VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV TELEKOMUNIKACÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF TELECOMMUNICATIONS

METODY ŘEŠENÍ VLIVU OPTICKÉ DISPERZE NA STÁVAJÍCÍCH OPTICKÝCH SÍTÍCH

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE Bc. DUŠAN ČERVENKA
AUTHOR

BRNO 2011

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

ÚSTAV TELEKOMUNIKACÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

DEPARTMENT OF TELECOMMUNICATIONS

METODY ŘEŠENÍ VLIVU OPTICKÉ DISPERZE NA STÁVAJÍCÍCH OPTICKÝCH SÍTÍCH

THE METHODS OF OPTICAL DISPERSION COMPENSATION ON CURRENT TRACES

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE Bc. DUŠAN ČERVENKA

AUTHOR

VEDOUCÍ PRÁCE Ing. PAVEL REICHERT

SUPERVISOR

BRNO 2011

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií

Ústav telekomunikací

Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor
Telekomunikační a informační technika

Student:	Bc. Dušan Červenka	***ID:***	78604
Ročník:	2	***Akademický rok:***	2010/2011

NÁZEV TÉMATU:

Metody řešení vlivu optické disperze na stávajících optických sítích

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Proveďte analýzu současných diagnostických metod optických tras, se zaměřením na vliv optické disperze. Zvažte výhody a nevýhody jednotlivých metod a porovnejte je. Dále proveďte analýzu současných kompenzačních metod optické disperze vyhodnoťte nejvhodnější způsob kompenzace optické disperze. Dále navrhněte odpovídající simulační model a porovnejte výsledky. Závěrem navrhněte vhodnou kompenzaci optické disperze konkrétní trasy.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] Hájek, M., Holomeček, P. Měření chromatické a polarizační vidové disperze jednovidových optických tras, CABLEX, České Budějovice 2002
[2] Kyselák, M. Způsoby řešení polarizační vidové disperze u stávajících optických tras, Optické komunikace 2006. Praha: Agentura Action M, 2006. s. 85-174. ISBN: 80-86742-16-4.
[3] Galtarossa A., Menyuk C.R.: Polarization Mode Dispersion, Springer, Padova, ISBN 0-387-23193-5

Termín zadání:	7.2.2011	***Termín odevzdání:***	26.5.2011

Vedoucí práce: Ing. Pavel Reichert

prof. Ing. Kamil Vrba, CSc.
Předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové 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 části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

Klíčová slova

Měření optických disperzí, Simulace a kompenzace optických disperzí, Chromatická disperze, polarizační vidová disperze, PMD

Klíčová slova – anglicky

Optic dispersion measurement,Simulate and compensation optic dispersion, chromatic dispersion, polarization mode dispersion, PMD

Abstrakt

Tato práce pojednává o problému optických disperzí na stávajících trasách. V úvodu rozebírá jednotlivé vlastnosti a vliv chromatické a polarizační vidové disperze PMD, jednotlivé měřící metody těchto disperzí a jejich kompenzací. V závěru práce je nastíněna analýza výsledků měření stávající sítě a návrhy na kompenzaci a simulace stávajících optických tras a vyhodnocení výsledků

Abstrakt – anglicky

Polarization mode dispersion, PMD influence of fibres. Next includes optic dispersion measurement and compensation of optics dispersion follows. In the end thesis analyze measure of existing fibres, simulating and suggest optimal solutions.

Bibliografická citace

ČERVENKA, D. *Metody řešení vlivu optické disperze na stávajících optických sítích.* Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2011. 61 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Pavel Reichert.

Prohlášení

Prohlašuji, že svoji diplomovou práci na téma Metody řešení vlivu optické disperze na stávajících optických sítích jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové 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 diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této diplomové 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 26. května 2011 .....

podpis autora

Poděkování

Děkuji vedoucímu práce Ing. Pavlu Reichertovi za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé diplomové práce.

V Brně dne 26. května 2011 .....

podpis autora

Obsah

Obsah ..... - 1 -
Úvod ..... - 3 -
1. Jevy a vlastnosti optických vláken ..... - 4 -
1.1. Lineární jevy ..... - 4 -
1.1.1. Útlum optického vlákna ..... - 4 -
1.1.2. Vlastní absorpce ..... - 5 -
1.1.3. Nevlastní absorpce ..... - 5 -
1.1.4. Geometrické a materiálové nehomogenity ..... - 5 -
1.1.5. Materiálový rozptyl ..... - 6 -
1.1.6. Comptonův rozptyl ..... - 6 -
1.1.7. Rayleighův rozptyl ..... - 6 -
1.1.8. Mieův rozptyl ..... - 6 -
1.1.9. Stokesův rozptyl ..... - 6 -
1.1.10. Difuzní odraz ..... - 6 -
1.1.11. Makroohybové ztráty ..... - 7 -
1.1.13. Mikroohybové ztráty ..... - 7 -
1.1.13. Fresnelův odraz ..... - 7 -
1.1.14. Rozdílné průměry jader a plášťů ..... - 7 -
1.1.14. Rozdílná numerická apertura - NA ..... - 7 -
1.1.15. Ztráty souosostí vláken ..... - 8 -
1.1.16. Nerovnost ploch ..... - 8 -
1.1.17. Znečištění ..... - 8 -
1.2. Nelineární jevy ..... - 9 -
1.2.1. Stymulovaný rozptyl ..... - 9 -
1.2.1. Brillouinův rozptyl ..... - 9 -
1.2.2. Ramanův rozptyl ..... - 9 -
1.2.3. Vlastní fázová modulace ..... - 9 -
1.2.4. Křížová fázová modulace ..... - 10 -
1.2.4. Čtyřvlnné směšování ..... - 10 -
1.3. Disperze ..... - 10 -
1.3.1. Vidová disperze ..... - 10 -
1.3.2. Materiálová disperze D_{MAT} ..... - 11 -
1.3.3. Vlnovodná disperze D_{WG} ..... - 11 -
1.3.3 Profilová disperze D_P ..... - 11 -
1.3.4. Chromatická disperze D_{CH} ..... - 11 -
1.3.5. Polarizační vidová disperze ..... - 12 -
2. Měření optických disperzí ..... - 13 -
2.1. Měření chromatické disperze ..... - 13 -
2.1.1 Měření chrom. disperze metodou fáz. posuvu a dif. fáz. posuvu ..... - 14 -
2.1.2 Měření chrom. disperze metodou zpoždění impulsů v čas. oblasti ..... - 15 -
2.1.3 Měření chromatické disperze interferometrickou metodou ..... - 16 -
2.2. Měření polarizační vidové disperze - PMD ..... - 16 -
2.2.1 Měření polarizační vidové disperze metodou interferometrickou ..... - 16 -
2.2.2 Měření polarizační vidové disperze metodou skenování vlnové délky . - 17 -
2.2.3 Měření polarizační vidové disperze metodou polarimetrickou ..... - 17 -
3. Kompenzace disperzí ..... - 18 -

3.1. Kompenzace chromatické disperze ..... - 18 -
3.1.1 Čerpovaná Braggova mřížka ..... - 18 -
3.2. Kompenzace polarizační vidové disperze - PMD ..... - 19 -
3.2.1 Rozdělení trasy na menší úseky s opakovači ..... - 19 -
3.2.2 Použití vlnového multiplexu pro rozložení přenosové kapacity ..... - 19 -
3.2.3 Použití jiné vlnové délky. ..... - 19 -
3.2.4 Použití jiného vlákna optického kabelu. ..... - 19 -
3.2.4 Výměna celé optické trasy ..... - 20 -
3.2.5 Výměna úseku vlákna. ..... - 20 -
3.2.5 Kompenzace PMD ..... - 20 -
3.2.6 Změna přenosové technologie ..... - 20 -
4. Analýza stávající sítě ..... - 21 -
4.1. Úvod ..... - 21 -
4.2. Historie sítě MU ..... - 22 -
4.2. Analýza optického kabelu SM 48f Botanická 68a - Rektorát MU ..... - 27 -
4.3. Analýza OK SM 48f Mas. onk. ústav Žlutý kopec – VŠ koleje nám. Míru .. - 29 -
4.4. Analýza optického kabelu SM 36f ..... - 32 -
Lipová ESF MU - Poříčí PdF MU ..... - 32 -
5. Simulace optické trasy ..... - 34 -
5.1. Úvod ..... - 34 -
5.1. Komponenty pro simulaci ..... - 34 -
5.1. Stanovení maximální délky optických vláken bez kompenzace ..... - 35 -
5.2. Výběr a stanovení konkrétní trasy ..... - 38 -
5.3. Simulace optické trasy Brno - Olomouc ..... - 39 -
5.3.1. Kompenzace optické trasy za pomocí DCF vlákna ..... - 39 -
5.3.1. Kompenzace optické trasy za pomocí čerpované Braggovy mřížky .... - 43 -
Závěr ..... - 47 -
Příloha 1.1 ..... - 49 -
Příloha 1.2 ..... - 50 -
Příloha 1.3 ..... - 51 -
Příloha 2.1 ..... - 52 -
Příloha 2.2 ..... - 53 -
Příloha 2.3 ..... - 54 -
Příloha 3.1 ..... - 55 -
Příloha 3.2 ..... - 56 -
Příloha 3.3 ..... - 57 -
Příloha 4 ..... - 58 -
Obsah CD: ..... - 58 -
Seznam obrázků ..... - 59 -
Seznam tabulek ..... - 59 -
LITERATURA ..... - 60 -

Úvod

Celou problematiku jsem rozdělil do 5 částí. První pojednává o problematice optických vláken a její vlastností a negativních jevů, které se mohou vyskytovat při šíření záření. Snaží se o ucelené a přehledné shrnutí problematiky, tak aby čtenář měl dobrý přehled o všech základních důležitých aspektů optických vláken. Druhá část se zabývá problematikou měření optických disperzí, jaké nástrahy zde mohou číhat a snažil jsem se o základní výčet používaných metod pro měření kabelových optických tras s ohledem i na praktičnost. Třetí část se věnuje možnostem kompenzace optických disperzí. Snažil jsem se shrnout nejpoužívanější. Každou metodu kompenzace jsem zhodnotil a objektivně posoudil možné klady a zápory s vlivem i na ekonomické hledisko. Čtvrtá část se věnuje analýze stávajících optických tras, snaží se nalézt jednotlivé chyby na trase z dostupných údajů a navrhnout řešení s výhledem budoucího využívání optických tras pro vysokorychlostní přenosy. Poslední část diplomové práce je zaměřena na simulace stávajících optických tras a kompenzace optických disperzí pro použití vysokorychlostních přenosů. V závěru jsem zhodnotil dosažené výsledky navrhl finální variantu nejhodnější jak z pohledu kompenzací, tak i ceny a dalších kritérií důležitých pro aplikaci v praxi.

1. Jevy a vlastnosti optických vláken

Abych mohl provést analýzu současné optické trasy, je důležité nastínit jednotlivé vlastnosti a úskalí vlastností optických vláken a jaký vliv mají na přenášený signál. Jednotlivé jevy jsou rozděleny na jevy lineární a nelineární. Lineární jevy obsahují útlum vláken, jednotlivé druhy disperzí i problematiku šumu. V dnešní době velice oblíbené se stávají nelineární jevy, jejichž dopad je patrný zvláště při vysokých přenosových rychlostech, tzn. při navázání velmi vysokého výkonu vysílače do optického vlákna. V této kapitole jsou zde popsány možné příčiny těchto jevů a pokud lze prakticky tyto negativní jevy kompenzovat, je zde popsána i jejich kompenzace.

1.1. Lineární jevy

1.1.1. Útlum optického vlákna

Stejně jako u metalických vedení, také v optickém vláknu dochází ke snižování výkonu zdroje vlivem zvětšující se vzdálenosti. Útlum optického vlákna je udávám v dB/km a jeho definice je stejně jak u metalického vedení poměr výstupního světelného výkonu P_2 a vstupního světelného výkonu P_1, avšak pro danou vlnovou délku λ.

$$A = 10\log\frac{P_2}{P_1} \quad [\mathrm{dB}]. \tag{1}$$

Útlum je celkovým měřítkem ztrát optické energie ve vlákně. Závisí na absorpci a rozptylu v jádře i plášti optického vlákna a je vidově závislý. Vyšší vid má větší útlum, a pr oto má také jednovidové vlákno (SM) nižší útlum než vlákno mnohavidové (MM). Ztráty vznikají také náhodnými fluktuacemi příčných rozměrů vlákna, jeho mechanickým nebo tepelným namáháním [6]. Měrný útlum vlákna α představuje útlum na 1 km délky. Získáme jej ze vztahu (1) podělíme-li jej délkou vlákna L.

$$\alpha = \frac{A}{L} \quad [\mathrm{dB/km}]. \tag{2}$$

Ztráty lze rozdělit i podle místa kde vznikly. Útlum proto dále dělíme na vnější a vnitřní. Vnitřní ztráty tvoří hlavně materiálové absorpce (ta se dále dělí na vlastní a nevlastní) a materiálový rozptyl. Hlavní typy materiálového rozptylu jsou Mieův, Stokesův, Comptonův a Rayleighův. Vnější útlum je důsledek pohlcení energie na povrchu, kde se nacházejí nečistoty. Jedná se o difuzní odraz, ztráty makro- či mikroohyby, geometrické nehomogenity či materiálové nehomogenity. Dále jsem patří vazební ztráty, které dělíme také na vlastní a nevlastní. Vlastní vazební ztráty tvoří rozdílné průměry jader a pláště či jiné profilové parametry, Fresnelův odraz, rozdílná NA - numerická apertura a Fresnelův odraz. Nevlastní vazební ztráty

vnímáme jako nerovnosti ploch, znečištěni či nesouosost vláken. Předmětem práce je vliv optické disperze a její kompenzace, proto se dále nebudeme zaobírat útlumem a problému s ním vznikajícím.

1.1.2. Vlastní absorpce

Vlastní absorpce spočívá v pohlcení části optického záření vlastními molekulami materiálu optického vlákna [10]. Křemenný materiál vykazuje absorpční maxima jak v ultrafialové (UV), tak i v infračervené (IR) oblasti, tedy dvě dominantní absorpční pásma. V současné době jsou provozovány systémy v okolí tří vlnových délek 850, 1310, 1550, 1625nm tzv. okna. Tyto absorpce jsou velmi malé. Absorpční pás v UV oblasti spektra odpovídá elektronovým a elektronově-vibračním přechodům. S vlnovou délkou klesá a z technologického hlediska je to zatím neodstranitelný problém. V IR oblasti pak jde o kmitání (vibrace) celých molekul skla, přičemž roste se zvětšující se vlnovou délkou. Omezuje tak použití optických vláken pro vlnové délky nad 1700nm. Hodnotu absorpce lze částečně ovlivnit, a pokud jsou molekulové útvary těžší, světlo jej nedokáže rozkmitat. Toho je využito k posunutí IR absorpce k nižším vlnovým délkám a k dosažení nízké absorpce.[1]

1.1.3. Nevlastní absorpce

Naprosté čistoty křemenného skla nelze prakticky dosáhnout, proto bude světlovod zpravidla více či méně znečištěn, které do vlákna pronikly při jeho výrobě a taktéž v důsledku špatně provedené vnější ochrany. Nevlastní absorpce je tak způsobena nečistotami, příp. dopanty přítomnými v optickém materiálu. Jde především o ionty kovů Fe, Cu, Cr a zejména radikálů OH^-.[6]. Koncentrace iontů v obsahu SiO_2 musí být snížena na hodnotu 10^{-9}, aby se dosáhlo výkonového útlumu pod 1 dB/km. V křemenných vláknech je minimum útlumu absorpcí a rozptylem situováno v oblasti 1,5 µm, kde jsou nejen menší ztráty Rayleighovým rozptylem, ale rovněž zde leží i minimum materiálové disperze. Největší nevlastní absorpci má na svědomí zbytková vlhkost, která byla ve vláknu ponechána v průběhu výrobního procesu ve formě iontů OH^-, které ovlivňují na určitých vlnových délkách útlum vlákna. Čistota křemenného skla z hlediska iontů OH^- je tedy neobyčejně důležitá. Proto jsou vyráběna vlákna s velkým nebo malým obsahem OH^-(ultra low, low, high a ultra high OH^-). V současné době je trend vyrábět vlákna s nízkým obsahem OH^-, která jsou označována LWP (Low Water Peak). Tato vlákna mají špičku OH^- absorpce téměř neznatelnou a postupně se velmi prosazují.[1]

1.1.4. Geometrické a materiálové nehomogenity

Tyto ztráty vznikají důsledkem deformací povrchu styku jádra a pláště optického vlákna, kruhového tvaru či eliptičnost jádra. Jakékoli porušení dokonalé symetrie a geometrie jádra a pláště se projeví ztrátami. Mezi materiálové ztráty řadíme poruchy v materiálu vlivem nečistot, bublinek, trhlin v materiálu. T\to všechny ztráty jsou obsaženy v údaji celkového útlumu vlákna a lze je omezit zdokonalením výroby optických vláken

1.1.5. Materiálový rozptyl

Při výrobě optických vláken a zvláštně při tuhnutí skleněného vlákna vzniká materiálový rozptyl, který je způsoben nehomogenitou (náhodným rozložením) molekul což způsobuje různé indexy lomu ve vlákně a po dopadu na tuto nehomogenitu dochází k všesměrového lomu (rozptylu) a paprsek je rozštěpen do stran. To má za následek ztráty části výkonu V pásmu vlnových délek využívaných ve sdělování je typický silný pokles rozptylu s růstem vlnové délky, neboť amplituda rozptýleného pole je funkcí λ^{-2} a intenzita rozptýleného pole je funkcí λ^{-4}. Je tedy žádoucí pracovat na co nejdelší vlnové délce.[1] Velikost útlumu je závislý na použitém materiálu při výrobě a výrobního postupu skleněného vlákna.

1.1.6. Comptonův rozptyl

Comptonův rozptyl vychází ze změny frekvence fotonů při jejich pružných srážkách s elektrony v obalu atomů.[1]

1.1.7. Rayleighův rozptyl

Jedná se významný jev pro používané vlnové délky v praxi. Vzniká v důsledku malých náhodných změn jako tepelné kmitání krystalické mřížky.Rayleighův rozptyl je přímo úměrný osmé mocnině indexu lomu a klesá se čtvrtou mocninou vlnové délky.Tento jev se nedá odstranit.[1] Při vyšších vlnových délkách je jeho vliv menší, a proto ho lze omezit pouze změnou vlnové délky.

1.1.8. Mieův rozptyl

Pokud jsou ve vlákně nehomogenity, které jsou svojí délkou srovnatelné s vlnovou délkou záření v optickém vlákně, vznikne Mieův rozptyl. Ten se ještě významně zvyšuje, pokud tyto nehomogenity překračují desetinu vlnové délky světla. Mieův rozptyl lze omezit zdokonalením výrobních procesů optických vláken.

1.1.9. Stokesův rozptyl

Interakcí fotonů v krystalech materiálu je důsledkem stokesova rozptylu. Jeho velikost určuje minimální velikost útlumu pro daný základní materiál. Stokesův a Comptonův rozptyl je fyzická vlastnost materiálu, proto je nelze odstranit.

1.1.10. Difuzní odraz

V oblasti lomu nebo odrazu optického záření může vzniknout na vadách materiálu či nehomogenitách difúzní odraz. Velikost difuze závisí na množství těchto bodových poruch přímo v místě dopadu paprsku. To vyvolá všesměrový odraz paprsku.

1.1.11. Makroohybové ztráty

Makroohyby jsou v praxi velice běžné. Vznikají v důsledku ohybu vlákna pod určitou dovolenou hranici poloměru ohybu, kdy část energie záření se vyváže z vlákna ven a dojde k částečnému vyzáření do okolí. S vyšší vlnovou délkou roste útlum způsobený těmito ohyby. Snížení útlumu lze dosáhnout změnou provozních vlnových délek na nižší či použití optického vlákna s velkou hodnotou relativní změny indexu lomu.

1.1.13. Mikroohybové ztráty

Mikroohyby jsou poruchy přímočarosti osy vlákna. Malé chyby v geometrii vlákna způsobují tzv. mikroohybové ztráty, které mohou vést k přelévání energie mezi sousedními vidy. Vznikají jak při výrobě, tak působením vnějších sil, které deformují plášť kabelu, ale způsobují pouze malý ohyb vlákna. Na mikroohybech jsou některé vidy odráženy pod velkým úhlem, unikají mimo jádro optického vlákna a mohou tak podstatně ovlivnit útlum vlákna [11]. Závisí na vlnové délce a se zvětšující se vlnovou délkou jsou ztráty větší. Počítají se velmi těžko, určují se experimentálně. Snížení ztrát se docílí vhodným návrhem optického kabelu, který musí odpovídajícím způsobem chránit vlákno před vnějším namáháním, nepravidelným tlakem a podmínkami okolí. Proces nanášení vnějších ochran vlákna musí být řádně kontrolován. Je nutné dodržovat pokyny výrobce a vlákno ohýbat s co největším poloměrem.[1]

1.1.13. Fresnelův odraz

Vzniká na začátku nebo konci optického vlákna, kdy optické záření při navázání od světelného zdroje do optického vlákna se odrazí od kolmé hrany jádra optického vlákna a vrací se zpět ke světelnému zdroji, obdobně to platí i na konci světlovodu.

1.1.14. Rozdílné průměry jader a plášťů

Při spojení dvou vláken, které mají rozdílné průměry jader, se části paprsku naváže do pláště druhého vlákna, dojde k odrazu či rozptylu a důsledkem toho ke ztrátě energie paprsku.

1.1.14. Rozdílná numerická apertura - NA

Spolu s průměrem jádra se veličina NA podílí na účinnosti vazby záření do jádra a má také souvislost s útlumem. Je-li numerická apertura přijímacího vlákna menší než numerická apertura zdrojového vlákna, nebude se část přijímaného světla vláknem šířit a vzniknou ztráty. Je zřejmé, že vazební účinnost světla do vláknového vlnovodu poroste s růstem průměru jádra a s růstem akceptačního úhlu. Ztráty způsobené rozdílností NA se snadno spočítají viz [11].

1.1.15. Ztráty souosostí vláken

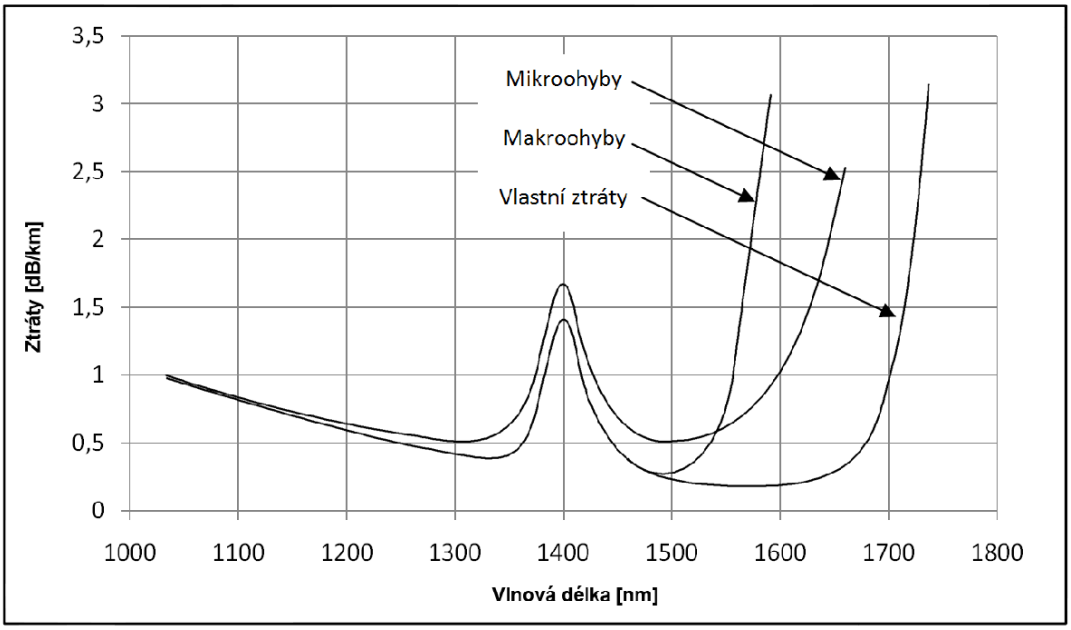
Jedná se o ztráty způsobené nepřesností spojování vláken, přičemž dochází k posunutí os vláken a část paprsků není navázána do jádra navazujícího vlákna. Z toho vyplývá nutnost vysoké přesnosti při spojování vláken. Jedná se o laterální nezarovnání vláken (posuv v ose x či y), separace v ose z (podélné nezarovnání vláken) a úhlové vyosení (úhel mezi osami jader vlákna).[1]

1.1.16. Nerovnost ploch

Při spojování vláken i na konci vlákna je důležité mít rovnou plochu svírající 90° úhel s osou jádra, jinak dojde ke ztrátám vlivem této odchylky os.

1.1.17. Znečištění

Přítomnost cizích znečišťujících látek ve spojení dvou vláken vede ke ztrátám lomem, odrazem, absorpcí a vlivem překážek pro šíření světla. Ve všech případech tedy velikost numerické apertury a plochy jádra přímo ovlivňuje vazební účinnost a celkový navázaný výkon. Nejmarkantnější je tato situace u jednovidových vláken, kde je průměr jádra srovnatelný s délkou vlny záření λ.[1] V takovém vláknu, které se současně vyznačuje nízkým útlumem i extrémně velkou šířkou pásma, lze dosáhnout jen velmi nízké vazební účinnosti. Zmíněné nevýhody odstraňuje vláknový optický vlnovod typu W s třívrstvou konstrukcí, v níž je mezi jádro a plášť vložena tenká nízkoindexová vrstva, která za určitých okolností může mít zápornou vlnovodovou disperzi [11]. Tím je možné dále vykompenzovat kladnou materiálovou disperzi ve velkém rozmezí vlnových délek. Lze tak dosáhnout šířky přenášeného pásma až 400 GHz/km i s např. luminiscenční diodou.[1]



Obr. 1: Graf ztrát způsobené ohybem [1]

1.2. Nelineární jevy

Vznik nelineárních jevů je podmíněn velkými hustotami světelného výkonu ve vlákně. Pokud máme systém pracující s několika desítkami kanálů, tak výkon všech laserů (světelných zdrojů) se musí sečíst.

1.2.1. Stymulovaný rozptyl

Jedná se o nelineární fyzikální jev, při němž dochází k rozptylu světelné vlny srážkami s akusticky nebo tepelně kmitajícími atomy vlákna. Při rozptylu dochází i k mírnému posuvu vlnových délek směrem k vyšším hodnotám.[7]

1.2.1. Brillouinův rozptyl

Brillouinův rozptyl je vyvolán interakcemi monochromatického světla s akustickými vlnami ve světlovodu (generuje se akustický foton), přičemž dochází k frekvenčnímu posuvu ve zpětném směru. Je v podstatě vyvolán podélnou akustickou vlnou vzniklou elektrostrikcí a rozptýlená vlna je spektrálně posunuta o cca 10 GHz. Nad určitou prahovou hodnotou světelného výkonu v médiu může stimulovaný rozptyl. [7] Je zvláště významný pro signály s úzkou šířkou čáry, a proto je tento jev možné účinně potlačit rozšířením spektra signálu. Velikost závisí na úhlu rozptylu,maximum energie je rozptýleno ve zpětném směru.[1]

1.2.2. Ramanův rozptyl

Podstatou je vzájemná interakce světla šířícího se v určitém prostředí s tímto prostředím, jejímž důsledkem je frekvenční posuv. Rozptýlená světelná vlna se šíří oběma směry. Kritický výkon závisí opět na materiálu a dále na počtu, středním výkonu a vzájemném odstupu optických kanálů.[7] Tento jev lze do jisté míry potlačit vhodným návrhem vlákna, např. zvětšením průměru jádra. Pro jisté aplikace však může být Ramanův rozptyl žádoucí a dobře využitelný. Stimulovaného Ramanova jevu lze využít jako zesilujícího prvku v prostředí jednovidových vláken na bázi SiO2.[1]

1.2.3. Vlastní fázová modulace

Je důležitým jevem u optických systémů, ve kterých bývají použity velmi rátké a intenzivní pulsy světla, jako jsou lasery a přenosové systémy vybudované na optických vláknech. Přichází-li laserové záření s velkou intenzitou, může být tento signál modulován svojí vlastní fází v závislosti na koeficientu chromatické disperze.
Vlivem SPM pak ve WDM systémech dochází k vzájemné interferenci mezi přenosovými kanály [12].

1.2.4. Křížová fázová modulace

je principiálně podobným jevem jako vlastní fázová modulace, avšak za podmínek, kdy signál jedné vlnové délky fázově moduluje signál vlnové délky jiné. Dochází proto k němu jen u vícekanálových optických systémů.

1.2.4. Čtyřvlnné směšování

Je nelineární jev, při němž interakcí signálů dvou a více vlnových délek vznikají signály nových vlnových délek. Je to obdobný efekt z elektrotechniky, kdy při modulaci vznikají intermodulační produkty [7].

1.3. Disperze

Disperze vln v optických vláknech je hlavní příčinou zkreslení přenášeného signálu a definuje se jako rozdíl šířky impulsu v polovině výšky na konci a na začátku vlákna. Kmitočtová závislost indexu lomu, která vyvolá kmitočtovou závislost skupinové a fázové rychlosti šíření vlny v materiálu, z něhož je světlovod vyroben, je příčinou materiálové disperze. Ve světlovodu se materiálová disperze vidu kombinuje s disperzí vlnovodovou, způsobenou změnami geometrie vidu a tím i změnami podélné skupinové i fázové rychlosti šíření při změně kmitočtu. Výsledný účinek materiálové a vlnovodové disperze bývá označován jako disperze chromatická. Je-li šířící se energie rozdělena do více vidů, přistupuje k chromatické disperzi ještě disperze vidová, způsobená rozdílnou rychlostí šíření jednotlivých vidů. Zkreslení přenášeného signálu způsobené chromatickou disperzí lze zmenšit zúžením jeho kmitočtového spektra, vliv vidové disperze můžeme redukovat zmenšením počtu vidů účastnících se přenosu vhodnou volbou konstrukčních parametrů světlovodu, v mezním případě až na jeden vid - jednovidový světlovod. Jednovidový světlovod má pouze chromatickou disperzi. Jiným způsobem snížení vidové disperze je vyrovnání skupinových rychlostí šíření jednotlivých vidů vhodným uspořádáním vlnovodné struktury. [1]

Disperze ovlivňuje časový průběh (odezvu) optického signálu, tj. přenosové vlastnosti. U digitálního systému se projevuje rozšířením optických pulsů při průchodu optickým vláknem, u anal ogového systému je to pak zmenšením frekvenční šířky modulačního signálu optické nosné. Výsledný rozšířený signál zasahuje svou šířkou do okolních bitů a přesahuje rozhodovací úrovně, následkem čehož vzniká tzv. mezisymbolová interference. Všechny druhy disperzí se podílejí na rozšiřování přenášených impulsů (měřeno v časové oblasti).[7]

1.3.1. Vidová disperze

Vidová disperze je dána časovou diferencí nejrychlejšího a nej pomalejšího vidu při jednom kmitočtu. Omezuje tak mezní šířku pásma či přenosovou rychlost nebo maximální dosah. Je charakteristická pro MM vlákna a úměrná délce vlákna L

(pouze u dlouhých vláken je vidová disperze úměrná L1/2). Tento jev se projevuje především u dlouhých vláken impulsového provozu, při přenosu dat na větší vzdálenosti a omezuje počet impulzů, které mohou být za určitý časový interval vyslány. Vidová disperze je zmenšována uspořádáním vlákna, zejména použitím vláken s gradientní změnou indexu lomu. Vzhledem k tomu, že u jednovidových vláken vidová disperze neexistuje, byl odstraněn hlavní faktor omezující přenosovou rychlost v mnohovidových vláknech [11]. Typická hodnota
pro vidovou disperzi stepindexových vláken je asi 20 ns/km, což odpovídá 3 dB. [1]

1.3.2. Materiálová disperze D_{MAT}

Materiálová disperze je způsobena závislostí indexu lomu samotného materiálu vlákna na vlnové délce záření. Tím se každá vlnová délka materiálem šíří různě rychle, čímž se snižuje přenosová kapacita. Nenulová šířka spektra je však typickou vlastností optických signálů. Spektrální šířka světla polovodičového laseru je sice nepatrná, ale emisní diody zajišťují šířku 30-40 nm [11]. Materiálová disperze ovlivňuje také dobu průchodu jednotlivých vidů, což má částečný vliv na disperzi vidovou. Udává se v hodnotách časového rozptylu šíření daného vidu na 1 km délky vlákna a 1 nm šířky spektrální čáry [nm.s/km]. Nejmenších ztrát materiálovou disperzí je dosahováno pro křemenné sklo v oblasti 1,27 μm.[1]

1.3.3. Vlnovodná disperze D_{WG}

Vychází ze závislostí skupinového zpoždění daného vidu na kmitočtu. Se změnou kmitočtu se mění v dané struktuře tvar podélného pole daného vidu [11]. Hlavní význam má v SM vláknech (jako fázové zkreslení signálu) a na v lnových délkách, kde je materiálová disperze malá (tj. kolem 1300 nm). Pro MM vlákna je tato disperze zanedbatelná, neboť většina vidů je mimo mezní vlnovou délku. Ovlivňování vlnovodné disperze je možné prostřednictvím geometrické konstrukce vlákna (poloměru jádra nebo profilem indexu lomu). Tento parametr je vždy záporný, umožňuje nám tedy kompenzovat materiálovou disperzi, viz dále. Vlnovodná disperze způsobí časové zpoždění vlny s vyšší vlnovou délkou, naproti tomu materiálová disperze zpomalí vlnu s kratší délkou vlny. Tím se dá u každého materiálu nalézt kmitočtová oblast vzájemné kompenzace materiálové a vlnovodné disperze.[1]

1.3.3 Profilová disperze D_P

Je dána závislostí profilu indexu lomu na vlnové délce záření a z toho plynoucí závislosti rychlosti šíření vlny na kmitočtu [11].Profilová disperze je poměrně malá a projevuje se až u vysokých přenosových rychlostí.[1]

1.3.4. Chromatická disperze D_{CH}

Chromatická disperze vznikne součtem výše uvedených složek: materiálové, vlnovodné a profilové disperze,

$$D_{CH}(\lambda) = D_{MAT}(\lambda) + D_{WG}(\lambda) + D_{P}(\lambda). \quad [ps] \tag{3}$$

Obr. 2: Princip chromatické disperze [7]

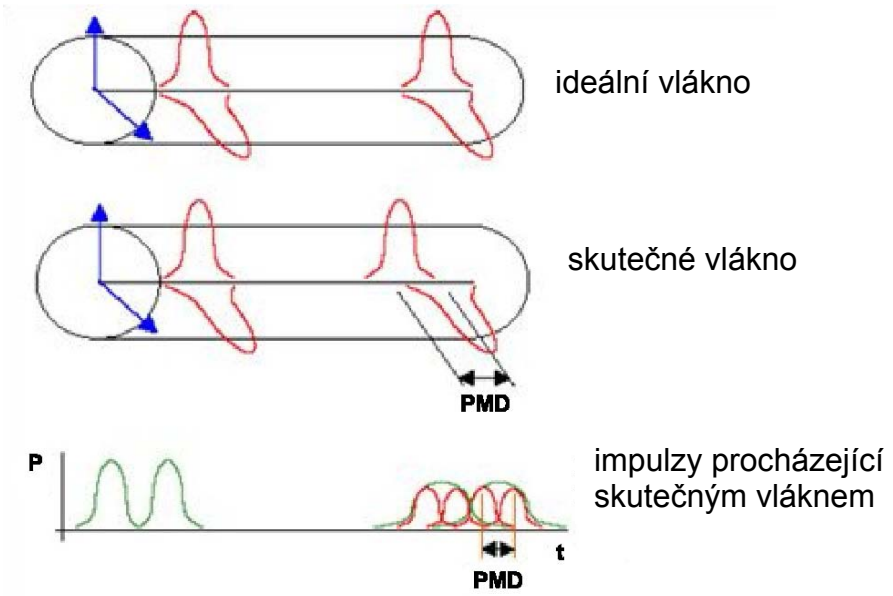
Chromatická disperze se v podstatě donedávna neměřila. Potřeba jejího měření začala se vzrůstající potřebou přenosových kapacit a nástupem systémů, jenž používají hustého vlnového multiplexu DWDM (Danse Wavelength Division Multiplex). Při takových přenosech se nám optickým vláknem najednou šíří různé spektrální složky signálu (odlišných vlnových délek) různou rychlostí. V tomto případě se nám vstupní impuls signálu, jenž vždy obsahuje více spektrálních složek, při průchodu optickým vláknem budou některé jeho složky zpožďovat. Impuls se nám tedy bude průchodem optickým vláknem časově roztahovat a takto zdeformovaný impuls nám bude z asahovat do vedlejších bitových mezer a doj de ke zkreslení přenášené informace.[7]

1.3.5. Polarizační vidová disperze

Polarizační vidová disperze je do jisté míry náhodný jev. Vlivem dvojlomu se světlo šíří vlnovodem dvěma vidy ve dvou, navzájem k sobě kolmých, rovinách, přičemž působením nehomogenit a jiných vlivů se tyto šíří nestejnou rychlostí. V ideálních jednovidových vláknech je světlo vedeno celým jádrem a z části ni pláštěm.V takovém případě lze uvažovat pouze jeden vid šíření. Protože však reálná vlákna jsou materiály, ve kterých vzniká dvojlom, je tento jediný vid polarizován dvěma různými způsoby, které kopírují polarizační osy daného vlákna. Tyto osy jsou také nazývány „hlavními stavy polarizace”(Principal State of Polarization - zkráceně PSP), což vede ke vzniku dvou polarizačních vidů.

Signál se tedy jednovidovým optickým vláknem šíří ve dvou navzájem kolmých tzv. polarizačních rovinách prostřednictvím dvou polarizačních vidů. Pokud by vlákno bylo po celé své délce zcela homogenní a dokonale kruhové, podmínky šíření signálu budou pro oba tyto vidy (tzn. v obou rovinách) stejné. Žádné optické vlákno ale ideálně kruhové a homogenní není a proto je ve vláknu přítomen tzv. dvojlom. Jednotlivé vidy se pak šíří v obou polarizačních videch různě rychle a dochází tak k časovému zpoždění – DGD (Differential Group Delay). Jelikož impuls nesoucí informaci je tvořen oběma polarizačními vidy, dochází tím k jeho degradaci – rozptylu v čase. Časové rozšíření impulsu vede ke snižování výkonové špičky signálu, čímž se zhoršuje odstup signálu od šumu (SNR) a může dojít i k roztažení impulsu až do sousedních bitových mezer. Důvod pro dvojlom v jednovidových vláknech může být popsán jako vnitřní a vnější. Vnitřní faktory jsou ty, které byly přítomny ve vlákně hned po výrobě. I při specializované výrobě se ve vlákně objevuje

nesouměrnost, která způsobuje dvojlom. Takto vyrobená vlákna mohou mít i vysokou hodnotu PMD. Dnešní vlákna jsou již vyráběná se zvláštní péčí a tedy i minimální nesouměrností. PMD úrovně takového vlákna jsou typicky < 0,1 ps.km-1/2. Vnější vlivy jsou ty, které navodí dvojlom bez ohledu na výrobu, mezi ně patří kabeláž vlákna, ohýbaní, změna teploty a další. Jsou to vlivy, které výrobou nelze ovlivnit. Protože PMD závisí na náhodném dojlomu vlákna, nemůže být definována přímo. Také okamžitá hodnota DGD nemůže být použita ke kalkulacím, protože má malou vypovídací hodnotu. DGD hodnoty kolísají náhodně okolo průměrné hodnoty, které popisuje Maxwellova křivka.



Obr. 3: Princip polarizační vidové disperze – PMD [7]

Jev nabyl na významu při navyšování přenosových rychlostí existujících vláken, často vyrobených před rokem 1990. Většina takových vláken má nyní problémy s PMD u bitových rychlostí vyšších než 10 Gbit/s. Základním přidruženým jevem je nestálost PMD v závislosti na vlnové délce – SOPMD (Second Order PMD) => nerovné hrany of optical Eye Pattern. Jeho význam je však o několik řádů méně významný, než význam samotné PMD. [1],[7]

2. Měření optických disperzí

2.1. Měření chromatické disperze

Úvodem by bylo dobré objasnit, z jakých důvodů je zapotřebí měřit optické trasy, jestliže chromatickou disperzi lze snadno a přesně spočítat. Montáž samostatné optické trasy nemá vliv na změnu chromatické disperze a ani vliv okolního prostředí zásadně neovlivňuje její velikost. Praktických důvodu je hned

několik. Z důvodu požadavků na stále rychlejší přenos signálu (40Gbit/s a více) či nasazování vlnových multiplexů DWDM, kde využíváme oblast vlnových délek zhruba od 1530 - 1625nm je nutné stanovit přesnou hodnotu chromatické disperze, abychom mohli provést přesnou kompenzaci. Pro vlnové multiplexy DWDM je zapotřebí stanovit tuto přesnou velikost nejen pro vlnovou délku např. 1550nm, ale pro celou oblast využívanou vlnovým multiplexem DWDM a i kompenzace musí být řešena širokopásmově. V neposlední řadě se čím dál více objevují případy pronájmů či prodejů optických vláken od jiných telekomunikačních provozovatelů, kdy je velice obtížné spočítat přesnou velikost chromatické disperze a jedinou možností je její měření.

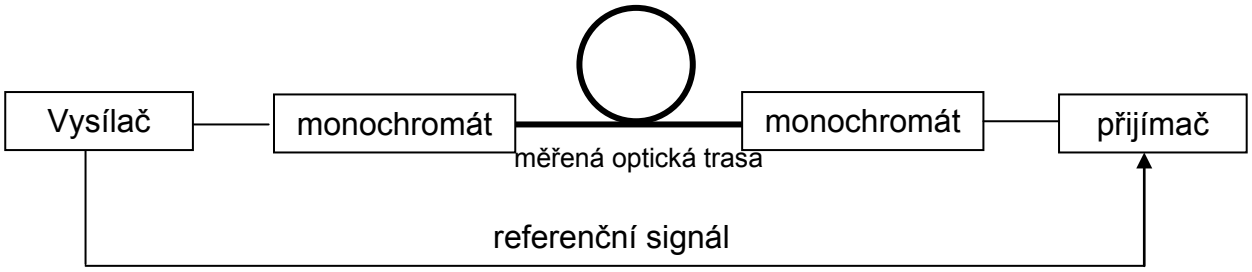
Z hlediska měření se dá vzniklé zpoždění vlivem chromatické disperze zjišťovat přímým měřením časového zpoždění signálů o různých vlnových délkách nebo měřením jejich fázového zpoždění, které odpovídá časovému. Ve většině případů bývá zpoždění měřeno pro diskrétní vlnové délky. Pro stanovení samotné chromatické disperze musíme v takovém případě použít matematickou aproximaci – proložit naměřené hodnoty křivkou, jelikož chromatická disperze je definována jako změna skupinového zpoždění signálu v závislosti na vlnové délce – viz. definice výše. Metody pro měření chromatické disperze, jsou již dnes velmi přesné. Přesnost měření vždy závisí na konkrétním měřicím přístroji, jeho parametrech, použitých komponentách a jejich stabilitě. Lze však říci, že u všech základních metod je dosahováno přesnosti stanovení koeficientu chromatické disperze v desetinách i setinách ps/(nm×km) a přesnosti stanovení vlnové délky nulové chromatické disperze až v desetinách nm [8].

2.1.1 Měření chromatické disperze metodou fázového posuvu a diferenciálního fázového posuvu

Pro měření je využit zdroj záření, který je modulován na několika vlnových délkách a na přijímací straně je zjišťován fázový posuv signálu. Aby bylo možné fázový posuv porovnat, je zapotřebí zaslat k přijímači informaci o vstupní fázi pomocí referenční trasy např. jiným vláknem v kabelu. Tato metoda se v praxi používá méně. Použití diferenciálního fázového posuvu, kdy jsou využity dvě vlnové délky a měříme fázový posuv mezi nimi, je praktičtější a odpadá nutnost druhého vlákna pro komunikaci a ovládání vysílače. Používají se v zásadě dva typy zdrojů - LED nebo LD. LED diody jsou širokospektrální a oproti LD mají vyšší stabilitu. U zdrojů s laserovými diodymi se používá sada těchto diod, u kterým dosáhneme vyššího výkonu a tím i dynamického rozsahu.

Zdroj optického záření je modulován signálem o frekvenci v řádu stovek MHz (100, 300 MHz) až desítek GHz. Výběr modulační frekvence určuje přesnost měření a maximální měřitelnou hodnotu zpoždění (disperze). [8]

Přístroje založené na těchto metodách se pro měření chromatické disperze používají nejdéle. Čas potřebný k měření vlákna u nich závisí hlavně na počtu měřicích vlnových délek a je řádově v desítkách sekund až jednotek minut. Jednou ze zajímavých modifikací této metody je přímé měření chromatické disperze, kdy se jako zdroj záření využívá laditelný zdroj záření (nebo laditelný filtr).[8]

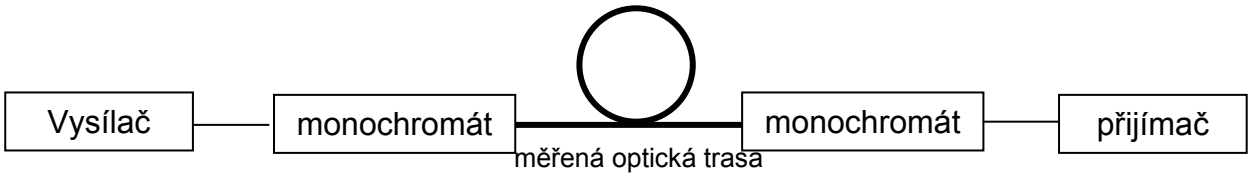


Obr. 4: Měření chromatické disperze metodou fázového posuvu [8]

2.1.2 Měření chromatické disperze metodou zpoždění impulsů v časové oblasti

Měření probíhá jako sled impulzů o různých vlnových délkách v přesných rozestupech. Pokud porovnáme rozestupy na začátku a na konci měřené trasy, dostaneme zpoždění, které odpovídá chromatické disperzi daného vlákna. Jako zdroj záření se používá sada LD nebo širokospektrální zdroj - LED dioda v kombinaci s monochromátorem. Nastavení časových rozestupů jednotlivých impulzů nastavujeme maximální měřitelné zpoždění vlivem chromatické disperze. Díky tomu se pro měření využívá pouze jedno optické vlákno. Paradoxně na samotné impulzy také působí chromatická disperze, protože jsou tvořeny více spektrálními složkami. To má za následek roztahování impulzů a tím horší přesnost ve stanovení časové polohy impulzů.

Jednou z modifikací této metody je využití principu OTDR (metoda měření zpětného rozptylu užívaná standardně k měření útlumu optických tras). Přístroje pracující na této bázi využívají jako impulsní zdroje záření samotné laserové diody klasických OTDR pro měření útlumu s tím, že v tomto případě je nutné měřit na více vlnových délkách (standardně čtyřech). Obvykle se využívají vlnové délky pokrývající celé užívané spektrální pásmo jednovidových optických vláken (1310 nm až 1625 nm). Z tohoto důvodu tato metoda skýtá úskalí při matematické aproximaci naměřených hodnot zpoždění, jak uvidíme dále, což se může projevit na přesnosti stanovení hodnot chromatické disperze. Výhoda této metody může být v tom, že touto metodou provádíme zároveň též spektrální měření útlumu optické trasy. Jiná výhoda plynoucí z principu OTDR spočívá v tom, že měření se provádí na trase vždy z jednoho místa, jelikož se vyhodnocuje odražený signál od druhého nezapojeného konce trasy. Je ovšem také nutné, aby na volném konci byl dostatečný odraz, což je problematické u tras se šikmými APC konektory. V tomto případě je nutné na konec trasy připojit ještě přídavný odrazný modul, čímž se výhoda jednostranného měření ztrácí. Z principu OTDR plyne, že doba měření je závislá na délce trasy. [8]



Obr. 5: Měření chromatické disperze metodou zpoždění impulsů v časové oblasti [8]

2.1.3 Měření chromatické disperze interferometrickou metodou

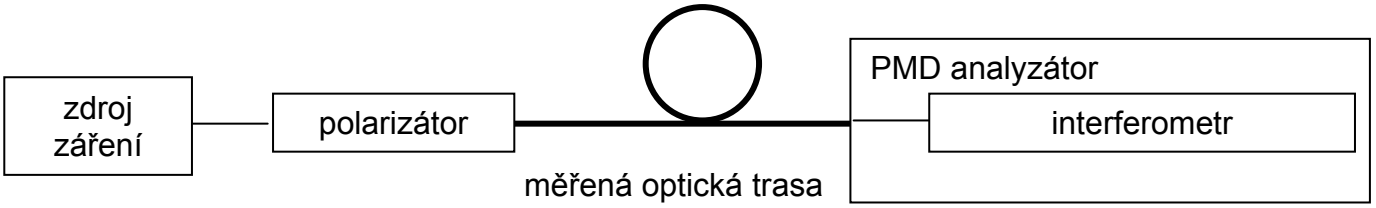
Tuto metodu tu jen zmíním, jelikož není vhodná pro měření optických tras. Interferometrická metoda využívá nejčastěji Michelsonův nebo Mach-Zehnderův interferometr. Pomocí interference mezi zářením z měřeného a referenčního vlákna (o známé chromatické disperzi) se zjišťuje fázový rozdíl obou signálů. Touto metodou je možné měřit jen krátké úseky vláken (o celkové hodnotě chromatické disperze nejvýše jednotek ps). Jelikož se jedná o měření na jednom místě, není ani nedostatkem nutné užití referenčního vlákna. Z tohoto důvodu se jedná o metodu spíše laboratorní, která není určena pro měření tras, kde jsou konce od sebe vzdáleny i desítky kilometrů.[8]

2.2. Měření polarizační vidové disperze - PMD

Měření PMD vlákna se provádí od výroby, přes kabelování, závěrečné měření při uvedení instalované kabelové trasy do provozu až po údržbová měření. Polarizační vidová disperze optického vlákna je důsledkem rozdílného zpoždění dvou polarizačních vidů signálu, a proto hodnoty zpoždění způsobené vlivem PMD jsou velmi malé (řádu jednotek až desítek ps). Takto malé časové hodnoty je nutné zjišťovat nepřímým měřením. Proto se používají jiné metody, než například pro měření chromatické disperze, kde je také měřeno zpoždění jednotlivých složek signálu. Principy základních metod ke zjištění PMD budou popsány níže s orientací na měření optických sítí a kabelových tras. [17],[8]

2.2.1 Měření polarizační vidové disperze metodou interferometrickou

Interferometrická metoda měření PMD je založena na interferenci nízko-koherentního optického záření. Jako zdroj záření se využívá polarizovaná širokospektrální LED dioda (nízkokoherentní zdroj záření). Na výstupu měřené kabelové trasy je užit Michaelsonův interferometr, na kterém se získává autokorelační funkce přicházejícího optického záření. Detailnější pohled na Michelsonův interferometr je na obrázku č. 7. Optické záření se v interferometru rozdělí do dvou větví z nichž v jedné větvi je pevné zrcadlo a v druhé zrcadlo pohyblivé. Pohyblivým zrcadlem měníme fázový posun mezi signály obou větví a pomocí jejich interference na detektoru zjišťujeme zpoždění vlivem PMD.[8],[4],[7]

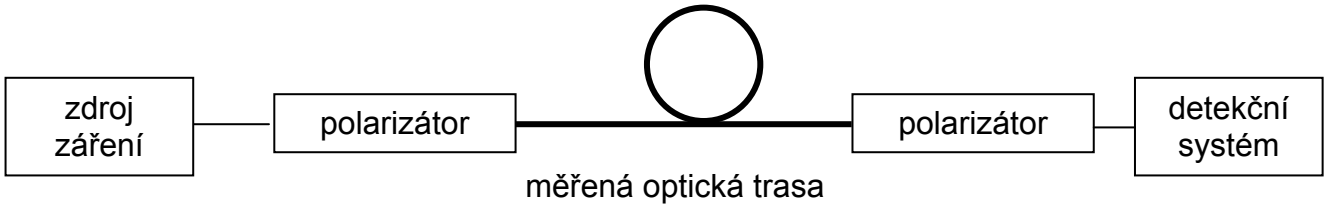


Obr. 6: Měření polarizační vidové disperze metodou interferometrickou [8]

Měření se provádí pouze v jednom kroku, protože není třeba provádět nastavování referenční hodnoty. K měření se používá pouze měřené optické vlákno. Tato měřicí metoda je velmi rychlá a dostatečně přesná pro měření PMD optických tras. Je možné měřit hodnoty zpoždění PMD od 0,1 ps až po stovky ps, což je pro měření optických kabelových tras naprosto postačující. Tato metoda je vhodná pro měření v terénu pro svou rychlost, odolnost vůči vibracím optického vlákna a nepotřebě stanovování referenční hodnoty.[8],[18]

2.2.2 Měření polarizační vidové disperze metodou skenování vlnové délky (metoda s fixním analyzátorem)

Základem této metody je měření optického výkonu procházejícího měřenou trasou v závislosti na vlnové délce. Jako zdroj záření je možné použít širokospektrální LED diodu, nebo laditelný laser. Za zdrojem následuje polarizátor. Na detekční straně měřicího systému je nutné dle užitého zdroje použít detekční prvek tak, aby bylo možné provádět měření výkonu v závislosti na vlnové délce. Tzn. pro širokospektrální zdroj je to optický spektrální analyzátor OSA, pro laditelný laser postačuje měřidlo výkonu.[8] Většinou se ke stanovení PMD používá rychlá Fourierova transformace (FFT), která umožňuje naměřené spektrální výsledky převést přímo do časové oblasti. Metoda skenování vlnové délky je časově náročnější, jelikož je třeba provádět dva měřicí kroky a je náchylnější na vibrace vlákna. [18],[8]



Obr. 7: Měření polarizační vidové disperze metodou skenování vlnové délky [8]

2.2.3 Měření polarizační vidové disperze metodou polarimetrickou

Polarimetrická metoda je dle ITU stanovena jako referenční metoda pro měření PMD. Pod názvem polarimetrická metoda se skrývá více metod, které pracují na obdobném základě. Jádrem těchto metod je zjišťování komplexních informací o polarizačním stavu na vstupu a na výstupu optické trasy, což obě dříve popsané metody neumožňují. Jedná se o metody:

- metoda analýzy Jonesovy matice
- metoda Poincarého koule
- metoda polarizačních stavů (SOP)

Polarimetrické metody jsou ze zmiňovaných metod nejpřesnější a umožňují vysokou reprodukovatelnost naměřených výsledků, jelikož skutečně známe veškeré informace o polarizaci vstupního a výstupního záření. Nevýhodou těchto metod je vysoká časová náročnost měření a složitost měřicí aparatury. Použití této metody je také více náchylné na vibrace vlákna a navíc vysokou přesnost při měření PMD tras

ani nevyužijeme. Tyto metody se používají pro přesná měření PMD velmi malých hodnot, například u optických součástek ve výrobě. Jelikož soubor polarimetrických metod není příliš vhodný pro měření optických kabelových tras v terénu, leží mimo hlavní oblast našeho zájmu.[8],[7],[17]

3. Kompenzace disperzí

3.1. Kompenzace chromatické disperze

Jak je uvedeno výše, chromatická disperze je velice stálý parametr, který není ovlivněn montáží trasy či okolním prostředím a při měření skutečné optické trasy dostaneme přibližně hodnoty udávané výrobcem. Nejpoužívanější způsob kompenzace je zařazení předřadného kompenzačního vlákna DCF (Disperzion Compensation Fiber) na k onec trasy, které má vysokou hodnotu záporné chromatické disperze. V dnešní době jsou nabízeny nové typy těchto kompenzačních vláken s dostatečným záporným sklonem disperzní charakteristiky, které jsou navrženy i pro kompenzaci vláken s nenulovou disperzí NZDF (Nonzero Dispersion-shifted Fiber, dle ITU-T G.655) nebo p lochou disperzní charakteristikou. Problém DCF je vložný útlum, který je způsoben velkou délkou předřadného vlákna DCF (asi 1/6 z celé délky kompenzované trasy). Další možnost je použití HOM vláken (High Order Mode Fiber), které mají asi 3x vyšší koeficient záporné disperze než DCF[7]. HOM vlákna mají menší útlum a jsou více odolná na nelineární jevy. Obdobně lze ke kompenzaci chromatické disperze použít také vláknové Braggovské mřížky FBG (Fibre Bragg gratings). Ty se vyznačují velkou šířkou pásma, filtrují signál, zostřují spektrum, jsou laditelné a ek onomické.[1] Takovou mřížku s proměnnou periodou mřížky lze použít jako kompenzační vlákno, ale obvykle jen pro velice úzkou spektrální oblast pár nm. Pro kompenzaci chromatické disperze u v íce vlnových délek je zapotřebí utvořit celou kaskádu takových mřížek. V dnešní době výrobci již nabízejí širokopásmové kompenzační jednotky na principu Braggovské mřížky pro pásmo široké až 35nm.

3.1.1 Čerpovaná Braggova mřížka

FBG mřížka [15] je typ distribuovaného Braggova reflektoru konstruovaného v krátkém segmentu optického vlákna, viz obr. 2, který odráží určitou vlnovou délku světla (λ) a ostatní λ propouští. Toho je dosaženo pravidelnou změnou indexu lomu n jádra vlákna, viz obr. 2, které vytváří dielektrické zrcadlo o specifické vlnové délce. Profil indexu lomu mřížky může být například upraven lineární změnou v periodě mřížky. Takto vzniklá mřížka se nazývá čerpovaná a používá se pro kompenzaci disperze, viz obr. 3. Se změnou periody mřížky dochází k odrazu různých vlnových délek. „Rychlejší“ část spektra pulsu se odrazí dále na FBG mřížce a „pomalejší“ část spektra pulsu se odrazí dříve. Tím dojde k časové kompresi pulsu a kompenzaci

chromatické disperze. Spektrum takto odraženého pulsu je užší než spektrum pulsu vstupního.[16]

3.2. Kompenzace polarizační vidové disperze - PMD

Polarizační vidovou disperzi lze ovlivnit, avšak pouze do určité míry. Protože se jedná o vliv do jisté míry náhodný a proměnný s časem, je velice obtížné kompenzovat vliv polarizační vidové disperze. Elektronické zařízení, která měří hodnotu PMD a snaží se ji eliminovat v reálném čase jsou ve vývoji nebo mají astronomickou hodnotu. Pokusím se navrhnout realizovatelná řešení kompenzace:

3.2.1 Rozdělení trasy na menší úseky s opakovači

Při použití regenerátoru optického signálu je signál detekován ještě před jeho znehodnocením přes hraniční hodnotu DGD. Bohužel tato metoda s sebou přináší celou řadu jiných negativních jevů a nevýhod a proto bývá používána jen řídce. Největší překážkou se stává u multiplexních systémů.[3],[11],[1]

3.2.2 Použití vlnového multiplexu pro rozložení přenosové kapacity.

Použití vlnového multiplexu je velmi účinný způsob, jak snížit vliv PMD, protože díky tomu, že použijeme pro přenos mnohem více kanálů, můžeme snížit přenosovou rychlost na jednotlivé kanály. Jedná se o velmi účinnou metodu, avšak značně neefektivní a neekonomickou z pohledu využití optické trasy pro provoz.

3.2.3 Použití jiné vlnové délky.

Pokud nevyhovuje přenosová cesta pro konkrétní vlnovou délku, je možné použít pro přenos jinou vlnovou délku. Tato metoda vyplývá z fyzikální podstaty světla. Účinnost je velice spekulativní, ale na první pohled ekonomičtější než ostatní metody.[1], [9]

3.2.4 Použití jiného vlákna optického kabelu.

Optická cesta bývá zpravidla zajištěna i několika rezervními, servisními vlákny, či vlákny určenými pro přenos pouze režijních informací. To vychází z koncepce celého návrhu optických tras, kde se již při projektování daného optického propoje počítá s navyšování kapacity, proto bývá často mnoho vláken rezervním pro budoucí využití a lze si vybrat jiné. Pro nejnižší hodnotu PMD zpravidla změříme všechna vlákna v kabelu a vlákna s nejnižšími hodnotami použijeme pro daný přenos. Pokud nemáme k dispozici měřící přístroj, je to spolu se způsobem změny vlnové délky jediný způsob jak se vyhnout nákladné změně celého kabelu, či zavádění přídavných zařízení do sítě.

3.2.4 Výměna celé optické trasy.

Jedná se o velice radikální metodu. Pro některé úseky se staršími optickými vlákny (vyrobenými v 90. letech) je tato metoda doporučována vždy. Spíše než výměnu bych doporučil tam kde je to možné (rezervní HDPE chránička, či možnost zatažení druhého kabelu) nový optický kabel současně se stávajícím optickým kabelem. Výrazně se tím navýší počet vláken. U novým vláken lze použít vysokorychlostní přenosy, u stávajícím vláken vlnové multiplexy. Je to ekonomičtější a praktičtější řešení než výměna.

3.2.5 Výměna úseku vlákna.

Tato metoda vyžaduje proměření optické trasy reflektometrickým přístrojem POTDR (Polarimetric Optical Time Domain Reflectometry). Tento způsob je velmi efektivní a lze jej použít na v šech druzích optických tras. Přejímkové měření přístrojem POTDR je na vysokorychlostních spojích nezbytnou podmínkou funkčnosti. Přístroj POTDR umožní zjistit místa se zhoršenými poměry PMD a následně je vyměnit. [13]

3.2.5 Kompenzace PMD

V případě kompenzace PMD nelze užít statických pasivních kompenzačních prvků, jak tomu je u chromatické disperze, jelikož tento jev je do značné míry náhodný a v čase proměnný. Využívá se proto aktivních kompenzátorů, které umí vyhodnocovat stavy polarizace a podle nich přizpůsobují své vlastnosti. Není možné úspěšně kompletně odstranit PMD, ale lze ho snížit na únosnou mez.[1]

3.2.6 Změna přenosové technologie

Pokud ani jedna z předchozích variant nepřipadá v úvahu, v dnešní době lze již vybírat z přenosových systémů, které jsou odolnější na vliv polarizační vidové disperze. Jedná se o velice drahá zařízení, ale v některých případech mohou být levnější variantou oproti kompletní výměně stávající optické trasy. Při nasazení systému s vyšší dynamikou lze docílit toho, že i hodnoty PMD na trase okolo 10ps nemusejí znamenat problém.

4. Analýza stávající sítě

4.1. Úvod

Při analýze stávajících optických vláken je nutno počítat s budoucím navyšováním rychlosti přenosu a proto již dnes používat limitní hodnoty pro tyto budoucí přenosy. Podle ITU-T všechny budoucí přenosové systémy budou muset splňovat základní kritéria přenosových systému 10/40Gbit.s-1 Zejména se jedná o velikost polarizační vidové disperze ≤ 2,5ps, 0,2ps/√km a chromatické disperze ≤ 60 ps/nm. Dnešní praxe ukazuje, že hodnoty 3 - 4ps u PMD a 300 – 400ps/nm u CD jsou ještě přijatelné a aktivní zařízení na koncích takového optického spojení se takovým zpožděním vypořádají, aniž bychom museli pořizovat speciální drahá zařízení.

Pro analýzu sítě byly použity měření Brněnské metropolitní a akademická síťě, kterou pro Masarykovu univerzitu prováděla firma PROFiber Networking s.r.o. Jedná se o analýzu naměřených hodnot na třech optických kabelech - Botanická 68a - Rektorát Masarykovy univerzity, Žlutý kopec (Masarykův onkologický ústav) - nám. Míru (VŠ koleje), Lipová ESF MU - Poříčí PdF MU. Měření probíhali bez překladu provozu, proto byly pro měření použity pouze vlákna bez provozu. K měření byly použity tyto přístroje:

- FIP-400 - Optický mikroskop od firmy EXFO. Je určen pro inspekci v konektorových spojek. Provedení mikroskopu je ve formě inspekční sondy, kterou lze připojit k jednoduché zobrazovací jednotce nebo PC. Zobrazený obrázek je možné uložit v běžném elektronickém formátu pro účely dokumentace.

- FOT-932 - multifunkční měřidlo útlumu (tzv. All in One) od firmy EXFO s funkcí měření FasTest. Jeho největší výhodou je, že provádí obousměrné měření útlumu na všech obsažených vlnových délkách včetně měření délky a útlumu odrazu během 10s stiskem jediného tlačítka.

- FTB-5800 - měřící přistroj chromatické disperze od firmy EXFO. Měřicí modul EXFO FTB-5800 je 4-slotový měřicí modul do platformy EXFO FTB-400, který poskytuje rychlé a přesné měření chromatické disperze na optických trasách od středních vzdáleností (metropolitní optické trasy) až po extrémně dlouhé optické transportní trasy. Měřicí modul je připraven pro testování optických tras s přenosovou kapacitou 10 Gbit/s, 40 Gbit/s s výhledem na 100 bit/s. Měřicí modul využívá metodu fázového posuvu a pro měření je ho tedy nutné doplnit o modulovaný zdroj záření EXFO FLS-5800A. Přístroj umožňuje testování celé optické linky včetně EDFA zesilovačů bez nutnosti rozpojování na jednotlivé sekce a nabízí tak rychlé a bezchybné měření. Testování přes zesilovače je možné díky tomu, že filtrování signálu je realizováno na straně přijímače a mezi zdrojem a přijímačem tak neprobíhá žádná komunikace.

- FTB-5700 - kombinovaný měřící přístroj CD/PMD disperze od firmy EXFO. Měřicí modul EXFO FTB-5700 je unikátním typem analyzátoru pro kombinované jednosměrné měření disperzí CD a PMD (jediný přístroj svého druhu na trhu). Přístroj EXFO je vhodný pro měření na kratších až středně dlouhých optických trasách (do 140 km) bez zesilovačů. Měření se provádí tzv. jednosměrnou metodou (reflektometrickou), kdy odpadá nutnost použití zdroje záření na druhém konci. Výhodou tohoto EXFO modulu je dále také jeden měřicí port pro kombinované měření CD/PMD a tedy velice jednoduché nastavení a ovládání měření obou parametrů v jednom kroku s možností zobrazení indikace vyhověl/nevyhověl.EXFO měřicí modul se vyrábí ve 2-slotovém provedení, je ho tedy možné integrovat nejen do měřicí jednotky EXFO FTB-400, ale také do malé přenosné kompaktní platformy EXFO FTB-200 vhodné pro měření v terénu.

- FTB-5500B - měřidlo polarizační vidové disperze od firmy EXFO. Měřicí modul EXFO FTB-5500B je 3-slotový měřicí modul do platformy EXFO FTB-400, který poskytuje rychlé a přesné měření polarizační vidové disperze na optických trasách od středních vzdáleností (metropolitní optické trasy) až po extrémně dlouhé optické transportní trasy. Přístroj je vhodný pro testování podzemních i závěsných kabelů. Měřicí modul je připraven pro testování optických tras s přenosovou kapacitou 10Gbit/s, 40Gbit/s s výhledem na 100Gbit/s. EXFO měřicí modul využívá tzv. obecnou interferometrickou metodu měření PMD (GINTY). Tato metoda oproti starší klasické metodě TINTY se vyznačuje potlačením vlivu autokorelační špičky. Tím je dosaženo mnohem přesnějšího měření a je umožněno měření před EDFA zesilovače. Pomocí pokročilé softwarové analýzy je navíc možné zjišťovat PMD 2.řádu a tím přesněji určit kvalitu přenosu u vysokorychlostních systémů.Jako polarizovaný zdroj záření je možné použít zdroj EXFO FTB-5800A, který pracuje i jako modulovaný zdroj záření pro měření chromatické disperze CD. Měřicí jednotku EXFO FTB-400 je tak možné osadit EXFO modulem pro měření CD a modulem pro měření PMD a vytvořit tak výkonnou sestavu pro testování disperzních charakteristik.[14]

4.2. Historie sítě MU

V roce 1993 byla prakticky zahájena výstavba Metropolitní počítačové sítě v Brně realizací projektu s názvem *Akademická počítačová síť v Brně*, jehož cílem bylo propojení vysokých škol a vědeckých pracovišť v rámci brněnské aglomerace. Nositelem projektu byl ÚVT Masarykovy univerzity v Brně a CVIS Vysokého učení technického v Brně. Projekt navazoval na jednání se zástupci brněnských vysokých škol a z nich vyplývajících závěrů na postupné vybudování metropolitní počítačové sítě s ohledem na stávající i budoucí potřeby napojení se na dostupné světové informační zdroje.

1. etapa

Po dlouhých a neúspěšných jednáních s vedením SPT TELECOM o možnostech vybudování sítě tímto subjektem přikročily MU a VUT Brno k vybudování vlastní privátní optické počítačové sítě. Z důvodů vysoké cenové náročnosti budování sítě pomocí kabelů uložených v zemi bylo rozhodnuto vybudovat vedení s použitím samonosného optického kabelu ukotveného na střešnících umístěných na jednotlivých objektech.

Vzhledem k cenám koncových zařízení bylo vybráno gradientní vlákno 62.5/125, samonosné, bez metalického prvku. Samonosný kabel obsahuje celkem 8 optických vláken. Kabely pro vnitřní vedení jsou 4 vláknová. Vnější a vnitřní vlákna jsou svařena a uložena do spojek. Tyto spojky jsou, z důvodů omezení přístupu k nim, umístěny v uzamykatelných skříních. V každé lokalitě, kde je umístěn router, byla vnitřní vlákna vyvedena do rozvodné skříňky. Jedná se tedy vždy o jeden vnitřní 4 vláknový kabel. Pouze v objektech CVIS VUT a ÚVT MU bylo do rozvodné skříňky vyvedeno 16 vláken.

Při vlastní realizaci bylo nutné dbát na vhodný typ jednotlivých vnitřních a vnějších vláken, aby byla možnost je svařovat, na vhodný typ upínacích prvků, aby nedocházelo k poškozování obalu kabelu při jeho napínání; použití samonosných vláken při využívání komínových průduchů v budovách atp.

Z hlediska použité technologie svařování vláken v jednotlivých lokalitách jsou zajímavé i dosažené útlumy. Např. na vzdálenosti cca 2.5 km mezi CVIS VUT a ÚVT MU bylo dosaženo útlumu na 5 vláknech v rozmezí od 7 do 8 dB. Celá síť byla provozována na ETHERNETU na rychlosti 10 Mb/s. Lokalita Technická byla připojena přes mikrovlnné pojítko rychlostí 4 Mb/s. Vzhledem k významu tohoto objektu se předpokládalo jeho brzké připojení do sítě optickým vláknem.

Celá síť byla tedy vybudována na samonosném optickém kabelu, umístěném na konzolách na střechách domů. Vzhledem ke značnému zájmu dalších uživatelů o vstup do této sítě se předpokládalo připojování těchto účastníků pomocí kabelů uložených v zemi, případně pronájmem vláken od SPT TELECOM. Převážná část prostředků, které byly určeny na vybudování vedení, nákup aktivních prvků a měřící techniky, se nakonec použila na vybudování trasy sítě. Jedinou výjimkou byl nákup svářecího zařízení.

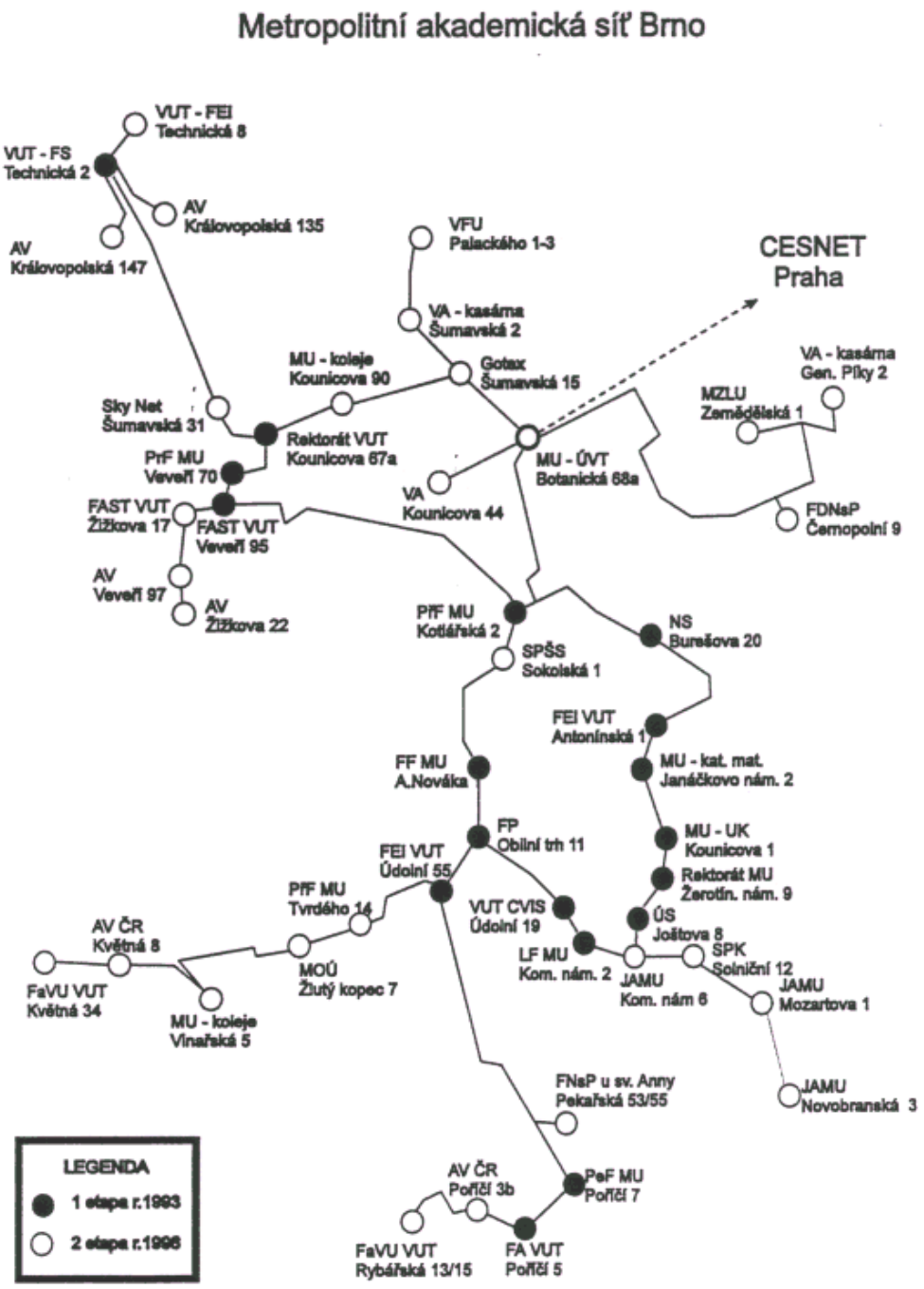
2. etapa

Druhá etapa budování sítě byla zahájena na přelomu let 1995/1996 realizací *Projektu rozvoje metropolitní akademické počítačové sítě v Brně a jejího přechodu na kvalitativně vyšší technologii*, na který byly přiděleny prostředky z Fondu dynamického rozvoje.

Cílem projektu bylo umožnit připojení do páteřní optické sítě dalším lokalitám, které byly dosud připojeny pouze po pevných pronajatých okruzích, což značně omezovalo jejich možnosti. Jednalo se zejména o lokality:

- Vinařská (Areál kolejí a menz, předpoklad výstavby další lokality)
- Botanická (Fakulta informatiky)

- Zemědělská (Vysoká škola zemědělská)
- Palackého (Vysoká škola veterinární)



Obr. 8: Metropolitní akademická síť Brno [7],[2]

Druhá část projektu se týkala nasazování výkonné výpočetní techniky do vybraných lokalit s největším předpokladem zatížení sítě, jejich technické

možnosti, dostupností dané lokality a s ohledem na požadavky pracoviště nebo školy napojit se na páteřní síť.

Práce na projektu Metropolitní akademické počítačové sítě lze rozčlenit do dvou zásadních oblastí. První byla oblast legislativní, druhá pak vlastní technická realizace. Práce v první oblasti byly s ohledem na předpokládanou složitost zahájeny již na počátku roku 1995, a to bez ohledu na konečné rozhodnutí o přidělení prostředků z Fondu dynamického rozvoje. Tyto prostředky však i přes naše požadavky na jejich včasné přidělení z důvodů nutnosti provést výběrová řízení, zpracování prováděcího projektu, získání povolení telekomunikačního úřadu a následného stavebního povolení, byly přiděleny až v měsíci srpnu. Tím došlo k značnému časovému tlaku při řešení projektu. Povolení telekomunikačního úřadu k rozšíření metropolitní počítačové sítě jsme pak získali až v listopadu 1995. Po získání prostředků z Fondu dynamického rozvoje jsme vypsali veřejnou obchodní soutěž, ve které zvítězil Spojprojekt Brno. Hodnocena byla jednak cena, ale také zkušenosti této firmy se zajišťováním kompletních stavebních akcí, které s výstavbou sítě souvisí.

V rámci první etapy byly v roce 1993 uvedené lokality propojeny samonosným kabelem s 8 gradientními vlákny. V další etapě v letech 1995-1996 byly již jednotlivé lokality propojeny kabelem s 8 monovidovými vlákny a 4 gradientními vlákny. Cílem projektu bylo nejen napojení dalších lokalit, ale i zvýšení bezpečnosti sítě. Z těchto důvodů byla zakoupena zařízení na přenos dat atmosférou. Kromě lokalit z oblasti MŠMT jsou do sítě zapojeny některé objekty, které se nacházely na trase a jejichž budov bylo využito pro výstavbu vedení. Připojení do sítě si tyto instituce hradily z vlastních zdrojů.

Výstavba sítě nebyla však hrazena jen z prostředků získaných ze společných projektů; připojení a vybavení některých lokalit přístupovými prvky bylo zajišťováno samotnými školami - a to poměrně značnými náklady.

Nasazení ATM technologie

Další oblastí, která byla součástí projektu, je nasazení nové technologie v některých uzlech sítě. Jako aktivní prvky sítě byla ve výběrovém řízení, jehož se celkem zúčastnilo 6 firem, vybrána zařízení dodávaná firmou Unient Communications, a.s. Výrobcem tohoto zařízení je BAY Networks. Řada firem, které se zúčastnily výběrového řízení, nám zpřístupnila aktivní prvky pro ATM technologii, takže jsme měli možnost se s nimi v dostatečném předstihu seznámit. Naše praktické zkušenosti s touto technikou potom sehrály významnou roli při výběru ATM technologie.

Jako ATM přepínač byl zvolen Lattis Net 5000AH. Jedná se o modulárně rozšiřitelný hub s přepínací kapacitou 5 Gb/s. Umožňuje nasazení až 16 portů OC3c a podporuje všechny potřebné standardy. Lattis Net 5000AH byl vybrán v následující konfiguraci: 14ti slotové chassi, zdroj, dohlížecí modul, SFM přepínací modul, SCM řídící modul, interfejsový modul pro MMF a modulární modul pro aplinky, a to jak pro přenosové médium MMF tak SMF.

Jako přístupový prvek sítí Ethernet k ATM páteři byl vybrán EtherCell. Jedná se o Ethernet-to-ATM switch s kapacitou 1 ATM OC3 port a 12 UTP ethernet portů.

Každý ethernetový port je obsluhován samostatným LAN Emulation Clientem. Vnitřní sběrnice pracuje na rychlosti 310 Mbit/s. Je podporována specifikace LAN Emulation 1.0, vydaná ATM fórem.

Další aktivní prvky byly hrazeny z projektu *Brněnská akademická počítačová síť a síť MU*, který byl podán v rámci programu INFRA. Zatímco v minulých letech se kladl zejména důraz na rozšiřování sítě, v současné době se začínají objevovat větší požadavky na kvalitní přístupové prvky sítě. Vytváří tak zárodek nové ATM podsítě, která kromě možností vysokorychlostních přenosů nabízí celou řadu dalších služeb. Jedná se zejména o možnosti změn vnitřní struktury lokality (16 příp. až 32 Ethernetových portů), možnosti vytváření virtuálních sítí, což je striktní požadavek u lékařských aplikací, možnosti vyčlenění hlasového kanálu, propojování příček mezi ústřednami atd.

Z výše uvedených důvodů byla tato zařízení zakoupena pro lokalitu Botanická (ÚVT MU), lokalitu Obilní trh (pracoviště LF MU), lokalitu Kotlářská (PřF MU), lokalitu Žerotínovo nám. příp. Janáčkovo nám. (Re MU a PřF MU). Nasazení těchto systémů a snaha o pokud možno co největší využití možností zařízení CENTILION vedla k následným úpravám zapojení rozvodů v síti, a to jak v Metropolitní síti, tak i v některých lokalitách. Nejdramatičtější byla tato změna v lokalitě Kotlářská (z hlediska provozu sítě nejvýznamnější lokalita), kde došlo ke změně celé topologie sítě.

Od této změny očekáváme maximální využívání možností nových systémů a tím i získání dalších zkušeností s nimi. Využívání ATM technologie v lékařské oblasti je jednou ze stěžejních oblastí, u nichž očekáváme značný rozvoj požadavků na multimediální aplikace. Nasazení ATM technologie do tohoto uzlu je pak teprve prvním krůčkem k realizaci rozsáhlejších systémů, které umožní studentům a přednášejícím přístup do databází, obsahujících např. rentgenové snímky pacientů z různých časových období, výsledky tomografických vyšetření, angiovyšetření atd.

Realizace uzlu Obilní trh umožní nasazení této technologie přímo ke zdroji dat. V současné době se dokončují přípravy na změnu zapojení tohoto uzlu. Zároveň probíhají na ÚVT na dodaných zařízeních testy možností virtuálních sítí, které jsou nezbytnou podmínkou jejich praktického nasazení do reálného provozu.

Rozvoj metropolitní sítě v tomto roce by měl být částečně zajištěn prostředky z programu INFRA (třetí rok projektu) a dále byl podán projekt do FR (společný projekt pěti vysokých škol v Brně). Tyto projekty jsou zejména zaměřeny na nasazování technologie ATM, zvyšování bezpečnosti sítě vytvářením redundantních spojení a získání potřebné měřící techniky.

Z mého příspěvku je zřejmé, že výstavba sítě byla doposud v převážné míře hrazena z projektových prostředků. V blízké budoucnosti však s těmito zdroji nelze počítat a školy si budou muset ze svých prostředků hradit nejen provoz sítě, ale i její další rozvoj. A na závěr několik statistických údajů charakterizujících vývoj sítě po ukončení stávajících dvou etap (1. etapa / 2. etapa): [2][7]

- délka optických vedení: 7 km / 20 km
- počet uzlů připojených optickým kabelem: 18 / 45
- počet uzlů metalického spojení: - / 6
- investované grantové prostředky: 3 mil. Kč / 17 mil. Kč [2]

4.2. Analýza optického kabelu SM 48f Botanická 68a - Rektorát MU

Při prvním pohledu na stávající optický propoj, je důležité si uvědomit, jaké jsou zásadní prvky, které mohou velice negativně ovlivnit přenos záření a které lze opravit či vyměnit. Jedná se především o konektory, které v praxi způsobují až 90% poruch a problémů na síti, pomineme-li neodborný vnější zásah třetích osob (výkopy, poruchy, neodborná montáž v serverovnách). Konektory jsou „Achillovou patou“ optických sítí. Špinavý či poškozený konektor způsobí nemalé potíže na síti a dnes již každý majitel optické sítě vždy čistí konektory a PATCH panely s kterými manipuluje. Optický mikroskop dobře odhalí poškozený či špinavý konektor a tím můžeme eliminovat další chyby a špatné závěry v dalším měření.

Tabulka 1: Přehled stavu optických konektorů na optické trase Botanická 68a – Rektorát MU

Botanická - Rektorát					
Vlákno	**Konektor**	**Vlákno**	**Konektor**	**Vlákno**	**Konektor**
07	mírně špinavý	34	OK	43	OK
08	poškozený	35	OK	44	OK
09	poškozený	36	OK	45	OK
10	mírně špinavý	37	OK	46	OK
21	špinavý	38	OK	47	OK
22	poškozený	39	OK	48	mírně špinavý
31	mírně špinavý	40	OK		
32	OK	41	OK		
33	OK	42	OK		

Již z těchto poznatků je patrná potřeba kontrol s manipulovanými konektory a jejich čištěni a vždy bych doporučil poškozené konektory vyměnit za nové. Dále na síti jsou použity konektory SC/PC, které svojí konstrukcí méně odolávají nečistotám. Pro zmenšení negativních vlivů konektorů bych doporučil výměnu konektorů za E2000/APC.

Zkoumání výsledků měření přímou metodou nám poskytne cenné informace o stavu sítě, a jestli zde není nějaký zásadní problém. V příloze 1 je uveden FasTesT Report všech měřených vláken. První vlákno s poř.č. 000 není skutečné měření, ale referenční kalibrační hodnoty. Naměřené hodnoty se zdají být v pořádku. U vlákna č. 37 je útlum odrazu 25,36dB co značí, že daný konektor je v pořádku (z praxe doporučená hodnota je ≥25dB), ale vzhledem k ostatním konektorům, které mají hodnoty útlumu odrazem okolo -40dB, by si měl vyžádat naši pozornost. Optický mikroskop ukázal, že konektor je čistý, proto problém může být špatně zastrčený nebo špinavý PATCH panel.

Tabulka 2: Měření Chromatické a polarizační vidové disperze PMD na optické trase Botanická 68a – Rektorát MU

Botanická - Rektorát				
Vlákno	Chromatická disperze		PMD	
	[ps/nm] v 1550nm	[ps/nm] Maximální	ps	ps/√km
07	28,73	41,71	0,1032	0,0714
08	30,04	36,83	0,07	0,0463
31	36,30	51,58	0,1124	0,0778
32	34,21	49,75	0,04	0,0291
33	33,64	47,08	0,16	0,1073
34	37,81	45,07	0,21	0,1424
35	35,07	50,21	0,01	0,0096
36	35,06	51,76	0,11	0,0746
37	35,67	49,02	0,02	0,0152
38	34,94	49,72	0,07	0,0518
39	35,53	42,07	0,03	0,0233
40	37,28	51,31	0,06	0,0391
41	35,12	51,80	0,01	0,0094
42	36,43	47,58	0,02	0,0128
43	34,80	45,25	0,03	0,023
44	33,48	44,74	0,02	0,0119
45	35,21	49,99	0,03	0,0173
46	35,23	47,07	0,08	0,0555
47	35,42	41,28	0,01	0,0071
48	36,48	51,26	0,02	0,0166

Z výsledků měření je patrno, že naměřené hodnoty splňují limitní hodnoty pro budoucí vysokorychlostní přenosy a bylo by plýtvání finančními prostředky pro další redukci a omezení vlivu těchto disperzí. Tyto dobré výsledky jsou zapříčiněny velice krátkou vzdáleností (2094m) a na tomto optickém propojení bude možné v budoucnu nasadit vysokorychlostní přenosy 40 či 100Gbit/s. Pouze bych doporučil výměnu poškozených a očištění špinavých konektorů a jejich pravidelné čištění řpi každé manipulaci, popřípadě jejich kompletní výměnu za lépe konstruované šikmé konektory E200/APC, které mají menší útlum a l epší vlastnosti i odolnost proti znečištění. Vlákna č.7, 31, 33, 34 a 36 mají větší hodnotu PMD, proto bych tyto vlákna v budoucnu nepoužíval pro nejrychlejší přenosy a spíše bych využil jiná vlákna, které mají mnohem lepší parametry.

4.3. Analýza optického kabelu SM 48f Masarykův onkologický ústav Žlutý kopec – VŠ koleje nám. Míru

Obdobně jako při analýze prvního kabelu jsem nejprve zhodnotil stav konektorů a přehledně je zpracoval do tabulky. Při měření nebyli změřeny všechna vlákna v kabelu, ale pouze rezervní nepoužívané vlákna, které byly aktuálně bez provozu. Více jak polovina zkontrolovaných konektorů vykazovali známky nečistot či poškození, které mají zásadní vliv na přenos signálu a celkové vlastnosti celé optické trasy.

Tabulka 3: Přehled stavu optických konektorů na optické trase Masarykův onkologický ústav Žlutý kopec - VŠ koleje nám.Míru

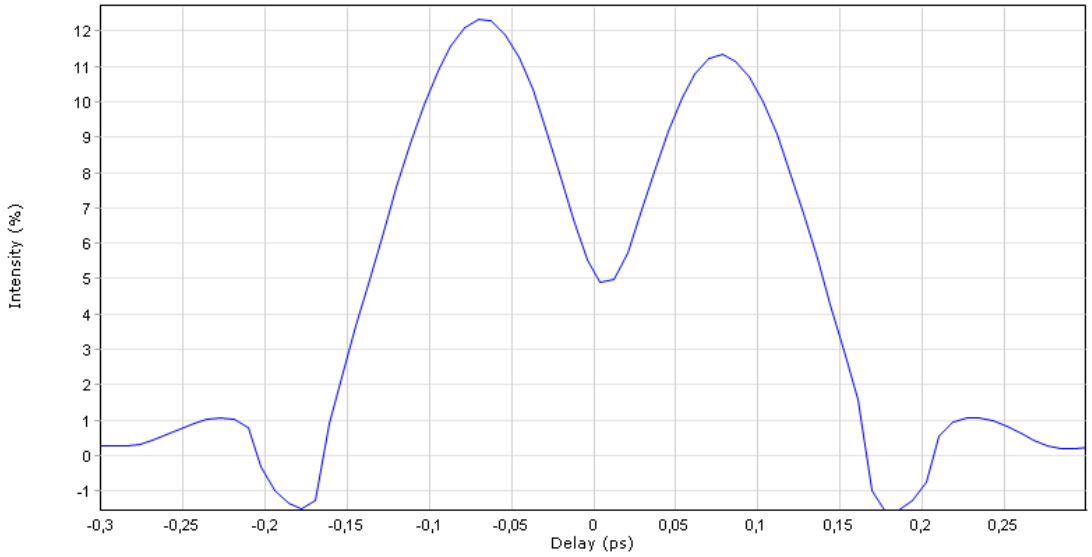
Masarykův onkologický ústav Žlutý kopec - VŠ koleje nám.Míru					
Vlákno	**Konektor**	**Vlákno**	**Konektor**	**Vlákno**	**Konektor**
01	OK	26	špinavý	38	mírně špinavý
02	špinavý	27	špinavý	39	OK
03	OK	28	špinavý	40	OK
04	mírně špinavý	29	mírně špinavý	41	OK
05	OK	30	OK	42	OK
06	ok	31	mírně špinavý	43	OK
19	OK	32	mírně špinavý	44	OK
20	OK	33	OK	45	OK
22	špinavý	34	mírně špinavý	46	špinavý
23	OK	35	OK	47	špinavý
24	OK	36	mírně špinavý	48	špinavý
25	mírně špinavý	37	OK		

Při analýze optických disperzí této trasy, její délka je 2624m, jsem dospěl k těmto poznatkům. Chromatická disperze na vlnové délce 1550nm byla menší než 60ps/nm, což je dostačující pro budoucí nasazení vysokorychlostních přenosů a teoreticky není zapotřebí její kompenzace. Vyšší hodnoty chromatické disperze byly dosaženy na vlnové délce 1625nm, kde již u některých vláken byla překročena tato hodnota, což by mohlo negativně ovlivňovat budoucí vysokorychlostní přenos na těchto vláknech. Nelze s určitostí stanovit, zda bude v budoucnu potřeba přikročit ke kompenzaci chromatické disperze u těchto vláken. Pokud by k tomu přeci jen mělo dojít, pokusím se zde nastínit možnosti takovéto kompenzace.

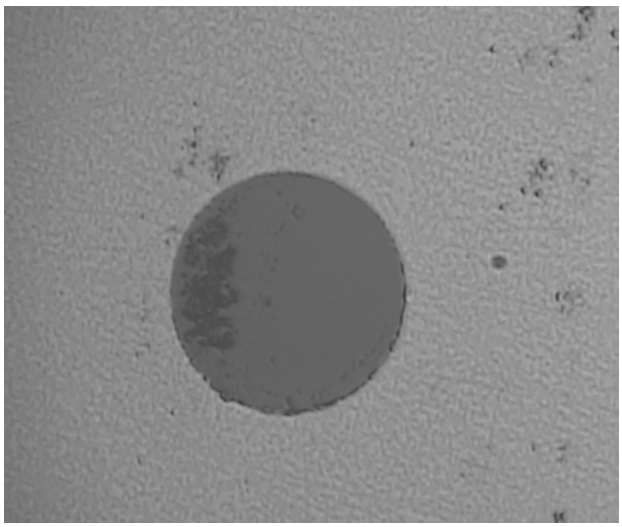
Jako nejvhodnější řešení se zde jeví použití kompenzačního DCF vlákna, které sice vnáší větší vložný útlum, ale při této krátké trase zde nebude problém s intenzitou záření. Toto řešení je výborné pro DWDM systémy, které pracují na rozsáhlé spektrální oblasti a je zde potřeba pro každou vlnovou délku provést kompenzaci. Taková starost u kompenzačních DCF vláken odpadá, protože kompenzují v celém vlnovém spektru. Z mého pohledu velkou nevýhodou takového řešení je jednostrannost. Pokud provedeme kompenzaci u jednoho vlákna a z důvodu optimalizaci sítě je nutné stávající provoz přesunout na jiné, je nutné pořídit

opět nové kompenzační DCF vlákno s požadovanými parametry. Ekonomicky výhodnější z dlouhodobého hlediska je kaskáda čerpovaných Braggovských mřížek, které dnes dokážou pokrýt požadovaný rozsah vlnových délek. Navíc jsou tyto kompenzátory laditelné, a proto je lze použít opakovaně na trase dle potřeby či při změně trasy (přeložení optického kabelu, výměna optického kabelu atd.) a tím dokážou šetřit vynaložené náklady na kompenzaci.

Největší hodnota polarizační vidové disperze byla naměřena u vlákna č. 28. Při bližším zkoumání grafu průběhu zpožděného impulzu jsme zjistili, že impulz se „rozdělil“ a dorazil jako dva po sobě následující impulzy. Tyto „dva hrby“ byly způsobeny odrazem na konektorech na velice krátké trase, většinou na Pigtailech. Na špinavém či poškozeném konektoru vznikne odraz, část signálu se vrací zpět, kde se opět odrazí od druhého konektoru a výsledný impulz vypadá jako dva navzájem posunuté. Tento jev velice negativně ovlivňuje přenos na takové trase a je nutné tyto konektory vyhledat a vyčistit či vyměnit. Optický mikroskop potvrdit moji domněnku špinavého konektoru.



Obr. 9: Měření polarizační vidové disperze PMD na vláknu č. 28



Obr. 10: Snímek vlákna č. 28 z optického mikroskopu

Tabulka 4: Přehled Měření Chromatické a polarizační vidové disperze PMD na optické trase Masarykův onkologický ústav Žlutý kopec - VŠ koleje nám.Míru

Masarykův onkologický ústav Žlutý kopec - VŠ koleje nám. Míru				
Vlákno	Chromatická disperze		PMD	
	[ps/nm] v 1550nm	[ps/nm] Maximální	ps	ps/√km
01	49,15	57,14	0,05	0,0290
02	52,21	61,88	0,05	0,0268
03	48,43	67,62	0,04	0,0262
04	51,81	60,24	0,03	0,0168
05	50,47	64,31	0,04	0,0245
06	51,14	62,94	0,03	0,0167
19	52,44	62,65	0,02	0,0095
20	47,81	68,13	0,01	0,0072
22	52,20	60,35	0,03	0,0164
23	50,90	62,94	0,05	0,0281
24	47,70	67,51	0,04	0,0254
25	52,01	59,74	0,06	0,0358
26	47,94	69,21	0,03	0,0205
27	47,92	68,34	0,01	0,0054
28	47,44	65,57	0,09	0,0504
29	47,38	64,77	0,04	0,0252
30	49,65	58,05	0,10	0,0577
31	49,63	56,37	0,09	0,0513
32	51,33	59,64	0,04	0,0208
33	48,55	68,60	0,02	0,0120
34	48,68	65,92	0,05	0,0305
35	46,97	66,31	0,01	0,0078
36	47,23	65,16	0,04	0,0233
37	47,63	64,67	0,01	0,0085
38	48,22	58,32	0,02	0,0107
39	49,43	60,52	0,01	0,0071
40	51,57	56,26	0,02	0,0143
41	47,72	68,00	0,03	0,0201
42	48,66	66,40	0,01	0,0077
43	49,20	57,43	0,04	0,0226
44	48,07	64,81	0,05	0,0282
45	49,46	63,23	0,05	0,0305
46	50,92	56,28	0,02	0,0114
47	47,79	66,26	0,02	0,0146
48	50,57	57,39	0,01	0,0059

4.4. Analýza optického kabelu SM 36f Lipová ESF MU - Poříčí PdF MU

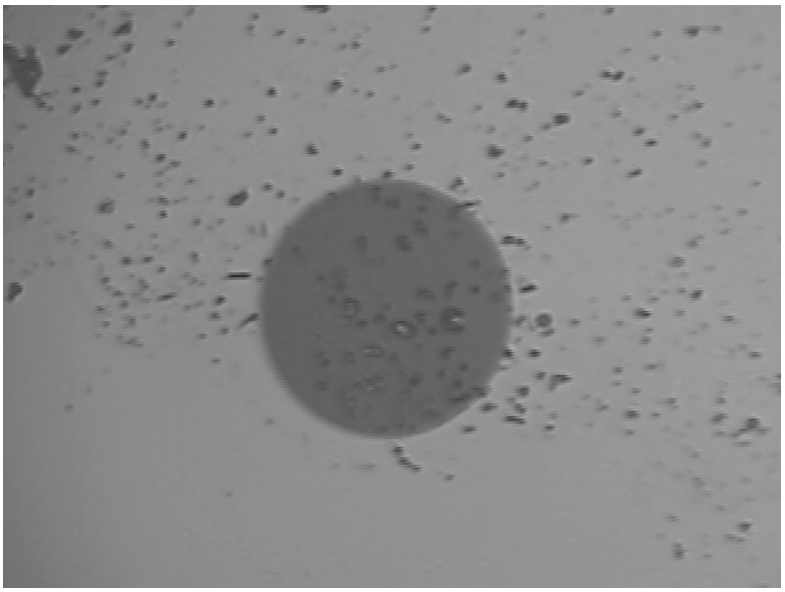
Poslední analyzovaná trasa optického kabelu z ESF MU na ulici Lipové do PdF MU na ulici Poříčí nepřinesla nové překvapivé výsledky v porovnání s předchozími dvěma optickými propoji. Opět hodnoty chromatické disperze okolo vlnové délky 1550nm byly dostatečné na to, aby vyhověly přísné normě ITU-T a plně vyhověli budoucím nárokům na optické cesty pro vysokorychlostní přenosy.

Tabulka 5: Přehled Měření Chromatické a polarizační vidové disperze PMD na optické trase Lipová ESF MU - Poříčí PdF MU

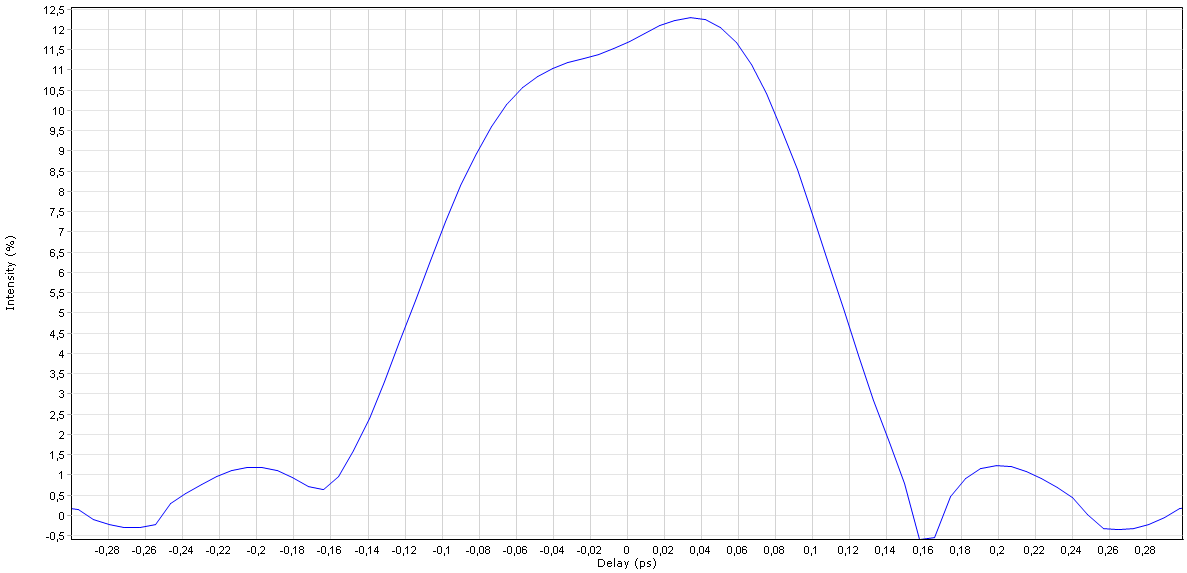
Lipová ESF MU - Poříčí PdF MU				
Vlákno	Chromatická disperze		PMD	
	[ps/nm] v 1550nm	[ps/nm] Maximální	ps	ps/√km
03	43,92	55,92	0,02	0,0127
04	46,68	63,01	0,03	0,0202
05	47,33	53,33	0,02	0,0093
06	47,23	54,49	0,02	0,0110
07	46,71	56,93	0,03	0,0163
08	46,81	56,47	0,01	0,0092
09	45,38	61,49	0,03	0,0172
10	47,80	53,61	0,04	0,0240
13	43,79	53,92	0,04	0,0265
14	42,47	61,23	0,03	0,0157
19	46,78	58,28	0,01	0,0066
20	44,98	54,77	0,03	0,0206
21	44,16	54,26	0,02	0,0139
22	46,96	54,19	0,03	0,0174
23	47,47	56,31	0,02	0,0099
24	45,71	52,88	0,03	0,0211
25	43,93	52,89	0,04	0,0236
26	41,20	58,53	0,03	0,0184
27	43,12	54,74	0,01	0,0075
28	43,11	55,27	0,03	0,0155
29	43,54	61,46	0,02	0,0131
30	41,27	59,70	0,02	0,0144
31	44,35	60,48	0,11	0,0660
33	41,69	58,69	0,06	0,0368
34	43,40	60,00	0,02	0,0115
35	46,58	55,14	0,03	0,0174
36	42,34	57,13	0,02	0,0149

Na vlnové délce 1625nm byly hodnoty CD opět vyšší jako v případě optického kabelu SM 48f Masarykův onkologický ústav Žlutý kopec – VŠ koleje nám. Míru. I zde bych doporučil primárně využít vlákna, která mají nejmenší hodnoty zpoždění popřípadě využít laditelného kompenzátoru chromatické disperze na principu kaskády braggovských mřížek.

Optické vlákno č. 31 opět vykazovalo velkou hodnotu polarizační vidové disperze PMD 0,11 ps. Při zkoumání průběhu jsem opět narazil na tvar impulzu připomínající zdvojení impulzu. Optický mikroskop odhalil značně zašpiněné konektor, který je příčinou tohoto jevu.



Obr. 11: Snímek vlákna č. 31 z optického mikroskopu



Obr. 12: Měření polarizační vidové disperze PMD na vláknu č. 31

5. Simulace optické trasy

5.1. Úvod

Pro simulaci optické trasy jsem vybral nejdelší trasu. Jedná se o úsek optického kabelu SM 48f Masarykův onkologický ústav Žlutý kopec – VŠ koleje nám. Míru která měří 3,36km. Po zamyšlení nad touto krátkou trasou a z důvodu prezentování vlivu optických disperzí, jsem dospěl k závěru, že bude nejvhodnější pracovat s naměřenými parametry jednotlivých vláken a stanovit maximální teoretickou délku optických vláken za předpokladu, že parametry takovéhoto optického spoje budou odpovídat parametrům naměřeným, ovšem vztažených na kilometr trasy. Zdá se mi to jako nejlepší řešení pro pochopení a jasnou demonstraci kvality daných optických vláken a vliv kompenzace optických disperzí.

5.1. Komponenty pro simulaci

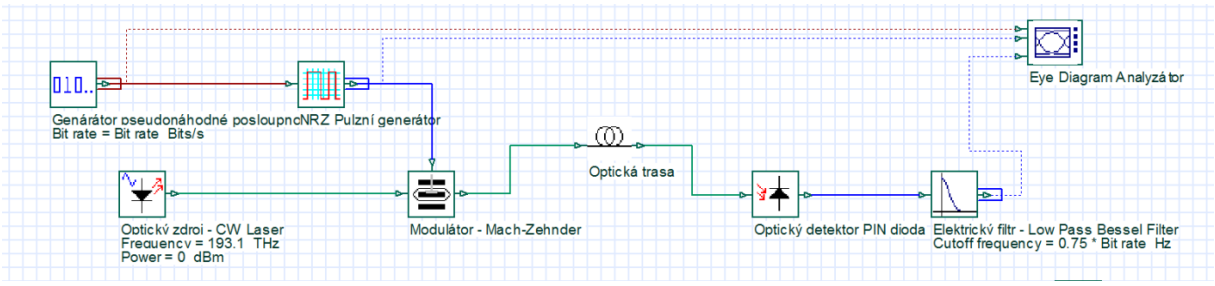
Při simulaci jsem zaměřil na reálné prvky optických sítí včetně jejich útlumu a typických vlastností a ztrát. Jako nejvhodnější simulační program jsem zvolil OptiSim verze 9 od spol. Optiwave, který má obsažen v rozsáhlé databázi komponenty s parametry, které jsou nejpoužívanější u skutečných sítí. Dále umožňuje editaci parametrů do nejmenších detailů, a proto lze vytvořit skutečně přesný model sítě se všemi aktivními či pasivními prvky. Já jsem zvolil pro simulaci základní komponenty, které jsou přehledně shrnuty v tabulce č.6

Tabulka 6: Přehled použitých komponentů a parametrů pro simulace optických disperzí

Optický zdroj - Laser	CW, Lorentzian, 1550 nm, 0 dBm
Modulátor	Sin2 MZ, Excess Loss 3 dB
Vysílač	NRZ, PRBS degree 9
Přijímač	Photo Dioda PIN, 0,875 A/W
Elektrický filtr	Bessel 4 pole, 8 Ghz
Simulace	VBS full, 40 Gb/s

5.1. Stanovení maximální délky optických vláken bez kompenzace

Simulační program umí pracovat k režimu rozmítání jakéhokoli parametru, což bylo pro naši situaci velice výhodné, nebylo nutné vytvářet pro každé vlákno simulační schéma. Vytvořil jsem projekt s 35 parametry, což odpovídá 35 měřeným vláknům. Každému vláknu jsem nastavil jeho chromatickou i polarizační vidovou disperzi, která byla naměřena a takto vzniklý model dále sloužil pro všechny následné simulace. Pro hledání největší možné délky optického vlákna jsem využil integrovaného modulu optimalizačních metod hledání extrémů. V mém případě jsem jako nejvhodnější vybral zjednodušenou metodu Monte-Carlo. Hlavní hledaný parametr je maximální délka vlákna a jako reference byla nastavena min. chybovost přenosu BER = $1 \cdot 10^{-13}$, což odpovídá doporučení ITU-T pro vysokorychlostní 40Gbit/s přenosy. Dále jsme nastavili přesnost pro chybovost BER na 4 d esetinná místa. Tímto způsobem jsem dosáhli maximální možných délek pro jednotlivá vlákna v optickém kabelu. V tabulce č.7 jsou shrnuty všechny nastavené parametry a dosažené výsledky.

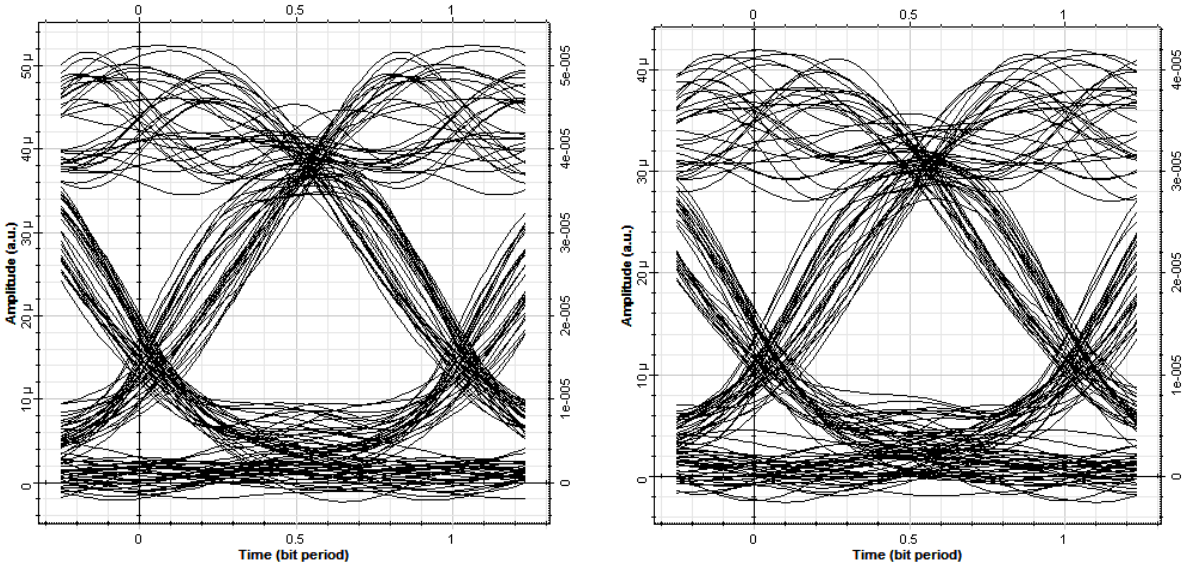


Obr. 13: Simulační model optické trasy

V tabulce jsou zobrazeny parametry chromatické i polarizační vidové disperze. Pokud se zaměříme na dosažené délky vláken a porovnáme je s koeficienty optických disperzí pro jednotlivá vlákna, zjistíme, že daný simulační model se snaží o simulaci skutečného optického vlákna a zanáší do modelu pro koeficienty PMD určitou nahodilost či rozsah, to způsobuje, že nejdelší dosažená délka u vlákna č.22 75,36km neodpovídá nejlepším hodnotám koeficientů PMD či CD a naopak nejkratší dosažená délka 70km neodpovídá nejhorším koeficientům.. Tento způsob simulací vlastností optického vlákna lze přenastavit tak, aby se choval přesně podle nastavených hodnot a nezanášel do s imulace nahodilost, ovšem myslím si, že je vhodnější se co nejblíže přibližovat skutečným vlastnostem optických vláken.

Tabulka 7: Přehled nastavených parametrů optických disperzí a dosažení maximální délky optického vlákna

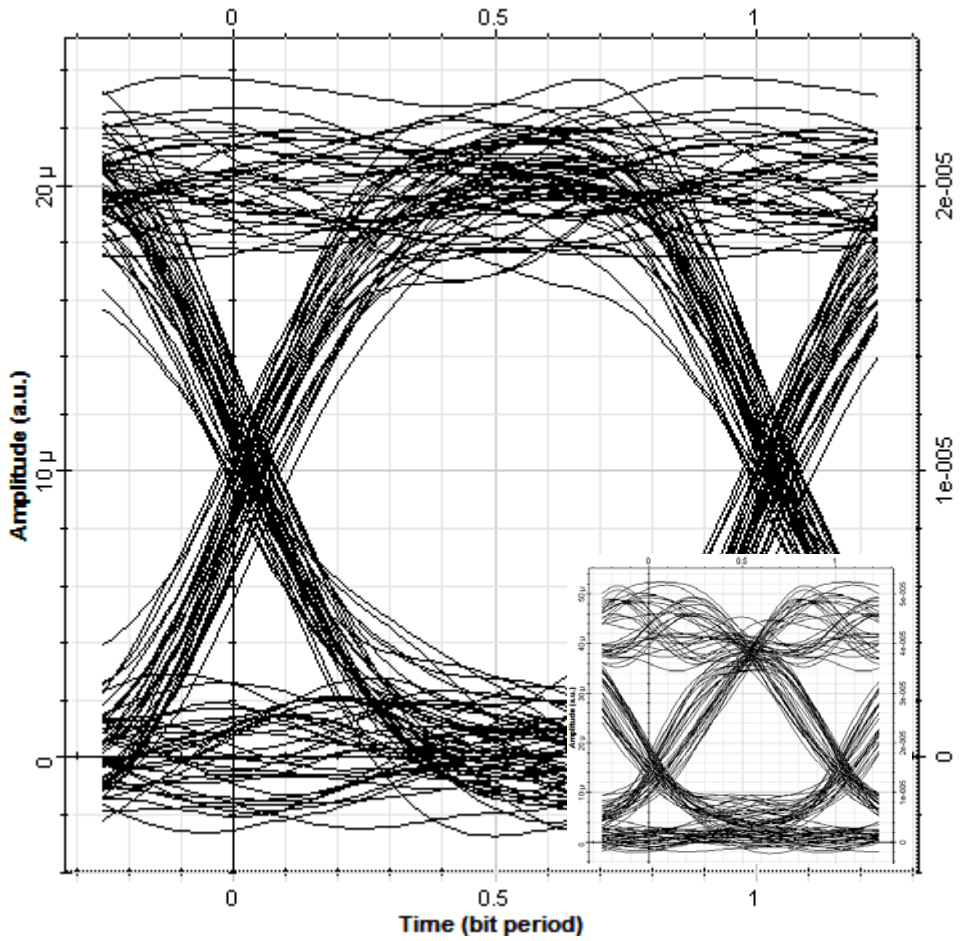
Masarykův onkologický ústav Žlutý kopec - VŠ koleje nám,Míru							
Vlákno	Chromatická disperze			PMD			Dosažená délka vlákna
	[ps/nm] v 1550nm	[ps/nm] Maximální	[ps/nm/km] v 1550nm	ps	ps/√km	ps/km	km
01	49,15	57,14	14,63	0,05	0,0290	0,0149	74,01
02	52,21	61,88	15,54	0,05	0,0268	0,0149	70,76
03	48,43	67,62	14,41	0,04	0,0262	0,0119	72,90
04	51,81	60,24	15,42	0,03	0,0168	0,0089	72,91
05	50,47	64,31	15,02	0,04	0,0245	0,0119	71,00
06	51,14	62,94	15,22	0,03	0,0167	0,0089	74,59
19	52,44	62,65	15,61	0,02	0,0095	0,0060	70,00
20	47,81	68,13	14,23	0,01	0,0072	0,0030	74,06
22	52,20	60,35	15,54	0,03	0,0164	0,0089	75,36
23	50,90	62,94	15,15	0,05	0,0281	0,0149	72,37
24	47,70	67,51	14,20	0,04	0,0254	0,0119	74,83
25	52,01	59,74	15,48	0,06	0,0358	0,0179	71,24
26	47,94	69,21	14,27	0,03	0,0205	0,0089	74,24
27	47,92	68,34	14,26	0,01	0,0054	0,0030	74,22
28	47,44	65,57	14,12	0,09	0,0504	0,0254	71,53
29	47,38	64,77	14,10	0,04	0,0252	0,0119	72,35
30	49,65	58,05	14,78	0,10	0,0577	0,0298	74,43
31	49,63	56,37	14,77	0,09	0,0513	0,0268	74,43
32	51,33	59,64	15,28	0,04	0,0208	0,0119	70,78
33	48,55	68,60	14,45	0,02	0,0120	0,0060	73,48
34	48,68	65,92	14,49	0,05	0,0305	0,0149	75,29
35	46,97	66,31	13,98	0,01	0,0078	0,0030	72,78
36	47,23	65,16	14,06	0,04	0,0233	0,0119	74,62
37	47,63	64,67	14,18	0,01	0,0085	0,0030	72,87
38	48,22	58,32	14,35	0,02	0,0107	0,0060	72,55
39	49,43	60,52	14,71	0,01	0,0071	0,0030	75,08
40	51,57	56,26	15,35	0,02	0,0143	0,0060	70,49
41	47,72	68,00	14,20	0,03	0,0201	0,0089	75,17
42	48,66	66,40	14,48	0,01	0,0077	0,0030	71,82
43	49,20	57,43	14,64	0,04	0,0226	0,0119	73,98
44	48,07	64,81	14,31	0,05	0,0282	0,0149	74,70
45	49,46	63,23	14,72	0,05	0,0305	0,0149	72,36
46	50,92	56,28	15,15	0,02	0,0114	0,0060	74,73
47	47,79	66,26	14,22	0,02	0,0146	0,0060	74,26
48	50,57	57,39	15,05	0,01	0,0059	0,0030	72,07
průměr	48,93	62,22	14,56	0,03	0,0205	0,01012	73,41



Obr. 14: Diagram oka pro vlákno č.19 (dosažená délka 70km) a digram oka pro vlákno č.22 (dosažená délka vlákna 75,36km)

Pokud porovnáme jednotlivé diagramy ok pro každé optické vlákno, uvidíme několik zásadních společných vlastností. Všechny digramy jsou velice podobné a pro přenášený signál téměř identické, to je způsobeno, že jednotlivé odchylky jsem promítli do různých délek optických vláken. Dále je patrno, že digram oka je v horní části značně rozostřen a diagram oka je mírně přivřený a deformovaný. Optické disperze a jejich vliv je zde velice zřetelný. Začíná se zde projevovat i vliv útlumu optického vlákna, který se podepisuje na intenzitě detekovaného signálu. Pokud bychom měli trasu s těmito parametry, stálo by za zamyšlení aplikovat kompenzaci minimálně chromatické disperze, která by nám zaručila méně zkreslený detekovaný signál a menší požadavky na plánovanou přenosovou technologii a v neposlední řadě by ovlivnila cenu celého plánovaného systému.

Pro názornou ukázku jsem při simulaci použil kaskádu braggovských mřížek naladěných výpočtem (stejný postup bychom uplatnili v praxi) s vložným útlumem 3dB. Z diagramu oka (obr. 15) je patrné výrazné zlepšení vlastností. Pro porovnání jednotlivých parametrů oka jsem vložil zmenšený digram oka, kde nebyla použita kompenzace pomocí kaskády braggovských mřížek. Pro tento případ by nebylo vhodné využití kompenzačních vláken DCF vzhledem k většímu vložnému útlumu bychom překročili hranici dostatečné výkonové rezervy pro detektor a nedosáhli bychom lepších výsledků. Tento problém se dá vyřešit navýšením výkonu vysílače, ovšem tím bychom změnili parametry daného modelu a výsledek by nebyl tak názorný a jednoznačný.



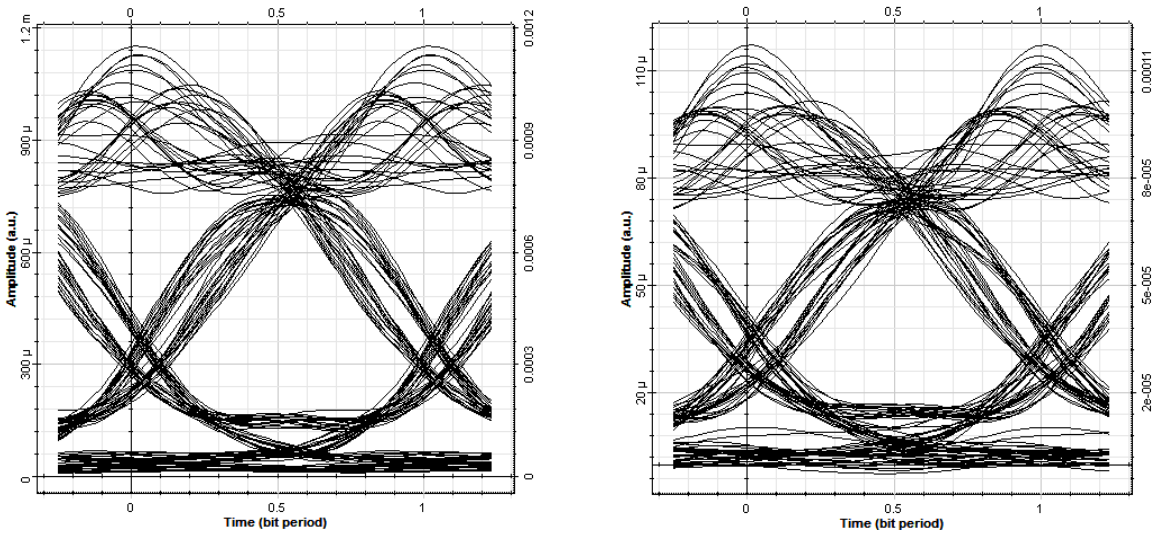
Obr. 15: Diagram Oka pro vlákno č.22 kompenzace pomocí kaskády Braggovských mřížek s porovnáním bez kompenzace.

5.2. Výběr a stanovení konkrétní trasy

Při analýze konkrétních optických tras metropolitní akademické sítě jsme zjistili velice dobré parametry optických vláken a vzhledem k velice krátkým vzdálenostem optických tras zde nebyl patrný velký vliv optických disperzí. Během simulací jsme zjistili teoretickou nejdelší možnou délku optické trasy pro 40Gbit/s přenosový systém. Tato dosažená délka se pohybuje v rozmezí 70 – 75km. Z těchto poznatků jsem vyhodnotil jako ideální řešení optickou trasu Brno – Olomouc. Celková délka této optické trasy je 80km. Budeme předpokládat, že na této trase byly použity stejná optická vlákna, která jsme použili v předchozích simulacích a které vychází z reálných hodnot skutečných tras. Již z tohoto zadání lze usoudit, že není možné dosáhnout takové vzdálenosti bez kompenzace optických disperzí a j ejich vlivů na přenášený signál a nejspíše bude nutné kompenzovat nejenom vliv chromatické disperze ale i polarizační vidové disperze. Nejprve bych se chtěl soustředit pomocí běžně dostupných kompenzátorů a jejich parametrů na kompenzaci chromatické disperze a následně na takto upravenou trasu zkusím aplikovat kompenzační model PMD, který bude simulovat aktivní kompenzátor polarizační vidové disperze.

5.3. Simulace optické trasy Brno - Olomouc

Simulační model optické trasy Brno – Olomouc vychází z předchozího simulačního modelu, u kterého byly nastaveny všechny důležité parametry optických disperzí a vlastností optického vlákna. Délka této trasy je 80km. Z předchozích simulací je patrno, že bude nejspíše nutné navýšit výkon signálu detekovaný detektorem a to buď výkonnějším laserem na začátku trasy popř. volbou vhodného optického zesilovače na konci optické trasy. Dále zde vyvstává otázka, zda je opravdu nezbytně nutné investovat nemalé finanční náklady do kompenzačního systému a zda nebude dostačují pouhé navýšení výkonové úrovně přenášeného signálu. Na všechny tyto otázky se pokusím najít přesvědčivé odpovědi.



Obr. 16: Diagram Oka pro 80km trasu bez kompenzace, vpravo s EDFA zesilovačem (zisk 10dBm), vlevo laser s vysílacím výkonem 5dBm

Na prvním pohled stejně vypadající diagramy mají zásadní rozdíly a to v měřítkách. Pravý diagram odpovídá optické trase Brno – Olomouc (vzdálenost 80km) kde nebyla použita kompenzace optických disperzí a byl zde použit optický zesilovač EDFA se ziskem 10dBm. Chybovost BER je sice dostatečná ($1{,}01 \cdot 10^{-15}$) avšak Q-faktor je 7,98. Pochopitelně lepších výsledků dosáhneme pokud zvýšíme výkon signálu na začátku trasy (Chybovost BER $3{,}97 \cdot 10^{-15}$ a Q-faktor 8,54). Otázkou je, zda tato trasa je připravena pro nasazení nových metod přenosu signálu jako jsou DWDM systémy. Myslím si, že nemůžeme zaručit fungování vysokorychlostních systému či DWDM vzhledem k velkému zkreslení signálu a nedostatečný odstup signál šum, který je požadován pro 40Gbit/s přenosové systémy 25dB[19].

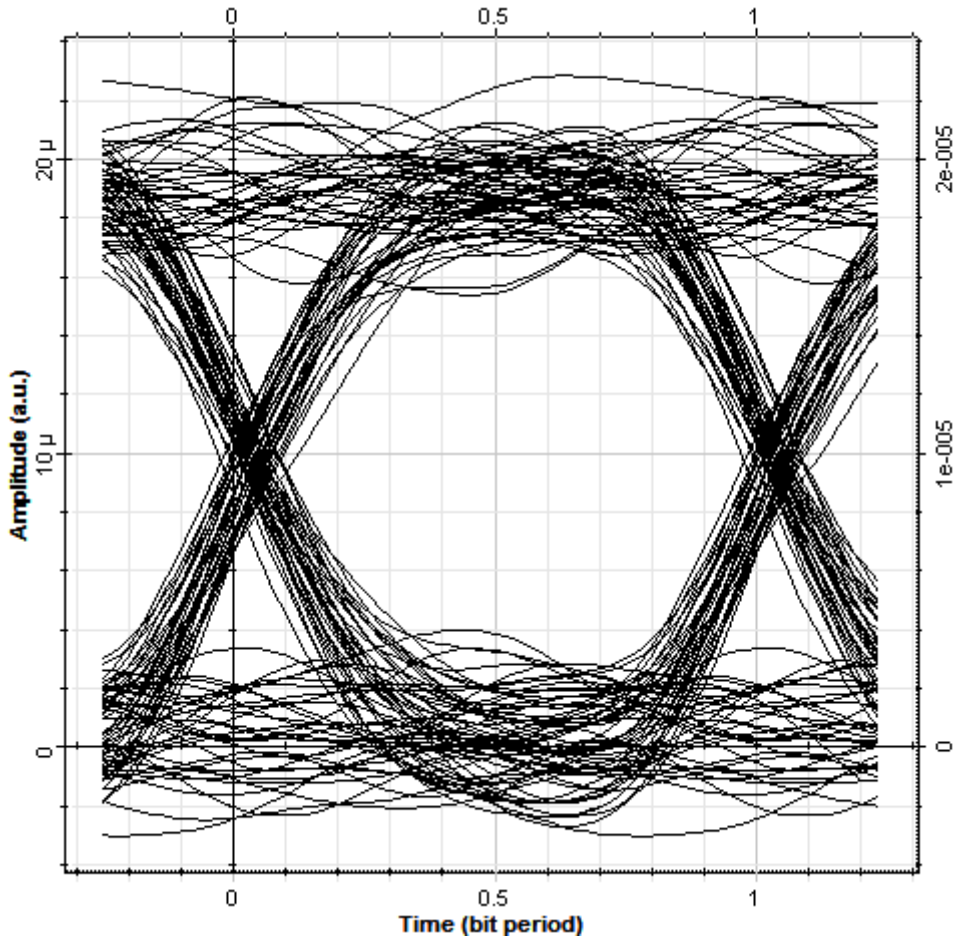
5.3.1. Kompenzace optické trasy za pomocí DCF vlákna

Pro kompenzaci použijeme DCF vlákno, které má zápornou hodnotu chromatické disperze rovnu $D_K = -100$ps/nm×km . Pro získání velké záporné disperze musí mít kompenzační vlákno DCF plochu jádra od 20 do 30 μm ^{2}. To má velký vliv

na útlum tohoto vlákna a od povídá 0,5dB/km. Pokud má optické vlákno trasy chromatickou disperzi rovnu D_T= 15,61ps/nm×km a víme, že délka vlákna je L_T=80km. Snadno dopočítáme požadovanou délku kompenzačního vlákna (4).

$$L_K = \frac{D_T \cdot L_T}{D_K} = \frac{15{,}61 \cdot 80}{100} = 12{,}488km \qquad (4).$$

Při útlumu 0,5dB/km kompenzačního vlákna DCF bude celkový útlum vlákna roven 6,244dB. Pro pokrytí zrát můžeme zvýšit výstupní úroveň signálu laseru na 5dBm nebo použít optický zesilovač EDFA po kompenzaci disperze se ziskem 10dBm. Navrhované hodnoty vychází z běžně dostupných V praxi rozhoduje cena, a proto je důležité se zamyslet nad ekonomičností. Pokud máme možnost navýšit úroveň výstupního vysílaného signálu (některé lasery mají možnost regulace či změny výkonu), pak bych se přikláněl využít tuto možnost.

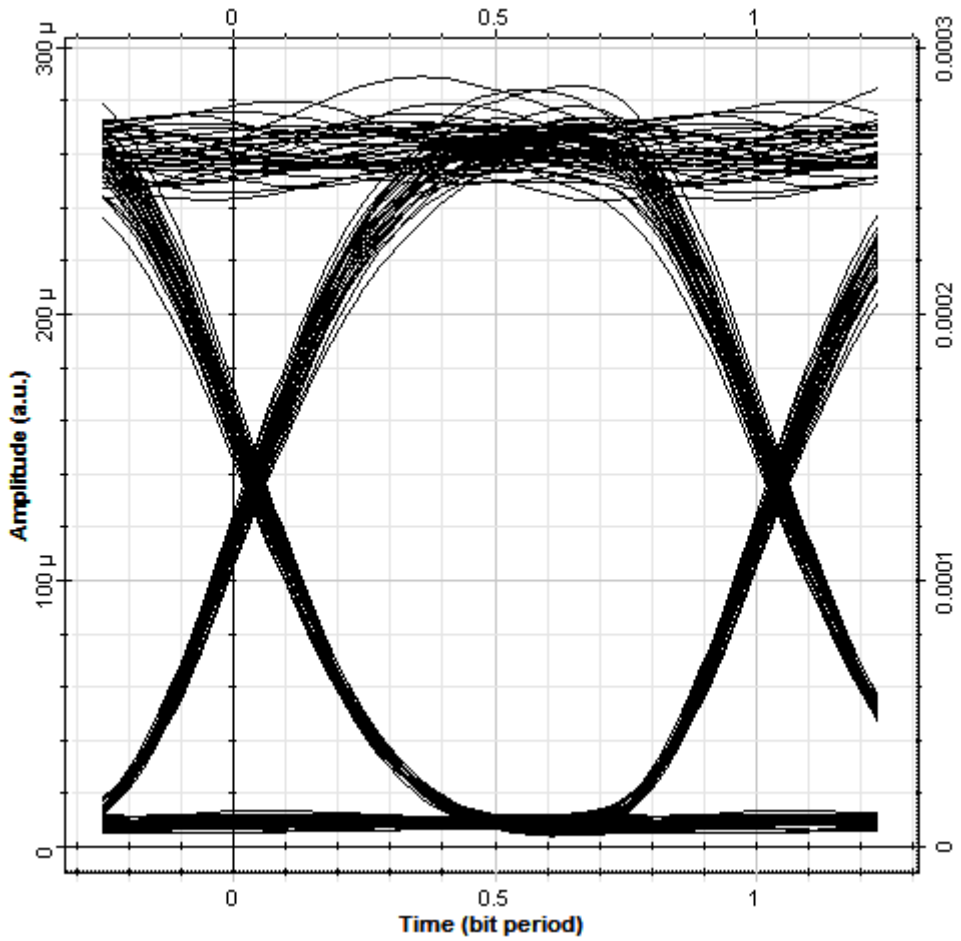


Obr. 17: Diagram Oka optickou trasu Brno – Olomouc s kompenzací chromatické disperze pomocí DCF vlákna, úroveň vysílaného signálu 5dBm

Z diagramu oka je patrné výrazné zlepšení všech parametrů, chybovost BER je $3 \cdot 10^{-13}$, Q-parametr 7,19. Diagram oka není nikterak deformován a dl e jeho parametrů můžeme soudit, že tato kompenzace chromatické disperze je dostatečná.

Problém by mohl nastat při nasazování DWDM systémů, které potřebují větší odstup signál šum. U těchto přenosových systémů bychom mohli mít problémy a pořízení výkonnějšího vysílače pro DWDM systémy je velice nákladné. Dále pokud se budeme zamýšlet nad otázkou eliminace nákladů v budoucnu, nastane zde problém při změně trasy např. vlivem přeložení trasy či jiné konfigurace opravy a pod., kdy kompenzační vlákno bude nadále nejspíše nepoužitelné. Tuto variantu bych volil pouze v případě, pokud by to bylo skutečně aktuálně velice výhodné.

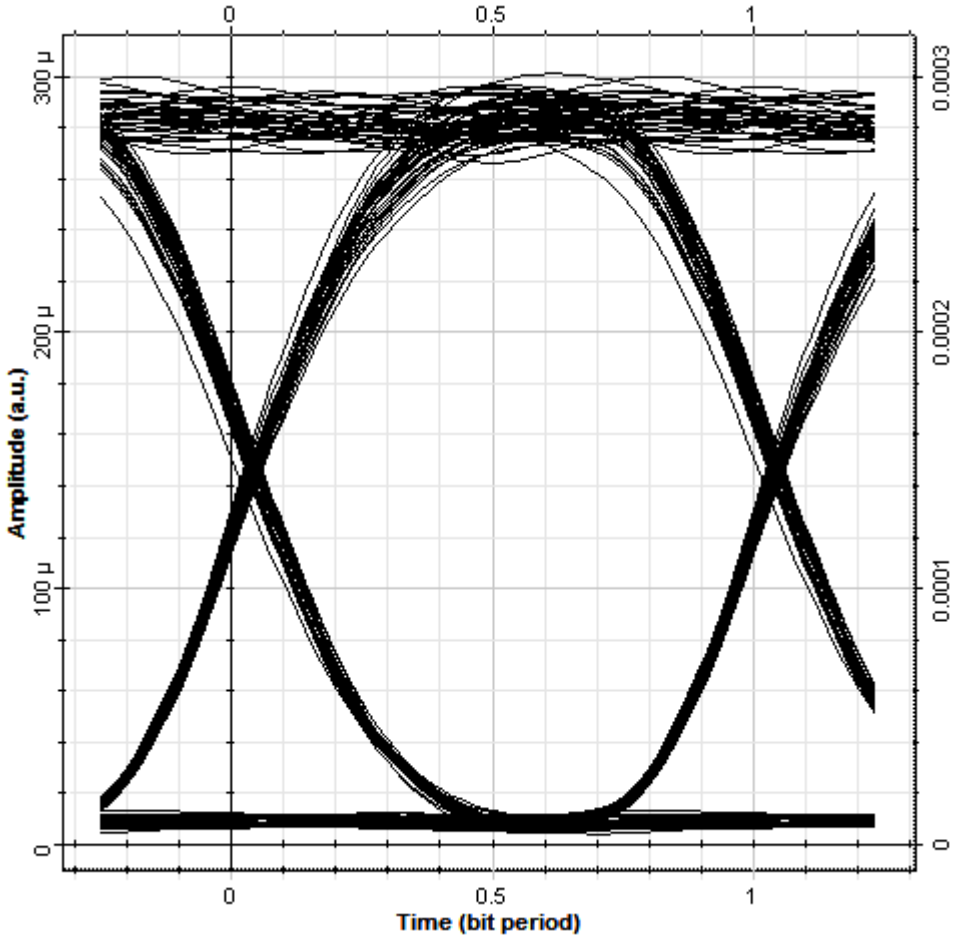
Další možností pokrytí ztrát kompenzačního DCF vlákna je použití např. EDFA zesilovače, který dnes dokáže pokrýt celé C popř. i L pásmo a zajistí dostatečnou výkonnou rezervu na detektoru. Na první pohled je vidět výborné parametry diagramu oka, chybovost BER je $1{,}35 \cdot 10^{-153}$, Q-faktor 26,36. Optická trasa Brno – Olomouc s těmito parametry je připravená na nasazení nových moderních přenosových systémů, které jsou náchylné na zkreslování signálu.



Obr. 18: Diagram Oka s optickou trasu Brno – Olomouc s kompenzací chromatické disperze pomocí DCF vlákna, úroveň EDFA zesilovače 10dBm

Již z těchto výsledků vidíme jednu zásadní věc a to skvělé vlastnosti optických vláken, které mají velice dobré parametry polarizační vidové disperze a i velikost chromatické disperze odpovídá dnešním optickým vláknům. V diagramu oka je vidět vliv polarizační vidové disperze, avšak u této trasy byl zásadní vliv chromatické

disperze. Problém při kompenzaci polarizační vidové disperze je v nedostupnosti levných kompenzátorů, což je způsobeno hlavně faktem, že se jedná o veličinu náhodnou, a proto její kompenzace nemůže být statická, musí být využito nějakého aktivního zařízení s adaptivní změnou regulace časového zpoždění jednotlivých vidů v obou polarizačních rovinách. Abych demonstroval vliv polarizační vidové disperze, provedl jsem simulaci s kompenzací pomocí DCF vláknem a do trasy jsem zařadil nově vytvořený prvek, který simuloval kompenzaci hodnot PMD s úspěšností 50%, tzn. že hodnota PMD na konci trasy byla poloviční oproti původním hodnotám bez kompenzace. Abych dosáhl této kompenzace, vytvořil jsem fiktivní optické vlákno, které mělo poloviční délku (40km), žádný útlum, ani chromatickou disperzi a hodnoty PMD měl stejno stejné, všem záporné. Vytvořil jsem spřažení mezi vláknem trasy a kompenzátorem, aby náhodné hodnoty PMD nastavoval stejně o obou.



Obr. 19: Diagram Oka optické trasy Brno – Olomouc s kompenzací chromatické disperze pomocí DCF vlákna a PMD kompenzátoru, úroveň EDFA zesilovače 10dBm

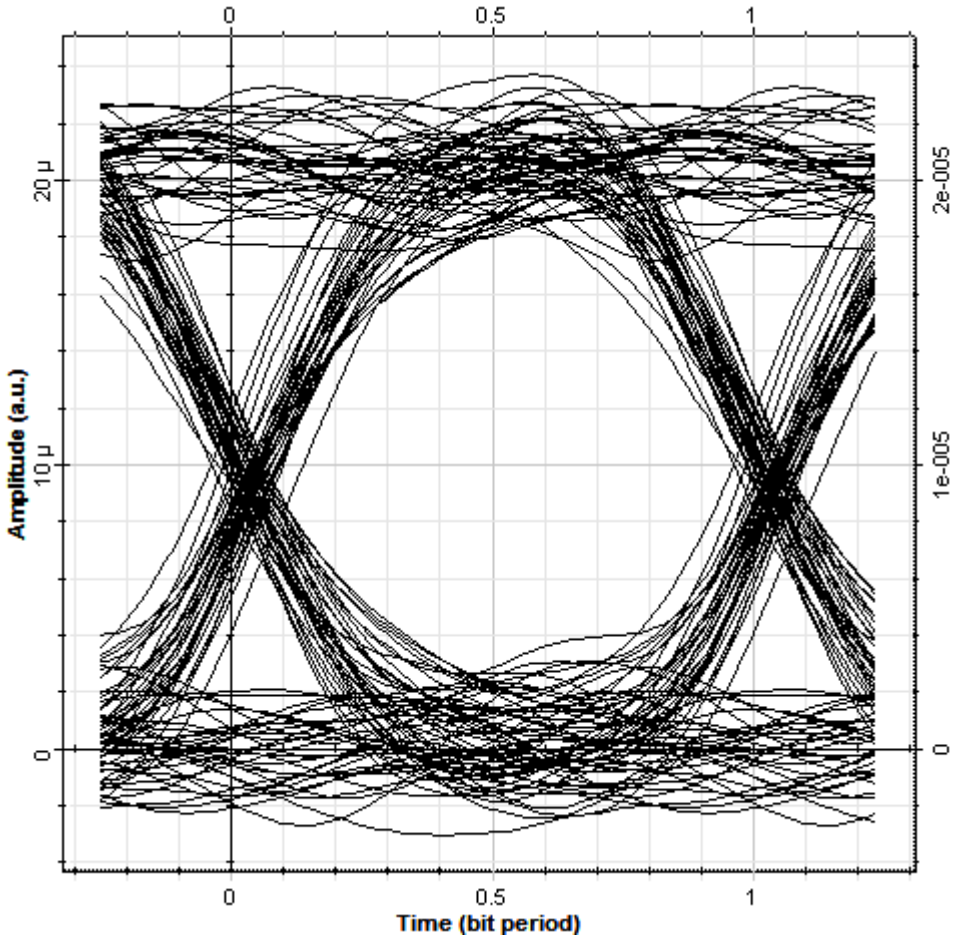
Výsledky simulace dopadly dle očekávání. Dvojnásobně nižší hodnoty chybovost BER je $8{,}92 \cdot 10^{-232}$ a Q-faktor 32,48. Zde je vidět, že vliv PMD se značně projevuje na vysokorychlostních přenosech, ale vzhledem k nízkým hodnotám na naší trase a protože trasa je uložena v zemi, kde je vliv teploty a okolních vlivu značně eliminován, předpokládáme, že nebude nezbytně nutné nasazování nějakého experimentálního systému pro kompenzaci PMD. Pokud by tato skutečnost nastala a bylo by nutné omezit vliv PMD, pokusil bych se najít i jiné možnosti, které nemusejí být takto značně nákladné. Například u naší trasy Brno – Olomouc, kde

tato trasa vede přes Vyškov, bych navrhoval pokud by to bylo technicky možné, zde umístit člen obnovy signálu. Ten pr acuje na pr incipu detekce optického signálu, převod na elektrický jeho vyhodnocení a opětovný převod na optický, tím eliminujeme vliv předešlého úseku trasy, vysílací výkon nemusí být navyšován a celý přenosový systém bude levnější, protože zde nebude potřeba používat dražší zařízení, které je schopno pracovat s větším zpožděním či zkreslením signálu. Je zde nutné počítat s časovým zpožděním přenosu signálu, který vznikne touto rekonstrukcí signálu a pro některé případy to nemusí být ideální řešení.

Navíc platí, že dopředná i následná kompenzace pomocí DCF vlákna i aktivního PMD kompenzátoru dosahuje téměř shodných výsledků, a proto se nemusíme se obávat při obousměrném provozu, popř. pokud nám podmínky nedovolí jednu nebo druhou možnost.

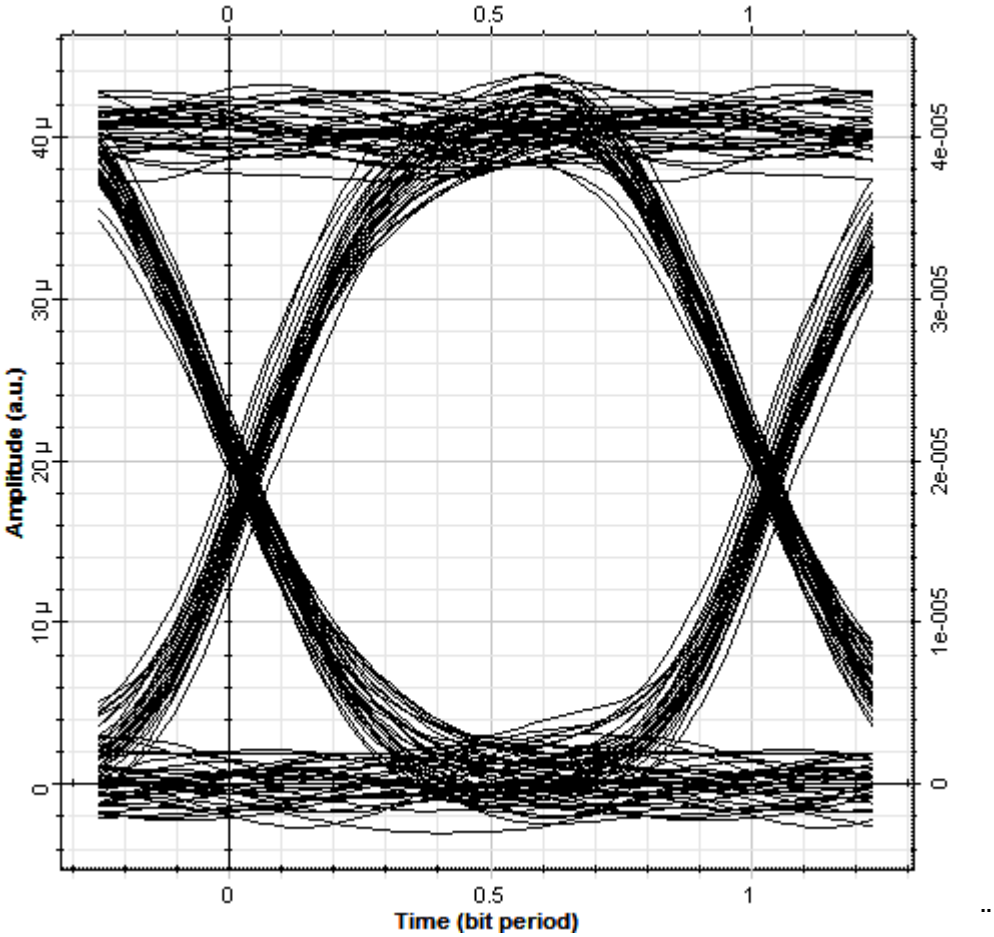
5.3.1. Kompenzace optické trasy za pomocí čerpované Braggovy mřížky

Jednu ze zásadních výhod oproti kompenzačním vláknům je v malém vložném útlumu, který čerpovaná Braggova mřížka vytváří. Nevýhodou je rozsah vlnových délek, pro které může být použita. Dnes pokrok ve vývoji Braggových mřížek pokročil natolik, že dnes existují kompenzátory s kaskádou laditelných Braggových mřížek plynule v celém rozsahu C i L pásma.



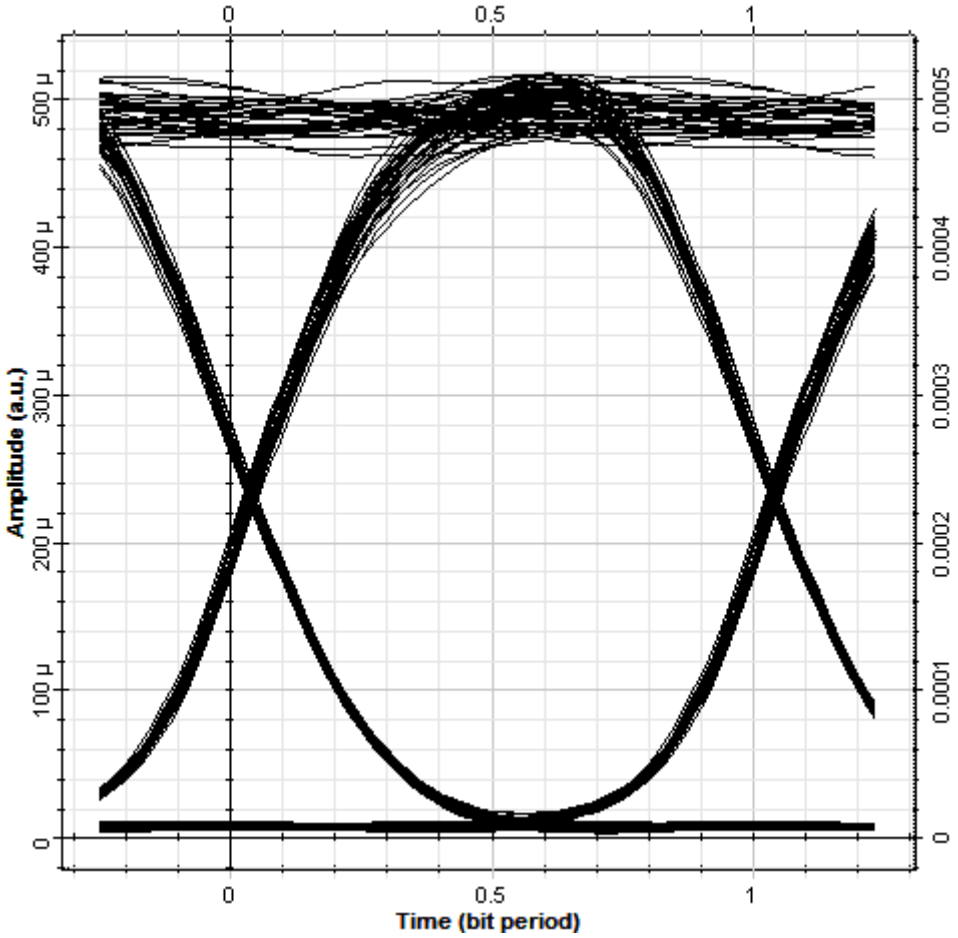
Obr. 20: Diagram Oka optickou trasu Brno – Olomouc s kompenzací chromatické disperze pomocí čerpované Braggovy mřížky, úroveň vysílaného signálu 2dBm

Při simulaci byla navýšena výstupní úroveň laseru na 2dBm. Tato hodnota je běžná pro SPF moduly. Z di agramu je patrné, že by takto upravené trasa byla dostatečná, chybovost BER je $3{,}98 \cdot 10^{-14}$ a Q-faktor je 7,47. Opět nelze zaručit funkčnost všech přenosových systémů, které by bylo možné nasadit a výkonová rezerva pro DWDM systémy by zde také chyběla. Pokud bychom byli schopni navýšit výkon laseru na 5dBm, tak jako v případě kompenzačního DCF vlákna, dosáhli bychom výrazného zlepšení.



Obr. 21: Diagram Oka optickou trasu Brno – Olomouc s kompenzací chromatické disperze pomocí čerpované Braggovy mřížky, úroveň vysílaného signálu 5dBm

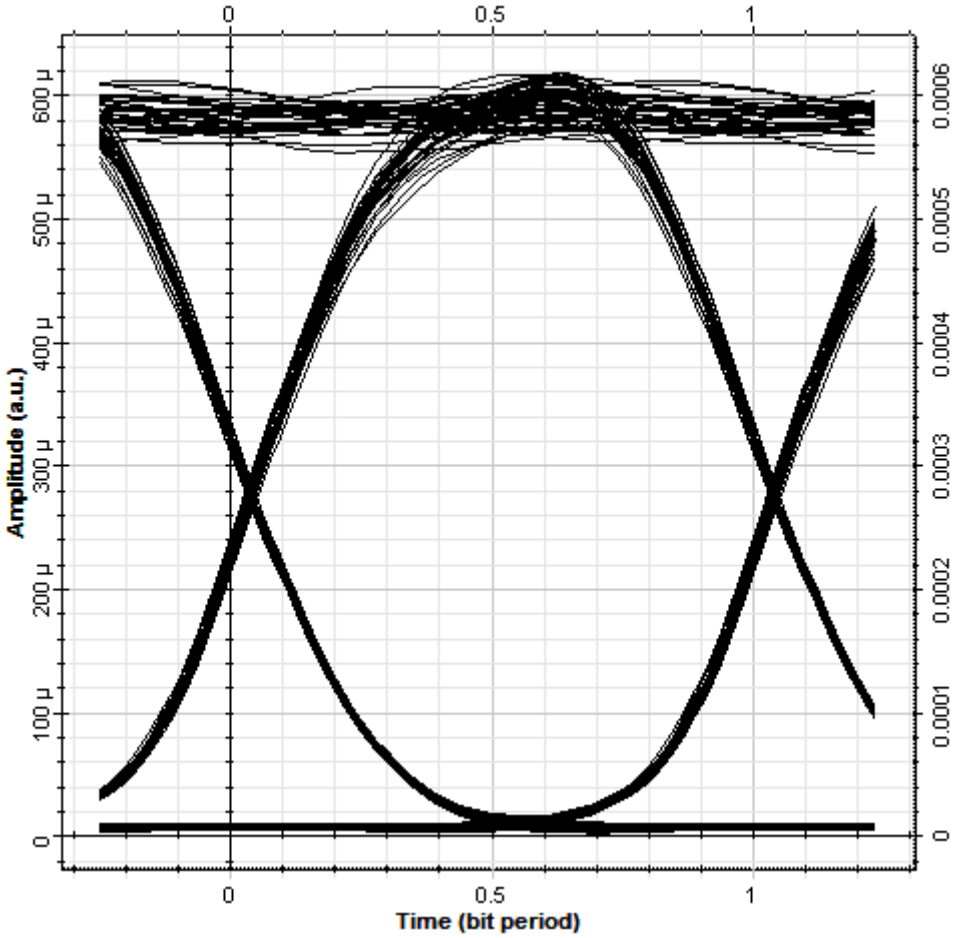
Zlepšení chybovosti BER je velice významné $5{,}41 \cdot 10^{-49}$ a Q-faktor odpovídá 14,67. Je vidět velký vliv malého vložného útlumu a pokud bychom měli možnost využít výkonnějšího laseru, byla by tato volba optimální. Pokud bychom tuto možnost neměli, je zde i další možnost jako v případě u kompenzace DCF vláknem využít optického zesilovače EDFA se ziskem 10dBm. Výsledky této úpravy jsou ohromující. Nejspíše se bude jednat o nejdražší kompenzaci, ovšem protože kaskáda Braggovských mřížek je laditelná, neohrozí nás změna trasy či její úprava a díky tomu nám tato kompozice zaručí ušetření dalších nákladů. Navíc dle potřeby lze tuto technologii uplatnit na j iný konkrétní spoj a tím zvýšit využitelnost a p oskytuje dostatečnou výkonovou rezervu i pro DWDM systémy



Obr. 22: Diagram Oka optickou trasu Brno – Olomouc s kompenzací chromatické disperze pomocí čerpované Braggovy mřížky, úroveň EDFA zesilovače 10dBm

Diagram oka je zřejmým důkazem využitelnosti kaskády čerpovaných Braggových mřížek a jejich použitelnost pro kompenzaci chromatické disperze. Díky malému vložnému útlumu jsme dosáhli pozoruhodných výsledků. Chybovost BER je rovna $6 \cdot 10^{-263}$ a Q-faktor je 34,62. Pokud bychom chtěli bezproblémový optický spoj pro budoucí přenosové systémy, jasnou volbou je kompenzace chromatické disperze pomocí kaskády čerpovaných Braggových mřížek. Zde je velice dobře patrné velice dobré vlastnosti našich optických vláken, které nemusejí být vždy tak optimální. Abychom měli kompletní přehled o možnostech kompenzace optických disperzí, je zapotřebí i zde provést simulaci, kde bude použit aktivní kompenzátor PMD, tak jako v případě kompenzace DCF vláknem. V našem případě, pokud bych skutečně měl na starosti kompenzaci vlivů optických disperzí a danou trasu bych měl v praxi nachystat pro připravovaný vysokorychlostní přenosový systém, nejspíše bych žádnou kompenzaci polarizační vidové disperze neprováděl. Zde je ovšem důležité mít na paměti, že PMD je jev náhodný, mění se náhodně a nelze jeho vliv podceňovat, protože by to mohlo způsobit velké problémy při neúspěšném pokusu realizace některého vysokorychlostního systému a další vysoké náklady na zjištění a

odstranění problémů. Vhodné je provést kontrolní měření těsně před nasazením systému popř. pravidelné kontroly rezervních vláken pro případné využití.



Obr. 23: Diagram Oka optickou trasu Brno – Olomouc s kompenzací chromatické disperze pomocí čerpované Braggovy mřížky a PMD kompenzátoru, úroveň EDFA zesilovače 10dBm

Z diagramu oka jsou patrné neskutečně dobré výsledky. Chybovost se přiblížila k téměř neměřitelným hodnotám $6{,}89 \cdot 10^{321}$ a Q-faktor vzrostl na 38, 27. Bohužel takové parametry by byly extrémně nákladné a vynaložené investice ještě nejsou zárukou úspěchu jako např. u kompenzace chromatické disperze. Přesto vývoj takovýchto kompenzátorů má smysl a v budoucnu bude jejich přínos nedocenitelný. V mém případě postačí kompenzace chromatické disperze a zajištění dostatečné výkonové rezervy na signálu pro dobrý odstup signál šum, protože hodnoty PMD jsou přijatelné pro přenosové systémy 40Gb/s a další.

Závěr

V práci byly shrnuty jednotlivé negativní jevy se zaměřením na chromatickou a polarizačně vidovou disperzi. Následně jsem přehledně zpracoval jednotlivé metody měření jejich výhody s ohledem na použití pro analýzu stávajících sítí. Ve třetí části práce jsem se snažil o maximalizaci výčtu kompenzačních metod s ohledem na praktičnost a ekonomičnost jednotlivých řešení. Následovala analýza stávajících optických tras. Měřené optické trasy mají výborné koeficienty optických disperzí a celkově bych doporučil zatím využít vlákna s nejlepšími parametry, které dostačují pro budoucí přenosové systémy 40Gbit/s a více. Největší problém na optických trasách shledávám v optických konektorech. Špinavé a poškozené konektory značně ovlivnili výsledky měření, ale i přesto zde nebyly zásadní problémy, které by si vyžádali vynaložení finančních prostředků na kompenzaci optických disperzí. To je způsobeno i velice krátkými vzdálenostmi optických tras (do 4 km). Přesto je důležité mít na paměti, že i krátký úsek metropolitní sítě se může v budoucnu stát součástí páteřního propojení (např. Brno – Praha či jiné delší vzdálenosti) a z tohoto důvodu i zdánlivě dobré parametry nemusejí vyhovět. U vláken s nejhoršími parametry jsem navrhl případnou kompenzaci chromatické disperze pomocí laditelné kaskády braggovských mřížek, která má sice omezený počet vlnových délek, na kterých bude provedena kompenzace, ale již v dnešní době existují takové soustavy, které dostatečně pokrývají využívané spektrum vlnových délek. Navíc je zde výhoda při změně vlákna či jiné změny na optické trase přeladění a tím ušetření nemalých finančních prostředků.

Závěr práce se věnuje simulacím optických tras, kde z naměřených parametrů optických vláken jsme zjistili teoretické maximální délky optických vláken a na základě této délky, byl stanoven konkrétní optický propoj Brno – Olomouc, který má stejné parametry optických vláken vztažené na kilometr délky jako měřené trasy. Trasa je dlouhá 80km a bez kompenzací optických disperzí by zde nebyl možný aplikovat 40Gb/s systémy a více. Jako nejvhodnější varianta pro skutečný provoz je kaskáda Braggových mřížek, která je plynule laditelná v celém svém pracovním rozsahu (dle potřeby bych zvolil C popř. i L pásmo) a ideálně s optickým zesilovačem EDFA o v ýstupním optickém výkonu min. 10dBm. Jako alternativní varianta je výkonnější laser (SPF modul) s min. výstupném výkonem 5dBm. V simulaci byla demonstrována i kompenzace PMD, ovšem vliv u této trasy nebyl tak zásadní a náklady na kompenzaci by byly neúměrné dosaženým výsledkům. Pokud by zde byla potřeba kompenzace polarizační vidové disperze, přikláněl bych se k nalezení alternativy např. jiné optické vlákno popřípadě eliminovat PMD zařazením zařízení pro obnovu signálu, které nezesiluje optický signál, ale převádí ho na elektrický, který následně vyhodnotí a opět převede na optický, tím odstraní vliv předchozí trasy, ovšem zanese zpoždění celého přenosového systému, s kterým je při návrhu potřeba počítat.

Pro aplikování vysokorychlostních přenosových systémů je nezbytně nutné, pokud se nejedná o velmi krátké trasy, kompenzace chromatické disperze, která se stává dnes pomalu běžnou součástí i kratších vzdálenosti a pomalu se uplatňuje v metropolitních sítích, kde pokud bychom chtěli vytvořit kruh po celém městě, který může být delší jak 50km a provozovat zde vysokorychlostní systémy 40Gb/s a více, kompenzace chromatické disperze je nutností pro bezproblémový provoz celého systému. U kompenzace polarizační vidové disperze je problém v tom, že její vliv je značný, ovšem máme málo možností jak ji eliminovat natož ji zcela odstranit. Zde navrhuji měření jako zásadní pro přehled o stavu vláken, které mohou nebo budou využity pro tyto provozy a výběru nejvhodnějšího vlákna. Pokud již nelze výběrem snížit vliv PMD, zvolil bych nejspíše nahrazení částí optické trasy tam, kde máme rezervní HDPE chráničku nebo nám stav obsazenosti v HDPE umožní zafouknutí dalšího optického kabelu. Výměnu bych volil v nejkrajnějším případě, protože stávající vlákna mohou být využita pro jiný provoz. Jako další varianta se mi jeví použití aktivního prvku obnovy signálu, který je v podstatě detektor s vysílací laserem dohromady. Obsahuje ještě vyhodnocovací obvody. Díky tomu lze eliminovat vliv předchozí trasy a tím snížit celkový vliv PMD. Nevýhodou by mohlo být zpoždění detekce, vyhodnocení úrovní signálu a jeho rekonstrukce.

Příloha 1.1

FasTesT Report

General Information

Filename:	ZLKOP_NAM.MIRU_B_48.olts	Cable ID:	ZLKOP_NAM.MIRU_B_48
Test date:	30.6.2010	Fiber ID:	ZLKOP_NM001; ZLKOP_NM002; ZLKOP_NM003; ZLK
Test time:	7:57; 7:59; 8:00; 8:07; 8:08; 8:09; 8:10; 8:11; 8:12; 8:13; 8:14; 8:	Customer:	
Job ID:		Company:	
Comments:			

Location A			Location B		
Location:	Unit's model:	FOT-932	Location:	Unit's model:	FOT-932
Operator:	Unit's s/n:	398216	Operator:	Unit's s/n:	398215

FasTesT

Fiber ID	Wavelength (nm)	Loss A->B (dB)	Ref. A->B (dB)	Loss B->A (dB)	Ref. B->A (dB)	Average (dB)	ORL A->B (dB)	ORL B->A (dB)	Length (m)
ZLKOP_NM001	1310	1,59	-0,04	1,66	0,16	1,62	36,54	36,34	2 860,773
	1550	1,15	0,02	1,24	-0,06	1,20	38,36	38,50	
	1625	1,09	0,00	1,26	-0,03	1,18	39,12	39,30	
ZLKOP_NM002	1310	1,66	-0,04	1,67	0,16	1,67	36,48	36,76	2 859,855
	1550	1,17	0,02	1,29	-0,06	1,23	38,23	38,83	
	1625	1,21	0,00	1,35	-0,03	1,28	39,06	39,53	
ZLKOP_NM003	1310	1,14	-0,04	1,16	0,16	1,15	36,18	35,93	2 859,563
	1550	0,78	0,02	0,91	-0,06	0,84	38,04	38,14	
	1625	0,83	0,00	0,93	-0,03	0,88	38,80	39,01	
ZLKOP_NM004	1310	1,28	-0,04	1,28	0,16	1,28	36,37	35,83	2 860,206
	1550	0,83	0,02	1,02	-0,06	0,92	38,12	38,03	
	1625	0,90	0,00	1,06	-0,03	0,98	38,86	38,94	
ZLKOP_NM005	1310	1,58	-0,04	1,58	0,16	1,58	36,72	36,50	2 859,042
	1550	1,12	0,02	1,24	-0,06	1,18	38,46	38,58	
	1625	1,09	0,00	1,33	-0,03	1,21	39,26	39,48	
ZLKOP_NM006	1310	1,44	-0,04	1,51	0,16	1,48	36,80	36,23	2 858,754
	1550	1,02	0,02	1,09	-0,06	1,06	38,60	38,43	
	1625	1,05	0,00	1,20	-0,03	1,12	39,48	39,17	
ZLKOP_NM019	1310	2,62	-0,04	2,71	0,16	2,66	38,00	37,11	2 856,226
	1550	1,87	0,02	2,02	-0,06	1,95	39,49	38,96	
	1625	1,90	0,00	2,08	-0,03	1,99	40,40	39,76	
ZLKOP_NM020	1310	1,19	-0,04	1,25	0,16	1,22	36,25	35,91	2 859,493
	1550	0,80	0,02	0,95	-0,06	0,88	38,04	38,16	
	1625	0,82	0,00	1,01	-0,03	0,92	38,91	39,02	
ZLKOP_NM022	1310	1,12	-0,04	1,14	0,16	1,13	36,32	35,98	2 856,686
	1550	0,72	0,02	0,82	-0,06	0,77	38,11	38,17	
	1625	0,74	0,00	0,86	-0,03	0,80	38,94	38,84	
ZLKOP_NM023	1310	1,44	-0,04	1,47	0,16	1,45	36,44	36,34	2 857,347
	1550	1,03	0,02	1,16	-0,06	1,10	38,31	38,41	
	1625	1,05	0,00	1,20	-0,03	1,13	39,16	39,23	
ZLKOP_NM024	1310	1,44	-0,04	1,48	0,16	1,46	37,20	36,16	2 856,708
	1550	1,36	0,02	1,25	-0,06	1,30	39,16	38,31	
	1625	1,44	0,00	1,53	-0,03	1,48	39,96	39,02	

EXFO Signature: _____ Date: 12.12.2010 Page 1 of 3

Příloha 1.2

FasTesT Report

ZLKOP_NM025	1310	1,37	-0,04	1,35	0,16	1,36	36,61	35,87	2 858,209
	1550	0,88	0,02	0,99	-0,06	0,94	38,30	38,08	
	1625	0,89	0,00	1,00	-0,03	0,95	39,11	38,82	
ZLKOP_NM026	1310	1,60	-0,04	1,65	0,16	1,62	36,96	36,22	2 857,235
	1550	1,06	0,02	1,20	-0,06	1,13	38,60	38,30	
	1625	1,11	0,00	1,27	-0,03	1,19	39,34	39,01	
ZLKOP_NM027	1310	1,53	-0,04	1,62	0,16	1,57	36,52	36,57	2 857,884
	1550	1,14	0,02	1,22	-0,06	1,18	38,36	38,63	
	1625	1,17	0,00	1,28	-0,03	1,22	39,20	39,32	
ZLKOP_NM028	1310	1,54	-0,04	1,60	0,16	1,57	36,82	36,31	2 857,648
	1550	1,04	0,02	1,11	-0,06	1,08	38,47	38,41	
	1625	1,07	0,00	1,16	-0,03	1,12	39,31	39,26	
ZLKOP_NM029	1310	1,34	-0,04	1,38	0,16	1,36	36,41	36,42	2 857,156
	1550	0,84	0,02	1,00	-0,06	0,92	38,17	38,48	
	1625	0,93	0,00	1,02	-0,03	0,98	38,96	39,14	
ZLKOP_NM030	1310	1,61	-0,04	1,66	0,16	1,64	36,63	36,67	2 857,459
	1550	1,14	0,02	1,25	-0,06	1,19	38,35	38,74	
	1625	1,14	0,00	1,33	-0,03	1,24	39,12	39,39	
ZLKOP_NM031	1310	2,41	-0,04	2,49	0,16	2,45	36,65	38,18	2 857,329
	1550	1,70	0,02	1,82	-0,06	1,76	38,43	39,81	
	1625	1,68	0,00	1,81	-0,03	1,74	39,30	40,33	
ZLKOP_NM032	1310	1,10	-0,04	1,16	0,16	1,13	36,61	36,11	2 857,057
	1550	0,76	0,02	0,88	-0,06	0,82	38,35	38,31	
	1625	0,82	0,00	0,92	-0,03	0,87	39,17	38,98	
ZLKOP_NM033	1310	1,56	-0,04	1,56	0,16	1,56	36,60	36,51	2 859,140
	1550	1,07	0,02	1,18	-0,06	1,13	38,34	38,58	
	1625	1,11	0,00	1,28	-0,03	1,20	39,10	39,11	
ZLKOP_NM034	1310	1,51	-0,04	1,62	0,16	1,56	36,62	36,60	2 858,793
	1550	1,09	0,02	1,22	-0,06	1,16	38,39	38,64	
	1625	1,11	0,00	1,27	-0,03	1,19	39,23	39,14	
ZLKOP_NM035	1310	1,22	-0,04	1,21	0,16	1,22	36,35	36,07	2 858,522
	1550	0,82	0,02	1,02	-0,06	0,92	38,14	38,30	
	1625	0,86	0,00	1,08	-0,03	0,97	38,96	38,88	
ZLKOP_NM036	1310	1,34	-0,04	1,42	0,16	1,38	36,42	36,33	2 859,017
	1550	0,95	0,02	1,08	-0,06	1,01	38,23	38,45	
	1625	0,99	0,00	1,09	-0,03	1,04	39,03	39,12	
ZLKOP_NM037	1310	1,26	-0,04	1,29	0,16	1,28	36,63	36,33	2 859,244
	1550	0,90	0,02	0,98	-0,06	0,94	38,43	38,52	
	1625	0,96	0,00	1,09	-0,03	1,02	39,27	39,11	
ZLKOP_NM038	1310	1,70	-0,04	1,71	0,16	1,71	36,67	36,83	2 859,063
	1550	1,05	0,02	1,22	-0,06	1,13	38,45	38,73	
	1625	1,14	0,00	1,20	-0,03	1,17	39,31	39,34	
ZLKOP_NM039	1310	1,67	-0,04	1,74	0,16	1,70	37,32	36,63	2 858,478
	1550	1,26	0,02	1,40	-0,06	1,33	39,06	38,74	
	1625	1,18	0,00	1,36	-0,03	1,27	39,81	39,48	
ZLKOP_NM040	1310	1,39	-0,04	1,41	0,16	1,40	30,88	30,10	2 858,599
	1550	0,97	0,02	1,13	-0,06	1,05	32,66	32,87	
	1625	1,01	0,00	1,18	-0,03	1,09	33,61	33,75	

EXFO Signature: _____ Date: 12.12.2010 Page 2 of 3

Příloha 1.3

FasTesT Report

ZLKOP_NM041	1310	1,51	-0,04	1,56	0,16	1,53	32,84	31,80	2 858,696
	1550	1,06	0,02	1,14	-0,06	1,10	35,55	35,00	
	1625	1,10	0,00	1,18	-0,03	1,14	36,53	35,96	
ZLKOP_NM042	1310	1,54	-0,04	1,59	0,16	1,57	31,92	29,16	2 858,807
	1550	1,06	0,02	1,17	-0,06	1,11	31,71	30,21	
	1625	1,10	0,00	1,23	-0,03	1,16	31,93	30,44	
ZLKOP_NM043	1310	1,92	-0,04	2,00	0,16	1,96	30,42	29,12	2 857,910
	1550	1,33	0,02	1,43	-0,06	1,38	30,13	30,14	
	1625	1,39	0,00	1,54	-0,03	1,46	30,49	30,41	
ZLKOP_NM044	1310	1,30	-0,04	1,33	0,16	1,31	35,57	34,65	2 858,698
	1550	0,84	0,02	0,96	-0,06	0,90	37,17	36,98	
	1625	0,89	0,00	0,96	-0,03	0,92	38,00	37,63	
ZLKOP_NM045	1310	1,45	-0,04	1,53	0,16	1,49	35,28	34,91	2 858,071
	1550	1,02	0,02	1,09	-0,06	1,06	37,25	37,16	
	1625	1,05	0,00	1,10	-0,03	1,08	37,92	37,71	
ZLKOP_NM046	1310	1,68	-0,04	1,76	0,16	1,72	36,39	35,04	2 857,229
	1550	1,22	0,02	1,37	-0,06	1,30	37,78	37,37	
	1625	1,29	0,00	1,38	-0,03	1,34	38,51	37,99	
ZLKOP_NM047	1310	1,63	-0,04	1,69	0,16	1,66	34,81	34,88	2 857,950
	1550	1,10	0,02	1,25	-0,06	1,17	36,32	37,03	
	1625	1,11	0,00	1,33	-0,03	1,22	37,13	37,62	
ZLKOP_NM048	1310	1,20	-0,04	1,20	0,16	1,20	34,55	33,92	2 857,583
	1550	0,81	0,02	0,85	-0,06	0,83	36,00	35,98	
	1625	0,84	0,00	0,98	-0,03	0,91	36,80	36,55	

EXFO Signature: _____ Date: 12.12.2010 Page 3 of 3

Příloha 2.1

FasTesT Report

General Information

Filename:	ZLKOP_NAM.MIRU_B_48.olts	Cable ID:	ZLKOP_NAM.MIRU_B_48
Test date:	30.6.2010	Fiber ID:	ZLKOP_NM001; ZLKOP_NM002; ZLKOP_NM003; ZLK
Test time:	7:57; 7:59; 8:00; 8:07; 8:08; 8:09; 8:10; 8:11; 8:12; 8:13; 8:14; 8:	Customer:	
Job ID:		Company:	
Comments:			

Location A

Location:		Unit's model:	FOT-932
Operator:		Unit's s/n:	398216

Location B

Location:		Unit's model:	FOT-932
Operator:		Unit's s/n:	398215

FasTesT

Fiber ID	Wavelength (nm)	Loss A->B (dB)	Ref. A->B (dB)	Loss B->A (dB)	Ref. B->A (dB)	Average (dB)	ORL A->B (dB)	ORL B->A (dB)	Length (m)
ZLKOP_NM001	1310	1,59	-0,04	1,66	0,16	1,62	36,54	36,34	2 860,773
	1550	1,15	0,02	1,24	-0,06	1,20	38,36	38,50	
	1625	1,09	0,00	1,26	-0,03	1,18	39,12	39,30	
ZLKOP_NM002	1310	1,66	-0,04	1,67	0,16	1,67	36,48	36,76	2 859,855
	1550	1,17	0,02	1,29	-0,06	1,23	38,23	38,83	
	1625	1,21	0,00	1,35	-0,03	1,28	39,06	39,53	
ZLKOP_NM003	1310	1,14	-0,04	1,16	0,16	1,15	36,18	35,93	2 859,563
	1550	0,78	0,02	0,91	-0,06	0,84	38,04	38,14	
	1625	0,83	0,00	0,93	-0,03	0,88	38,80	39,01	
ZLKOP_NM004	1310	1,28	-0,04	1,28	0,16	1,28	36,37	35,83	2 860,206
	1550	0,83	0,02	1,02	-0,06	0,92	38,12	38,03	
	1625	0,90	0,00	1,06	-0,03	0,98	38,86	38,94	
ZLKOP_NM005	1310	1,58	-0,04	1,58	0,16	1,58	36,72	36,50	2 859,042
	1550	1,12	0,02	1,24	-0,06	1,18	38,46	38,58	
	1625	1,09	0,00	1,33	-0,03	1,21	39,26	39,48	
ZLKOP_NM006	1310	1,44	-0,04	1,51	0,16	1,48	36,80	36,23	2 858,754
	1550	1,02	0,02	1,09	-0,06	1,06	38,60	38,43	
	1625	1,05	0,00	1,20	-0,03	1,12	39,48	39,17	
ZLKOP_NM019	1310	2,62	-0,04	2,71	0,16	2,66	38,00	37,11	2 856,226
	1550	1,87	0,02	2,02	-0,06	1,95	39,49	38,96	
	1625	1,90	0,00	2,08	-0,03	1,99	40,40	39,76	
ZLKOP_NM020	1310	1,19	-0,04	1,25	0,16	1,22	36,25	35,91	2 859,493
	1550	0,80	0,02	0,95	-0,06	0,88	38,04	38,16	
	1625	0,82	0,00	1,01	-0,03	0,92	38,91	39,02	
ZLKOP_NM022	1310	1,12	-0,04	1,14	0,16	1,13	36,32	35,98	2 856,686
	1550	0,72	0,02	0,82	-0,06	0,77	38,11	38,17	
	1625	0,74	0,00	0,86	-0,03	0,80	38,94	38,84	
ZLKOP_NM023	1310	1,44	-0,04	1,47	0,16	1,45	36,44	36,34	2 857,347
	1550	1,03	0,02	1,16	-0,06	1,10	38,31	38,41	
	1625	1,05	0,00	1,20	-0,03	1,13	39,16	39,23	
ZLKOP_NM024	1310	1,44	-0,04	1,48	0,16	1,46	37,20	36,16	2 856,708
	1550	1,36	0,02	1,25	-0,06	1,30	39,16	38,31	
	1625	1,44	0,00	1,53	-0,03	1,48	39,96	39,02	

EXFO Signature: _____ Date: 12.12.2010 Page 1 of 3

Příloha 2.2

FasTesT Report

ZLKOP_NM025	1310	1,37	-0,04	1,35	0,16	1,36	36,61	35,87	2 858,209
	1550	0,88	0,02	0,99	-0,06	0,94	38,30	38,08	
	1625	0,89	0,00	1,00	-0,03	0,95	39,11	38,82	
ZLKOP_NM026	1310	1,60	-0,04	1,65	0,16	1,62	36,96	36,22	2 857,235
	1550	1,06	0,02	1,20	-0,06	1,13	38,60	38,30	
	1625	1,11	0,00	1,27	-0,03	1,19	39,34	39,01	
ZLKOP_NM027	1310	1,53	-0,04	1,62	0,16	1,57	36,52	36,57	2 857,884
	1550	1,14	0,02	1,22	-0,06	1,18	38,36	38,63	
	1625	1,17	0,00	1,28	-0,03	1,22	39,20	39,32	
ZLKOP_NM028	1310	1,54	-0,04	1,60	0,16	1,57	36,82	36,31	2 857,648
	1550	1,04	0,02	1,11	-0,06	1,08	38,47	38,41	
	1625	1,07	0,00	1,16	-0,03	1,12	39,31	39,26	
ZLKOP_NM029	1310	1,34	-0,04	1,38	0,16	1,36	36,41	36,42	2 857,156
	1550	0,84	0,02	1,00	-0,06	0,92	38,17	38,48	
	1625	0,93	0,00	1,02	-0,03	0,98	38,96	39,14	
ZLKOP_NM030	1310	1,61	-0,04	1,66	0,16	1,64	36,63	36,67	2 857,459
	1550	1,14	0,02	1,25	-0,06	1,19	38,35	38,74	
	1625	1,14	0,00	1,33	-0,03	1,24	39,12	39,39	
ZLKOP_NM031	1310	2,41	-0,04	2,49	0,16	2,45	36,65	38,18	2 857,329
	1550	1,70	0,02	1,82	-0,06	1,76	38,43	39,81	
	1625	1,68	0,00	1,81	-0,03	1,74	39,30	40,33	
ZLKOP_NM032	1310	1,10	-0,04	1,16	0,16	1,13	36,61	36,11	2 857,057
	1550	0,76	0,02	0,88	-0,06	0,82	38,35	38,31	
	1625	0,82	0,00	0,92	-0,03	0,87	39,17	38,98	
ZLKOP_NM033	1310	1,56	-0,04	1,56	0,16	1,56	36,60	36,51	2 859,140
	1550	1,07	0,02	1,18	-0,06	1,13	38,34	38,58	
	1625	1,11	0,00	1,28	-0,03	1,20	39,10	39,11	
ZLKOP_NM034	1310	1,51	-0,04	1,62	0,16	1,56	36,62	36,60	2 858,793
	1550	1,09	0,02	1,22	-0,06	1,16	38,39	38,64	
	1625	1,11	0,00	1,27	-0,03	1,19	39,23	39,14	
ZLKOP_NM035	1310	1,22	-0,04	1,21	0,16	1,22	36,35	36,07	2 858,522
	1550	0,82	0,02	1,02	-0,06	0,92	38,14	38,30	
	1625	0,86	0,00	1,08	-0,03	0,97	38,96	38,88	
ZLKOP_NM036	1310	1,34	-0,04	1,42	0,16	1,38	36,42	36,33	2 859,017
	1550	0,95	0,02	1,08	-0,06	1,01	38,23	38,45	
	1625	0,99	0,00	1,09	-0,03	1,04	39,03	39,12	
ZLKOP_NM037	1310	1,26	-0,04	1,29	0,16	1,28	36,63	36,33	2 859,244
	1550	0,90	0,02	0,98	-0,06	0,94	38,43	38,52	
	1625	0,96	0,00	1,09	-0,03	1,02	39,27	39,11	
ZLKOP_NM038	1310	1,70	-0,04	1,71	0,16	1,71	36,67	36,83	2 859,063
	1550	1,05	0,02	1,22	-0,06	1,13	38,45	38,73	
	1625	1,14	0,00	1,20	-0,03	1,17	39,31	39,34	
ZLKOP_NM039	1310	1,67	-0,04	1,74	0,16	1,70	37,32	36,63	2 858,478
	1550	1,26	0,02	1,40	-0,06	1,33	39,06	38,74	
	1625	1,18	0,00	1,36	-0,03	1,27	39,81	39,48	
ZLKOP_NM040	1310	1,39	-0,04	1,41	0,16	1,40	30,88	30,10	2 858,599
	1550	0,97	0,02	1,13	-0,06	1,05	32,66	32,87	
	1625	1,01	0,00	1,18	-0,03	1,09	33,61	33,75	

EXFO Signature: _____ Date: 12.12.2010 Page 2 of 3

Příloha 2.3

FasTesT Report

ZLKOP_NM041	1310	1,51	-0,04	1,56	0,16	1,53	32,84	31,80	2 858,696
	1550	1,06	0,02	1,14	-0,06	1,10	35,55	35,00	
	1625	1,10	0,00	1,18	-0,03	1,14	36,53	35,96	
ZLKOP_NM042	1310	1,54	-0,04	1,59	0,16	1,57	31,92	29,16	2 858,807
	1550	1,06	0,02	1,17	-0,06	1,11	31,71	30,21	
	1625	1,10	0,00	1,23	-0,03	1,16	31,93	30,44	
ZLKOP_NM043	1310	1,92	-0,04	2,00	0,16	1,96	30,42	29,12	2 857,910
	1550	1,33	0,02	1,43	-0,06	1,38	30,13	30,14	
	1625	1,39	0,00	1,54	-0,03	1,46	30,49	30,41	
ZLKOP_NM044	1310	1,30	-0,04	1,33	0,16	1,31	35,57	34,65	2 858,698
	1550	0,84	0,02	0,96	-0,06	0,90	37,17	36,98	
	1625	0,89	0,00	0,96	-0,03	0,92	38,00	37,63	
ZLKOP_NM045	1310	1,45	-0,04	1,53	0,16	1,49	35,28	34,91	2 858,071
	1550	1,02	0,02	1,09	-0,06	1,06	37,25	37,16	
	1625	1,05	0,00	1,10	-0,03	1,08	37,92	37,71	
ZLKOP_NM046	1310	1,68	-0,04	1,76	0,16	1,72	36,39	35,04	2 857,229
	1550	1,22	0,02	1,37	-0,06	1,30	37,78	37,37	
	1625	1,29	0,00	1,38	-0,03	1,34	38,51	37,99	
ZLKOP_NM047	1310	1,63	-0,04	1,69	0,16	1,66	34,81	34,88	2 857,950
	1550	1,10	0,02	1,25	-0,06	1,17	36,32	37,03	
	1625	1,11	0,00	1,33	-0,03	1,22	37,13	37,62	
ZLKOP_NM048	1310	1,20	-0,04	1,20	0,16	1,20	34,55	33,92	2 857,583
	1550	0,81	0,02	0,85	-0,06	0,83	36,00	35,98	
	1625	0,84	0,00	0,98	-0,03	0,91	36,80	36,55	

EXFO Signature: _____ Date: 12.12.2010 Page 3 of 3

Příloha 3.1

FasTesT Report

General Information

Filename:	LIP_POR_36.olts	Cable ID:	LIP_POR_36
Test date:	29.6.2010	Fiber ID:	LIP_POR003; LIP_POR004; LIP_POR005; LIP_POR0(
Test time:	9:20; 9:21; 9:22; 9:23; 9:24; 9:26; 9:27; 9:28; 9:29; 9:30; 9:31; 9::	Customer:	
Job ID:		Company:	
Comments:			

Location A			Location B		
Location:	Unit's model:	FOT-932	Location:	Unit's model:	FOT-932
Operator:	Unit's s/n:	398216	Operator:	Unit's s/n:	398215

FasTesT

Fiber ID	Wavelength (nm)	Loss A->B (dB)	Ref. A->B (dB)	Loss B->A (dB)	Ref. B->A (dB)	Average (dB)	ORL A->B (dB)	ORL B->A (dB)	Length (m)
LIP_POR003	1310	1,63	-0,04	1,69	0,14	1,66	15,79	11,64	2 623,398
	1550	1,32	0,02	1,45	-0,06	1,39	12,59	10,17	
	1625	1,39	0,00	1,61	-0,03	1,50	12,42	9,95	
LIP_POR004	1310	1,37	-0,04	1,46	0,14	1,41	25,85	23,11	2 621,858
	1550	2,09	0,02	2,22	-0,06	2,15	28,71	25,31	
	1625	2,83	0,00	3,00	-0,03	2,92	30,58	25,92	
LIP_POR005	1310	1,31	-0,04	1,35	0,14	1,33	35,54	35,02	2 624,473
	1550	0,84	0,02	0,91	-0,06	0,87	36,88	36,72	
	1625	0,89	0,00	1,07	-0,03	0,98	37,55	37,26	
LIP_POR006	1310	1,11	-0,04	1,18	0,14	1,14	35,87	35,47	2 623,371
	1550	1,35	0,02	1,48	-0,06	1,41	37,64	38,28	
	1625	1,82	0,00	1,99	-0,03	1,90	38,44	39,38	
LIP_POR007	1310	1,48	-0,04	1,49	0,14	1,48	36,53	35,13	2 623,179
	1550	0,96	0,02	1,05	-0,06	1,01	37,58	36,96	
	1625	1,11	0,00	1,26	-0,03	1,18	38,27	37,70	
LIP_POR008	1310	1,72	-0,04	1,74	0,14	1,73	36,21	36,50	2 624,276
	1550	1,45	0,02	1,48	-0,06	1,47	37,86	38,62	
	1625	1,57	0,00	1,64	-0,03	1,61	38,55	39,48	
LIP_POR009	1310	1,15	-0,04	1,22	0,14	1,18	36,18	35,46	2 621,847
	1550	1,57	0,02	1,69	-0,06	1,63	38,04	38,52	
	1625	2,23	0,00	2,34	-0,03	2,29	38,89	39,71	
LIP_POR010	1310	0,96	-0,04	1,05	0,14	1,01	36,41	36,03	2 623,731
	1550	0,64	0,02	0,74	-0,06	0,69	38,25	38,19	
	1625	0,75	0,00	0,92	-0,03	0,84	39,04	38,94	
LIP_POR013	1310	1,47	-0,04	1,58	0,14	1,52	36,20	35,98	2 619,032
	1550	1,08	0,02	1,15	-0,06	1,11	37,81	37,88	
	1625	1,17	0,00	1,27	-0,03	1,22	38,52	38,72	
LIP_POR014	1310	1,37	-0,04	1,49	0,14	1,43	36,17	36,06	2 620,000
	1550	1,00	0,02	1,12	-0,06	1,06	37,79	38,04	
	1625	1,10	0,00	1,30	-0,03	1,20	38,62	38,75	
LIP_POR019	1310	1,27	-0,04	1,33	0,14	1,30	36,06	35,98	2 620,943
	1550	0,85	0,02	0,96	-0,06	0,91	37,71	37,88	
	1625	0,89	0,00	1,07	-0,03	0,98	38,45	38,30	

EXFO Signature: _____ Date: 12.12.2010 Page 1 of 3

Příloha 3.2

FasTesT Report

LIP_POR020	1310	1,77	-0,04	1,82	0,14	1,80	36,30	36,89	2 621,695
	1550	1,25	0,02	1,35	-0,06	1,30	37,90	38,57	
	1625	1,21	0,00	1,35	-0,03	1,28	38,66	39,13	
LIP_POR021	1310	1,25	-0,04	1,38	0,14	1,32	36,39	35,72	2 620,012
	1550	0,84	0,02	0,97	-0,06	0,90	37,98	37,71	
	1625	0,83	0,00	1,03	-0,03	0,93	38,68	38,36	
LIP_POR022	1310	1,32	-0,04	1,40	0,14	1,36	36,85	35,93	2 620,016
	1550	0,91	0,02	1,00	-0,06	0,95	38,50	38,05	
	1625	1,00	0,00	1,09	-0,03	1,04	39,19	38,78	
LIP_POR023	1310	1,31	-0,04	1,40	0,14	1,35	36,30	35,99	2 619,160
	1550	1,46	0,02	1,54	-0,06	1,50	38,08	38,73	
	1625	1,81	0,00	1,98	-0,03	1,89	38,94	40,01	
LIP_POR024	1310	1,03	-0,04	1,10	0,14	1,07	36,44	35,78	2 621,772
	1550	0,67	0,02	0,78	-0,06	0,72	38,13	37,92	
	1625	0,71	0,00	0,92	-0,03	0,82	38,92	38,53	
LIP_POR025	1310	1,51	-0,04	1,51	0,14	1,51	36,57	36,59	2 620,830
	1550	1,00	0,02	1,09	-0,06	1,05	38,29	38,46	
	1625	0,98	0,00	1,10	-0,03	1,04	38,99	39,10	
LIP_POR026	1310	1,10	-0,04	1,20	0,14	1,15	36,47	35,74	2 619,507
	1550	0,71	0,02	0,84	-0,06	0,78	38,18	37,89	
	1625	0,76	0,00	0,93	-0,03	0,84	38,92	38,26	
LIP_POR027	1310	1,58	-0,04	1,57	0,14	1,57	25,42	22,91	2 621,105
	1550	1,14	0,02	1,22	-0,06	1,18	26,19	25,28	
	1625	1,10	0,00	1,24	-0,03	1,17	27,75	26,72	
LIP_POR028	1310	0,97	-0,04	1,03	0,14	1,00	36,54	35,88	2 620,603
	1550	0,66	0,02	0,74	-0,06	0,70	38,29	38,07	
	1625	0,69	0,00	0,79	-0,03	0,74	39,00	38,74	
LIP_POR029	1310	1,75	-0,04	1,69	0,14	1,72	35,87	36,11	2 621,004
	1550	1,28	0,02	1,39	-0,06	1,34	37,24	37,87	
	1625	1,28	0,00	1,46	-0,03	1,37	37,83	38,33	
LIP_POR030	1310	1,62	-0,04	1,65	0,14	1,63	36,36	36,47	2 621,197
	1550	1,16	0,02	1,24	-0,06	1,20	38,09	38,49	
	1625	1,20	0,00	1,35	-0,03	1,27	38,91	39,24	
LIP_POR031	1310	1,49	-0,04	1,54	0,14	1,52	30,61	29,01	2 620,880
	1550	1,01	0,02	1,13	-0,06	1,07	32,98	32,57	
	1625	1,07	0,00	1,15	-0,03	1,11	33,95	33,71	
LIP_POR032	1310	1,39	-0,04	1,35	0,14	1,37	30,58	28,16	2 622,121
	1550	0,92	0,02	1,03	-0,06	0,98	29,73	28,79	
	1625	1,00	0,00	1,10	-0,03	1,05	30,04	28,96	
LIP_POR033	1310	1,09	-0,04	1,13	0,14	1,11	35,99	35,07	2 620,945
	1550	0,74	0,02	0,85	-0,06	0,79	37,52	37,12	
	1625	0,84	0,00	0,91	-0,03	0,87	38,32	37,77	
LIP_POR034	1310	0,89	-0,04	0,95	0,14	0,92	35,81	35,17	2 621,371
	1550	0,54	0,02	0,66	-0,06	0,60	37,37	37,19	
	1625	0,63	0,00	0,73	-0,03	0,68	38,13	37,76	
LIP_POR035	1310	1,14	-0,04	1,22	0,14	1,18	35,99	34,99	2 618,944
	1550	0,73	0,02	0,87	-0,06	0,80	37,45	36,98	
	1625	0,83	0,00	0,87	-0,03	0,85	38,18	37,51	

EXFO Signature: _____ Date: 12.12.2010 Page 2 of 3

Příloha 3.3

FasTesT Report

LIP_POR036	1310	1,64	-0,04	1,67	0,14	1,65	36,63	35,85	2 621,259
	1550	1,10	0,02	1,24	-0,06	1,17	38,05	37,78	
	1625	1,19	0,00	1,37	-0,03	1,28	38,86	38,23	

EXFO Signature: _____ Date: 12.12.2010 Page 3 of 3

Příloha 4

Obsah CD:

- Simulace pro kompenzace chromatické disperze pomocí DCF kompenzačního vlákna včetně aktivního PMD kompenzátoru – simulační program OptiSim v9.0 od spol. Optiwave

- Simulace pro kompenzace chromatické disperze pomocí Braggovy přížky včetně aktivního PMD kompenzátoru – simulační program OptiSim v9.0 od spol. Optiwave.

- Simualce trasy Žlutý kopec – VŠ koleje nám. Míru – maximální délka vlákna – simulační program OptiSim v9.0 od spol. Optiwave včetně exportu do *.xls

- Měřící záznamy pro všechny hodnocené trasy – záznamy z měřících přístrojů

Seznam obrázků

Obr. 1: Graf ztrát způsobené ohybem [1] - 8 -
Obr. 2: Princip chromatické disperze [7] - 12 -
Obr. 3: Princip polarizační vidové disperze – PMD [7] - 13 -
Obr. 4: Měření chromatické disperze metodou fázového posuvu [8] - 15 -
Obr. 5: Měření chromatické disperze metodou zpoždění impulsů v časové oblasti [8] - 15 -
Obr. 6: Měření polarizační vidové disperze metodou interferometrickou [8] - 16 -
Obr. 7: Měření polarizační vidové disperze metodou skenování vlnové délky [8] - 17 -
Obr. 8: Metropolitní akademická síť Brno [7],[2] - 24 -
Obr. 9: Měření polarizační vidové disperze PMD na vláknu č. 28 - 30 -
Obr. 10: Snímek vlákna č. 28 z optického mikroskopu - 30 -
Obr. 11: Snímek vlákna č. 31 z optického mikroskopu - 33 -
Obr. 12: Měření polarizační vidové disperze PMD na vláknu č. 31 - 33 -
Obr. 13: Simulační model optické trasy - 35 -
Obr. 14: Diagram oka pro vlákno č.19 (dosažená délka 70km) a digram oka pro vlákno č.22 (dosažená délka vlákna 75,36km) - 37 -
Obr. 15: Diagram Oka pro vlákno č.22 kompenzace pomocí kaskády Braggovských mřížek s porovnáním bez kompenzace - 38 -
Obr. 16: Diagram Oka pro 80km trasu bez kompenzace, vpravo s EDFA zesilovačem (zisk 10dBm), vlevo laser s vysílacím výkonem 5dBm - 39 -
Obr. 17: Diagram Oka optickou trasu Brno – Olomouc s kompenzací chromatické disperze pomocí DCF vlákna, úroveň vysílaného signálu 5dBm - 40 -
Obr. 18: Diagram Oka s optickou trasu Brno – Olomouc s kompenzací chromatické disperze pomocí DCF vlákna, úroveň EDFA zesilovače 10dBm - 41 -
Obr. 19: Diagram Oka optické trasy Brno – Olomouc s kompenzací chromatické disperze pomocí DCF vlákna a PMD kompenzátoru, úroveň EDFA zesilovače 10dBm - 42 -
Obr. 20: Diagram Oka optickou trasu Brno – Olomouc s kompenzací chromatické disperze pomocí čerpované Braggovy mřížky, úroveň vysílaného signálu 2dBm - 43 -
Obr. 21: Diagram Oka optickou trasu Brno – Olomouc s kompenzací chromatické disperze pomocí čerpované Braggovy mřížky, úroveň vysílaného signálu 5dBm - 44 -
Obr. 22: Diagram Oka optickou trasu Brno – Olomouc s kompenzací chromatické disperze pomocí čerpované Braggovy mřížky, úroveň EDFA zesilovače 10dBm - 45 -
Obr. 23: Diagram Oka optickou trasu Brno – Olomouc s kompenzací chromatické disperze pomocí čerpované Braggovy mřížky a PMD kompenzátoru, úroveň EDFA zesilovače 10dBm - 46 -

Seznam tabulek

Tabulka 1: Přehled stavu optických konektorů na optické trase Botanická 68a – Rektorát MU - 27 -
Tabulka 2: Měření Chromatické a polarizační vidové disperze PMD na optické trase Botanická 68a – Rektorát MU - 28 -
Tabulka 3: Přehled stavu optických konektorů na optické trase Masarykův onkologický ústav Žlutý kopec - VŠ koleje nám.Míru - 29 -
Tabulka 4: Přehled Měření Chromatické a polarizační vidové disperze PMD na optické trase Masarykův onkologický ústav Žlutý kopec - VŠ koleje nám.Míru - 31 -
Tabulka 5: Přehled Měření Chromatické a polarizační vidové disperze PMD na optické trase Lipová ESF MU - Poříčí PdF MU - 32 -
Tabulka 6: Přehled použitých komponentů a parametrů pro simulace optických disperzí - 34 -
Tabulka 7: Přehled nastavených parametrů optických disperzí a dosažení maximální délky optického vlákna - 36 -

LITERATURA

[1] KYSELÁK, M. Disperzní vlivy optických vláken na multiplexové přenosy. Brno, 2008. 110 s. Dizertační práce. VUT.

[2] Dostál, O. Brněnská metropolitní a akademická síť. Zpravodaj ÚVT MU. ISSN 1212-0901, 1997, roč. VII, č. 3, s. 6-10.

[3] Technologie CWDM v optických sítích. Technologie multiplexu WDM [online]. 2005, 1, [cit. 2010-12-06]. Dostupný z WWW: <www.rlc.cz>.

[4] Disperzní parametry SMF optických vláken a tras. Moderní měřicí technika v optických komunikacích [online]. 2009, 1, [cit. 2010-12-06]. Dostupný z WWW: <www.mikrokom.eu>.

[5] KYSELÁK, M.; FILKA, M.; BERNKOPF, M. Optical Communication Routes Planning. International Journal of Computer Science and Network Security. 2007. 2007(6). p. 27 - 30. ISSN 1738-7906.

[6] SALEH B. A. E., TEICH M. C.: Fundamentals of Photonics. Praha :Matfyzpress, 1996, 22 s., S. 779-1055, ISBN 80-85863-12-X (brož).

[7] FILKA, M. Optoelektronika pro telekomunikace a informatiku. první. Brno : Centra, spol. s r. o., 2009. 369 s. ISBN 978-80-86785-14-1.

[8] Hájek, M., Holomeček, P. Měření chromatické a polarizační vidové disperze jednovidových optických tras, CABLEX, České Budějovice 2002

[9] Kyselák, M. Způsoby řešení polarizační vidové disperze u stávajících optických tras, Optické komunikace 2006. Praha: Agentura Action M, 2006. s. 85-174. ISBN:80-86742-16-4.

[10] Galtarossa A., Menyuk C.R.: Polarization Mode Dispersion, Springer, Padova, ISBN 0-387-23193-5

[11] URBAN, F., MIKEL, B. Optoelektronika a optické komunikace. Skriptum. VUT FEKT, Brno, 2003.

[12] HAVELKA, D. Nelineární vlivy optických vláken. Diplomová práce. VUT FEKT, Brno 2007.

[13] KYSELÁK, M. FILKA, M. KOVÁŘ, P. Novell Approach to the Solution of Optical Fibre Dispersion Effects. In Telecommunications and Signal Processing TSP - 2006. Brno, Brno. 2006. p. 25 - 28. ISBN 80-14-226-8.

[14] PROFiber Networking s.r.o. [online]. 2010 [cit. 2010-12-10]. Měřící technika. Dostupné z WWW: <www.profiber.cz>.

[15] Ouellette, F. „Dispersion cancellation using lineary chirped Bragg grating filters in optical waveguides", Opt. Lett., vol. 12, pp. 847-849, 1987.

[16] Porovnání metod kompenzace chromatické disperze u k lasického optického jednovidového vlákna. Access Server : Optické sítě. 2008, 8, MSM6840770014, s. 1-5. Dostupný také z WWW: <access.feld.cvut.cz>. ISSN 1214-9675.

[17] Moderní způsoby řešení PMD u stávajících optických tras. Access Server : Optické sítě. 2008, 8, MSM6840770014, s. 1-5. Dostupný také z WWW: <access.feld.cvut.cz>. ISSN 1214-9675.

[18] Kucharski, M., Dubský, P.: Měření přenosových parametrů optických vláken, kabelů a tras, MIKROKOM, Praha 1998

[19] BROUČEK, J.; HÁJEK, M. PRAKTICKÉ ZKUŠENOSTI Z MĚŘENÍ DWDM [online]. 2003 [cit. 2011-05-12].
Dostupné z WWW: <www.mikrokom.eu>