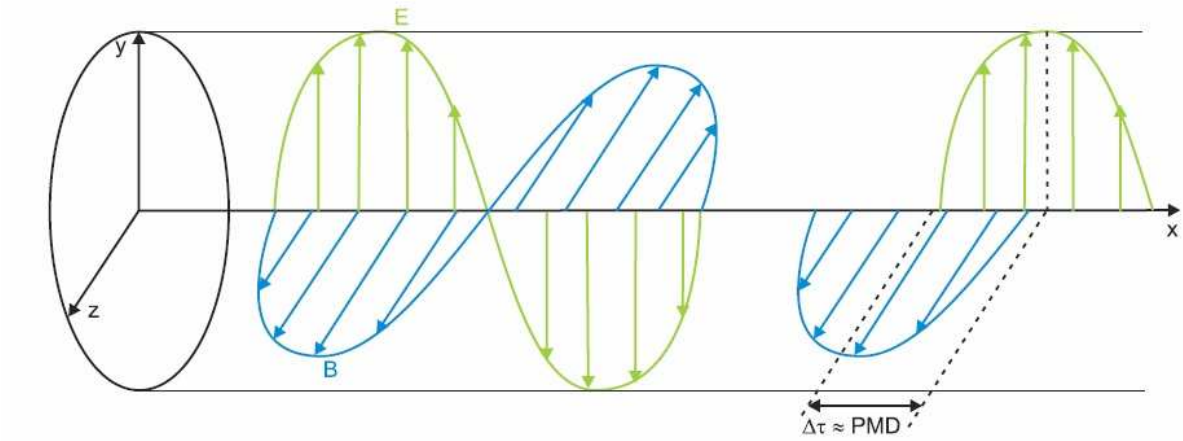
λ_0 – vlnová délka



Obrázek 8 – Vliv chromatické disperze na impuls (převzato z [5])

Polarizační vidová disperze

Vid, procházející optickým vláknem, se šíří ve dvou vzájemně na sebe kolmých polarizačních rovinách, stejně jako elektromagnetická vlna. Přenos může být zhoršen při jakékoli nesymetrii optického vlákna, jako například makroohyby a mikroohyby. To může mít za následek, že se každá složka šíří jinou rychlostí a získáme zkreslený signál nebo rozšířený impulz. Za následek potom může být zkreslení signálu nebo rozšíření impulsu. Velký vliv na PMD má opotřebení vláken vlivem stárnutí a zvyšování přenosové rychlosti, která je dnes už nad 10 Gb/s. Omezení polarizační vlnové disperze, je možné například výběrem vláken z kabelu, které mají garantovanou hodnotu.



Obrázek 9 – Znázornění polarizační vidové disperze (převzato z [5])

1.5 Nelineární jevy při optickém přenosu

Vznik nelineárních jevů je podmíněn velkými hustotami světla ve vlákně. Problém je v tom, že průřez vláken je velmi malý a se začátkem používání systémů vlnového multiplexu se do delších tras začaly přidávat optické zesilovače – násobiče světla. Používáme – li systém pracující s několika desítkami kanálu, tak se výkon všech laserů sčítá a musíme řešit problematiku nelineárních jevů přenosu.

Stimulovaný rozptyl

Stimulovaný rozptyl je nelineární fyzikální jev, při kterém dochází k rozptylu světelné vlny srážkami s akusticky nebo tepelně kmitajícími atomy vlákno. Při rozptylu dochází k mírnému posuvu vlnových délek k vyšším hodnotám.

Brilluinův rozptyl

Brilluinův rozptyl je vyvolán podélnou akustickou vlnou vzniklou elektrostrikcí a rozptýlená vlna je spektrálně posunuta přibližně o 10 GHz. Tento rozptyl je typický pro signály s úzkou šířkou čáry a je možné ho potlačit rozšířením spektra.

Ramanův rozptyl

Podstata tohoto jevu je vzájemná interakce světla šířícího se v určitém prostředí s tímto prostředím, jejímž důsledkem je frekvenční posuv. Rozptýlená vlna se šíří oběma směry.

Vlastní fázová modulace

Vlastní fázová modulace je výsledkem působení optického impulsu na sebe. To vede ke změnám fáze a šíření, tvarovému zkreslení a rozšíření spektra. Při velkém rozšíření dochází k překrytí signálů a následně chybám přenosu.

2 Technika spojování a vazební členy

Stejně jako běžné metalické kabely jsou i optické kabely dodávány v určitých délkách, které je potřeba vzájemně propojovat, tedy nejdříve spojit jednotlivá vlákna a potom plášť. Spojování optických kabelů je mnohem složitější než u metalických kabelů, spojky pláště jsou v podstatě shodné se spojkami u plastových kabelů.

V místech, kde bude častěji zapotřebí přerušovat optickou trasu, například z důvodu měření se zapojují optické konektory.

Potom existuje základní rozdělení spojů ve vláknové optice:

- Spoje nerozebíratelné
- Spoje rozebíratelné

Vazební členy se tedy využívají pro směrování, spojování a vydělování světelného záření. Obecně každý spoj v optické komunikaci je možné považovat za vazební člen, který do spoje vnáší značný útlum. Proto je vyžadována dokonalá technologie pro spojování optických vláken, protože v každém spoji vznikají ztráty. Jejich příčina je v rozdílných vlastnostech spojovaných vláken (vnitřní vlivy) a v nedokonalé geometrii spoje (vnější vlivy).

Příčiny vnitřních vlivů:

- Změna průměru jádra a primární ochrany spojovaných vláken
- Nepřizpůsobení indexu lomů
- Nepřizpůsobení numerických apertur
- Eliptičností a nesoustředností jádra a primární ochrany

Příčiny vnějších vlivů:

- Příčné přesazení
- Podélné přesazení
- Axiální sklon vláken
- Kvalita opracování konce vlákna
- Fresnelovy odrazy

Vnější vlivy je možné snížit kvalitní technologií spojování. Pro mnohovidová vlákna platí, že největší ztráty vznikají axiálním lomem a příčným přesazením. Podélné předsazení se už tolik neprojevuje. Fresnelovy ztráty odrazem na rozhraní sklo – vzduch – sklo je možné snížit vhodným výplňovým materiálem s podobným indexem lomu, jako má jádro.

2.1 Spoje nerozebíratelné

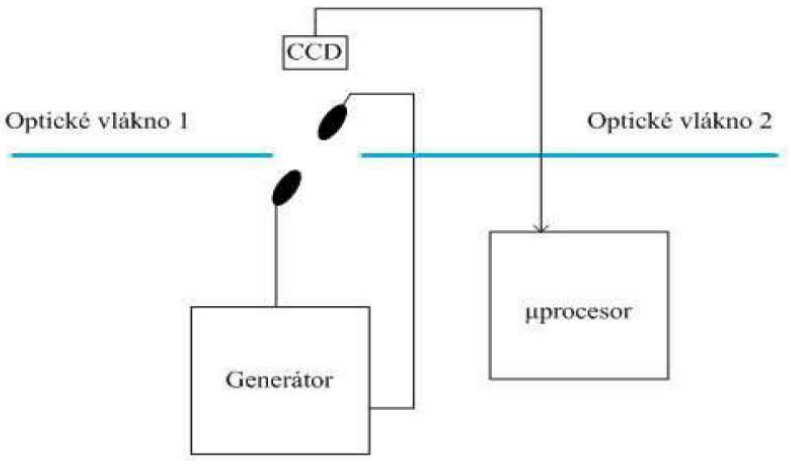
Hlavní problém u nerozebíratelných spojů, je spojení dvou vláken tak, aby nedocházelo k velkým ztrátám. Existuje několik možných technologií, jako například metoda tavného svařování, metoda spojování optických vláken lepením a nejnovější metody pevných metalických spojek.

Tavné svařování

Z dostupných známých metod se nejvíce ujalo a rozšířilo svařování elektrickým obloukem. Již méně se používá metoda svařování plynovým plamenem nebo laserem CO_2. Z důvodu toho, že ve sváru nesmí dojít k zúžení průměru vlákna, jsou vlákna při svaru posouvána proti sobě. Tyto operace jsou velmi důležité pro vlastní kvalitu sváru a jsou zpravidla kontrolovány automaticky, jako například mikroprocesorem s příslušnými V/V obvody. Pro kvalitní svár je nutné znát i bod tavení skla. Podle typu skla musí být nastaveny časy natavení konce vlákna a vlastního sváření. Následujícím krokem je zalomení vlákna a odstranění primární ochrany. Pro axiální usměrnění před svařováním se používají klínové drážky, které zajistí požadovanou geometrii vláken při sváření. Povrchové napětí v oblasti zóny tavení zajišťuje srovnání průměru vláken a taveniny. Kontroly nastavení vláken i průběh tavení je možné sledovat na obrazovce. Po provedení svaru se většinou provádí zkouška pevnosti spoje a provádí se kontrola spojky na útlum pomocí měření.

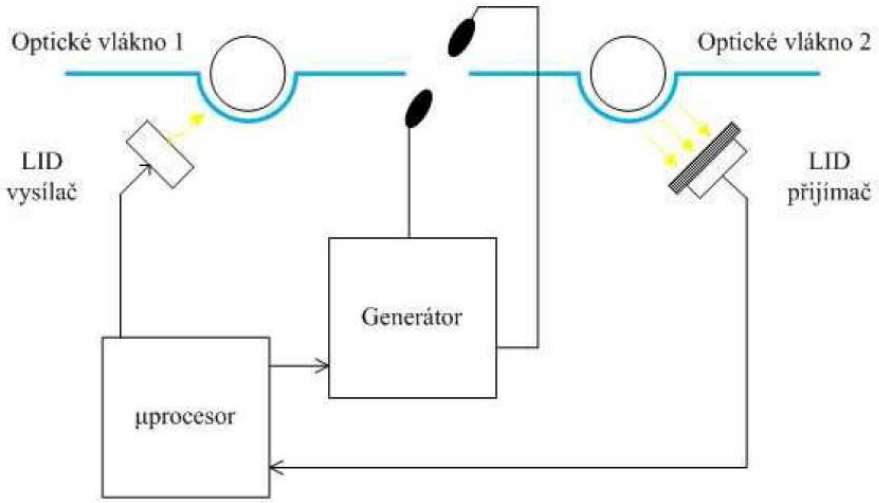
K tomuto svařování se požívají v zásadě dva systémy:

- L – PAS (Lense – Profile Alignment Switch) – Pozorování vláken v rovině x a y se provádí CCD videokamerou. Video obraz se znázorňuje na LCD monitoru a vyhodnocuje se polohování, posouzení koncových ploch a stanoví se útlum.



Obrázek 10 – Technologie L – PAS (převzato z [8])

- Systém LID – pracuje s postupem měření průchozího světla a obsahuje dva ohebné vazební členy. Světlo o vlnové délce 1300 nm se vysílá do levého ohebného vazebního členu a přijímá se opět vazebním členem na pravé straně.



Obrázek 11 – Technologie LID (převzato z [8])

Slepované spoje

U těchto spojů se používá lepidel k přilepení vláken k podkladu a ke spojení vláken dohromady. Lepidlo plní následující funkce:

- Má velmi podobný index lomu jako vlákno
- Zajišťuje ochranu spoje před prostředím
- Trvale zajišťuje vlákna v patřičné poloze
- Zabraňuje deformacím spoje a zajišťuje pevnost v tahu

Samotná spojka se potom skládá z trubičky s vnitřním otvorem, jehož světlost odpovídá vnějšímu průměru spojovaných vlákena v níž se dotýkající konce vláken zalepí. Technika vytvrditelného spoje je založena na zavedení ultrafialového světla do vlákna po nastavení geometrie spoje.

Mechanické spoje

Při této metodě se osové vyrovnání vlákna provádí za pomoci různých mechanických struktur, jako jsou V drážky. Pro trvalé zajištění nízkého útlumu je zapotřebí použití optického sdružovacího materiálu mezi konci vláken. Materiál je vybírán podle optických vlastností skla. Běžně se používají silikonové gely, epoxidové pryskyřice, optické tuky a ultrafialová lepidla. Sdružovací materiály musí zůstat v kontaktu s oběma vlákny i při změně mezery. Tyto materiály slouží i jako primární ochrana holého jádra. V případě lepidel je zajištěna i mechanická pevnost.

2.2 Spoje rozebíratelné

Spoje rozebíratelné, tzv. konektorové spoje, se nejvíce využívají v ústřednách, případně v místech opakovacích zesilovačů, v menší míře i v kabelových trasách při použití kabelů s páskovou strukturou.

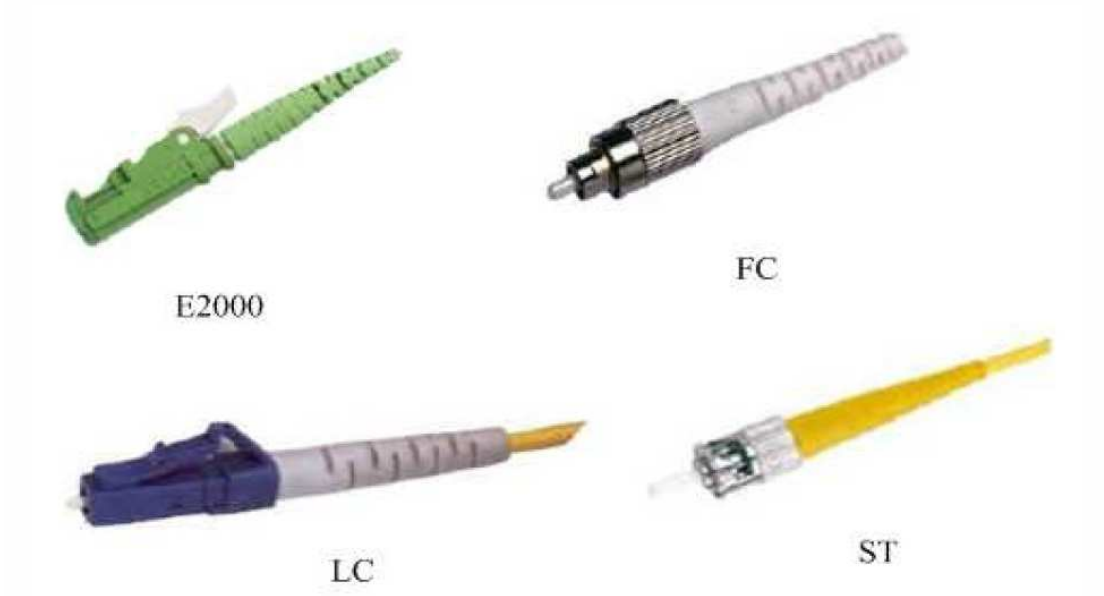
Princip konektorů spočívá v přesném navádění příslušných konců vláknových světlovodů proti sobě, ale problém je komplikován tím, že konečnou optimální polohu je třeba zajistit vhodným mechanickým dorazem a spojením obou částí konektoru. Spojovaná vlákna se nesmí dotýkat, aby nedocházelo k oděru čelních ploch. Důležitou úlohu má proto počáteční nastavení polohy konců vláken vůči referenčním polohám příslušné části konektoru pomocí speciálních fixovaných přípravků, případně i rychlých automatických mikromanipulátorů. Vlastní kontaktní člen je hlavní nosnou částí funkce konektoru a určuje jeho kvalitu i cenu.

K zajištění přesné souososti spojovaných vláken se používá jak tuhého, tak poddajného uložení v tělese konektoru. Většina konektorů používá jako hlavní konstrukční prvek vhodné pouzdro nebo kolíkovou vložku.

Obrázek 12 – Složení optického konektoru (převzato z [8])

Typy konektorů:

- Bionic – jeden z prvních konektorů, kuželovitá ferule, vložný útlum 0,5 – 0,6 dB
- SMA – také starší typ konektoru, nezajištěná ferule proti pootočení, aluminiová nebo ARCAP ferule, šroubovací převlečená matice.
- FC – standart pro telekomunikace, keramická nebo kompozitní ferule o průměru 2,5 mm, šroubovací převlečná matice s polohováním
- ST – standart pro telekomunikace, aretace proti pootočení vodícím kolíkem, odpružená ferule, bajonetový závěr, vložný útlum 0,2 – 0,3 dB
- SC – push–pull provedení, keramická nebo kompozitní ferule, vložný útlum 0,15 dB
- FDDI – párový konektor pro sítě FDDI, push–pull provedení, keramická ferule,vložný útlum 0,2 dB
- ESCON – obdoba FDDI, podporovaný IBM
- E2000 – evropský standart pro telekomunikace, push–pull provedení, napružený kryt překrývající feruli, vložný útlum 0,2 dB
- LC – představuje novou generaci konektorů, který po konstrukční stránce zabírá o 50% menší prostor než konektor SC. Vyrábí se v MM i SM provedení.
- MT – RJ – dvouvláknový konektor slučitelný s RJ 45
- MTP – určený pro páskové kabely (4,6,12,24,36 až 72 vláken)
- VF 45 – dvouvláknový konektor, pro připojení k PC



Obrázek 13 – Přehled některých používaných konektorů (převzato z [8])

3 Zdroje a detektory záření

3.1 Luminiscenční a laserové diody

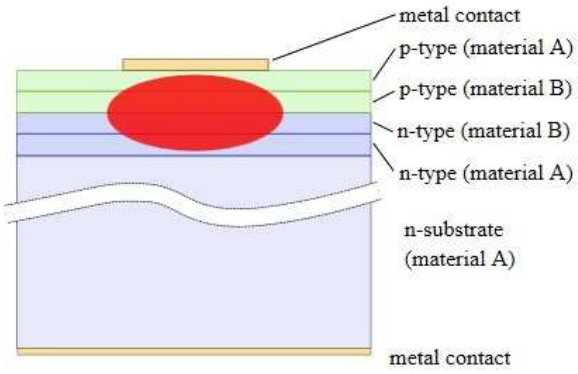
Zdroje záření, jako jsou luminiscenční diody, tvoří jednu ze základních částí optoelektronického spoje. Na zdroje záření pro tento účel použití jsou kladeny požadavky na záření světla na bázi pevné fáze při pokojové teplotě. Z tohoto důvodu byly vyvinuty luminiscenční a laserové diody.

Požadavky kladené na zdroje záření:

- Co největší účinnost konverze elektrické energie na energii zářivou
- Generace záření na takových vlnových délkách, kde útlum stávajících optických vláken je nejmenší
- Generují záření při pokojových teplotách
- Mají vysokou spolehlivost a životnost
- Snadnou modulovatelnost v širokém rozsahu
- Vysokou monochromatičnost a koherenci generovaného záření
- Co nejužší směrovou charakteristiku vystupujícího záření
- snadnou zapojitelnost generovaného záření na optické vlákno
- malé rozměry a hmotnost

Polovodičové infračervené elektroluminiscenční diody (LED) jsou P – N struktury převážně na bázi GaAs, polarizované v propustném směru, kdy na P – N přechodu dochází k injekci minoritních nositelů, z nichž část zářivě nekombinuje. Energií, která vzniká při přechodu proudu diodou, se vytváří páry elektron – díra v aktivní oblasti. Z energetického diagramu vyplývá, že elektrony se nachází ve vodivostním pásu s energií E_v a díry ve valenčním pásu E_i.

Odezva na proudový impuls elektroluminiscenčních diod je určena dobou života spontánně rekombinujících injektovaných minoritních nosičů. Pro polovodiče typu GaAs je tato doba krátká a náběžná hrana světelného impulsu je pouze několik ns. Těchto rychlých reakcí se dosahuje nahrazením obyčejného P – N přechodu jednoduchým nebo dvojitým heteropřechodem z úzkou aktivní oblastí. Výhody těchto zdrojů jsou to, že jsou malé, levné a mají relativně dobrou účinnost.



Obrázek 14 – Struktura laseru (převzato z [11])

Laserové diody jsou zase založeny na zesilování světla pomocí stimulace emise záření. Svoji konstrukcí se příliš neliší od uspořádání luminiscenční diody vyzařující z hrany. Musí však navíc splňovat některé požadavky, které umožňují emisi koherentního záření. Laser se skládá ze dvou základních částí, což je zesilovač světelné vlny a zpětnovazební rezonátor. Při interakci elektromagnetického pole s pevnou látkou vznikají tři základní druhy přechodů mezi stavem základním a excitovaným. Je to absorpce záření a spontánní a stimulovaná emise. Spontánní emise záření začíná samovolně a náhodně po určitém čase od excitace. Stimulovaná emise je vyvolávána přímou interakcí s přítomným elektromagnetickým polem. Tato interakce způsobuje, že optické záření vznikající v prvku, ve kterém převládá tento typ přechodu, je koherentní.

Pro dosažení tohoto efektu musíme působením vnější energie zabezpečit takový nerovnovážný stav, že bude větší počet atomů nebo molekulových systémů aktivní oblasti v excitovaném stavu, než ve stavu základním. V takové struktuře potom převládají interakcí pole a látky je stimulovaná emise a nikoli absorpce a optické záření šířící se touto oblastí je zesilováno. Tento stav se nazývá inverze populace.

3.2 Detektory záření

Pro detekci záření se používají prvky zvané detektory. Detektory záření, které jsou potřebné pro příjem a demodulaci optického signálu v optoelektronických systémech musí splňovat určité požadavky z hlediska parametrů, slučitelnosti s ostatními prvky, provedení a nákladů. V praxi se běžně využívají výhradně polovodičové detektory. Zejména se používají dva typy a to fotodioda PIN a lavinová fotodioda (APD).

Na detektory jsou potom kladeny tyto požadavky:

- vysoká citlivost v pásmu světelných zdrojů (800 nm – 1550 nm)
- musí se zaručit dostatečná šířka přenášeného frekvenčního pásma
- rychlá časová odezva
- malý vlastní šum
- minimální rozměry, současně vhodné připojení na optické vlákno
- necitlivost na teplotní změny a změny napájecího napětí

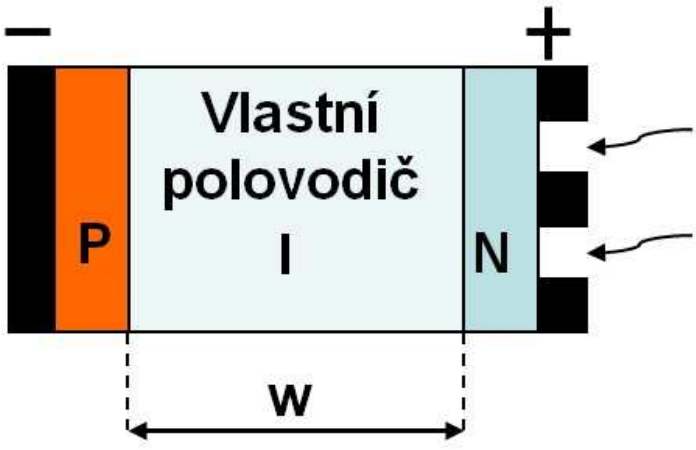
PIN fotodioda

Skládá se z tří základních vrstev:

- ze silně legované vrstvy P o síle w_p
- ze silně legované vrstvy o síle w_n
- střední vrstvy i, která je slabě legována a má vodivost typu P nebo N

Průběh intenzity elektrického pole ve vrstvě i je vytvořen vlivem napětí, kterým je dioda polarizována v závěrném směru. V místě styku vrstvy P a i vzniká přechod. Právě tak vzniká přechod v místě styku vrstev i a N. Obecně se mohou pod vlivem dopadajícího světla vytvářet páry elektron – díra ve všech oblastech diody. Elektrony a díry vzniklé v oblasti difundují pod vlivem silného elektromagnetického pole v navzájem opačných směrech.

Pro získání dostatečné účinnosti generování párů elektron – díra je nezbytné, aby i oblast byla co nejširší a obě sousední oblasti byly úzké. Fotodiody PIN jsou velmi rozšířené detektory, které mají vysoký kvantový výtěžek (60 – 80 %) a rychlou odezvu.

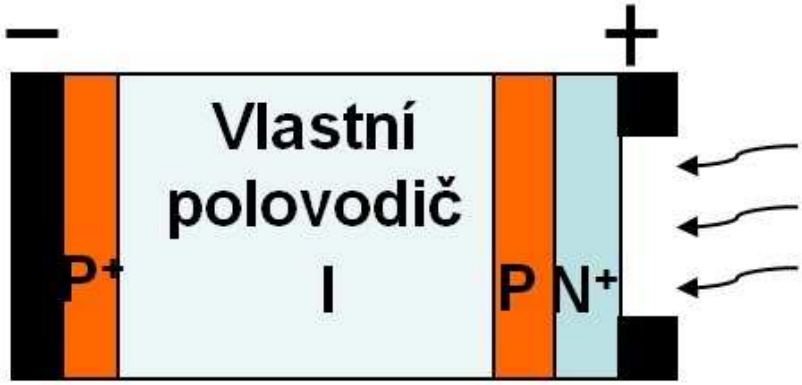


Obrázek 15 – Struktura fotodiody PIN (převzato z [12])

Lavinová fotodioda

Lavinové fotodiody jsou v praxi používané z důvodu dosažení větší citlivosti, v porovnání s probíranými PIN diodami. Na rozdíl od PIN fotodiod, založených na optické excitaci volných nosičů náboje a rekombinačních procesech, je u lavinových fotodiod proces multiplikace volných nosičů náboje na základě ionizace v silném elektrickém poli.

Nevýhodou lavinových fotodiod je komplikovanější výroba, jsou také dražší, vyžadují předpětí a je zde zvýšená úroveň hladiny šumu. Z konstrukčního hlediska je legování provedeno tak, aby v oblasti přechodu dosáhla intenzita elektrického pole vysoké hodnoty. Nosiče náboje, které driftují v této oblasti, jsou urychlovány vlivem nárazové ionizace.



Obrázek 16 – Struktura lavinové fotodiody (převzato z [12])

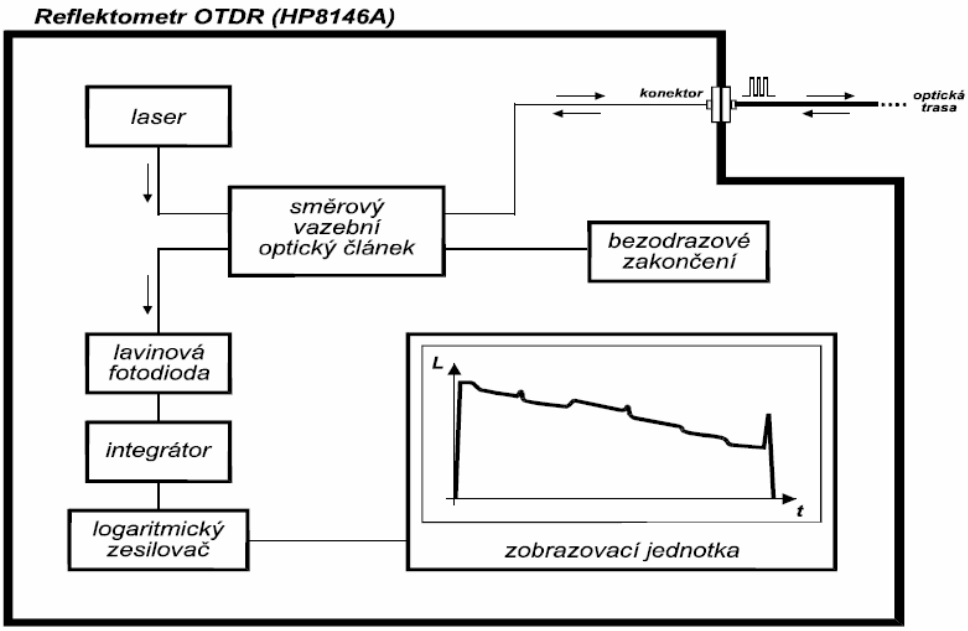
4 Praktická část a optické simulace

4.1 Metoda OTDR

Metoda OTDR (Optical Time Domain Reflectometry) je dnes nejrozšířenější a nejpoužívanější metodou měření parametrů optických vláken a lokalizace poruch. Metoda je založená na principu zpětného rozptylu a umožňuje měření optické trasy po celé její délce. Z toho vyplývá možnost měřit a analyzovat útlum vlákna jak v jednotlivých úsecích, tak po celé délce, zjišťovat podélnou homogenitu vlákna, útlum svarů, případnou reflexi u konektorů, zjišťovat délku vlákna a lokalizovat poruchy.

OTDR se také používá ke zjišťování optické kontinuity trasy. Případné Fressnelovy odrazy jsou z hlediska měření nežádoucím jevem, ale jsou vhodné pro měření délky a lokalizaci poruch. Fressnelův odraz nastává při dopadu optického záření na rozhraní dvou prostředí s různým indexem lomu.

Samotné měření probíhá tak, že se nejdříve vyšle světelný impulz do vlákna injekčním laserem prostřednictvím směrového vazebního článku nebo vazební optikou doplněnou o polopropustné zrcátko či jiný typ rozdělovače optického svazku. Zpětně odražené nebo rozptýlené světlo je detekováno lavinovou fotodiodou. Následně je detekovaný elektrický signál veden do analogového, případně digitálního integrátoru. Je nutno uvést, že zpětně odražený signál má velice nízkou úroveň výkonu a je velmi zatížen šumem, proto je důležité pro získání použitelného signálu provést zprůměrování. Signál z integrátoru je zaveden do logaritmického zesilovače nebo je logaritmování provedeno digitálně. Výsledné hodnoty se zobrazí na displeji a získáme tím závislost útlumu na vzdálenosti od počátku do konce optické trasy.



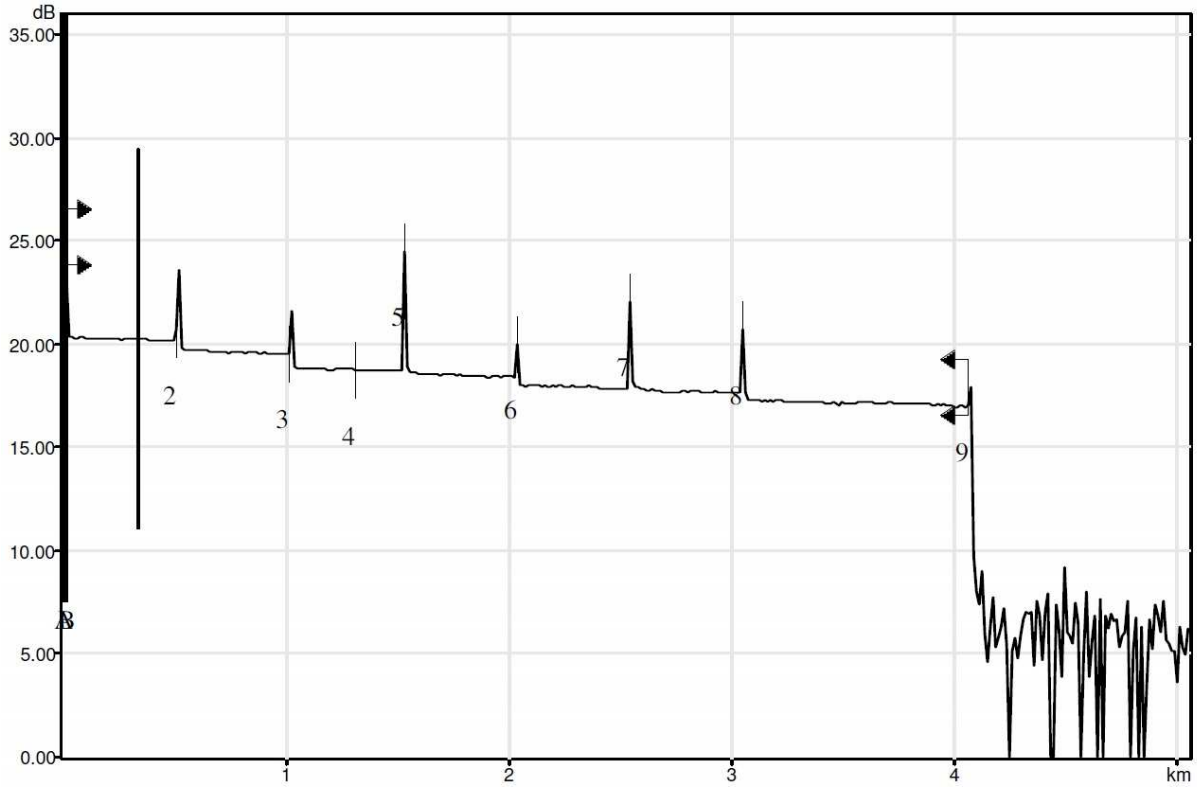
Obrázek 17 – Blokové schéma OTDR (převzato z [10])

4.2 Popis měření pomocí metody OTDR

Pomocí metody OTDR byla měřena trasa dlouhá 4 km, která byla sestavena z osmi délek jednovidového optického vlákna o délce 500 m. Na tomto optickém vláknu byly metodou OTDR měřeny parametry na vlnových délkách 1310 nm, 1550 nm a 1625 nm při délkách impulzů 10 ns a 30 ns. Celkově měla trasa osm konektorových spojů a 16 svarů. Útlum svarů na optickém vláknu, který byl odhadnut CCD snímačem při svařování, byl mezi 0,05 dB a 0,1 dB. Prvních šest konektorových spojení bylo realizováno konektory mechanicko – gelovými typu QA. Poslední dvě konektorová spojení byla realizována mechanickými konektory typu E2000.

4.3 Naměřené hodnoty

Měření závislosti útlumu na délce trasy, délka impulzu 10 ns, vlnová délka 1310 nm



Obrázek 18 – Měření na OTDR délka impulzu 10 ns, vlnová délka 1310 nm

Tabulka 1 – parametry trasy, délka impulzu 10 ns, vlnová délka 1310 nm

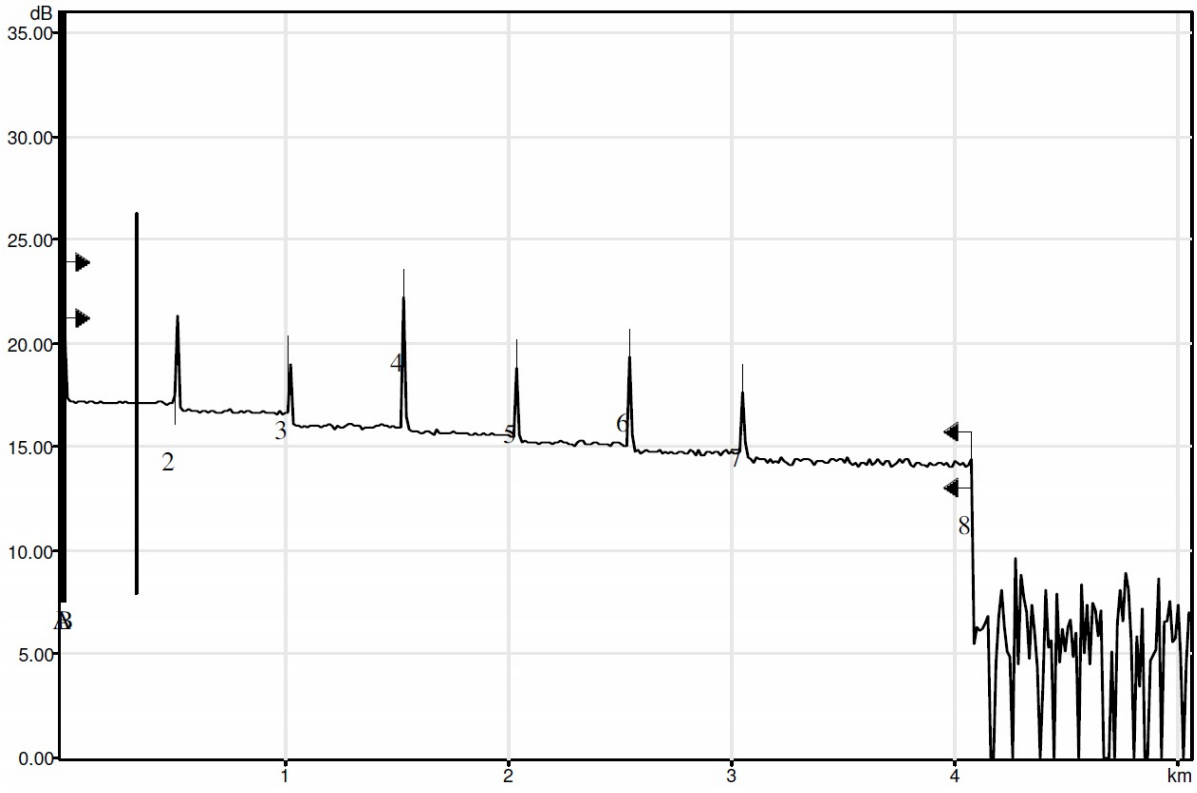
ztráta trasy (dB)	3,306
rozpětí (km)	4,0676
průměrná ztráta (dB/km)	0,813

Tabulka poruch

Číslo	Pozice (km)	Typ poruchy	Útlum (dB)	Odraz (dB)	Mer.útl. (dB/km)	Kumul. (dB)
1	0.0000	Úroven navázání	- - -	-42.8		0.000
		Vláknový úsek (0.5157 km)	0.183		0.356	0.183
2	0.5157	Událolst s odrazem	0.427	-43.9		0.611
		Vláknový úsek (0.5061 km)	0.215		0.425	0.826
3	1.0218	Událolst s odrazem	0.673	-51.6		1.499
		Vláknový úsek (0.2895 km)	0.082		0.285	1.582
4	1.3113	Bezodrazová událost	0.038			1.620
		Vláknový úsek (0.2173 km)	0.022		0.099	1.641
5	1.5286	Událolst s odrazem	0.082	-38.7		1.723
		Vláknový úsek (0.5068 km)	0.215		0.424	1.937
6	2.0354	Událolst s odrazem	0.412	-54.6		2.349
		Vláknový úsek (0.5068 km)	0.183		0.362	2.533
7	2.5422	Událolst s odrazem	-0.056	-43.7		2.477
		Vláknový úsek (0.5061 km)	0.246		0.486	2.723
8	3.0483	Událolst s odrazem	0.313	-48.2		3.037
		Vláknový úsek (1.0193 km)	0.270		0.265	3.306
9	4.0676	Událolst s odrazem	- - -	-49.7		3.306
		Vláknový úsek (0.9861 km)	1.209		1.226	- - -

Obrázek 19 – Tabulka poruch 10 ns, 1310 nm

Měření závislosti útlumu na délce trasy, délka impulzu 10 ns, vlnová délka 1550 nm



Obrázek 20 – Měření na OTDR délka impulzu 10 ns, vlnová délka 1550 nm

Tabulka 2 – parametry trasy, délka impulzu 10 ns, vlnová délka 1550 nm

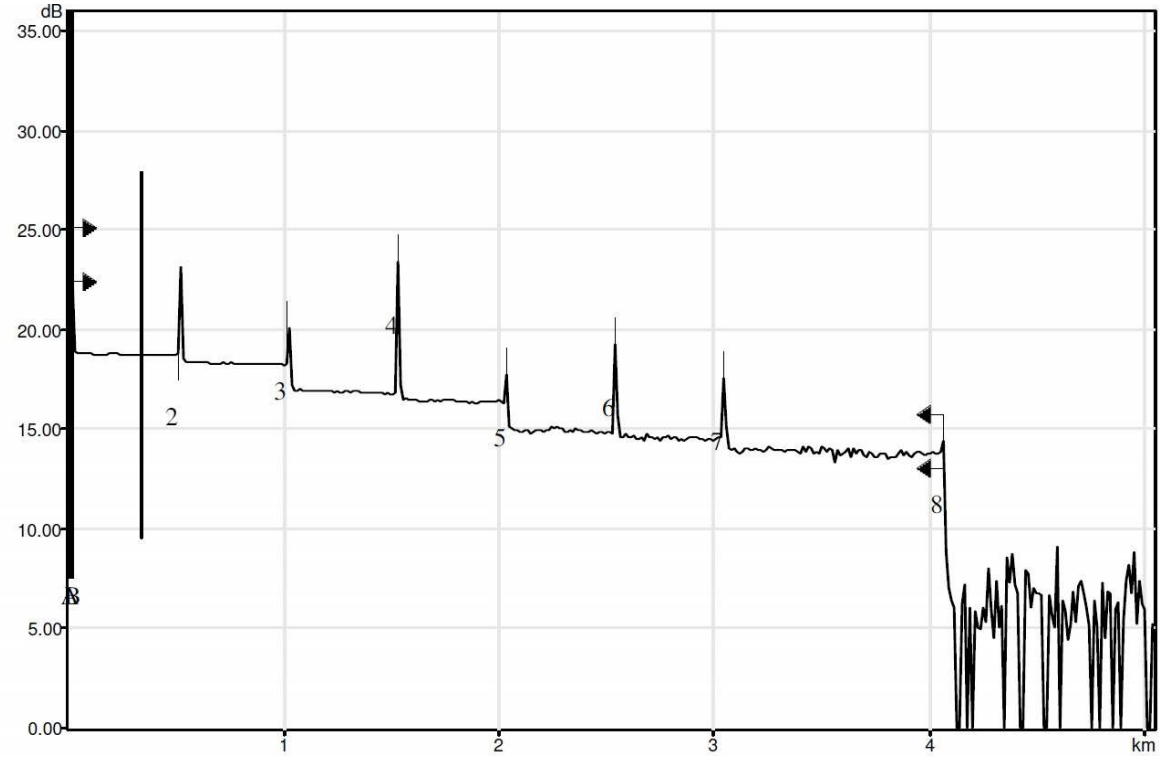
ztráta trasy (dB)	3,075
rozpětí (km)	4,0667
průměrná ztráta (dB/km)	0,756

Tabulka poruch

Číslo	Pozice (km)	Typ poruchy	Útlum (dB)	Odraz (dB)	Mer.útl. (dB/km)	Kumul. (dB)
1	0.0000	Úroven navázání	- - -	-43.2		0.000
		Vláknový úsek (0.5160 km)	0.146		0.282	0.146
2	0.5160	Událolst s odrazem	0.293	-44.9		0.438
		Vláknový úsek (0.5064 km)	0.193		0.381	0.631
3	1.0224	Událolst s odrazem	0.587	-52.6		1.218
		Vláknový úsek (0.5058 km)	0.076		0.150	1.294
4	1.5282	Událolst s odrazem	0.087	-39.0		1.380
		Vláknový úsek (0.5071 km)	0.331		0.653	1.711
5	2.0353	Událolst s odrazem	0.248	-49.1		1.959
		Vláknový úsek (0.5058 km)	0.217		0.430	2.176
6	2.5411	Událolst s odrazem	0.184	-44.5		2.360
		Vláknový úsek (0.5071 km)	0.170		0.336	2.531
7	3.0481	Událolst s odrazem	0.264	-49.2		2.795
		Vláknový úsek (1.0186 km)	0.280		0.274	3.075
8	4.0667	Událolst s odrazem	- - -	-54.9		3.075
		Vláknový úsek (0.9835 km)	0.384		0.390	- - -

Obrázek 21 – Tabulka poruch 10 ns, 1550 nm

Měření závislosti útlumu na délce trasy, délka impulzu 10 ns, vlnová délka 1625 nm



Obrázek 22 – Měření na OTDR délka impulzu 10 ns, vlnová délka 1625 nm

Tabulka 3 – parametry trasy, délka impulzu 10 ns, vlnová délka 1625 nm

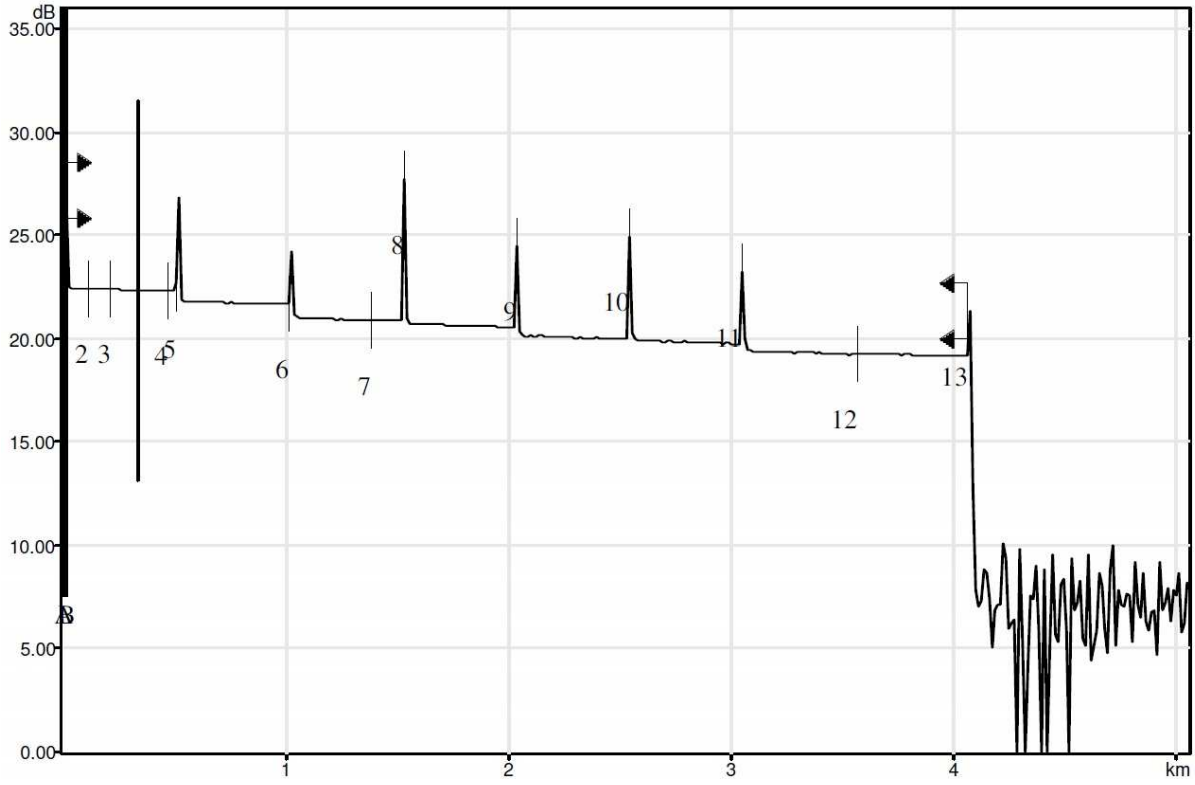
ztráta trasy (dB)	5,109
rozpětí (km)	4,0618
průměrná ztráta (dB/km)	1,258

Tabulka poruch

Číslo	Pozice (km)	Typ poruchy	Útlum (dB)	Odraz (dB)	Mer.útl. (dB/km)	Kumul. (dB)
1	0.0000	Úroven navázání	- - -	-43.1		0.000
		Vláknový úsek (0.5153 km)	0.137		0.267	0.137
2	0.5153	Událolst s odrazem	0.302	-45.1		0.439
		Vláknový úsek (0.5057 km)	0.170		0.337	0.610
3	1.0210	Událolst s odrazem	1.251	-54.3		1.860
		Vláknový úsek (0.5057 km)	0.190		0.376	2.051
4	1.5268	Událolst s odrazem	0.212	-39.4		2.263
		Vláknový úsek (0.5064 km)	0.237		0.469	2.500
5	2.0331	Událolst s odrazem	1.388	-57.2		3.888
		Vláknový úsek (0.5057 km)	0.153		0.303	4.042
6	2.5389	Událolst s odrazem	0.062	-45.1		4.104
		Vláknový úsek (0.5064 km)	0.199		0.393	4.303
7	3.0452	Událolst s odrazem	0.454	-49.8		4.757
		Vláknový úsek (1.0166 km)	0.351		0.346	5.109
8	4.0618	Událolst s odrazem	- - -	-57.0		5.109
		Vláknový úsek (0.9821 km)	0.608		0.619	- - -

Obrázek 23 – Tabulka poruch 10 ns, 1625 nm

Měření závislosti útlumu na délce trasy, délka impulzu 30 ns, vlnová délka 1310 nm



Obrázek 24 – Měření na OTDR délka impulzu 30 ns, vlnová délka 1310 nm

Tabulka 4 – parametry trasy, délka impulzu 30 ns, vlnová délka 1310 nm

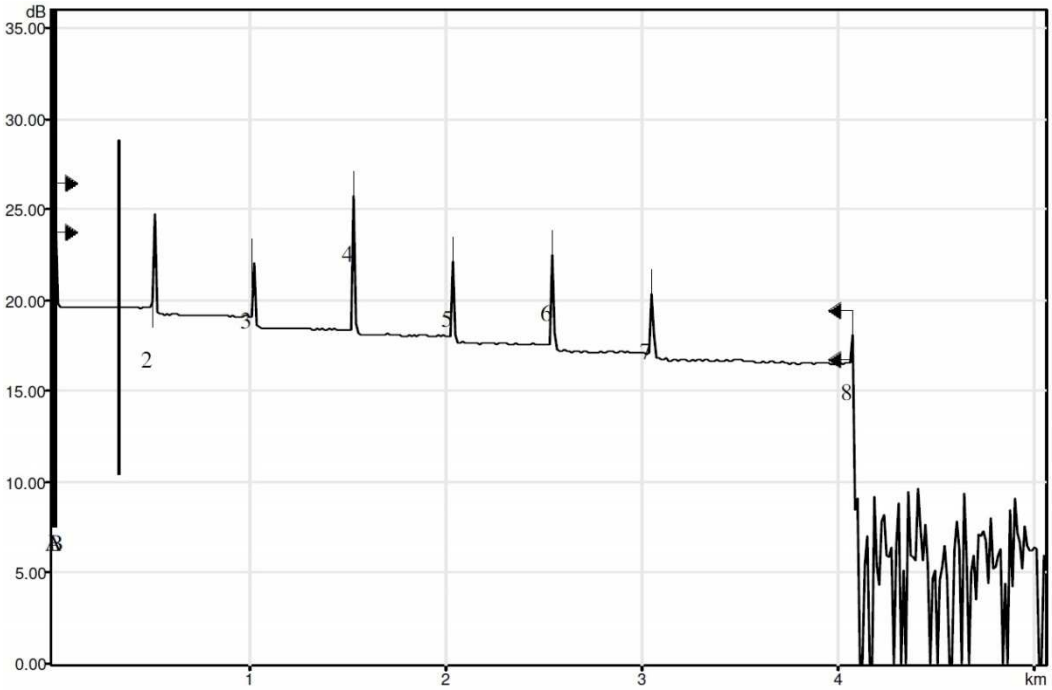
ztráta trasy (dB)	3,33
rozpětí (km)	4,0676
průměrná ztráta (dB/km)	0,819

Tabulka poruch

Číslo	Pozice (km)	Typ poruchy	Útlum (dB)	Odraz (dB)	Mer.útl. (dB/km)	Kumul. (dB)
1	0.0000	Úroven navázání	- - -	-42.8		0.000
		Vláknový úsek (0.1195 km)	0.105		0.876	0.105
2	0.1195	Zisková událost	-0.050			0.055
		Vláknový úsek (0.0914 km)	0.059		0.650	0.114
3	0.2109	Zisková událost	-0.022			0.092
		Vláknový úsek (0.2690 km)	0.116		0.432	0.208
4	0.4799	Zisková událost	-0.063			0.146
		Vláknový úsek (0.0358 km)	0.088		2.465	0.234
5	0.5157	Událolst s odrazem	0.413	-44.2		0.647
		Vláknový úsek (0.5068 km)	0.180		0.354	0.827
6	1.0225	Událolst s odrazem	0.597	-52.1		1.424
		Vláknový úsek (0.3598 km)	0.193		0.537	1.617
7	1.3823	Zisková událost	-0.058			1.559
		Vláknový úsek (0.1463 km)	0.099		0.674	1.657
8	1.5286	Událolst s odrazem	0.063	-38.6		1.721
		Vláknový úsek (0.5068 km)	0.225		0.445	1.946
9	2.0354	Událolst s odrazem	0.367	-47.0		2.313
		Vláknový úsek (0.5068 km)	0.217		0.429	2.530
10	2.5422	Událolst s odrazem	-0.007	-44.0		2.523
		Vláknový úsek (0.5061 km)	0.213		0.420	2.736
11	3.0483	Událolst s odrazem	0.313	-48.6		3.048
		Vláknový úsek (0.5164 km)	0.186		0.360	3.234
12	3.5646	Zisková událost	-0.060			3.174

Obrázek 25 – Tabulka poruch 30 ns, 1310 nm

Měření závislosti útlumu na délce trasy, délka impulzu 30 ns, vlnová délka1550 nm



Obrázek 26 – Měření na OTDR délka impulzu 30 ns, vlnová délka 1550 nm

Tabulka 5 – parametry trasy, délka impulzu 30 ns, vlnová délka 1550 nm

ztráta trasy (dB)	3,18
rozpětí (km)	4,0667
průměrná ztráta (dB/km)	0,782

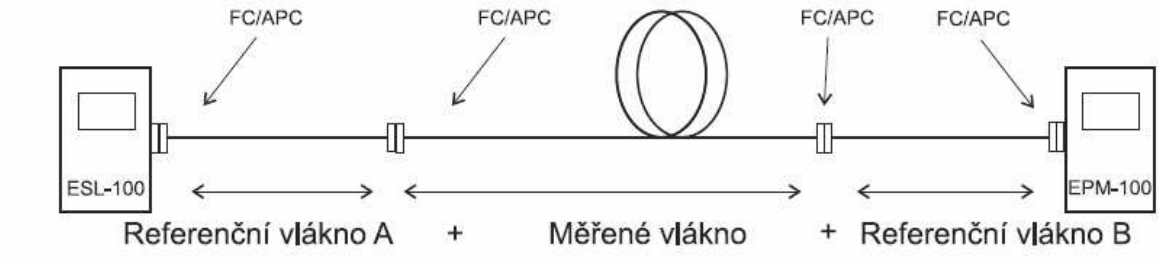
Tabulka poruch

Číslo	Pozice (km)	Typ poruchy	Útlum (dB)	Odraz (dB)	Mer.útl. (dB/km)	Kumul. (dB)
1	0.0000	Úroven navázání	- - -	-43.6		0.000
		Vláknový úsek (0.5160 km)	0.109		0.211	0.109
2	0.5160	Událolst s odrazem	0.314	-45.3		0.423
		Vláknový úsek (0.5064 km)	0.154		0.304	0.577
3	1.0224	Událolst s odrazem	0.630	-53.0		1.207
		Vláknový úsek (0.5058 km)	0.114		0.226	1.322
4	1.5282	Událolst s odrazem	0.212	-39.6		1.534
		Vláknový úsek (0.5064 km)	0.124		0.245	1.658
5	2.0346	Událolst s odrazem	0.316	-48.8		1.975
		Vláknový úsek (0.5064 km)	0.166		0.327	2.140
6	2.5411	Událolst s odrazem	0.245	-45.2		2.385
		Vláknový úsek (0.5071 km)	0.203		0.401	2.588
7	3.0481	Událolst s odrazem	0.293	-49.8		2.881
		Vláknový úsek (1.0186 km)	0.299		0.293	3.180
8	4.0667	Událolst s odrazem	- - -	-55.5		3.180
		Vláknový úsek (0.9835 km)	- - -		- - -	- - -

Obrázek 27 – Tabulka poruch 30 ns, 1550 nm

4.4 Přímá metoda měření útlumu

Přímá metoda měření nám umožňuje změřit celkový útlum optické trasy. Na jeden konec optického vlákna se připojí zdroj signálu a druhý měřič útlumu. Při měření jsem vždy postupně připojoval vlákno po 500 metrech, až byl nakonec změřen útlum celé optické trasy tak, aby byl útlum částečně porovnatelný s metodou OTDR. Vzhledem k relativně malé délce optické trasy a omezeným možnostem měření, byla zanedbána referenční vlákna.



Obrázek 28 – Blokové schéma měření přímou metodou (převzato z [7])

Tabulka 6 – Výsledky měření pomocí přímé metody

		délka vlákna (m)							
	λ(nm)	500	1000	1500	2000	2500	3000	3500	4000
A(dB)	1310	0,0517	0,945	1,448	2,059	2,797	3,401	3,519	3,653
	1550	0,436	1,123	1,572	2,158	2,875	3,469	3,565	3,686

4.5 Vyhodnocení výsledků

Při měření metodou OTDR jsem měřil na vlnových délkách 1310 nm, 1550 nm, 1625 nm. Tyto vlnové délky se používají při přenosech a označují se jako třetí, čtvrté a páté okno. Délky impulzů byly 10 ns a 30 ns. Při těchto délkách impulzů je měření relativně přesné, protože vzdálenost optického vlákna je relativně malá. Na délce vysílaných optických pulzů závisí dosah a přesnost měření. Čím je delší měřící pulz, tím větší je dosah, ale zhoršuje se přesnost měření. Při delším pulzu laser dokáže dosvítit na delší vzdálenost, ale integrátor průměruje výsledek pro menší množství delších pulzů. Důsledek je roztažení svarů a konektorů zobrazených na displeji, které by se v kritickém případě mohly jevit jako několik stovek metrů dlouhé. V mém případě jsou vysílané pulzy krátké a tak jsou vhodné pro měření kratších optických tras. Pokud by se tyto pulzy použily na delší optickou trasu, byl by průběh značně zkreslen šumem. Z toho je možné usoudit, že musíme volit optimální délku impulzů pro danou vzdálenost optické trasy.

Na samotných obrázcích z měření vidíme pro každý impulz a vlnovou délku různé výsledky měření. Pod každým výsledkem měření je tabulka s přesnými hodnotami útlumu nebo reflexe v případě rozhraní dvou konektorů v jednotkách decibel. Na každém měření je vidět nejdříve reflexe na prvním konektoru, které se projevuje špičkou v daném bodě optické trasy. Potom je vidět zvýšení útlumu a postupně mírně se zvyšující útlum se vzdáleností a následně další reflexe. Poslední špička představuje pouze referenční odraz na konci optické trasy a dál už je vidět pouze vlastní šum detektoru.

Tabulka 7 – Porovnání celkové ztráty výkonu na jednotlivých vlnových délkách

λ(nm)	ztráta trasy (dB)
1310	3,306
1550	3,075
1625	5,109

Celkový útlum byl při impulzu 10 ns 3,306 dB na vlnové délce 1310 nm, 3,075 dB na vlnové délce 1550 nm a na vlnové délce byl celkový útlum 5,109 dB. Při šířce impulzu 30 ns byl na vlnové délce 1310 nm celkový útlum 3,330 dB a na vlnové délce 1550 nm 3,106 dB. Na vlnové délce 1625 nm byl celkový útlum o něco vyšší, což odpovídá teoretickým předpokladům o útlumu na dané vlnové délce (viz. Obrázek 7). Z hlediska konektorového spojení je útlum na tak krátkou trasu příliš velký. Celkově je na trase 8 optických konektorů a 16 svárů. Útlum svárů byl relativně malý. U konektorových spojení byl útlum také relativně malý, ale důležitým parametrem při ztrátě výkonu zde byla reflexe. Na

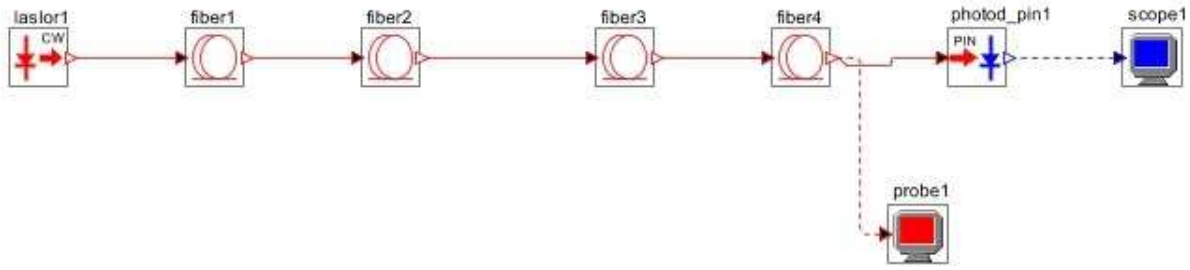
konektorech typu E2000 nebyla reflexe při měření zaznamenána, ale mechanické konektory typu QA se ukázaly jako značně nekvalitní, protože vykazovaly značnou reflexi na trase a rychle se opotřebovávaly. V tomto důsledku by se dál mohl zvyšovat útlum trasy, ale také reflexe a chybovost při přenosu dat. Navíc při zanesení i malé nečistoty může dojít i k přerušení trasy.

Při měření přímou metodou byl celkový útlum při vlnové délce 1310 nm 3,653 dB a při vlnové délce 1550 nm byl útlum 3,686 dB. Od metody OTDR se výsledky celkového útlumu liší přibližně o 0,5 dB a stejně jako u OTDR mechanicko – gelové konektory QA vykazovaly relativně velký útlum, zatímco u konektorů E2000 byl útlum zanedbatelný.

Obě měření potvrdila, že při realizaci optické trasy větších délkových rozsahů je nutné mít co nejmenší počet svarů a konektorů a samotné konektory by měly být co nejkvalitnější, aby se předešlo útlumu na těchto rozhraních a přenos byl potom co nejkvalitnější.

4.6 Simulace v programu OPTSim

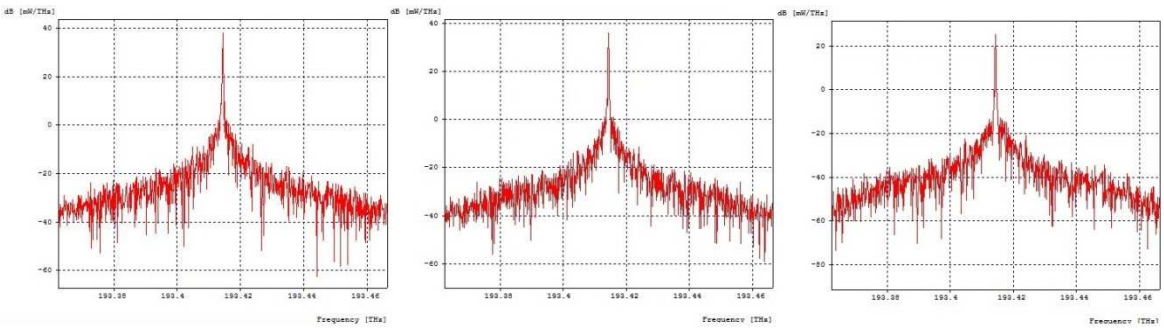
Simulace v prostředí OptSim se zabývá především vyhodnocováním z hlediska kvality datového přenosu. Zabýval jsem se 4 kilometry dlouhou optickou trasou, která byla reálně k dispozici při praktickém měření. Některé parametry byly potom porovnány s optickou trasou dlouhou 100 kilometrů. Nejprve byly nastaveny počáteční parametry simulace na jednovidovém vlákně. Vlnová délka byla 1550 nm, výkon vysílacího laseru 1 mW, a útlum konektorů 0,5 dB. Výsledné parametry byly sledovány na výstupu bloky probe1, který je pro optický signál a scope1, který je pro elektrický signál.



Obrázek 29 – Blokové schéma optické trasy v programu OptSim

4.7 Výsledky simulace v programu OptSim

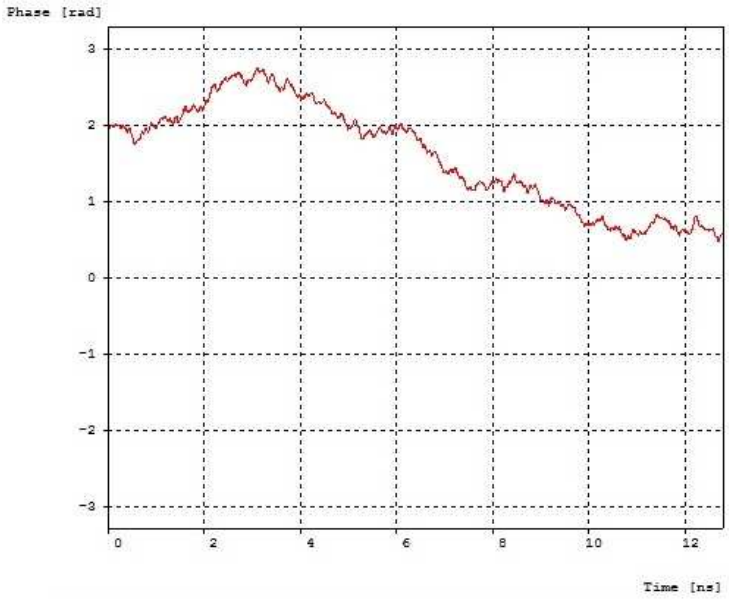
Spektrum optického signálu



Obrázek 30 – Porovnání spekter optického signálu (zleva: začátek trasy, 4 km, 100 km)

Na spektrech optických signálů je vidět závislost výkonu na frekvenci. Šíře pásma je kolem 193 THz, která odpovídá vlnové délce 1550 nm. Špička na spektru je vyzařovací výkon laseru a zbytek spektra jsou jen rušivé vlivy se zanedbatelným výkonem. Výkon signálu ve spektru byl 38 dB [mW/THz] při délce trasy 4 km a 24 dB [mW/THz] při délce trasy 100 km.

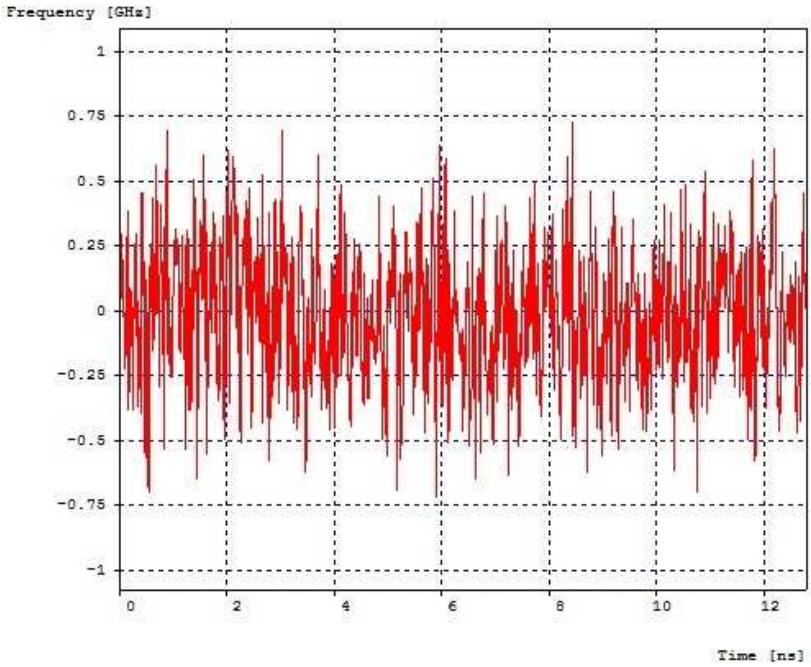
Okamžitá fázová odchylka



Obrázek 31 – Graf závislosti okamžité fázové odchylky fáze na čase

Graf závislosti okamžité fáze na čase udává rozdíl mezi okamžitou fází modulovaného signálu a nosné. Rozsah odchylek je úměrný amplitudě modulovaného signálu. Celkový rozsah fázové odchylky byl 2,29557 radiánů.

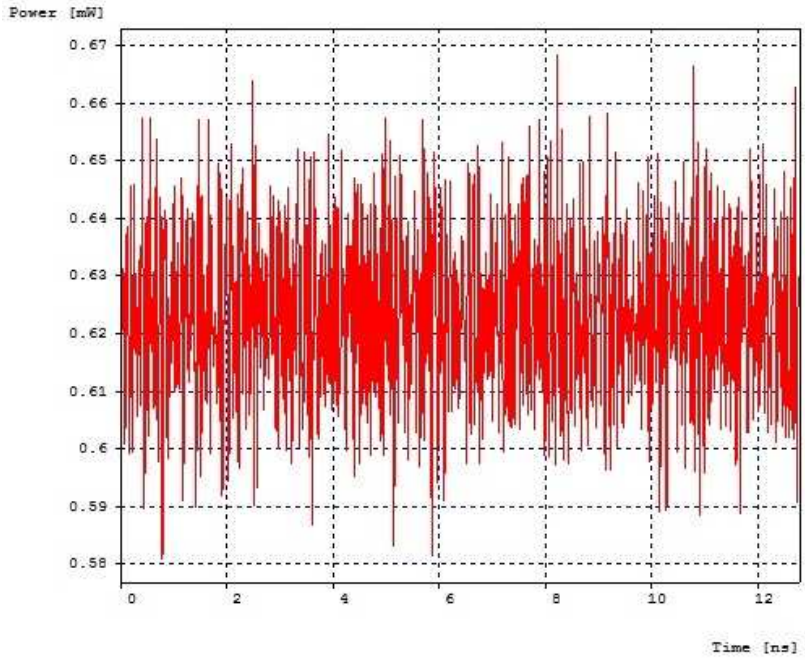
Okamžitá frekvenční odchylka



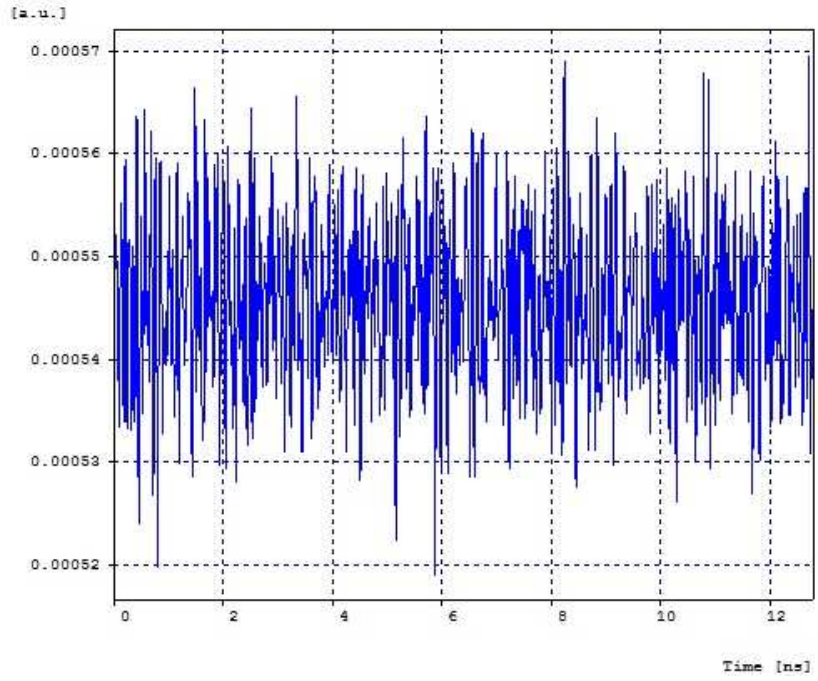
Obrázek 32 – Graf závislosti frekvenční odchylky na čase

Okamžitá frekvenční odchylka udává rozdíl mezi frekvencí modulačního signálu a jmenovité frekvenci nosné. Celkový rozsah frekvenční odchylky je 1,59 GHz.

Elektrický a optický signál v čase



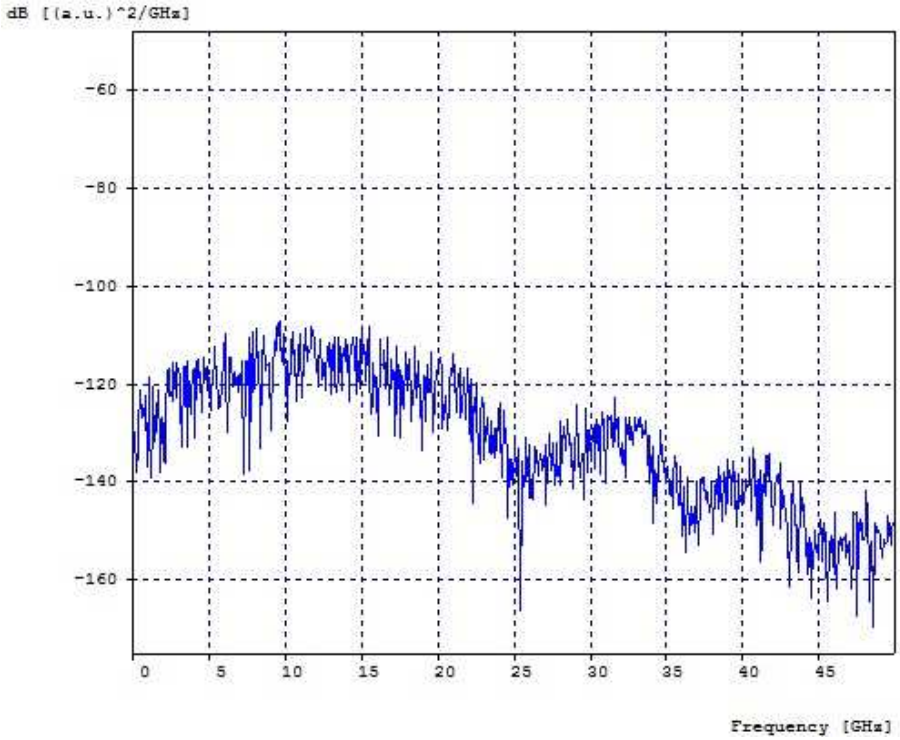
Obrázek 33 – Průběh optického signálu v časové oblasti



Obrázek 34 – Průběh elektrického signálu v čase

Z průběhů elektrického a optického signálu v čase můžeme zjistit útlum trasy. Při vlnové délce 1550 nm byl na trase 4 km útlum přibližně 2 dB.

Spektrum elektrického signálu

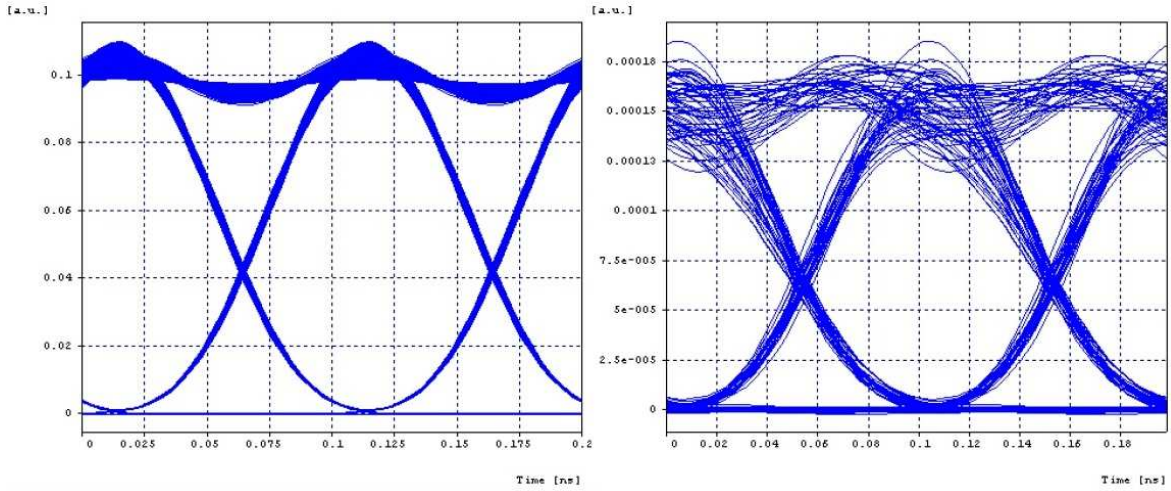


Obrázek 35 – Graf spektra elektrického signálu

Výsledné elektrické spektrum za lavinovou fotodiodou na konci trasy má velmi slabý signál a projevují se zde rušivé složky signálu. Rozsah spektra je 50 GHz kolem frekvence 193 THz.

Diagram oka na elektrickém signálu

Diagram oka je jedním z nejdůležitějších parametrů při vyhodnocování kvality přenosu dat. Základní parametry, které se u diagramu určují je otevření oka a šířka oka. Z diagramu oka je možné vyhodnotit rušivé vlivy, jako je mezisymbolová interference, jitter, proměnná rychlost šíření signálu kanálem a fluktuační šum superponovaný na signál.



Obrázek 36 – Porovnání diagramů oka, na trase dlouhé 4 km (vlevo) a 100 km (vpravo)

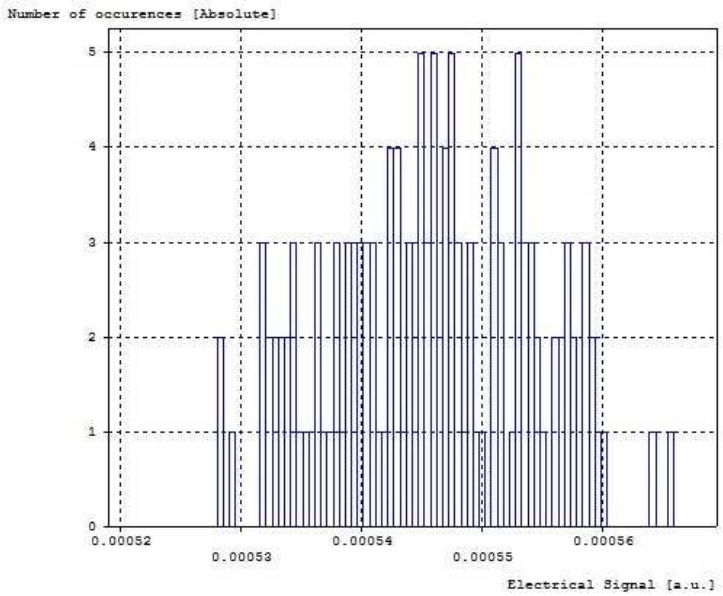
Tabulka 8 – Výsledné hodnoty z diagramu oka

Sampling time (ns)	0,025
Q value (dB)	6,0206
BER	0,02275
Eye opening	1,21E–07
Average opening	9,94E–06
closure (dB)	17,743
jitter (ns)	0,017793

Z diagramu oka byl zjištěn čas vzorkování, mezisymbolová interference, bitová chybovost, jitter – posunutí signálu vůči taktu, otevření a uzavření oka. Důvodem uvedení diagramu na délce optické trasy je projevování disperze, která se na optické trase dlouhé 4 km, téměř neprojevuje.

Histogram na diagramu oka

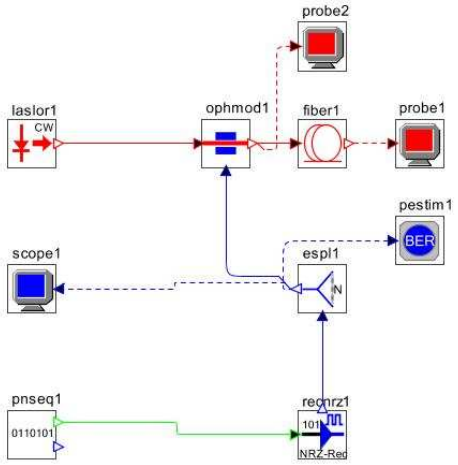
Histogram je sloupcový graf, kde výška sloupce udává vyjádření počtu vyskytujících se hodnot. Uvedený graf udává až na běžné odchylky normální rozdělení hodnot a tím i kvalitní datový přenos.



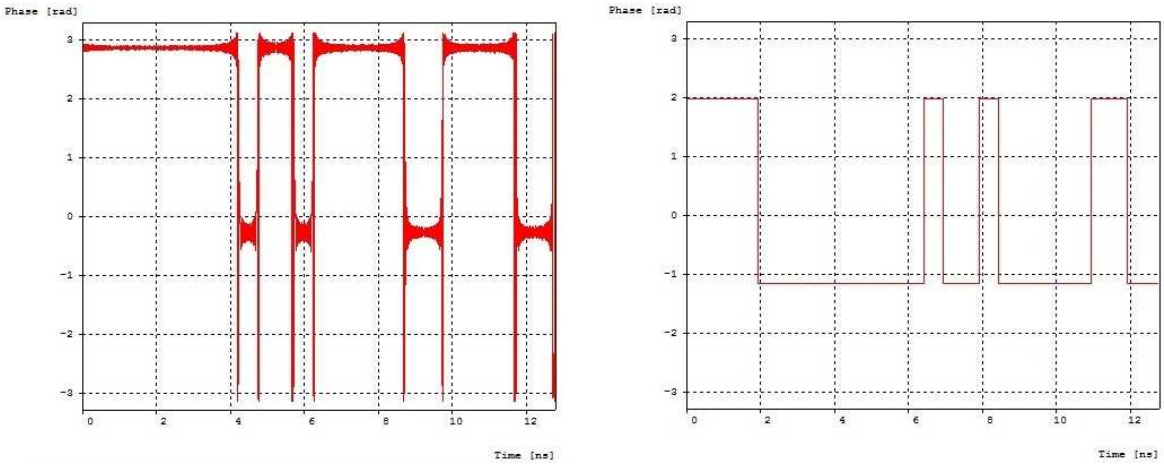
Obrázek 37 – Histogram na diagramu oka

Simulace vlivu PMD při modulaci BPSK

Na Obrázku 38 je vidět blokové schéma modulace BPSK. Při vlivu polarizační vidové disperze se mohou vyskytovat chyby v přenosu. V simulaci byla možnost nastavení disperze na nulu. Po potlačení polarizační vidové disperze je vidět pouze signál BPSK bez rušivých vlivů, který už je z hlediska vyhodnocování mnohem lepší.



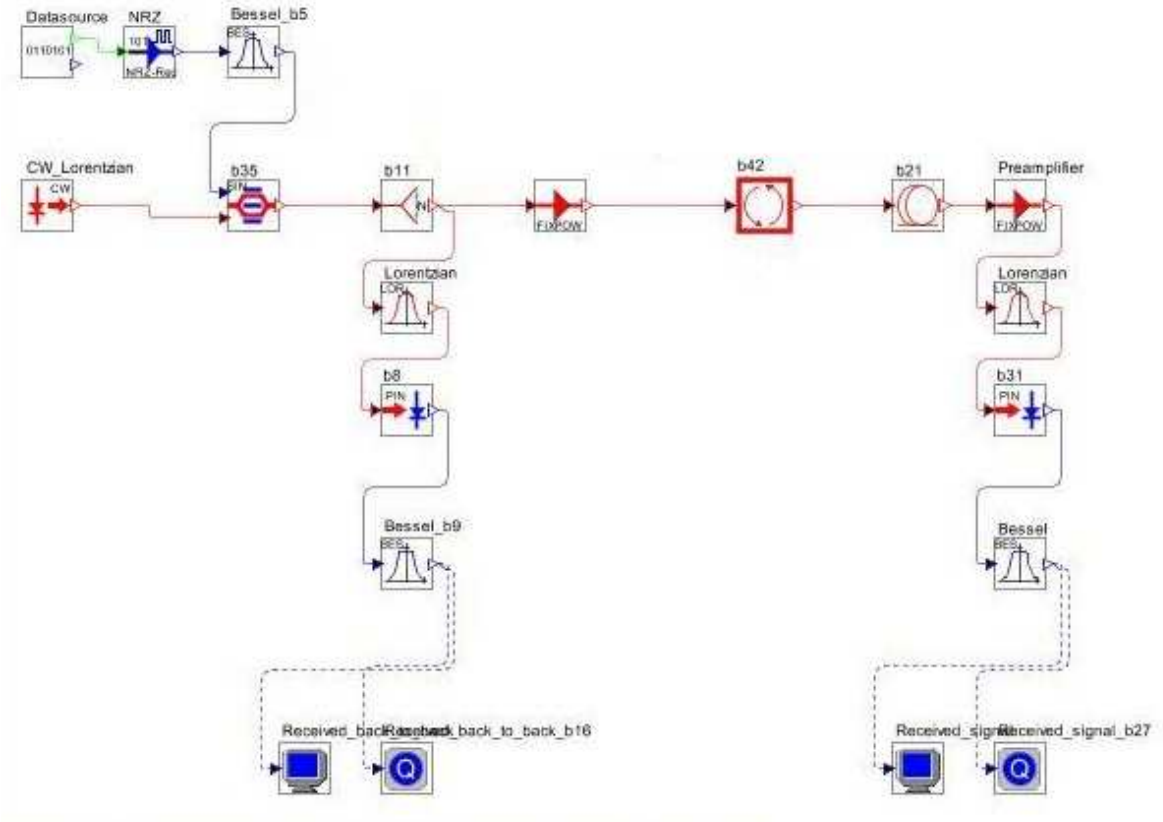
Obrázek 38 – Blokové schéma BPSK



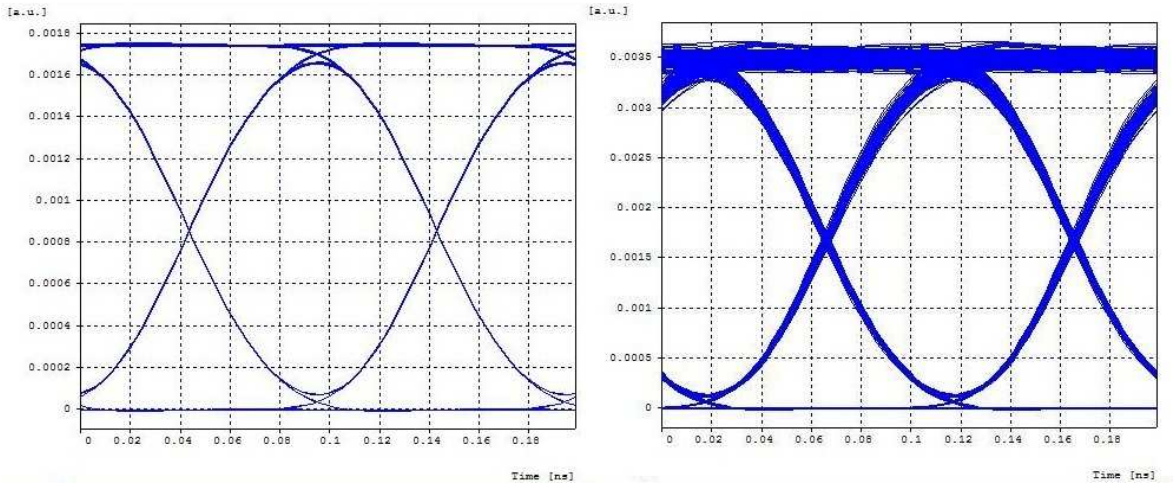
Obrázek 39 – Porovnání signálu BPSK s disperzí (vlevo) a bez disperze (vpravo)

Kompenzace optima disperze

Na Obrázku 40 je znázorněno schéma pro optimalizaci kompenzace disperze. Systém pracuje na jednom kanálu, s přenosovou rychlostí 10 Gb/s a NRZ kódem. Přenos probíhá přes 8 zesílených vidů po vlákně 60 km. Rozptyl je před přijímačem kompenzován potlačením odchylky disperze vlákna v rozsahu D = 16 ps/nm/km. Výsledkem je porovnání dvou diagramů oka.



Obrázek 40 – Blokové schéma kompenzace optima disperze



Obrázek 41 – Porovnání diagramů oka na začátku trasy (vlevo) a na konci trasy (vpravo)

5 Závěr

Tato práce je celistvým souhrnem teoretickým poznatků a praktických měření pomocí OTDR doplněných o simulace na optické trase v programu OptSim. U praktického měření jsou uvedeny příčiny, které mají vliv na útlum a reflexe na rozhraní dvou konektorů. U optických simulací byly uvedeny parametry datového přenosu.

Při měření metodou OTDR byly uvedeny grafy závislosti útlumu na délce vlákna pro druhé, třetí a páté okno vlnového přenosu. Měření proběhlo při délce impulzů 10 ns a 30 ns. Tato délka pulzů je pro měření na délce trasy 4 km nejoptimálnější a měření tedy bylo přesné. Měření bylo mírně ovlivněno absencí předřadného vlákna o délce 500 m. Při delších pulzech by se projevila nepřesnost na svarech a konektorech, které by se mohly jevit několik stovek metrů dlouhé. Útlum optické trasy byl na druhém a třetím okně okolo 3 dB a na pátém okně přibližně 5 dB. Pro měření je nutno zajistit, aby se do svarů a mezi konektory nedostávaly žádné nečistoty, protože může dojít k mnohonásobnému zvětšení útlumu nebo se dokonce může přerušit optická trasa. Dalším problém jsou mikroohyby a makroohyby které mají vliv jak na nepřesnost měření, tak na samotný datový přenos. Pro reálný datový přenos je tedy nutno zajistit celistvou trasu s nejmenším počtem sváru a konektorů, aby se zajistil co nejkvalitnější přenos.

Byly popsány výsledky optických simulací. Výsledky Okamžité frekvenční a fázové odchylky jsou spíše demonstrací možností programu OptSim a nemají na simulaci samotné reálné optické trasy v délce 4 km vliv z hlediska útlumu nebo přenosu dat. Z časového průběhu signálu byl zjištěn útlum 2 dB na vlnové délce 1550 nm. Jednovidové vlákno však bylo ideální bez jakýchkoli nečistot a ohybů, které mohou být přítomny na reálné trase. Útlum konektorů byl vole na 0,05 dB, což byl odhad při tavném svařování. Proto se výsledky útlumu z reálného měření a ze simulace nedají přímo porovnat. Výsledky simulace nám mohou sloužit spíše informativně pro reálné vlákno bez příčin omezujících útlum. Nejdůležitějším výsledkem simulace je diagram oka, který nám udává parametrydigitálního přenosu dat. Byl uveden diagram oka na 4 km dlouhé optické trase a 100 km dlouhé trase. Na 100 km dlouhé trase je vidět v horní části vliv disperze. V současnosti je největší problém disperze polarizační vidová (PMD), protože se neustále zvyšuje přenosová rychlost. Se vzrůstající přenosovou rychlostí tedy rostou nároky na kompenzaci disperze. V simulacích je také uvedena jedna z možností měření disperze.

Na základě těchto předpokladů je nutno zajistit podmínky pro kvalitní měření, aby se mohly odhalit a případně kompenzovat nebo odstranit příčiny, které mají vliv na útlum a datový přenos a tím zajistit nejkvalitnější přenos dat.

Literatura

[1] SALEH, Bahaa; TEICH, Malvin. Základy fotoniky. první vydání. Praha: Matfyzpress, 1994. 260 s. ISBN 80–85863–01–4.

[2] DUTTA, Achyut; DUTTA, NIloy; FUJIWARA, Masahiko. WDM technologies : Opticalnetworks. tretí vydání . [s.l.] : ElsevierAcademicpress, 2004. 336 s. ISBN 0–12–225263–2.

[3] BAILEY, David ; WRIGHT, Edwin . PracticalFiberOptics. první vydání. Velká Británie: ElsevierAcademicpress, 2003. 260 s. ISBN 0750658002.

[4] FILKA, Miroslav. *Optoelektronika*: *pro telekomunikace a informatiku*. první vydání. Vídeňská 113, Brno: Litozeman, 2009. ISBN 978–80–86785–14–1.

[5] AMBROŠ, Jan. *Měření optických přenosových tras*. Brno, 2.6.2009. Bakalářská práce. VUT Brno. Vedoucí práce Miroslav Filka.

[6] STUBUREK, Martin. *Distribuce analogového signálu optickým vláknem*. Brno, 2.6.2010. Bakalářská práce. VUT Brno. Vedoucí práce Ing. Jan Šporik.

[7] JEŽEK, Jaroslav. *Přenosové parametry optických přístupových sítí*. Brno, 2.6.2008. Bakalářská práce. VUT Brno. Vedoucí práce Ing. Dušan Havelka.

[8] JAROŠ, Pavel. *Optické spoje a vliv na přenos*. Brno, 2.6.2008. Bakalářská práce. VUT Brno. Vedoucí práce Ing. Vladimír Tejkal.

[9] MITRIČ, Martin. *Polymerová optická vlákna*. Brno, 2.6.2011. Bakalářská práce. VUT Brno. Vedoucí práce Prof. Ing. Miroslav Filka, Csc.

[10] BURČÍK, Jaroslav. *Optické komunikace*. 2006, 30 s. Dostupné z: www.comtel.cz/files/download.php?id=1935

[11] *Laserová dioda* [online]. 14. 2. 2012 [cit. 2012–04–08]. Dostupné z: http://cs.wikipedia.org/wiki/Laserov%C3%A1_dioda

[12] BEZOUŠEK, Pavel. *Elektronické součástky*.

[13] TEJKAL, Vladimír. *Návrh optické přístupové sítě FTTx*: *FTTx network design*. Brno: Vysoké učení technické, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2009. Diplomová práce. VUT Brno. Vedoucí práce Ing. PAVEL REICHERT.