

# Polarizační vidová disperze – PMD

Ing. Martin Ťupa<sup>1</sup>, prof. Ing. Miloslav Filka, CSc. <sup>1</sup>, Doc. Ing. Otto Dostál, CSc.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií VUT v Brně  
Email: martin.tupa@profiber.cz; filka@feec.vutbr.cz

<sup>2</sup>Ústav výpočetní techniky Masarykovy univerzity  
Email: dostal@ics.muni.cz

**Abstrakt** – Polarizační vidová disperze patří v současné době k nejvíce limitujícímu parametru při vysokorychlostních optických přenosech. Tento článek si klade za hlavní cíl obecné seznámení s problematikou PMD a srovnání jednotlivých měřících technik na základě praktického měření optických tras v BAPS (Brněnská Akademická Počítačová Síť).

## 1 Úvod

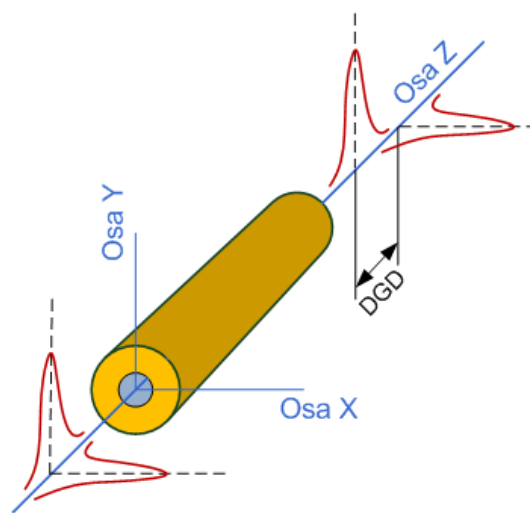
Důležitým jevem v optické technice je polarizační vidová disperze, která je způsobena anizotropními vlastnostmi optického vlákna. Index lomu není v celém průřezu stejný, ale díky některým jevům je funkcí okolních parametrů. Například tlak, tah, teplota atd. Jednotlivé složky světla se šíří různou rychlostí a tak vzniká polarizační vidová disperze, která se zkráceně označuje PMD. Velikost PMD je náhodná veličina, která je proměnná v čase. Při provozu vysokých přenosových rychlostí na optických trasách představuje jeden z hlavních problémů optického vlákna a stává se zásadním limitujícím faktorem pro přenos dat.

## 2 Definice PMD

Světelný signál, který je navázán jednovidovým optickým vláknem je šířen ve dvou navzájem kolmých polarizačních rovinách jedná se o šíření signálu prostřednictvím dvou polarizačních vidů.

Pokud vezmeme osu z za směr šíření vlnění potom roviny lze označit jako horizontální ve směru x či vertikální ve směru y neboli pomalý a rychlý směr osy. Popsaný model os se označuje jako PSP (*Principal States of Polarization*). Pokud tyto dvě složky sloučíme, dostaneme požadovaný vektor elektrického resp. magnetického pole. Polarizační vidy na konci trasy mají mezi sebou časové zpoždění  $\Delta\tau$  někdy označované také jako DGD (*Differential Group Delay*). Velikost parametru DGD se mění velmi pozvolně v časové oblasti, ale jeho změna v závislosti na vlnové délce je velmi rychlá.

Celková hodnota PMD vlákna optické trasy je vyjádřena jednotkou ps. Jelikož impuls nesoucí informaci je tvořen oběma polarizačními vidy, dochází tím k jeho roztahování. Časové rozšíření impulsu vede ke snižování výkonové



Obrázek 1: Zpoždění DGD světelného impulsu mezi rychlou a pomalou osou

špičky signálu, čímž se zhoršuje SNR (odstup signálu od šumu) a může dojít i k roztažení impulsu až do sousedních bitových mezer a vzniká mezisymbolová interference. Oba tyto mechanismy zvyšují chybovost a vedou k omezení maximální přenosové rychlosti.

PMD je parametr závislý na celé řadě různých faktorů. Příčinou PMD je zejména podélná kruhová nesymetrie vlákna a materiálová nehomogenita říkáme, že ve vlákně je přítomen dvojlom. Velikost parametru PMD ovlivňuje nejen samotná výroba vlákna, ale i výroba kabelu a další vlivy způsobující jakékoliv deformace, ohyby a mechanické pnutí či poškození vlákna. Další faktor ovlivňující velikost parametru PMD je kvalita montáže trasy a vlivy okolního prostředí, zejména teplotní změny při sezónním zahříváním a ochlazováním optického vlákna. Vlastní asymetrie vlákna je poměrně konstantní, zatímco mechanické namáhání se může lišit podél celé trasy. Mechanické namáhání na optické vlákno může pocházet z různých zdrojů. Tyto faktory ovlivňují velikost PMD značně náhodným způsobem což velmi ztěžuje způsoby kompenzace jejího vlivu.

K PMD jevu je nutné přistupovat jako k náhodnému jehož hodnotu pro danou optickou trasu není možné stanovit s dostatečnou přesností výpočtem. Parametr DGD je základním měřítkem PMD a je měřen v piko sekundách

[ps].

### 3 PMD v závislosti na délce optického vlákna

Vlákna, která mají střední výkonovou hodnotu v jednom ortogonálním polarizačním vidu v rámci  $1/e^2$  výkonového počátečního stavu vidu jsou nazývány jako vazební délka nebo také korelační délka  $L_C$ . Tento statistický parametr je závislý na vlnové délce, mechanickém namáhání podél celého vlákna a teplotě. Typická hodnota vazební délky je v rozsahu od 10 m až téměř do kilometru.

#### 3.1 PMD v krátkých vláknech

Pokud délka vlákna je daleko menší než korelační délka  $L_C$  potom je vlákno označováno jako krátké vlákno. Na krátkých vzdálenostech je PMD přibližně lineární a lze jej vyjádřit matematickou rovnicí:

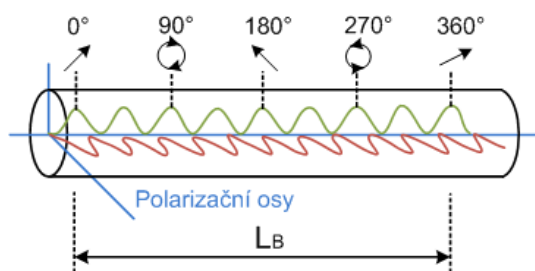
$$\text{PMD} = \frac{\Delta\tau}{L} \quad (1)$$

U krátkých vláken může být dvojlom považován za stále stejný a vidová vazba se neprojevuje (absence vidové vazby). Dvojlom v krátkých vláknech může být vyjádřen jako rozdíl mezi činiteli šíření mezi pomalou a rychlou osou.

$$\Delta\beta = \frac{\omega \cdot n_s}{c} - \frac{\omega \cdot n_f}{c} = \frac{\omega \cdot \Delta n}{c} \quad (2)$$

, kde  $\omega$  je úhlový optický kmitočet,  $c$  je rychlost světla, a  $\Delta n = n_s - n_f$  je efektivní rozdíl indexu odrazu mezi pomalou a rychlou osou.

V krátkých vláknech se vstupní polarizační poloha mění v kruhový tvar v důsledku šíření světelného paprsku vláknem např. z lineárního do eliptického a poté do kruhového tvaru a zpět přes eliptický k lineárnímu stavu jak ukazuje obrázek 2.



Obrázek 2: Prostorový vývoj polarizace

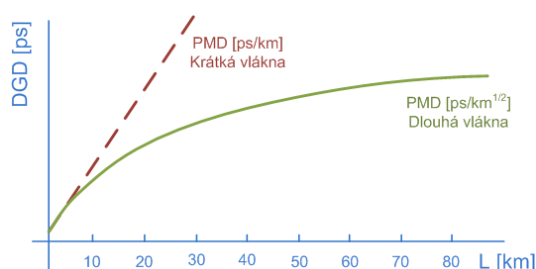
Vzdálenost  $L_B$  je definována jako vzdálenost šíření, kde dochází k  $2\pi$  fázovému rozdílu mezi dvěma vidy nebo ekvivalentní polarizační poloze během prostorového cyklu a je daný  $L_B = \lambda / \Delta n$ , kde  $\lambda$  je vlnová délka,  $\Delta n$  je rozdíl indexu lomu. Jedná se o standardní typ telekomunikačního vlákna a jeho velikost je kolem 10 m.

Vzhledem k absenci vidové vazby u krátkých vláken, DGD roste lineárně s délkou vlákna. Zpoždění lze odvodit derivací z rozdílu konstant šíření.

$$\frac{\Delta\tau}{L} = \frac{d}{d\omega} \left( \frac{\Delta n \cdot \omega}{c} \right) = \left( \frac{\Delta n}{c} \right) + \left( \frac{\omega}{c} \right) \frac{d}{d\omega} (\Delta n) \quad (3)$$

#### 3.2 PMD v dlouhých vláknech

Vlákna jejichž délka je daleko větší než korelační délka  $L_C$  jsou označena jako dlouhá vlákna. U dlouhých vláken dvojlom již není jednotný v důsledku náhodné přítomnosti deformace vlákna či vidové vazby. Dlouhá vlákna mohou být modelována jako zřetězení několika sekcí jejichž osy a velikost dvojlomu se mění náhodným způsobem.



Obrázek 3: Velikost PMD v závislosti na délce kabelu

Model pro dlouhá vlákna lze zobrazit jako koncentraci úseků s různou hodnotou dvojlomu jejichž změna je náhodná podél celého optického vlákna.

Velikost dílčího dvojlomu z každého úseku může doplnit nebo naopak být odečten z celkové hodnoty dvojlomu a tak DGD se nezvětšuje lineárně s délkou vlákna jako u krátkých vláken. Místo toho se DGD akumuluje jako tří dimenzionální náhodná veličina a v průměru se zvyšuje s druhou mocninou vzdálenosti.

$$\text{PMD} = \frac{\Delta\tau}{\sqrt{L}} \quad (4)$$

Velikost DGD se liší dle prostředí vlákna, pro analýzu PMD v dlouhých vláknech je přijat statistický postup. Přenosové systémy jsou obecně budovány z dlouhých vedení a tak PMD vlákna jsou často popsána pomocí PMD koeficientu ( $\text{ps}/\sqrt{\text{km}}$ ). Vlákna vyrobená dnes mají průměrný PMD koeficient menší než  $0,1 \text{ ps}/\sqrt{\text{km}}$  naopak vlákna instalovaná v 90-tých letech mohou vykazovat hodnotu PMD koeficientu vyšší než  $0,8 \text{ ps}/\sqrt{\text{km}}$ .

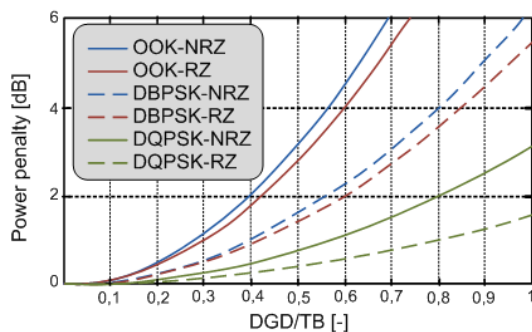
### 4 Vliv PMD na odolnost modulačních formátů

Polarizační vidová disperze má velký vliv na rozšíření a deformaci přenášeného pulzu, míra tohoto vlivu je odlišná pro aktuálně použitý modulační formát. Základní modulační formát pro optické sdělovací systémy je amplitudová modulace ASK, známá také jako modulace OOK (*On-off keying*). Dalšími typy modulačních formátů je diferenční

dvoustavová fázová modulace DBPSK nebo kvadraturní diferenční fázová modulace DQPSK. Všechny tyto druhy modulace mohou být bez návratu k nule NRZ nebo s návratem k nule RZ.

K vyhodnocení vlivu polarizační vidové disperze na chybovost optického kanálu se používá diagram oka. S diagramem oka souvisí bitová chybovost kanálu BER a odstup signálu od šumu SNR.

Bitová chybovost kanálu BER závisí na přenosové rychlosti a je pro každý modulační signál odlišná. Čím více se zvyšuje SNR, tím menší bude BER a vzniká lepší přenos po optickém kanále. Vlivem rostoucího DGD klesá hodnota SNR, diagram oka se uzavírá a přijímač není schopen správně vyhodnotit stavové hodnoty přenášeného signálu. Uzavírání diagramu oka vyjadřuje pokles oka v horizontálním i vertikálním směru. Hodnotu poklesu diagramu oka nazýváme *Power penalty*. *Power penalty* není vztažena přímo k hodnotě DGD, ale k poměru hodnoty DGD ku délce bitového intervalu  $T_B$ , který nazýváme jako normované diferenční skupinové zpoždění.



Obrázek 4: Závislost power penalty na DGD pro různé druhy modulací

V simulaci pro porovnání jednotlivých modulačních druhů byla zvolena přenosová rychlost 40 Gb/s a bitová chybovost BER  $10^{-12}$ . Ve všech výpočtech se počítá pouze se zkreslením, které způsobuje polarizační vidová disperze. Nebere se v úvahu zkreslení, které zapříčiní chromatická disperze a útlum. Podle normy ITU-T je hodnota maximálního diferenčního skupinového zpoždění při přenosové rychlosti 40 Gb/s rovna hodnotě 2,5 ps. Jakákoliv hodnota, která přesáhne maximální hodnotu diferenčního skupinového zpoždění z normy ITU-T způsobuje, že neprobíhá přenos a diagram oka se uzavírá. Záměrně byla zvolena velká vzdálenost optického vlákna 1000 km, aby bylo dosaženo vysokých hodnot diferenčního skupinového zpoždění. Použité optické vlákno je typu *G.652.D*, protože má nízkou hodnotu PMD 0,2 ps/ $\sqrt{\text{km}}$ .

Nejlepší modulace, které mají velkou toleranci k polarizační vidové disperzi jsou RZ-DQPSK a NRZ-DQPSK. Výhodou je, že se dají použít na velké vzdálenosti. Nevýhodou těchto modulací je jejich vysoká cena a složitost realizace. Nejhorší modulace, které mají malou toleranci k polarizační vidové disperzi jsou NRZ-DBPSK a NRZ-OOK. Jejich výhodou je nízká cena a nízká složitost realizace,

ale lze je použít pouze na krátké vzdálenosti. Kompromis mezi vzdáleností, cenou a složitostí realizace jsou modulace RZ-DBPSK a RZ-OOK.

## 5 Měření polarizační vidové disperze

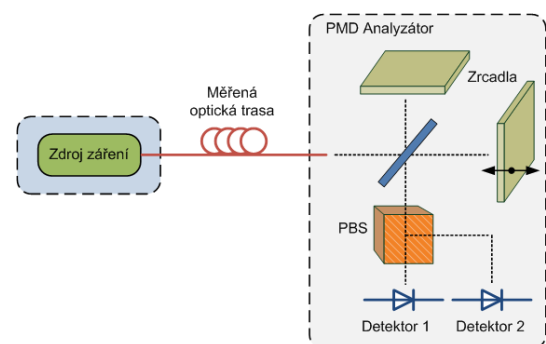
PMD parametr je v ohnisku zájmu prakticky každého, kdo se v této oblasti pohybuje, od výrobců optických vláken a kabelů přes instalační firmy až po provozovatele optických tras a výrobce měřicí techniky.

Z vlastností PMD vyplývá nutnost tento jev měřit ve všech etapách života vlákna a tato měření se dnes již staly i standardní součástí přejímacích měření vysokorychlostních optických tras.

Měření PMD vlákna se provádí od výroby, přes kabelování, závěrečné měření při uvedení instalované kabelové trasy do provozu až po údržbová měření. Pokud se ukáže, že dané optické vlákno trasy vykazuje zpoždění PMD větší než je schopen tolerovat přenosový systém, nelze takový systém použít. Toto riziko je vyšší zejména u starších tras postavených v 90-tých letech a tento problém je nutně často řešit v případě, že chceme na stávající starší optické trase instalovat systém s přenosovou rychlostí 10 Gbit/s.

### 5.1 Obecná interferometrická metoda měření PMD (GINTY)

Omezení tradiční interferometrické metody měření PMD (TINTY) plynou z přítomnosti autokorelace vlastního měřicího signálu ve výsledném interferogramu, z něhož se PMD vyhodnocuje. Nové zdokonalení metody spočívá tedy právě v potlačení vlivu autokorelační špičky.



Obrázek 5: Schematické uspořádání nové interferometrické metody GINTY

Na obrázku 5 je uvedeno schematické uspořádání nové metody, která je označována jako obecná interferometrická metoda GINTY (General analysis INTY).

Základní změna oproti tradiční metodě spočívá v tom, že výsledný signál obsahující optické záření z obou ramen interferometru je nově rozdělen polarizačním děličem PBS na dvě vzájemně kolmo polarizované složky, které dopadají každá na zvláštní detektor. Na každém z obou detektorů dochází k interferenci a oba tyto interferenční obrazce

obsahují opět obě korelační složky. Matematickými operacemi mezi oběma interferogramy lze ale obě složky od sebe oddělit („odečtením“ interferogramů se získá samotná vzájemná korelace, zatímco jejich „sečtením“ lze obdržet čistou autokorelaci).

Metoda GINTY umožňuje tedy autokorelační špičku z výsledného interferogramu odstranit, a tudíž provádět vyhodnocení PMD na samotné vzájemné korelační funkci. Tím odpadá i nutnost prokládat výsledný interferogram Gaussovou křivkou a hodnota PMD se vyhodnocuje přímo z bodů interferogramu (výpočet střední kvadratické hodnoty RMS).

K výpočtu hodnoty PMD nutno dodat, že autokorelace měřícího signálu se částečně uplatňuje také v samotné vzájemné korelační funkci. Zvláště k tomu dochází při měření velmi nízkých hodnot PMD, kdy jsou signály z obou navzájem kolmých polarizačních vidů prakticky shodné, a vzájemná korelace je tedy vlastně téměř autokorelací. Jelikož u GINTY metody známe však i samotnou autokorelační funkci („součet“ interferogramů na obou detektorech), je možné i tento vliv autokorelace potlačit. Výpočet hodnoty zpoždění PMD se proto „koriguje“ tím, že se od hodnoty RMS vypočítané ze vzájemné korelace odečte hodnota RMS spočtená z autokorelace.

## 6 Kompenzace PMD jevu

Náhodný charakter PMD parametru neumožňuje kompletní anulování tohoto jevu avšak určitou korekci PMD efektu lze realizovat. Kódování FEC (*Forward error correction*) a redundance vlnových délek ve WDM sítích jsou často navrhované možnosti pro zmírnění efektu PMD. Nicméně PMD kompenzace je často řešena nezávisle nebo ve spolupráci se záložními systémy.

Základní kompenzační techniky lze rozčlenit do kategorií dle použitých komponentů a jejich technických a fyzikálních vlastností:

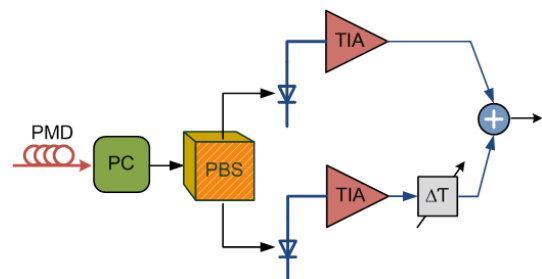
*Optická PMD kompenzace* – Vyžaduje drahé a relativně objemné optické komponenty. Kompenzátor musí být přizpůsobivý a musí reagovat na dynamickou povahu PMD. Tyto požadavky jsou obtížně dosažitelné, protože optické komponenty postrádají ohebnost a flexibilitu.

*Optoelektronická PMD kompenzace* – Pro zvýšení integrace se části systému přesouvají z optické do elektronické formy.

*Elektrická PMD kompenzace* – Vysoký stupeň integrace využitím elektronického ekvalizéru. Implementací vhodného adaptibilního algoritmu je zajištěna velká přizpůsobivost systému. Použití ve WDM systémech v kterých PMD kompenzace je potřebná pro každý přenosový kanál.

### 6.1 Optoelektronická PMD kompenzace

Optoelektronická kompenzace PMD je systém, který zahrnuje pro svou realizaci optický i elektrický obor. Typicky obsahuje dělič přijímaného světelného signálu do jeho dvou polarizačních rovin pomocí polarizačního kontroleru PC a polarizační paprsek je rozdělen v PBS (*polarization beam splitter*). Výsledné světelné signály jsou poté převedeny na elektrické signály pomocí dvou separátních TIA (*photodiode-transimpedance amplifier*) fotodetektorů. Elektrický signál odpovídající světlu v rychlé SOP je poté zpožděn interním komparátorem DGD zpoždění. Nakonec, oba signály jsou znovu smíseny do formy přijímaného signálu, který je bez vlivu PMD efektu. Tento koncept je ilustrován na obrázku 6.



Obrázek 6: Typická architektura optoelektronického PMD kompenzátoru

Hlavní výhoda optoelektronické kompenzace spočívá v převedení některého kompenzačního hardwaru z optické do elektrické oblasti. Nicméně, optoelektronické kompenzační systémy stále vyžadují některé optické komponenty jako polarizační kontroler PC a dělič PBS.

## 7 Expertní měření optické sítě BAPS

Měření vybraných parametrů proběhlo na Brněnské akademické počítačové síti. Tato privátní akademická počítačová síť vysokých škol má v současnosti cca 150 km optických kabelů. Počet vláken v optickém kabelu je převážně 96 vláken. Páteřní část sítě však má i kabely s počtem 280 vláken.

Měření vzhledem k rozsáhlosti této privátní počítačové sítě proběhlo ve čtyřech etapách v období téměř jednoho roku. Samotná výstavba této sítě začala již v roce 1993 a z tohoto důvodu zahrnuje široké spektrum různě starých kabelů od různých výrobců. Vzhledem k reálnému provozu na vláknech bylo samotné měření a zjišťování stavu optických vláken velkým problémem.

Vzhledem k neustále narůstajícím požadavkům na přenosové rychlosti bylo cílem měření zjistit stav jednotlivých tras s ohledem na očekávané nasazení vysokokapacitních přenosů DWDM/ CDWM s přenosovými rychlostmi 40-100 Gbit/s.

Jak je důležité měřit včas parametry optických vláken vyplývá například z výsledků IV. etapy měření. V této etapě bylo měřeno celkem 7 tras. Bylo zjištěno, že po-

žadovaným parametrům pro nasazení vysokokapacitních technologií nevyhovělo žádné vlákno u 2 tras. Pouze u dvou tras vyhověla požadavkům všechna vlákna. Jednalo se zejména o nevyhovující hodnoty PMD a problémy s OH peakem na útlumové charakteristice, byly ale zjištěny i problémy s kvalitou čel optických konektorů SC/PC a zejména starších FC/PC. Z výše uvedených výsledků měření vyplývá, že při nasazování vysokokapacitních přenosů bude nutné důkladné měření přenosových tras, výběr vhodných optických vláken splňujících požadavky uživatelů na přenosové kapacity. Výsledky měření jsou rovněž podkladem pro případnou výměnu nevyhovujících optických kabelů. Ze zpracovaných výsledků a jejich analýzy rovněž vyplývá, že vlákna která prošla expertním měřením jsou spolehlivá do  $40 \text{ Gbit} \cdot \text{s}^{-1}$  a lze je do budoucna za jistých podmínek využít i pro  $100 \text{ Gbit} \cdot \text{s}^{-1}$  v jednom kanálu. Stejně tak jsou vlákna, která prošla expertním měřením a auditem vhodná pro nasazení vícekanalových systémů CWDM/DWDM. Nebyl prokázán vzájemný vztah vlivu mezi parametry CD a PMD optického vlákna.

Pro mapování sítě byla použita unikátní souprava v konfiguraci:

*EXFO CD/PMD FTB-5700* – kompaktní tester chromatické a polarizační disperze.

*CD EXFO FTB-5800* – měřicí přístroj chromatické disperze využívající metodu fázového posunu.

*PMD EXFO FTB-5500B* – měřicí přístroj polarizační disperze využívající obecnou interferometrickou metodu měření GINTY.

## 8 Závěr

Každá měřená optická trasa byla osazena výše zmíněnými měřicími přístroji a byly stanoveny limitní hodnoty pro měřené parametry v závislosti na délce optického vlákna. Dle limitních parametrů se posuzovala jednotlivá optická vlákna z pohledu možnosti nasazení vysokorychlostních systémů. Výsledné náměry byly zpracovány do měřících protokolů pomocí softwaru s názvem *FastReporter*.

Mapování sítě potvrdilo dobrou shodu výsledků různých měřících metod. Zejména u kompaktního analyzátoru CD/PMD EXFO FTB-5700 existovala obava, že vzhledem k charakteru starší metropolitní sítě (krátké vzdálenosti, odrazy na konektorech, atd.) nemusí tato metoda poskytovat reprodukovatelné výsledky s požadovanou přesností. Testy a srovnání s referenční metodou CD FTB-5800 a referenční metodou PMD FTB-5500B však tyto obavy vvrátily. Ověřilo se, že i v podmínkách metropolitní sítě poskytuje tester FTB-5700 přesné a stabilní výsledky. Lze jej proto bez obav používat kdykoliv pro provozní měření a audit tras z pohledu CD a PMD před nasazením do provozu.

## Literatura

- [1] Dorociak, P.; Kyselák, M. *Vliv polarizační vidové disperze na odolnost modulačních formátů* [online]. 1.3.2008 [cit. 15.4.2011]. ISSN 1214-9675
- [2] FILKA, M. *Optoelektronika pro telekomunikace a informatiku* Brno: CENTA, 2009. 369 s. ISBN 978-80-86785-14-1
- [3] HÁJEK, M.; HOLOMEČEK P. *Nová metoda měření PMD optických kabelových tras* [online]. 23.9.2007 [cit. 19.4.2011].
- [4] KONDAMURI, P. K. *Characterization of Polarization-Mode Dispersion on buried standard single-mode fibers* India: Sri Venkateswara University Tirupathi, 2000. 127s.
- [5] SEWTER, J. *Electronic equalization of Polarization-Mode Dispersion in 40-Gb/s optical systems* Toronto: Electrical and Computer Engineering University of Toronto, 2005. 115 s.