



## Úvod - anotace

Jednu ze stěžejních překážek při nasazování vysokorychlostních přenosových systémů na optické kabelové trasy představuje zpoždění vlivem polarizační vidové disperze (PMD). Toto zpoždění může být z valné části způsobeno i třeba jen jedním kabelovým úsekem, který tudíž zamezuje danému použití celé trasy. Náš článek je věnován měření optických kabelových tras polarizačním reflektometrem – POTDR, pomocí kterého lze lokalizovat úseky trasy se zvýšenou hodnotou zpoždění vlivem PMD. Lokalizace a následná výměna problémového kabelového úseku umožní připravit trasu na nasazení daného systému. V článku se zabýváme metodou POTDR a přínosem takového měření a také praktickými zkušenostmi s jeho prováděním, jelikož jsme letos měli možnost provést řadu měření s tímto unikátním přístrojem na trasách přímo v České republice.

## 1. PMD na optických kabelových trasách

Jedním z nejzávažnějších problémů, před kterým stojíme, pokud chceme provozovat vysokorychlostní systémy na optických kabelových trasách, je vliv **polarizační vidové disperze – PMD**. Ta vzniká v důsledku přítomnosti dvojlomu ve vláknu, což znamená, že je odlišná rychlost šíření ve dvou tzv. polarizačních rovinách (videch), jimiž se každý signál ve vláknu šíří. Zpoždění vzniklé mezi oběma vidy vede k časovému roztahování přenášených impulsů, a tím k omezení maximální přenosové rychlosti spoje. Toto působení je z hlediska přenášeného signálu obdobné vlivu chromatické disperze. Ačkoliv je ale působení PMD ve srovnání s chromatickou disperzí výrazně slabší (významné je zpravidla teprve pro přenosové rychlosti 10 Gbit/s (STM-64) a vyšší), může působit daleko závažnější problémy.

Narozdíl od vlivu chromatické disperze nelze totiž působení PMD v podstatě kompenzovat (kompenzace je enormně technicky a finančně náročná). Pokud se tedy 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. 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. Provádí se proto výběr vhodného vlákna trasy, kde by byl limit systému splněn. Jestliže se ukáže, že žádné vlákno daný limit nesplňuje, zbývá ještě možnost, při které nám může pomoci právě **polarizační reflektometr POTDR**. Nadlimitní hodnota PMD celé trasy může být totiž způsobena i jen jedním kabelovým úsekem s vysokým PMD. Právě měření s POTDR slouží k lokalizaci takového úseku (či úseků) se zvýšenou hodnotou PMD, jehož výměna by umožnila celkové PMD trasy snížit a požadovaný systém na trasu nasadit neekonomičtější možným způsobem.

## 2. Metoda POTDR

Metoda POTDR je založena na využití principu klasické metody měření zpětného rozptylu OTDR. Půjde o to vyslat do vlákna trasy měřicí signál ve formě sledu impulsů a ze zpětně rozptýleného záření (vlivem Rayleighova zpětného rozptylu) se snažit vyčíst informace o PMD jednotlivých míst na vláknu trasy. Jelikož zde nepůjde o nějaké přímé měření PMD, podívejme se, jak se dá zjednodušeně vyjádřit závislost PMD vlákna trasy:

$$PMD \approx \beta \sqrt{L \cdot h}$$

- kde  $\beta$  symbolizuje velikost **dvojlomu** ve vláknu (ps/km), tzn. odlišnost rychlosti šíření výše zmíněných dvou polarizačních vidů, **L** je **délka vlákna** a **h** udává **vazební délku** charakterizující vazbu mezi polarizačními vidy. Jednoduše řečeno – vazební délka  $h$  udává délku vlákna, na které dojde k výrazné změně osy (tvaru) dvojlomu ve vláknu, a tím k výrazné výměně energie mezi polarizačními vidy.

Vidíme, že PMD roste s velikostí dvojlomu ve vláknu, délkou vlákna a s velikostí vazební délky. Čím bude delší vazební délka a tudíž menší výměna energie mezi oběma vidy šířícími se odlišnou rychlostí, tím více se bude odlišnost rychlostí obou polarizačních vidů uplatňovat.

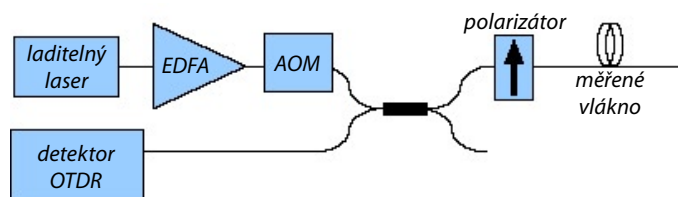
Při každém měření OTDR získáváme délkové informace o vláknu. Pro podélnou analýzu PMD budeme tedy ještě potřebovat ze zpětně rozptýleného záření z vlákna vyčíst informace o jeho lokálním dvojlomu a vazební délce.

Existují dvě základní metody POTDR jak to provést. Při obou budeme do vlákna posílat krátké intenzivní impulsy polarizovaného optického záření, přičemž obě metody se liší tím, jak zmíněné parametry ze zpětně rozptýleného záření zjišťujeme.

## 3. Metoda analýzy SOP (metoda skanování vlnové délky)

Jelikož vlivem dvojlomu a také působením mezividové vazby dochází ke změně polarizace procházejícího signálu, nabízí se možnost sledovat tuto změnu na zpětně rozptýleném záření z vlákna trasy – t.j. sledovat změnu **stavu polarizace SOP (State Of Polarization)**. Rychlost změny SOP je úměrná velikosti dvojlomu ve vláknu  $b$  a řekněme „charakter“ změny je závislý na mezividové vazbě resp. vazební délce  $h$ . Při zobrazení SOP na Poincarého kouli se jedná o rychlost rotace SOP (vliv  $b$ ) a změnu osy rotace (vliv  $h$ ). Pokud budeme provádět měření na různých vlnových délkách, můžeme vyhodnotit ze spektrální závislosti změn SOP pro jednotlivá místa v trase velikost PMD. Ukázka blokového schématu metody je na obrázku č. 1.

obr. č. 1.



Záření laditelného laseru s malou spektrální šířkou je zesilováno vláknovým zesilovačem (EDFA), modulováno akusto-optickým modulátorem (AOM), čímž vzniknou měřicí impulsy, které jsou po průchodu polarizátorem vyslány do měřené trasy. Zpětně rozptýlené záření přichází po opětovném průchodu polarizátorem na detektor OTDR. Měříme spektrální závislost výkonu záření zpětně rozptýleného z jednotlivých částí trasy, a jelikož je zařazen polarizátor, zjišťujeme tím spektrální závislost změn SOP v jednotlivých místech trasy.

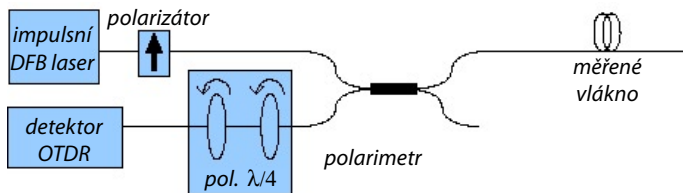
Tato metoda naráží na několik obtíží, které se zrcadlí již v uvedeném blokovém uspořádání. Základním problémem je to, že délka i nejkratších impulsů užívaných při OTDR měřeních (desítky ns) je pro měření vláken se silnějším dvojlomem příliš dlouhá na to, aby nedošlo v rámci impulsu k tzv. **depolarizaci**. Impuls šířící se vláknem zabírá totiž jeho určitou délku, u zmíněných velmi krátkých impulsů to jsou jednotky m. Například čelo impulsu už bylo tedy v každém okamžiku vystaveno působení dvojlomu vlákna o několik metrů delšího než tyč. Pokud se bude jednat o vlákno s vyšší hodnotou PMD (se silnějším dvojlomem, který mění resp. stáčí stav polarizace SOP), bude na čele impulsu jiný SOP než např. v tyči a impuls jako takový bude depolarizován, t.j. nebude mít celý stejnou polarizaci (stejný SOP). U záření zpětně rozptýleného z depolarizovaného impulsu se tak ztrácí možnost jeho SOP sledovat.

U této metody je tedy třeba užívat enormně krátké impulsy, což vede ke snížení dynamického rozsahu měření, a tudíž k omezení délky měřených tras. Proto je nutné měřicí signál zesilovat např. vláknovým zesilovačem (EDFA ve schématu). Avšak ani tak není tato metoda vhodná pro měřidlo určené k hledání úseků se zvýšeným PMD na delších optických kabelových trasách. Byla by použitelná nejspíše pouze pro měření velmi krátkých tras (jednotky km) s poměrně nízkou hodnotou PMD (< cca 0.7 ps/√km).

#### 4. Metoda analýzy DOP

Druhá metoda je založena – místo na sledování stavu polarizace SOP – na sledování **stupně polarizace DOP (Degree Of Polarization)**; pro impuls celý shodně polarizovaný  $DOP = 1$ , pro zcela depolarizovaný  $DOP = 0$ , pro záření zpětně rozptýlené ze zcela depolarizovaného impulsu se hodnota DOP blíží cca 1/3. Tím, že vyhodnocujeme DOP, se vlastně zásadní problém první metody stává zde nástrojem vyhodnocení. Přestože tato druhá metoda je méně exaktní než sledování přímo SOP, jsme při jejím užití skutečně schopni měřit i na delších optických trasách a lokalizovat úseky se zvýšenou hodnotou PMD. Blokové schéma metody je uvedeno na obrázku č. 2.

Obr.2



Jako zdroj záření je užit, narozdíl od laserů běžně užívaných v měřidlech OTDR, velmi úzkospektrální DFB laser. Je to z toho důvodu, aby nedošlo k depolarizaci signálu ve vláknu vlivem toho, že by se šířil prostřednictvím mnoha vlnových délek. Dvojloem vlákna by v tomto případě způsoboval pro různé vlnové délky různé změny stavu polarizace SOP, a tím depolarizaci signálu. Tento druhý mechanismus depolarizace je třeba potlačit úzkospektrálním zdrojem záření (Také u první metody bylo z tohoto důvodu nutné použít velmi úzkospektrální zdroj záření). Polarizované výstupní záření z DFB laseru je navázáno do měřeného vlákna. Pro zpětně rozptýlené záření z jednotlivých míst vlákna trasy se analyzuje DOP pomocí polarimetru a detektoru OTDR.

Co tedy jsme schopni zjistit z analýzy DOP? Jak bylo uvedeno výše, silný dvojloem ve vláknu  $\beta$  způsobuje rychlé stáčení stavu polarizace, což vede k depolarizaci záření v rámci měřicího impulsu a tedy ke snížení jeho stupně polarizace DOP. Slabý dvojloem vlákna bude mít tak za následek vysoký měřený DOP a naopak. Situace je ale složitější, neboť DOP bude záviset ještě na mezividové vazbě resp. vazební délce  $h$ . Situaci můžeme zjednodušeně rozdělit na tři eventuality:

1) vlákna se slabým dvojloem (malé  $\beta$ ) – DOP bude tudíž vysoký (až k 1) bez ohledu na mezividovou vazbu; v praxi se jedná o vlákna s velmi nízkou hodnotou PMD;

2) vlákna se silným dvojloem a silnou mezividovou vazbou (velké  $\beta$  a krátká vazební délka  $h$ ) – DOP bude malý vlivem silného dvojloemu (u zpětně rozptýleného signálu se bude blížit 1/3) a bude se velice rychle měnit vlivem silné mezividové vazby; v praxi se jedná o vlákna se střední hodnotou PMD;

3) vlákna se silným dvojloem a slabou mezividovou vazbou (velké  $\beta$  a dlouhá vazební délka  $h$ ) – zde bude záviset kromě  $\beta$  a  $h$  také na vzájemné poloze SOP záření a tvaru dvojloemu ve vláknu; DOP může kolísat mezi nízkými i vysokými hodnotami, ale bude se jen pomalu měnit; v praxi se jedná o vlákna s vysokou hodnotou PMD;

Důležité bude tedy sledovat nejen samotnou hodnotu DOP, ale též rychlost změny DOP.

#### 5. Vyhodnocení měření metodou analýzy DOP

Jak bylo výše uvedeno, vyhodnocení měření se provádí ze sledování DOP záření zpětně rozptýleného z měřicího impulsu ve vláknu trasy. Abychom mohli uvést naměřené výsledky, podívejme se na to, jak provádí analýzu měření přístroj, se kterým jsme měli možnost měřit.

Jelikož rychlost změny DOP může být značná, pro stanovení samotné hodnoty DOP je vhodné sledovat jeho „střední hodnotu“ stanovenou např. z několika desítek vzorků. Měřicí přístroj provádí dále každé měření pro dva stavy vstupní polarizace (polarizátor za DFB laserem v obr. č. 2). Získáváme tím dvoje výsledky měření: DOP a  $DOP_c$  (complementary), z nichž se výpočtem stanovuje parametr nazvaný  $DOP_{geo} = \sqrt{DOP^2 + DOP_c^2}$ , který dobře vypovídá o samotné hodnotě DOP záření rozptýleného z daného úseku vlákna trasy. Pro sledování rychlosti změny DOP užívá přístroj parametr  $hDOP$ , který zjednodušeně znamená délku vlákna, na níž se DOP výrazně změní – čím rychlejší budou změny DOP, tím menší bude  $hDOP$ .

O čem ale výše uvedené parametry vypovídají z hlediska PMD? Z analýzy DOP jednotlivých úseků vlákna trasy lze vyhodnotit, že:

- na úsecích s vysokou hodnotou  $DOP_{geo}$  bude mít PMD hodnotu nízkou z důvodu malého dvojloemu vlákna;

- na úsecích s nízkou či proměnlivou hodnotou  $DOP_{geo}$ , a tedy možným vyšším dvojloem vlákna, a s:

✓ malým  $hDOP$  bude hodnota PMD nízká, neboť ve vláknu je silná mezividová vazba;

✓ středním  $hDOP$  bude hodnota PMD střední;

✓ velkým  $hDOP$  bude hodnota PMD vysoká, neboť ve vláknu je mezividová vazba slabá.

Uváděné „hodnoty“ PMD – nízká, střední a vysoká – jsou určeny limitními mezemi nastavenými v přístroji (pro  $hDOP$  a  $DOP_{geo}$ ) a vycházejí z dlouhodobé analýzy tisíců naměrů výrobcem přístroje. Výsledkem měření nejsou exaktní hodnoty PMD jednotlivých míst trasy, ale spíše její relativní zmapování z hlediska PMD ukazující na možná problematická místa. Toto měření nenahrazuje měření celkové absolutní hodnoty zpoždění PMD trasy (např. interferometrickou metodou), ale doplňuje jej. Teprve, když např. interferometrickou metodou změříme, že daná trasa má příliš vysokou hodnotu zpoždění PMD, má význam, pokusit se pomocí POTDR zdroj této vysoké hodnoty lokalizovat.

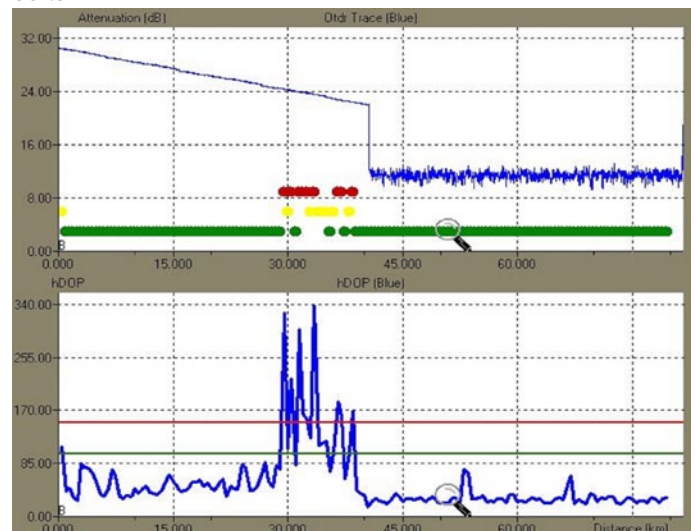
Z měření zároveň získáváme také POTDR reflektogram, kde lze sledovat jednotlivé kabelové úseky a místa trasy. (Pozn.: reflektogram je změřen polarizovaně, a proto může vykazovat odlišnosti oproti klasickým OTDR reflektogramům, a nelze jím tedy nahradit tradiční OTDR měření optických tras.) Měřit je možné trasy dlouhé mnoho desítek kilometrů, přičemž délková rozlišovací schopnost se pohybuje řádově ve stovkách metrů. Nižší rozlišovací schopnost oproti klasickým reflektometrům nepředstavuje z hlediska PMD významný problém, jelikož PMD není bodová záležitost.

#### 6. Výsledky našich měření s POTDR a jejich interpretace

Podívejme se nyní na výsledky měření polarizačním reflektometrem, které jsme prováděli na optických kabelových trasách přímo v České republice. Podívejme se postupně ve světle výše uvedených závěrů na všechny výstupy z měření, jež nám přístroj poskytuje. Ukázky jsou vybrány z měření vlákna, u kterého byla interferometrickou metodou naměřena velmi vysoká hodnota celkového zpoždění PMD (19 ps).

Základním výstupem z měření jsou křivky uvedené na obrázku č. 3.

Obr.3



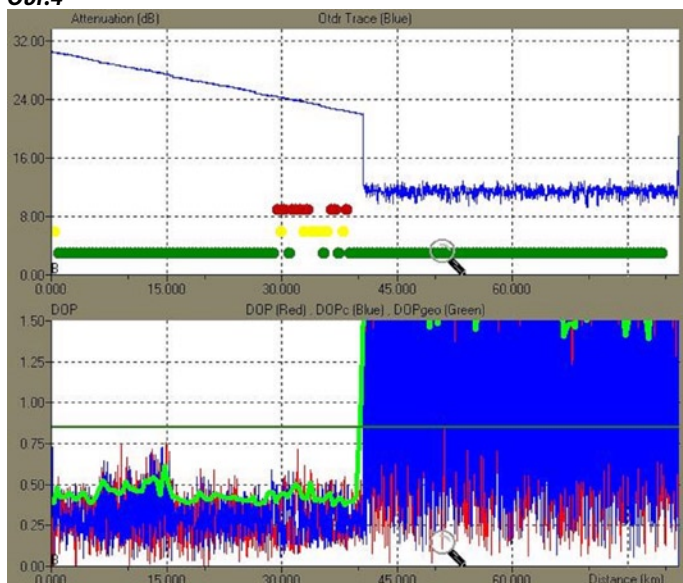
V horní polovině obrázku je vidět POTDR reflektogram, pod nímž barevné body: zelené (spodní), žluté a červené – znázorňují oblasti s nízkou, zvýšenou a vysokou hodnotou PMD. V dolní polovině obrázku je vidět průběh funkce  $hDOP$ , která je důležitou (nikoliv však jedinou) křivkou pro celkové vyhodnocení úseků z hlediska PMD. Kromě křivky ( $hDOP$ ), jsou zde vidět ještě horizontální přímkové (zelená a červená), které představují výše zmíněné nastavené mezní hodnoty. (Nastavení je možné uživatelsky měnit.)



Na křivce je vidět prudce zvýšená hodnota hDOP mezi cca 28 km a 40 km (konec trasy), přičemž zejména se jedná o úsek mezi cca 28 km a 34 km. Vysoká hodnota hDOP značí pomalou změnu DOP v této oblasti. Z toho lze usuzovat na velkou vazební délku  $h$ , a tedy na slabou mezividovou vazbu, a tudíž potenciálně na zvýšenou hodnotu PMD. Aby se toto podezření potvrdilo, je ovšem ještě třeba prohlédnout druhý z důležitých výstupů měření, kterým je křivka DOP resp. DOPgeo na obrázku č. 4.

Tato křivka je společně s křivkou hDOP pro vyhodnocení nejdůležitější. Obrázek obsahuje tři křivky: DOP (červená), DOPc (modrá) a DOPgeo (silná zelená), přičemž poslední jmenovaná má nejvyšší vypovídací hodnotu. Na křivce vidíme, že DOP zpětně rozptýleného záření má ve zmíněném úseku velmi nízkou hodnotu (DOP a DOPc kolem 1/3 a DOPgeo pod 0,5). To svědčí o téměř plné depolarizaci měřicího signálu, a tudíž o vyšším (či vysokém) dvojlomu ve vláknu. Podezření na zvýšenou hodnotu PMD se tím potvrzuje. Pro tuto část vlákna trasy jsou tedy hodnoty PMD pod reflektogramem označeny červeně, což symbolizuje vysokou hodnotu PMD (viz. obr. č. 3, 4). Takto vyniká zejména zmíněný úsek mezi cca 28 km a 34 km.

**Obr.4**

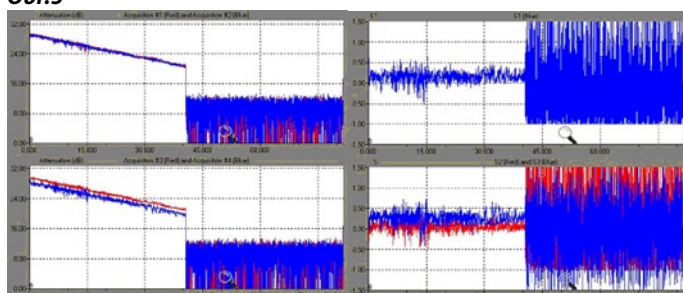


Optická trasa byla po POTDR měření ve vybraných bodech rozpojena a na jejích jednotlivých částech bylo provedeno měření PMD interferometrickou metodou. Toto měření ukázalo, že zmíněné vlákno skutečně vykazuje na lokalizovaném úseku mezi 28 km a 34 km vysokou hodnotu PMD, a tento úsek představuje hlavní zdroj celkového PMD zpoždění. Na vláknu trasy dlouhém cca 40 km byla naměřena celková hodnota zpoždění PMD 19 ps, přičemž na zmíněném úseku délky cca 6,4 km bylo změřeno zpoždění 17,4 ps.

Z uvedeného postupu vyplývá, že o zvýšené hodnotě PMD je možné rozhodnout vždy teprve po porovnání obou zmíněných křivek. Na jiných trasách jsme např. naměřili výsledky, kde křivka hDOP obsahovala podobně prudce zvýšené úseky. Z následné analýzy DOP ale vyplynulo, že hodnota PMD tam zvýšená není, neboť hodnota DOP byla pro tyto úseky vysoká, což svědčilo o nízkém dvojlomu ve vláknu.

Výsledky měření – kromě dvou uvedených základních křivek – obsahují dále pro oba vstupní stavy polarizace POTDR reflektogramy a křivky normalizovaných Stokesových parametrů S1 až S3 – viz. obr. č. 5.

**Obr.5**



Jak je patrné, přístroj POTDR skýtá poměrně velké množství zajímavých informací o měřené trase. Pro celkové úspěšné vyhodnocení měření je však nutné mít ještě k dispozici celkovou hodnotu PMD zpoždění trasy (jak bylo již výše uvedeno). Výhodou je též závěrečný měřicí protokol, kde jsou zaznamenány informace o svarech a konektorových spojeních. Na základě těchto údajů je potom možné odpovědně stanovit úseky se zvýšenou hodnotou PMD.

Jako poznámku na závěr bychom chtěli ještě uvést některé technické parametry měřicího přístroje, který jsme měli k dispozici. Přístroj používá měřicí vlnovou délku 1550 nm a měřicí impulsy v rozsahu 30 ns až 500 ns. Je s ním možné měřit optické trasy dlouhé až 60 km s rozlišovací schopností 500 m (také proto je dobré mít při vyhodnocení měřicí protokol se značením jednotlivých spojek). Měření trvá relativně dlouho z důvodu náročných výpočetních operací při analýze měření – na jedno vlákno kolem 8 minut. Dle údajů výrobce by měl být přístroj schopen zachytit více než 80% úseků s hodnotou koeficientu PMD nad 1 ps/√km.

## 7. Zhodnocení měření s POTDR

Provedli jsme řadu měření optických kabelových tras s polarizačním reflektometrem POTDR, využívajícího metodu analýzy stupně polarizace DOP. Výsledky měření potvrzují, že tento unikátní měřicí přístroj představuje v praxi použitelný nástroj pro lokalizaci úseků s vysokou hodnotou PMD na trasách. Odhalením a výměnou problémového úseku je tedy možné ekonomickým způsobem připravit trasu, která bude z hlediska PMD vyhovující pro nasazení vysokorychlostních systémů s přenosovou rychlostí 10 Gbit/s (či vyšší...).

## 8. Použitá literatura

- [1] Leblanc M., Fougères A.: Polarization-OTDR: identifying high-PMD sections along installed fibers, *Lightwave 2/2002*
- [2] Huttner B., Gisin B., Gisin N.: Distributed PMD measurement with a Polarisation-OTDR in optical fibers, *J. Lightwave Tech.* v. 17, 1999
- [3] firemní literatura a katalogové listy firmy EXFO Electro-Optical Engineering a GAP-Optique

Ing. Martin Hájek  
 Ing. Petr Holomeček  
 MIKROKOM s.r.o.  
 Pod Vinicí 622  
 143 00 Praha 4

[martin.hajek@mikrokom.cz](mailto:martin.hajek@mikrokom.cz)  
[petr.holomecek@mikrokom.cz](mailto:petr.holomecek@mikrokom.cz)  
 tel.: 241 760 100  
 fax.: 241 764 822  
[www.mikrokom.cz](http://www.mikrokom.cz)