

VĚDECKÉ SPISY VYSOKÉHO UČENÍ TECHNICKÉHO V BRNĚ

*Edice PhD Thesis, sv. 515*

*ISSN 1213-4198*



*Ing. Martin Kyselák*

# Disperzní vlivy optických vláken na multiplexní přenosy

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ  
FAKULTA ELEKTROTECHNIKY  
A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ  
ÚSTAV TELEKOMUNIKACÍ

**Ing. Martin Kyselák**

**DISPERZNÍ VLIVY OPTICKÝCH VLÁKEN NA MULTIPLEXNÍ  
PŘENOSY**

THE OPTICAL FIBRE DISPERSION EFFECTS ON MULTIPLEX  
TRANSMISSION SYSTEMS

ZKRÁCENÁ VERZE Ph.D. THESIS

|                 |                                                            |
|-----------------|------------------------------------------------------------|
| Obor:           | Teleinformatika                                            |
| Školitel:       | Doc. Ing. Miloslav Filka, CSc.                             |
| Oponenti:       | Prof. Ing. Milan Dado, CSc.<br>Ing. Václav Křepelka, Ph.D. |
| Datum obhajoby: | 12.1.2009                                                  |

**KLÍČOVÁ SLOVA:**

OPTICKÉ VLÁKNO, ÚTLUM, DISPERZE, POLARIZAČNÍ VIDOVÁ DISPERZE, CHYBOVOST, SIMULACE, MĚŘENÍ, KOMPENZACE, MODULACE, PMD.

**KEYWORDS:**

OPTICAL FIBRE, ATTENUATION, DISPERSION, POLARIZATION MODE DISPERSION, BER, SIMULATION, MEASUREMENT, COMPENSATION, MODULATION, PMD.

Disertační práce je k dispozici na Vědeckém oddělení děkanátu FEKT VUT v Brně, Údolní 53, Brno, 602 00.

# OBSAH

|                                                       |    |
|-------------------------------------------------------|----|
| OBSAH.....                                            | 3  |
| ÚVOD.....                                             | 5  |
| 1 PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU PROBLEMATIKY .....         | 6  |
| 1.1 Disperze .....                                    | 6  |
| 1.2 Polarizační vidová disperze .....                 | 7  |
| 1.3 Současné techniky plánování optických tras .....  | 8  |
| 2 CÍLE DISERTAČNÍ PRÁCE .....                         | 10 |
| 3 HLAVNÍ VÝSLEDKY PRÁCE .....                         | 11 |
| 3.1 Výpočet PMD statistickou metodou Monte Carlo..... | 11 |
| 3.2 Návrhová aplikace.....                            | 12 |
| 3.3 Simulační aplikace .....                          | 13 |
| 3.4 Vliv modulačních formátů na PMD.....              | 15 |
| 3.5 Praktické ověření výsledků .....                  | 18 |
| 4 ZÁVĚR.....                                          | 20 |
| LITERATURA .....                                      | 22 |
| <b>Seznam použité literatury</b> .....                | 22 |
| <b>Seznam vlastních prací</b> .....                   | 23 |
| CURRICULUM VITAE .....                                | 25 |
| ABSTRACT .....                                        | 26 |



# ÚVOD

Věda již dokázala vyřešit problémy s prvotním vysokým útlumem vláken. Novými technologiemi výroby se podařilo odstranit vlivy vidové disperze a použitím kompenzačních vláken a vláken s upravenou disperzní charakteristikou je v podstatě vyřešena disperze chromatická. Pokud však přenosová rychlost jednoho kanálu přesáhne určitou mez, začne nabývat na významu dosud nevyřešený jev zvaný polarizační vidová disperze (Polarization Mode Dispersion - PMD), jemuž především je tato práce věnována.

Tato disertační práce přináší ve své první části soupis všech negativních jevů působících na signál přenášený optickým vláknem. Velká pozornost je věnovaná právě polarizační vidové disperzi a dále teorii, která byla nutně použita při řešení zadané problematiky. Jedná se zejména o přehled ve vláknové optice používaných modulačních formátů, teorii chybovosti a diagramu oka.

Následuje soupis cílů disertační práce a vlastní řešení, které je obsaženo v kapitole „Přehled dosažených výsledků“. Postupně jsou představovány výsledky práce a dílčí závěry, někdy teoretické, ale častěji podložené důkazy převážně v podobě výstupů softwarových aplikací či simulací a jejich vzájemným srovnáváním. Některé domněnky jsou podloženy i praktickým měřením na různých optických trasách. Tato měření byla provedena díky společnosti PROFiber Networking CZ s.r.o. s použitím profesionálního měřicího přístroje FTB-5500B. Dosažené výsledky práce popisují nejprve ucelený soubor aplikací umožňující jev PMD cíleně simulovat, studovat princip jeho vzniku a měřit jeho dopad na přenášený signál. Součástí je i poloprofesionální aplikace, která umožňuje projektovat optickou trasu se zahrnutím jevu PMD.

Nejobsáhlejší částí je subkapitola 3.4 kapitoly 3 „Vliv modulačních formátů na PMD“, ve které je představena kompletní studie s výsledky získanými simulacemi a ověřenými srovnáním s výstupy jiných vědců. Přehledná obrazová dokumentace je uvedena odděleně v přílohách Disertační práce.

# 1 PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU PROBLEMATIKY

Práce je zaměřena na současný trend zvyšování přenosových rychlostí optických vláken s využitím vlnových multiplexů. S novými trendy vyvstávají nové teoretické a praktické problémy. Kromě známé vidové disperze existují problémy způsobené chromatickou a polarizační vidovou disperzí. V úvodu práce jsou proto postupně představeny všechny dnes známé jevy negativně ovlivňující signál přenášený optickým vláknem. Zvláštní pozornost je věnována jevu PMD a následně užité teorii.

## 1.1 DISPERZE

Disperze ovlivňuje časový průběh (odezvu) optického signálu, tj. přenosové vlastnosti. U digitálního systému se projevuje rozšířením optických pulsů při průchodu optickým vláknem, u analogového systému je to pak zmenšením frekvenční šířky modulačního signálu optické nosné. Výsledný rozšířený signál zasahuje svou šířkou do okolních bitů a přesahuje rozhodovací úroveň, následkem čehož vzniká tzv. mezisymbolová interference.

Všechny druhy disperzí se podílejí na rozšiřování přenášených impulsů (měřeno v časové oblasti).

- Vidová disperze

Vidová disperze je dána časovou diferencí nejrychlejšího a nejpomalejšího vidu při jednom kmotočtu. 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  $L/2$ ).

Tento jev se projevuje především u dlouhých vláken impulsového provozu, při přenosu dat na větší vzdálenosti a omezuje počet impulsů, 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 [17]. Typická hodnota pro vidovou disperzi stepindexových vláken je asi 20 ns/km, což odpovídá 3 dB.

- Materiálová disperze  $D_{MAT}(\lambda)$

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 [17].

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  $\mu\text{m}$ .

- Vlnovodná disperze  $D_{WG}(\lambda)$

Vychází ze závislosti skupinového zpoždění daného vidu na kmitočtu. Se změnou kmitočtu se mění v dané struktuře tvar podélného pole jistého vidu [17]. Hlavní význam má v SM vláknech (jako fázové zkreslení signálu) a na vlnových 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.

- Profilová disperze  $D_P(\lambda)$

Je dána závislostí profilu indexu lomu na vlnové délce záření a z toho plynoucí závislosti rychlosti šíření vlny na kmitočtu [17].

Profilová disperze je poměrně malá a projevuje se až u vysokých přenosových rychlostí. Dosahovaná hodnota je 0,5 ps/nm.km.

- Chromatická disperze  $D_{CH}(\lambda)$

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

K snížení vlivu chromatické disperze na přenosový systém vede celá řada postupů. První možnost spočívá v aplikování tzv. podmínky nulové chromatické disperze podle vztahu, který vychází ze záporné hodnoty vlnovodové disperze,

$$D_{MAT}(\lambda) + D_P(\lambda) = D_{WG}(\lambda). \quad [\text{ps}] \quad (1)$$

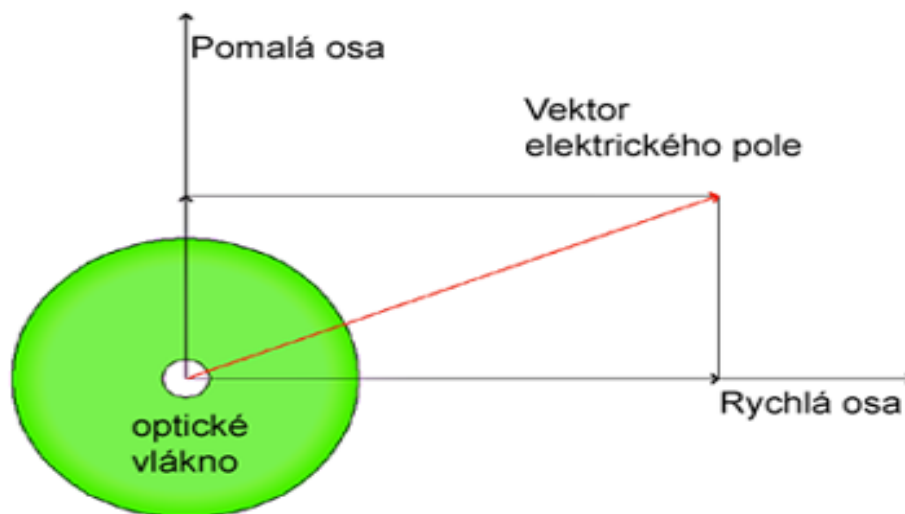
Vliv lze však též snížit vhodným výběrem zdroje záření, jelikož širší spektrální pološířka zdroje záření způsobuje větší roztážení impulsů vlivem chromatické disperze.

## 1.2 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 i 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 – znázorněno na obrázku Obr. 1.1.



*Obr. 1.1. Rozložení vektoru Elektrického pole do dvou polarizačních stavů.*

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 vlákně 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.

### 1.3 SOUČASNÉ TECHNIKY PLÁNOVÁNÍ OPTICKÝCH TRAS

Pokrok v optických komunikacích umožnil problémy útlumu a chromatické disperze prakticky zanedbat při plánování vysokorychlostních optických spojů [15]. Jediným skutečným problémem zůstává polarizační vidová disperze PMD, která se na degeneraci vysokorychlostního signálu podílí měrou sice zdaleka ne největší, ale nejvýznamější pro svou obtížnou odstranitelnost. Mezinárodní telekomunikační unie ITU stanovila limity pro maximální hodnoty PMD. V praxi se však častěji užívá deklarace 1/10 doby trvání jednoho signálového prvku, ale ve skutečnosti jsou trasy projektovány s ještě o řád lepšími parametry. V 1.Obr. 1.1.Tab. 1.1 jsou všechna doporučení přehledně srovnána.

Tab. 1.1. Doporučení ITU a limity PMD.

| přenosová rychlost                                       | 155 Mb/s | 622 Mb/s | 2,5 Gb/s  | 10 Gb/s   | 40 Gb/s  |
|----------------------------------------------------------|----------|----------|-----------|-----------|----------|
| SDH                                                      | STM-1    | STM-4    | STM-16    | STM-64    | STM-256  |
| trvání jednoho bitu                                      | 6,43 ns  | 1,61 ns  | 401,88 ps | 100,47 ps | 25,12 ps |
| limit PMD ITU                                            | 640 ps   | 160 ps   | 40 ps     | 10 ps     | 2,5 ps   |
| limit PMD deklarace 1/10                                 | 643 ps   | 161 ps   | 40,1 ps   | 10 ps     | 2,51 ps  |
| koeficient PMD na 400 km<br>$\text{ps}/\sqrt{\text{km}}$ | <32      | <8       | <2        | <0,5      | <0,125   |

Současné softwarové možnosti projektanta optických tras jsou vynikající, ale právě řešení problémů s PMD jsou do jisté míry velmi omezená. Existuje celá řada nástrojů pro tvorbu projektové dokumentace i podrobných výpočtů znehodnocujících vlivů na přenášený signál. Některé se vyznačují uživatelsky příjemným prostředím umožňujícím přehledně graficky plánovat, jiné jsou zaměřeny spíše developersky pro pokusy na trasách a testování různých variant. V následujících odstavcích jsou popsány všechny dostupné návrhové programy.

OptSim - je intuitivní modelovací a simulační prostředí společnosti RSoft podporující návrh a stanovení výkonnosti fyzické vrstvy (přenosové části) optických komunikačních systémů. Jako jediný z uvedených umožňuje volit hodnotu PMD optických vláken. Není však možné sledovat pouze tento parametr ani tvořit jakékoliv parametrické simulace. Aplikace pouze zahrne vliv PMD do všech nepříznivých vlivů trasy, vykreslí diagram oka pro zvolený modulační kmitočet a umožní výsledné hodnoty exportovat do prostředí MATLAB.

EXFO Optical software - aplikace vyvinutá speciálně pro zpracování výstupů měřicích přístrojů EXFO, chybí jakákoliv možnost trasy konfigurovat či měnit vstupní parametry.

FIBERCORE - Polarisation Mode Dispersion Emulators – jsou emulátory pro měření. Jedná se o hardwarové řešení sloužící k emulaci imaginární optické trasy. Chybí jakákoliv možnost trasy konfigurovat či měnit vstupní parametry.

OpTaliX – simulátor geometrické optiky, možnost simulovat optické přenosy, sledovat parametrické změny indexu lomu, útlumu prostředí, pohyblivě graficky vyobrazovat výsledky v závislosti na parametrech. Simulace disperzních vlivů je však možná pouze pro chromatickou disperzi.

Soubor simulačních programů OptiWave – jedná se o japonský software, bohužel s absencí anglického jazykového prostředí. Součástí souboru jsou jednotlivé aplikace OptiSystem, OptiBPM, OptiGratings, OptiFiber a OptiAmplifier.

Žádná z uvedených projekčních pomůcek však neobsahuje simulace PMD ani neumožňuje jakýmkoliv způsobem zobrazovat výslednou hodnotu PMD na základě dynamicky se měnících parametrů trasy.

## 2 CÍLE DISERTAČNÍ PRÁCE

Jak bylo zmíněno v úvodu disertační práce, polarizační vidová disperze je v současné době velmi významným omezujícím faktorem optovláknové komunikace. Přehled současného stavu problematiky jasně představuje veškeré negativní jevy, které degenerují užitečný signál přenášený optickým vláknem. Téměř všechny jevy dokážeme předem přesně definovat výpočtem či zpětně stanovit měřením. Současná věda již dávno vyřešila problematiku vidové disperze a disperzi chromatickou lze snadno kompenzovat či dokonce využít ku prospěchu optické trasy. Jediným jevem, který lze stále nedostatečně stanovit před realizací trasy, dokonce ani měřením nezískáme jeho hodnotu v čase se neměnicí, je polarizační vidová disperze. Tento jev je natolik významný, že se stal jevem omezujícím přenosovou rychlost především páteřních tras, které jsou určeny k přenosu na velké vzdálenosti.

Cílem disertační práce je tedy získání hlubokých znalostí o fyzikální podstatě polarizace světla a jejích důsledcích, které pomohou realizovat programové vybavení počítače, jímž bude možné účinně snížit dopady PMD na přenášený signál, PMD dostatečně přesně předpovědět ještě před realizací trasy, stanovit teoretické možnosti kompenzace a získat dostatečný potenciál pro účinné snížení hodnot DGD (Differential Group Delay) u tras již realizovaných. Cílem je dosáhnout těmito prostředky vyšší kapacity optického spoje, tedy zvýšení užitečné přenosové rychlosti. Produktem práce bude soubor nástrojů umožňujících obecně vylepšovat poměry DGD a snižovat celkový podíl omezujících vlivů PMD na optickou trasu.

V Přehledu současného stavu problematiky byl na základě teoretických znalostí vyhotoven soupis možných způsobů omezení významu jevu PMD. Jednoznačným cílem této disertační práce je předejít nutnosti použít kterékoliv z uvedených metod.

### 3 HLAVNÍ VÝSLEDKY PRÁCE

Postupně jsou představovány dílčí závěry a výsledky disertační práce.

Prvním výstupem je statistický kalkulátor využívající metodu Monte Carlo pro vyhodnocení naměřených hodnot diferenciálního grupového zpoždění. Výpočet probíhá na základě doporučení ITU. Matematický aparát je součástí doporučení např. ITU G.652.

Významnou částí výsledků disertační práce je vytvořená návrhová aplikace, která byla naprogramována jako poloprofesionální a může sloužit k výuce a projektování optických tras různých typů. Jako jediný z výstupů této práce zahrnuje vliv útlumu, chromatické a polarizační vidové disperze na optický signál.

Matematicky nejnáročnější operace byly zmechanizovány v podkapitole 3.3, která představuje simulační aplikace umožňující vyhodnotit vlivy PMD u multiplexních systémů a následně umožňují simulovat jejich omezení při měnících se vstupních parametrech. Čistě pro přehlednost a názornost byla vytvořena aplikace Momentka PMD, díky níž lze vykreslit okamžitý průběh rychlé a pomalé osy v libovolném bodě optické trasy.

Nejobsáhlejší částí je „Vliv modulačních formátů na PMD“, ve které je představena kompletní studie s výsledky získanými simulacemi a ověřenými srovnáním s výstupy jiných vědců. Přehledná obrazová dokumentace je uvedena odděleně v přílohách Disertační práce.

Posledním výstupem jsou cenná praktická ověření výsledků, kterých bylo dosaženo zejména díky možnosti použití měřicího přístroje FTB-5500B. Srovnáním výsledků získaných simulacemi a hodnot prakticky naměřených je práce zakončena.

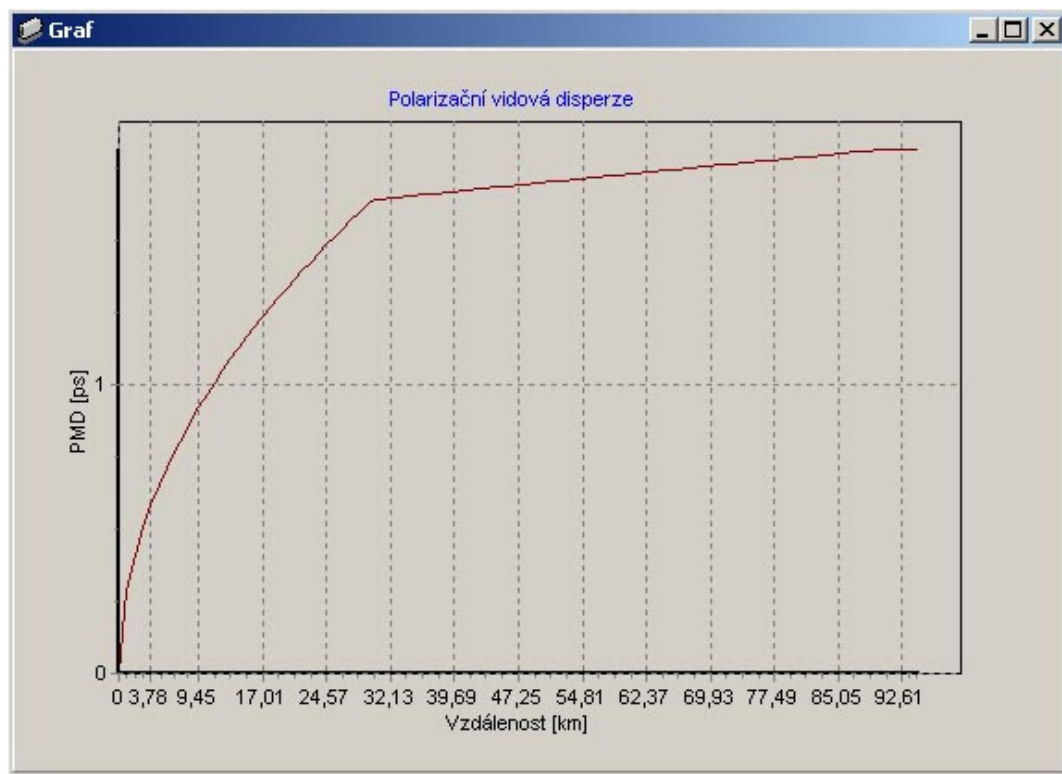
#### 3.1 VÝPOČET PMD STATISTICKOU METODOU MONTE CARLO

Jak je uvedeno v kapitole 1, podstata polarizační vidové disperze neumožňuje její snadný výpočet v libovolném bodě optického vlákna. Pro snadné určení celkové hodnoty PMD je vhodné použít aplikaci Výpočet PMD, která byla v rámci této disertační práce naprogramována v programovacím jazyce Object Pascal ve vývojovém prostředí Delphi 7. Hlavní předností aplikace je její snadná obsluha, uživatelsky vhodné vyhnutí se nepříjemným matematickým operacím a konečně i přehledné grafické výstupy. Matematický aparát vychází částečně z principu polarizace světla podrobně popsáné v Přehledu současného stavu problematiky a částečně z výpočtu pomocí statistických metod (např. Monte Carlo).

Výsledek kalkulace je pak zobrazen v závislosti na délce optického vlákna. Přínos vytvořené aplikace je tak nesporný. Jeho výstupy sice nepřinášejí žádný nový vědecký objev, avšak jednoznačně usnadňují práci se soubory naměřených hodnot PMD a výrazně zjednodušují výpočty pomocí Jonesových a Stokesových parametrů. Jak se později ukázalo, příprava této aplikace byla nutnou podmínkou pro splnění zadání disertační práce, jelikož její výstupy byly mnohokrát použity při vyhodnocování výsledků jak projekčních aplikací, tak později i experimentálně získaných hodnot (v podkapitolách 3.2, 3.3 a 3.5 této části práce).

## 3.2 NÁVRHOVÁ APLIKACE

Hlavním cílem řešení této části bylo vytvořit pro další potřebu takové programové vybavení počítače, které umožňuje modelovat disperzní vlastnosti optických komunikačních tras a následně určit vliv těchto parametrů na přenášený signál. Během studia problematiky se ukázalo, že je nutno disponovat maximálním počtem informací o trase, abychom mohli stanovit skutečně objektivní příčiny zhoršených disperzních parametrů.



Obr. 3.1. Ukázka grafu závislosti velikosti PMD na délce optické trasy.

Obr. 3.2.

Tato simulace umožní získat komplexní přehled o disperzních poměrech podél optického vlákna a umožní operativně měnit parametry a komponenty uvažované optické trasy. Počáteční snahou byla jednoduchost aplikace a zároveň variabilita přidávaných komponent, aby mohla být nasimulována libovolná trasa dle potřeby. Jako dostatečný výstup byl stanoven ucelený protokol demonstrující měření útlumu, chromatické a polarizační vidové disperze a zobrazení hodnot v grafech s možností odečítat hodnoty v libovolném místě optické trasy.

Program obsahuje databázi všech základních stavebních prvků optických systémů (zdroje, detektory, vlákna, kompenzační vlákna, konektory, zesilovače a útlumové články). Popis kompletní vytvořené trasy lze uložit do protokolu ve formátu HTML a následně vytisknout.

- Závěr

Aplikace byla vytvořena jako poloprofesionální, umožňující pohodlnou, plnohodnotnou a komplexní projekci optických tras. Byla nasazena v laboratorních cvičeních předmětu Optické

sítě (za tímto účelem byl vypracován návod k laboratorní úloze) a její výstupy byly odprezentovány v zahraničním časopise [31].

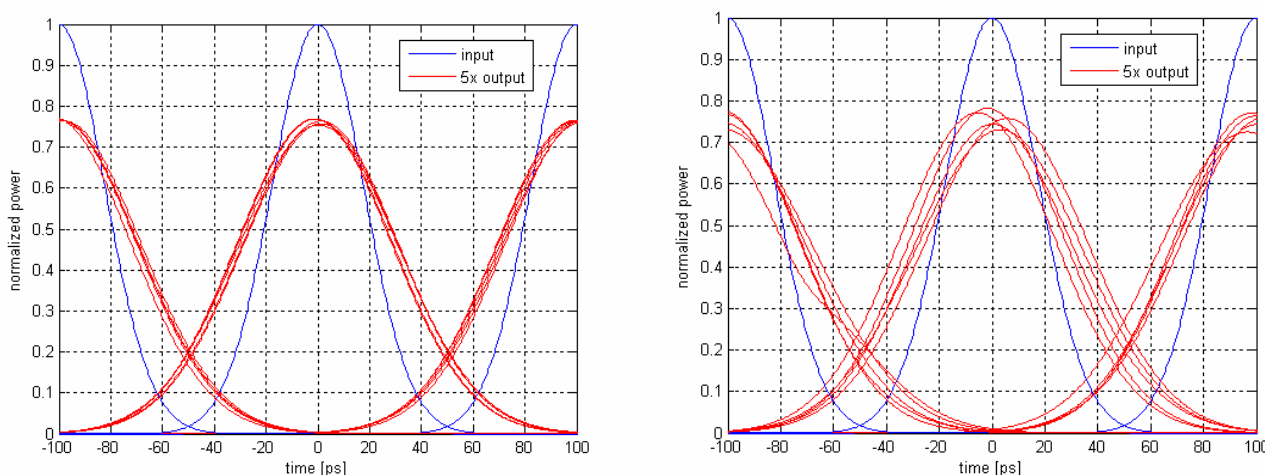
### 3.3 SIMULAČNÍ APLIKACE

Pro snadné získání potřebných výsledků a možnosti jejího vzájemného porovnání bylo nutno zmechanizovat velmi náročný matematický aparát. Matematické operace Schrödingerových rovnic, Jonesových a Stokesových vektorů je velmi obtížné ručně zpracovávat, zejména pokud se jedná o zpracování desítek či stovek měření získaných hodnot diferenciálního grupového zpoždění. Třetí aplikací je čistě pro přehlednost a názornost vytvořená aplikace Momentka PMD, díky níž lze vykreslit okamžitý průběh rychlé a pomalé osy v libovolném bodě optické trasy.

- Vyhodnocení vlivu PMD u multiplexních systémů

Matematickým modelem šíření optického pulsu ve vlákne je nelineární Schrödingerova rovnice (NLSE, NonLinear Schrödinger Equation). Klasická NLSE představuje skalární popis šíření světla, ovšem to je v současnosti nedostačující, jelikož při současných vyšších přenosových rychlostech se výrazně uplatňuje vliv PMD. U PMD uvažujeme dvě kolmé polarizované složky vidu šířící se optickým vláknem zvlášť, proto se zavedly vázané NLSE, kde jednotlivé rovnice popisují šíření každé polarizované složky, a tím jsme schopni zahrnout i vliv PMD. NLSE je parciální diferenciální rovnice a její numerické řešení není jednoduché. Pro řešení těchto typů rovnic se prakticky používá Split-Step Fourierova metoda (SSFM).

Navržený program realizovaný v prostředí MATLAB porovnává šíření optického pulsu s a bez uvažování PMD. Vstupní hodnoty pro výpočet jsou vybrány tak, aby odpovídaly reálným parametrům resp. uváděným katalogovým hodnotám. Pro názornost jsou, s výjimkou chromatické disperze, zcela zanedbány ostatní vlivy působící na signál přenášený optickým vláknem.



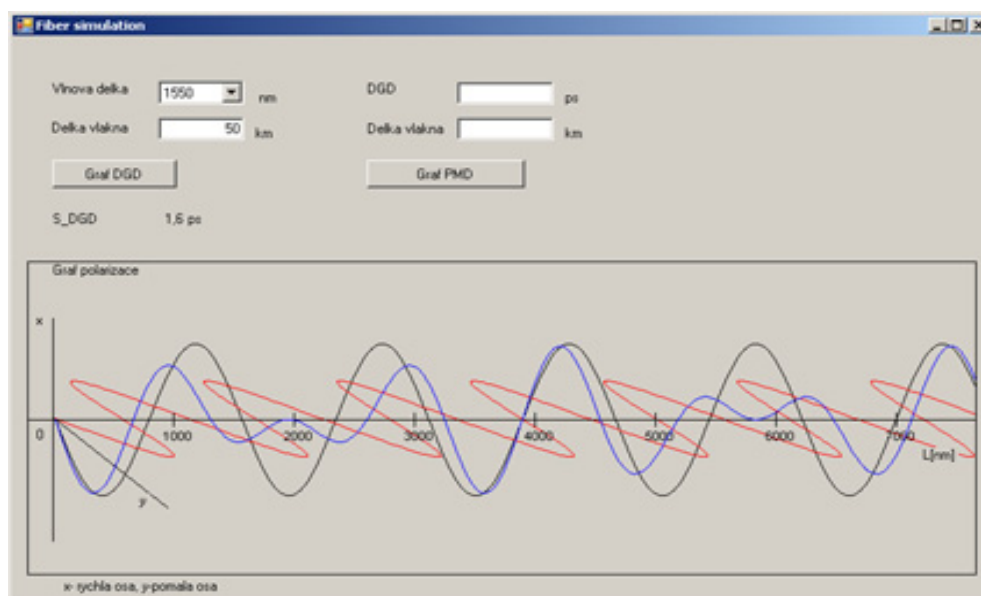
Obr. 3.3. Diagram oka  $D_{PMD} = 1 \text{ ps}/\sqrt{\text{km}}$  (vlevo) a  $D_{PMD} = 3 \text{ ps}/\sqrt{\text{km}}$ .

Na obrázku Obr. 3.3 můžeme srovnat, jak se bude lišit výstupní signál při vyšších hodnotách PMD, při dalším zvyšování DPMD již signál bude více degradovaný. Při přenosových rychlostech přes 40 Gb/s (tedy při šířce pulsu  $T_0 = 12,5$  ps) chromatickou disperzi snížíme na  $D = 1$  ps/nm.km, protože signál bude na tuto disperzi více náchylný, a ponecháme-li DPMD = 1 ps/ $\sqrt{\text{km}}$ , můžeme srovnat Obr. 3.3. Z čehož vyplývá, že výstupní signál je značně horší než na Obr. 3.3. Při přenosových rychlostech 40 Gb/s je vliv disperzí mnohem významnější a na zařízení této technologie musí být kladeny náročnější požadavky. U moderních zařízení se při takto vysokých přenosových rychlostech používají již nové typy kódování než RZ.

- Aplikace Momentka PMD

Aplikace Momentka polarizační vidové disperze (dále jen MPMD) byla vytvořena v rámci této disertační práce za účelem možnosti zobrazení okamžitého průběhu vektorového součtu horizontální a vertikální roviny polarizace v libovolném bodě optické trasy (v libovolné vzdálenosti od počátku vlákna). Obrovskou předností aplikace je získání představy uživatele o vzniku PMD. Původní představou bylo vytvořit aplikaci v takové podobě, aby mohla být i součástí laboratorních úloh předmětu Optické sítě vyučovaného na Fakultě elektrotechniky a komunikačních technologií VUT v Brně, ovšem složitost problematiky polarizační vidové disperze byla nakonec stažena z laboratorních úloh a nahrazena jednoduššími a názornějšími aplikacemi vláknové optiky.

Aplikace byla vyvíjena v prostředí MATLAB, které umožnilo snadno a hojně využít jeho matematického aparátu a schopností pracovat s maticemi. Byla použita nástavba Graphical User Interface (GUI), která uživatelsky velmi příjemně umožňuje snadněji modifikovat parametry simulace a zobrazovat výsledné grafy.



Obr. 3.4. Výstup aplikace MPMD, modře znázorněn vznik PMD.

Aplikace simuluje 3D průběh momentky vektoru elektrického pole světla procházejícího optickou trasou. Na Obr. 3.4 je modře vykreslen průběh momentky vektorového součtu horizontálního a vertikálního vidu.

Vstupními hodnotami simulace jsou vlnová délka, délka vlákna a hodnota DGD konkrétního typu vlákna nebo konkrétní označení doporučení ITU, dle kterého bylo vlákno vyrobeno. Průběh se vykreslí do grafu po stisknutí tlačítka Ideální průběh. Výstupy této části práce jsou velmi přínosné pro získání okamžité teoretické hodnoty a fáze vektorového součtu hlavních stavů polarizace.

### 3.4 VLIV MODULAČNÍCH FORMÁTŮ NA PMD

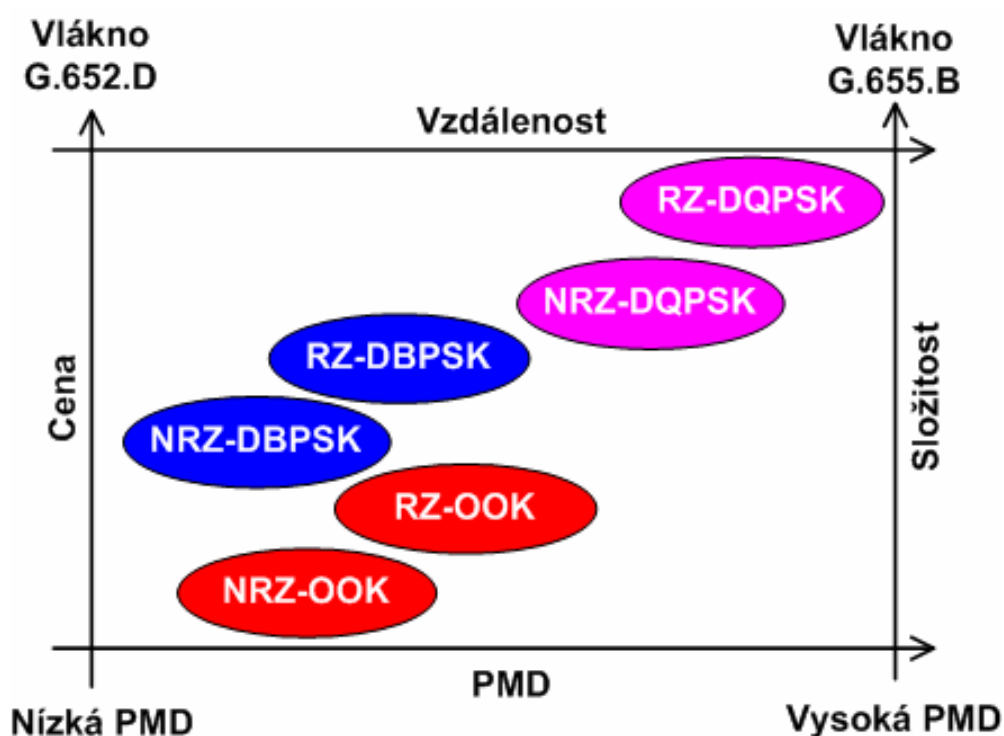
Aplikace byla naprogramována za účelem vyhodnocení vlivu jednotlivých modulačních formátů na hodnotu polarizační vidové disperze optické trasy. V celém programu se tak počítá pouze se zkreslením způsobeným polarizační vidovou disperzí. Aplikace byla naprogramována pro program MATLAB a uložena jako skript v souboru m-file. Jeho název je oko.m a je uložen na přiloženém kompaktním disku. V tabulce Tab. 3.1 jsou přehledně vyobrazeny výstupy aplikace (vliv modulace na pokles diagramu oka).

Tab. 3.1. Vliv modulace na pokles diagramu oka (Power Penalty).

| Typ vlákna     | Druh modulace | Délka vlákna L | DGD        | Power Penalty $\epsilon$ |
|----------------|---------------|----------------|------------|--------------------------|
| <b>G.655.B</b> | NRZ-OOK       | 1000 km        | 15,8114 ps | 4,4 dB                   |
|                | RZ-OOK        | 1000 km        | 15,8114 ps | 2,2 dB                   |
|                | NRZ-DBPSK     | 1000 km        | 15,8114 ps | 5,0 dB                   |
|                | RZ-DBPSK      | 1000 km        | 15,8114 ps | 2,5 dB                   |
|                | NRZ DQPSK     | 1000 km        | 15,8114 ps | 1,25 dB                  |
|                | RZ-DQPSK      | 1000 km        | 15,8114 ps | 0,625 dB                 |
| <b>G.652.D</b> | NRZ-OOK       | 1000 km        | 6,3246 ps  | 0,704 dB                 |
|                | RZ-OOK        | 1000 km        | 6,3246 ps  | 0,352 dB                 |
|                | NRZ-DBPSK     | 1000 km        | 6,3246 ps  | 0,8 dB                   |
|                | RZ-DBPSK      | 1000 km        | 6,3246 ps  | 0,4 dB                   |
|                | NRZ DQPSK     | 1000 km        | 6,3246 ps  | 0,2 dB                   |
|                | RZ-DQPSK      | 1000 km        | 6,3246 ps  | 0,1 dB                   |

Z hodnot uvedených v tabulce Tab. 3.1 je patrné, že nejlepší toleranci k PMD mají modulační schémata RZ-DQPSK a NRZ-DQPSK. Z výsledků simulací je však také patrné, že i modulační schéma RZ-OOK vykazuje relativně (pro některé aplikace) vyhovující hodnotu Power Penalty. Nevýhodou kvadraturních modulací je složitost a vysoká cena realizace. Nejhorší toleranci k PMD mají modulační schémata NRZ-DBPSK a NRZ-OOK. Nevýhodou NRZ-DBPSK je opět složitější realizace než NRZ-OOK. Výhodnější než NRZ-DBPSK a NRZ-OOK je pravděpodobně použití RZ-DBPSK a RZ-OOK.

Obrázek Obr. 3.5. přehledně ukazuje, která z modulací je vhodná pro konkrétní aplikaci. Obrázek zohledňuje nejvýznamnější aspekt – totiž PMD, ale i cenu a složitost v závislosti na délce optické trasy.



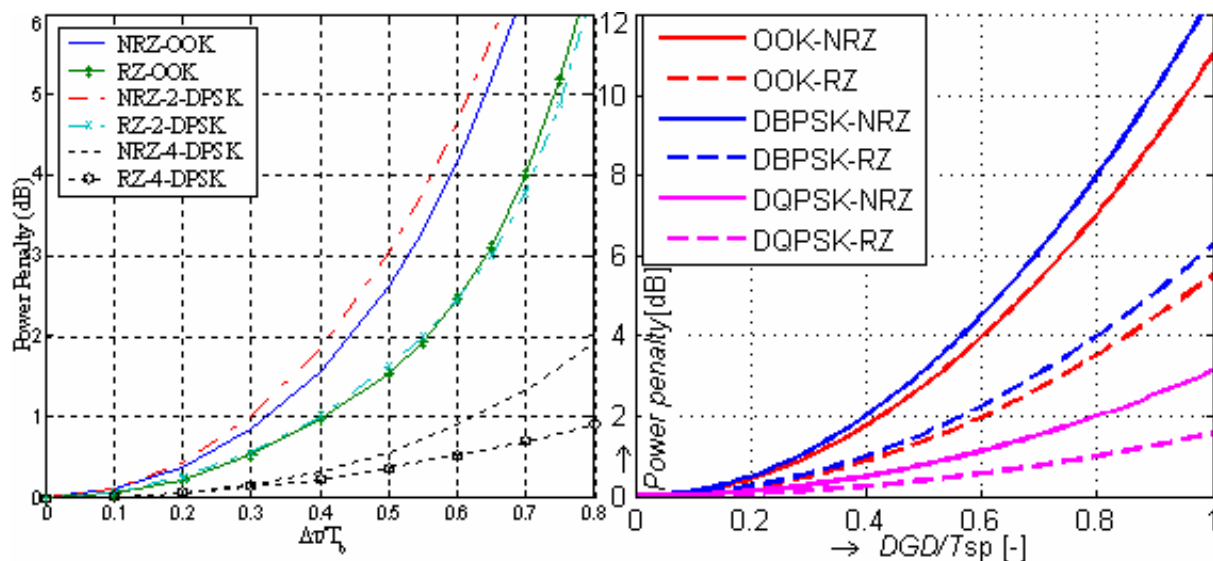
Obr. 3.5. Shrnutí všech druhů modulací.

- Ověření dosažených výsledků

Pro srovnání výpočetních mechanismů byly použity výsledky disertační práce autora čínské národnosti Jina Wang, absolventa University of California, Berkeley, CA 94720. Jin Wang ve své práci z roku 2003 „Performance Evaluation of DPSK Optical Fiber Communication Systems” [19] zcela jinými teoretickými metodami dospěl k teoretickým závěrům, které ve své době ještě nemohl podložit praktickými kontrolními mechanismy, i tak však byla jeho práce velkým přínosem. Jin Wang se ve své studii zabývá chromatickou a polarizační vidovou disperzí a vyhodnocuje její vliv na pokles diagramu oka pro různé modulační schémata.

Na obrázku Obr. 3.6 je zobrazeno srovnání převzatého výstupu práce Jina Wang (vlevo) se závěry simulační aplikace, která je součástí této disertační práce. Závislost Power Penalty byla

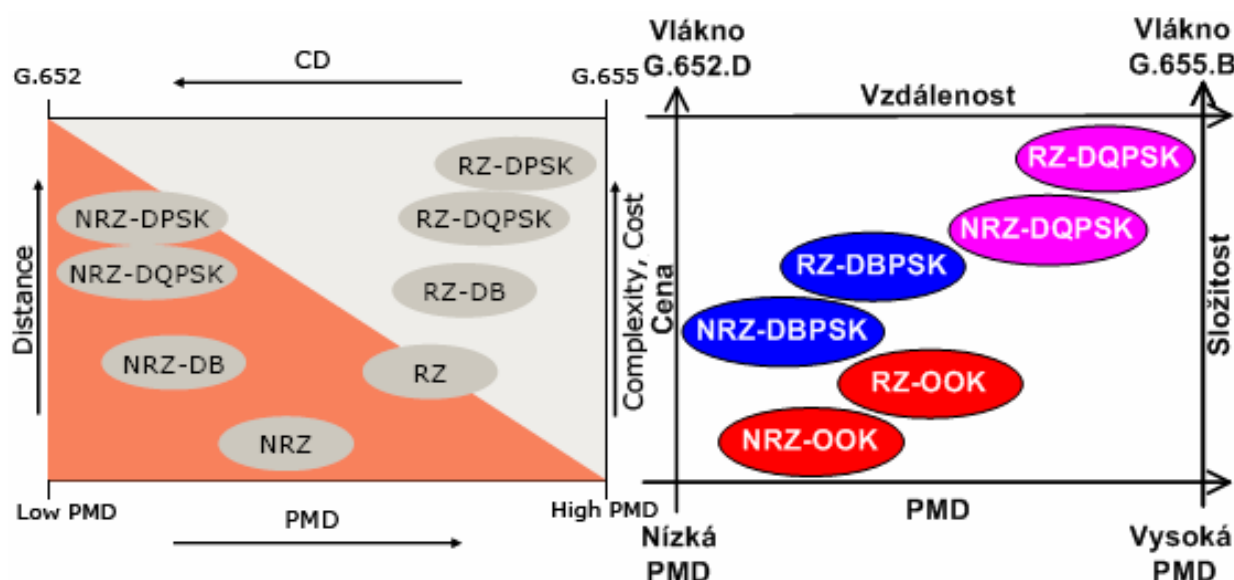
záměrně vyjádřena stejným způsobem, aby byla na první pohled patrná shoda obou výsledků vědeckých prací.



Obr. 3.6. Porovnání závislosti Power Penalty s výsledky Jina Wanga.

Díky grafickým výstupům aplikace lze rozhodnout, jak velkou toleranci k polarizační vidové disperzi jednotlivé modulační formáty mají. Modulační formáty RZ-QPSK a NRZ-DQPSK se tak jeví jako nejvýhodnější.

Pro srovnání vhodnosti jednotlivých modulačních formátů byla použita vědecká práce zaměstnance anglické společnosti ADVA Optical Networking Ltd., Clifton Moor, York UK. Dr. Klaus Grobe ve své práci „40Gb/s in metro and regional optical networking“ [18] uvádí své výsledky v přehledném grafu závislosti délky, finanční náročnosti na hodnotách CD a PMD. Autor užívá modulační formáty OOK, DBPSK, DQPSK. Navíc ve své práci používá modulaci DB (DuoBinary). DB je kombinace binární modulační formáty PSK a OOK. Nulová hodnota signálu je označována „0“, kladná hodnota „1“ a záporná „-1“. Grafy se sice liší v podání výsledků chromatické disperze, přesto je však na obrázku Obr. 3.7 jasné patrné, že výhodnost některých modulačních formátů je v obou pracích shodná. Vlevo je graf z práce Dr. Klause Grobeho zahrnující do svých výsledků i chromatickou disperzi.



Obr. 3.7. Porovnání výsledků modulací s prací autora Dr. Klause Grobe

Z levé části Obr. 3.7 je patrné, že všechny modulační schémata s návratem k nule mají lepší toleranci k vysokým hodnotám polarizační vidové disperze. Naproti tomu modulační schémata s NRZ mají zase lepší toleranci k vysokým hodnotám chromatické disperze. V pravé části Obr. 3.7 vidíme, jaký vliv bude mít na modulační schémata pouhá polarizační vidová disperze.

Mezi hlavní rozdíly výsledku obou prací patří vyhodnocení jednotlivých modulací v závislosti na délce optického vlákna. V článku [18] je modulační schémata NRZ-DQPSK a RZ-DQPSK vyhodnocena v závislosti na vzdálenosti hůře než modulační schémata NRZ-DBPSK a RZ-DBPSK. Ze závěrů naprogramované simulační aplikace je zřejmé, že s použitím modulací NRZ-DQPSK a RZ-DQPSK lze dosáhnout delších vzdáleností, jak vyplývá z grafů poklesů Power Penalty v příloze Disertační práce. Zbylé modulační schémata se patrně liší již jen příčinou nezakalkulovaného vlivu chromatické disperze.

### 3.5 PRAKTICKÉ OVĚŘENÍ VÝSLEDKŮ

Ve spolupráci se společností PROFiber Networking CZ s.r.o. byly v měsíci lednu 2008 provedeny zkušební měření chromatické a polarizační vidové disperze. Jednalo se o kombinace uložených testovacích kabelů 1,5 km a 25 km, přičemž PMD byla měřena na šesti testovacích vláknech délky 25 km uložených ve dvou různých kabelových trasách a na třech dalších testovacích vláknech uložených v tomtéž kabelu o délce 1,5 km. Společnost PROFiber Networking CZ s.r.o. umožnila získat měření pomocí přístroje EXFO FTB-5500B, který bezplatně zapůjčila. Díky výrobci měřicích přístrojů, kanadské společnosti EXFO Electro-Optical Engineering Inc., která bezplatně poskytla profesionální softwarový nástroj ToolBox 6 s nainstalovanými kity Polarization Mode Dispersion Analyzer a Polarization Mode Dispersion Analyzer Version B, bylo možné naměřené výsledky zpracovat a přehledně vyhodnotit.

Pro konkrétní vlákna na trasách A, B a C bylo díky statistickému zpracování možno stanovit výslednou tabulku hodnot Tab. 4.1 teoretických maximálních kapacit. Hodnoty byly získány aplikací Výpočet PMD. Je nutno připomenout, že tyto hodnoty jsou teoretické a vypočtené

záměrně pouze na základě vlivu jevu PMD. V praxi by bylo velmi obtížné dosáhnout takových přenosových rychlostí vlivem ostatních negativních jevů popsanych v Přehledu současného stavu problematiky.

Tab. 4.1. Přehled teoretických přenosových rychlostí.

| Trasa | Vlákno | Délka [km] | hodnota PMD [ps] | PMD koeficient [ps.km <sup>-1/2</sup> ] | Přenosová rychlost [Gbps] |
|-------|--------|------------|------------------|-----------------------------------------|---------------------------|
| A     | 01     | 25         | 0,218            | 0,0437                                  | 458,72                    |
| A     | 02     | 25         | 0,185            | 0,0371                                  | 540,54                    |
| A     | 03     | 25         | 0,352            | 0,0704                                  | 284,09                    |
| B     | 04     | 25         | 0,304            | 0,0607                                  | 328,95                    |
| B     | 05     | 25         | 0,415            | 0,0829                                  | 240,96                    |
| B     | 06     | 25         | 0,402            | 0,0803                                  | 248,76                    |
| C     | 07     | 1,5        | 0,154            | 0,126                                   | 649,35                    |
| C     | 08     | 1,5        | 0,185            | 0,037                                   | 540,54                    |
| C     | 09     | 1,5        | 0,029            | 0,023                                   | 3448,28                   |
| C     | 10     | 1,5        | 0,064            | 0,052                                   | 1562,50                   |

## 4 ZÁVĚR

Disertační práce se ve své úvodní části zabývá vlivem negativních jevů na signál přenášený optickým vláknem. Postupně jsou představovány jednotlivé jevy vznikající v optickém vlákně, je uvedena jejich příčina, následky a možnosti jejich odstranění či kompenzování. V souladu se zadáním disertační práce se přehled současného stavu řešené problematiky a celá další práce orientuje výhradně na jev zvaný polarizační vidová disperze (PMD), který je zde velmi podrobně vysvětlen včetně matematických principů. V další části přehledu současného stavu problematiky PMD jsou uvedeny principy, kterých bylo využito při výzkumu, zejména popis měřících technik, popis používaných modulačních technik, matematika chybovosti a statistické matematické operace.

Nejvýznamější přínos disertační práce spočívá v komplexním souboru aplikací, které umožňují do značné míry modelovat jev zvaný polarizační vidová disperze a získat tak velmi ucelený obraz o jeho vzniku, vývoji, šíření a vlivu na přenášený signál.

Prvním představeným výstupem je výpočtová aplikace využívající složitého matematického aparátu zpracování statistických dat metodou Monte Carlo. Přínosem této aplikace je významné usnadnění výpočtů a okamžité získání výstupní hodnoty z naměřených hodnot diferenciálního grupového zpoždění.

Návrhová aplikace, která byla vytvořena jako poloprofesionální a využitelná v rámci laboratorních cvičení či ke komerční projekci optických tras, umožňuje velmi přesně a přehledně vymodelovat poměry na trase z pohledu útlumu, chromatické disperze a polarizační vidové disperze. Vytvořený program umožňuje přidávat libovolné komponenty optické trasy, výstupní hodnoty okamžitě přepočítává a nabízí grafické výstupy vývoje zmiňovaných veličin v závislosti na délce optické trasy.

Soubor je doplněn trojicí simulačních aplikací, z nichž dvě se věnují multiplexním systémům. Simulátory vytvořené v prostředí MATLAB umožňují vyhodnotit vliv polarizační vidové disperze u multiplexních systémů a omezení vlivu jevu PMD. Tím je značně usnadněn postup hledání kompromisu při použití multiplexních systémů, což je stěžejním tématem této práce. Třetí simulací je aplikace Momentka PMD, která umožňuje díky skrytému matematickému aparátu uživatelsky velmi příjemně zobrazit okamžitý stav obou polarizačních rovin v libovolném bodě optického vlákna.

V další části následuje rozsáhlá podkapitola věnující se možnosti eliminovat vliv PMD použitím různých modulačních formátů. Za účelem získání spolehlivého výsledku bylo nutno naprogramovat a v prostředí MATLAB odsimulovat blokové diagramy testovaných modulačních formátů. Výstupním parametrem byla chybovost při totožných vstupních parametrech (na stejné optické trase), avšak odlišném použitém kódování. Nejlepší toleranci k PMD tak na základě výstupů simulací vykazují modulace RZ-DQPSK a NRZ-DQPSK. Je však také patrné, že i modulace RZ-OOK vykazuje dobrou hodnotu poklesu signálu k šumu. Nejhorší toleranci k PMD naopak mají modulace NRZ-DBPSK a NRZ-OOK. Nevýhodou NRZ-DBPSK je však složitější realizace než NRZ-OOK. Výhodnější než NRZ-DBPSK a NRZ-OOK je pravděpodobně použití RZ-DBPSK a RZ-OOK. Detailní výsledky jsou uvedeny v příslušné podkapitole 3.4. Díky početné obrazové části simulací musely být tyto uvedeny v samostatné příloze této práce.

Měřeními získané hodnoty, díky nimž bylo možno alespoň částečně prakticky ověřit dosažené výsledky, jsou uvedeny v kapitole 4. Jejich získání nebylo snadné, jelikož rozšíření

přístrojů schopných měřit PMD není prozatím dostatečné. Proto je velkým úspěchem, že velké množství teoreticky získaných výsledků bylo možno ověřit vlastními měřeními a nikoliv pouze srovnáním s výsledky jiných vědců, jak je tomu v případě simulace vlivu modulačních formátů na význam jevu PMD.

Disertační práce je ucelenou vědeckou studií jevu polarizační vidové disperze u multiplexních i nemultiplexních systémů. Vytyčené cíle disertační práce byly beze zbytku splněny. Výsledky jsou podloženy rozsáhlými simulacemi a praktickými měřeními, které teoreticky získané hodnoty vesměs potvrzují. Kromě „pomůcek“ zjednodušujících do značné míry stanovení velikost PMD je významným přínosem vyhodnocení odolnosti používaných modulačních formátů vůči polarizační vidové disperzi.

# LITERATURA

## Seznam použité literatury

- [1] GALTAROSSA, A., MENYUK, C., R.: *Polarization Mode Dispersion*. Springer Science + Business Media, Inc., New York, 2005, ISBN: 0-387-23193-5.
- [2] DAMASK, J., N.: *Polarization optics in telecommunications*. Springer Science + Business Media, Inc., New York, 2005, ISBN 0-387-22493-9.
- [3] AGRAWAL, G., P.: *Fiber-Optic Communication Systems*. John Wiley, USA, 2002, ISBN 7302087490.
- [4] ELLIOTT B., GILMORE M.: *Fiber Optic Cabling*. Newnes; 2 edition (5 Dec 2001), ISBN-10: 0750650133.
- [5] AGRAWAL, Govind P. *Nonlinear Fiber Optics*. 2nd edition. San Diego: Academic Press, 1995. 592 s. ISBN 0-12-045142-5.
- [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).

Doporučení ITU, normy IEC, ČSN:

- [7] ITU-T Recommendation G.652: *Characteristics of a single-mode optical fibre cable*. ITU-T, April 1997.
- [8] ITU-T Recommendation G.653: *Characteristics of a dispersion-shifted single-mode optical fibre cable*. ITU-T, April 1997.
- [9] ITU-T Recommendation G.655: *Characteristics of a non-zero dispersion shifted single-mode optical fibre cable*. ITU-T, October 1996.
- [10] ITU-T Recommendation G.691: *Optical interfaces for single-channel STM-64, STM-256 and other SDH systems with optical amplifiers*. ITU-T, 03/2006.
- [11] IEC 61282-3: work in progress, *Guidelines for the Calculation of PMD in Fibre Optic Systems*.
- [12] ČSN EN 61290-11-1 (359271) *Zkušební metody optických zesilovačů. Část 11-1: Polarizační vidová disperze - Metoda analýzy vlastních čísel Jonesovy matice (JME)*, EAN kód: 8590963691077, účinná od 1.1.2004.
- [13] ITU-T RECOMMENDATION G.959.1: *Optical transport network physical layer interfaces*. [online]. 03/2006. Dostupný z WWW: <[http://www.itu.int/rec/dologin\\_pubasp?lang=e&id=T-REC-G.959.1-200603-I!!PDF-&type=items](http://www.itu.int/rec/dologin_pubasp?lang=e&id=T-REC-G.959.1-200603-I!!PDF-&type=items)>.

Výroční zprávy:

- [14] SDRUŽENÍ NIX.CZ: *VÝROČNÍ ZPRÁVA 2005*. Z.S.P.O., Praha, 2005  
[http://www.nix.cz/vyrzpravy/vyrocní\\_zprava\\_NIX\\_2005.pdf](http://www.nix.cz/vyrzpravy/vyrocní_zprava_NIX_2005.pdf).

Skriptum a kvalifikační práce:

- [15] ŠKORPIL, V.: *Vysokorychlostní komunikační technologie*. VUT – Ústav telekomunikací, 2002, ISBN 80-214-2244-0.
- [16] HAVELKA, D. *Nelineární vlivy optických vláken*. Diplomová práce. VUT FEKT, Brno 2007.
- [17] URBAN, F., MIKEL, B. *Optoelektronika a optické komunikace*. Skriptum. VUT FEKT, Brno, 2003.
- [18] Grobe, K.: *40 Gb/s in metro and regional optical networking*. [online], dostupný z WWW: <[http://www.terena.nl/events/tnc2006/core/getfile.php?file\\_id=707](http://www.terena.nl/events/tnc2006/core/getfile.php?file_id=707)>

- [19] WANG, J. : *Performance evaluation of DPSK optical fiber communication systems*. [online], dostupný z WWW:< <http://www-inst.eecs.berkeley.edu/~ee290f/sp04/DissertationTalk.ppt> >.
- [20] AGILENT TECHNOLOGIES: *Eye diagram measurements in advanced design system*. [online]. Dostupný z WWW: < [http://eesof.tm.agilent.com/pdf/si\\_seminar\\_2006\\_eye\\_diagrams.pdf](http://eesof.tm.agilent.com/pdf/si_seminar_2006_eye_diagrams.pdf) >.
- [21] CHAPMAN, S., J.: *MATLAB Programming for Engineers, 4e*. Cengage Learning, 2008, ISBN: 978-0-495-24449-3.

Technické zprávy:

- [22] ARUN-PRASAD CHIMATA, CHRISTOPHER A. *Development of an Adaptive Polarization-Mode Disperzion Compenzation System*. Technická zpráva, The University of Kansas, 2003, ITTC-FY2003-TR-18834-02.
- [23] HÁJEK, M., HOLOMEČEK, P.: *Nová metoda měření PMD optických kabelových tras*. MIKROKOM s.r.o., CABLEX, České Budějovice 2002.

Časopisecké články a příspěvky ve sbornících:

- [24] LIU, X., YANG, B., ZHANG, X.: *Polarization mode dispersion in WDM systems*. in Optical and Quantum Electronics, Volume 34, Number 7 / July, 2002, Springer Netherlands, s. 677-685, ISSN 0306-8919 (Print) 1572-817X (Online).
- [25] PUZIO, M., ZHU, Z., BLUM, R., ANDREKSON, R., LI, T., SADJAPDOUR, H.: *Channel coding for polarization-mode dispersion limited optical fiber transmission*. in Optics Express, Vol. 12, Issue 18, 2004, ISSN: 4333-4338.
- [26] GORDON J. P., KOGELNIK H.: *PMD fundamentals: Polarization mode dispersion in optical fibers*. in Proceedings National Academy of Sciences of the USA, April 25, 2000, vol. 97, ISSN: 9 4541-4550.

### Seznam vlastních prací

- [27] KYSELÁK, M.; DOROCIAK, P.; FILKA, M.: *The Optical Modulation Format Impact on Polarization Mode Dispersion*. In International Journal of Computer Science and Network Security. 2008. 2008(5). p. 27 - 30. ISSN 1738-7906.
- [28] KYSELÁK, M.; DOROCIAK, P.: *Vliv polarizační vidové disperze na odolnost modulačních formátů*. In Access Server. 2008. vol. 6. p. 1 - 5., číslo článku 2008040002, ISSN 1214-9675.
- [29] KYSELÁK, M.; DOROCIAK, P.: *Vliv diferenčního skupinového zpoždění na chybovost optického kanálu*. In Elektrověst - Internetový časopis (<http://www.elektrověst.cz>). 2008. 10(6). p. 1 - 6. ISSN 1213-1539.
- [30] KYSELÁK, M.; FILKA, M.; KREJČA, L.: *Simulation of pulse propagation in WDM systems*. In International Transaction on Computer Science and Engineering. 2008. 46(5). p. 150 - 155. ISSN 1738-6438.
- [31] KYSELÁK, M.; FILKA, M.: *The Design of Optical Routes Applications*. Springer Verlag. Mobile and Wireless Communication Networks. 2007. 12(1). p. 595 - 601. ISSN 1571-5736.
- [32] KYSELÁK, M.; FILKA, M.; SKŘIPSKÝ, J.: *The Dispersion of SM Optical Fibers*. International Transaction on Computer Science and Engineering. 2007. 35(1). p. 1 - 7. ISSN 1738-6438.

- [33] 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.
- [34] 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 80-214-3226-8.
- [35] KYSELÁK, M.: *High-Speed Optical Networks Planning*. In Research in Telecommunication Technology 2007. Liptovský Ján, ŽU Žilina. 2007. p. 1 - 3. ISBN 978-80-8070-735-4.

# CURRICULUM VITAE

## Ing. Martin Kyselák

---

Bašného 62, 623 00 Brno, mobil 777 263 576, martinkyselak@centrum.cz

### osobní údaje:

datum narození: 11. 7. 1981

stav: ženatý, 1 dítě

### profil:

Ing. Martin KYSELÁK (1981) je v akademickém roce 2007/2008 studentem 3. ročníku prezenční formy doktorského studijního programu Elektrotechnika, elektronika, komunikační a řídicí technika, obor Teleinformatika na FEKT VUT v Brně. Je absolventem Vysokého učení technického v Brně, Fakulty elektrotechniky a komunikačních technologií, oboru Elektronika a sdělovací technika.

Problematicke projekce komunikačních technologií se věnuje ve spolupráci se společností UNIS, spol. s r.o.

### vzdělání:

2005 - dosud **FEKT VUT v Brně**, PhD studium, Obor: Teleinformatika.

2000 - 2005: **FEKT VUT v Brně**, Mgr studium, Obor: EST.

### jazykové znalosti:

angličtina: pokročilý

němčina: pokročilý

### účast na projektech:

- FRVŠ reg. č. 2069/2006/G1 „Modelování přenosových vlastností optických komunikačních traktů“ (spoluřešitel).
- FRVŠ reg. č. 1683/2007/F1a „Inovace laboratorní výuky v předmětu Přenosová média“ (spoluřešitel).
- FRVŠ reg. č. 714/2007/G1 „Měření chromatické a polarizační vidové disperze a její začlenění do výuky“ (řešitel).
- FRVŠ reg. č. 1776/2008/G1 „Zavedení problematiky sledovacích systémů a jejich využití v telekomunikacích do výuky“ (řešitel).
- FRVŠ reg. č. 1635/2008/F1a „Aplikace vlnových multiplexů ve výuce předmětu Optické sítě“ (spoluřešitel).

## ABSTRACT

This doctoral thesis deals with present trend to turn up the bit rate of the optical fibres making use of wavelenght multiplex systems. There are new theoretical and practical problems caused by the new technologies. Except the known modal dispersion there exist problems caused by chromatical and polarization mode dispersion. In the opening of the thesis the known effects, which influence the payload signal, are introduced. The polarization mode dispersion has the main attention.

Within the scope of this thesis there has been programmed the statistical calculator which can analyses the measured values of differential group delay by Monte Carlo calculation. Next meaningful output is the designating application of the optical routes. It is possible to mathematically unambiguously define the polarization mode dispersion by Jones, Stokes and Poynting vectors. This complicated calculations are mechanized and in the simulation application make possible to simulate the signification of the PMD influence at different input parameters. The thesis includes the study of the PMD modulation format impact with the results of simulations and confrontation with other scientists results. The significant output are the final practical results examinations, which can be implemented thanks to the possibility of using the FTB-5500B measuring device.