

3/2012

st

SDĚLOVACÍ technika

telekomunikace – elektronika – multimédia

SYNTEZÁTOR
frekvence typu FA

AKTIVITY
platformy ARTES

SMART GRIDS
na konferenci v Praze

DIGITALIZACE
TV vysílání v roce 2011

KONSTRUKCE
elektronického kompasu

ŘEŠENÍ PRO VAŠE NÁVRHY ZAČÍNÁJÍ ZDE



Navštivte nás na Amperu 20. – 23. března
v hale F, stánek FO38, a dozvíte se více



element14

farnell.com/farnellelement14



CENA 40 Kč/1,99 €

ISSN 0036-9942 BŘEZEN 2012

Novinová zaslánka – povolila ČP, s. p., OZ Praha, č. j. 813/92-NP ze dne 6. 8. 1992. Placeno v hotovosti.

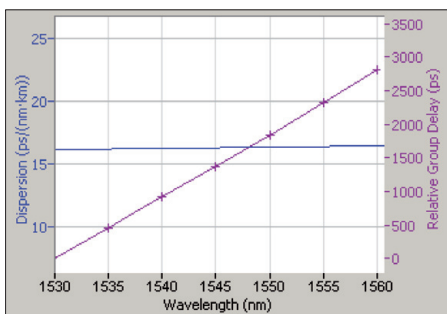
Vývoj a měření brněnské akademické optické sítě

Prof. Ing. Miloslav Filka, CSc., Doc. Ing. Otto Dostál, CSc., Ing. Pavel Reichert, Ing. Jan Šporik, VUT FEKT Brno

dokončení z minulého čísla

Měření chromatické disperze

Chromatická disperze je hlavním faktorem omezujícím přenosovou rychlost v jednov-



Obr. 7 Křivka koeficientu chromatické disperze D [ps/(nm×km)] a relativního skupinového zpoždění RGD [ps] v závislosti na vlnové délce λ [nm]

dových vlákních. Její velikost charakterizuje koeficient chromatické disperze, který udává změnu skupinového zpoždění signálu t_g při průchodu vláknem v závislosti na vlnové délce λ .

$$D(\lambda) = \delta t_g / \delta \lambda, \text{ [ps/nm} \times \text{km]} \quad (1)$$

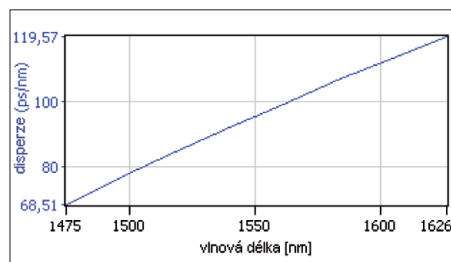
Hodnota koeficientu udává rozšíření impulzu v ps, při použití zdroje záření se spektrální pološířkou 1 nm po průchodu vláknem délky 1 km. Chromatická disperze je způsobena rozdílnou rychlostí šíření různých spektrálních složek signálu. To vede k časovému roztažení impulzu vyslaného do vlákna, který může zasahovat i do vedlejších bitových mezer, a zkrusovat tak přenášenou informaci. Prakticky u impulzu vyslaného zdrojem záření se spektrální pološířkou $\Delta\lambda$ [nm], po průchodu vláknem s koeficientem chromatické disperze D [ps/(nm × km)] a délkou L [km] dojde k časovému rozšíření Δt [ps] podle vztahu [2]:

$$\Delta t = D(\lambda) \times \Delta(\lambda) \times L, \quad (2)$$

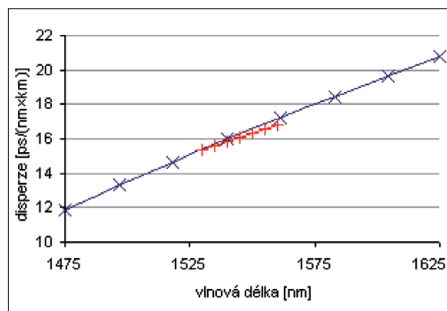
[ps; ps/(nm × km); nm; km].

Chromatická disperze je parametrem časově neměnným a při znalosti parametrů trasy může být snadno vypočtena. Problém s výpočtem nastává v případě, kdy neznáme přesné parametry součástek a optických vláken na trase. Znalost chromatické disperze je důležitá především pro její kompenzaci. Potřeba kompenzace roste se zvyšováním

přenosových rychlostí systémů, kdy dochází k omezení vzdálenosti vlivem časového roztažení impulsů a jejich vzájemného překrývání. Kompenzačními technikami se tedy na požadované vlnové délce snažíme snížit



Obr. 8 Křivka disperze D [ps/nm] v závislosti na vlnové délce λ [nm]



Obr. 9 Vypočítaná křivka chromatické disperze D [ps/(nm×km)] pro obě měřicí metody v závislosti na vlnové délce λ [nm]

koeficient chromatické disperze na nulovou hodnotu. Naproti tomu u systémů DWDM je přenášeno několik kanálů s odstupem 0,8 nm (0,4 nm) v oblasti kolem vlnové délky 1550 nm. Při nulové chromatické disperzi vznikají mezi kanály další spektrální intermodulační produkty vlivem čtyřvlnného směšování (Four Wave Mixing, FWM). U těchto systémů se ukázalo výhodné použít malou nenulovou chromatickou disperzi. Významnou roli má u DWDM systému také parametr S udávající sklon spektrální charakteristiky chromatické disperze. Aby byla chromatická disperze pro všechny kanály přibližně stejná, měla by být charakteristika co nejplošší. Ze znalosti vlnové délky nulové chromatické disperze o délce λ_0 a sklonu S_0 na této vlnové délce (běžně udávané katalogové hodnoty) jsme schopni dopočítat koeficient chromatické disperze pro všechny vlnové délky podle vztahu:

$$D(\lambda) = S_0/4 \times [l - (\lambda_0^4/\lambda^3)], \quad (3)$$

[ps/nm × km].

Se zvyšujícími se přenosovými rychlostmi se zvětšuje důraz na přesnou kompenzaci chromatické disperze. Proto je také důležité znát její přesnou hodnotu, a to zvláště v případě, kdy nemáme informaci o vláknech instalovaných na trase. Měření chromatické disperze na vláknech akademické optické sítě bylo prováděno v rámci plánovaného nasazení DWDM systému. Z toho důvodu probíhalo měření ve spektrální oblasti pásem C (1530–1565 nm) a L (1565–1625 nm). Pro měření používali autoři přístroj EXFO FTB-400 s modulem FTB-5800. Jako zdroj použili FLS-5834A. Chromatická disperze se měřila metodou fázového posuvu. Tato metoda je doporučena jako referenční metoda pro měření chromatické disperze optických vláken [3]. Na obr. 7 je zobrazena změřená závislost koeficientu chromatické disperze D a relativního skupinového zpoždění RGD (Relative Group Delay) na vlnové délce. Zdrojem jsou generované impulzy s přesně definovanými časovými rozestupy a měří se jejich časové zpoždění na různých vlnových délkách – křivka RGD . Z tohoto časového zpoždění, označeno Δt , a ze znalosti délky trasy L je vypočítán koeficient chromatické disperze podle vztahu 2.

Metodou fázového posuvu změřili autoři koeficient chromatické disperze 16,347 ps/(nm×km) na vlnové délce 1550 nm. Pro kontrolní měření bylo použito měřidlo EXFO FTB-200 s modulem FTB-5700. To umožňuje měření CD/PMD reflektometrickou metodou. Hodnota koeficientu chromatické disperze na vlnové délce 1550 nm byla změřena 15,56 ps/(nm×km). Konvenční jednovidové vlákno má mít koeficient chromatické disperze 18 ps/(nm×km). Změřené hodnoty disperze v závislosti na vlnové délce je na obr. 8.

Výstupem je křivka disperze v jednotkách [ps/nm], takže snadno dopočítáme koeficient chromatické disperze v jednotkách [ps/(nm×km)] pouhým podělením délkou trasy [km]. Limitní hodnota disperze pro trasu s provozem 10 Gb/s je 1100 ps/nm. Autory změřená hodnota byla nejvýše 110 ps/nm, takže optická trasa poskytuje značnou rezervu pro navyšování přenosových rychlostí. Přesné změřené hodnoty je možné analyzovat pomocí programu Fast-Reporter, který je dodáváný k měřicím přístrojům. Pro lepší přehlednost byly hodnoty naměřené oběma metodami sloučeny do jednoho grafu na obr. 9.

Na obr. 9 je vidět rozdíl chromatické disperze změřené oběma metodami. Zatímco reflektometrickou metodou (modrá křivka) proměřili autoři celé pásmo, u metody fázového posuvu (červená křivka) přesně definovali spektrální oblast pásma C a L. V této užší spektrální oblasti byla charakteristika změřena s menším rozestupem vlnových délek, a je tedy přesnější. Výhodou této metody byla také rychlost měření, kdy změření jednoho vlákna trvalo kolem 30 s. Čas měření jednoho vlákna reflektometrickou metodou se pohyboval kolem tří minut. Na druhou stranu tato metoda nabízí náhled na širší spektrum vlnových délek. Značnou výhodou je možnost měřit pouze z jedné strany, zejména pak trasy dlouhé přes desítky km.

Měření polarizační vidové disperze

V jednovidových optických vláknech se signál šíří ve dvou polarizačních rovinách, které jsou navzájem kolmé. Za předpokladu, že by bylo jádro dokonale kruhové v celé své délce, by se obě polarizační roviny (vidy) šířily stejně rychle. Reálně není možné takové vlákno vyrobit, a proto v něm dochází k dvojlomu, jehož vlivem se v obou polarizačních rovinách šíří vidy různou rychlostí. Po průchodu signálu vláknem pak dochází k časovému zpoždění mezi vidy obou polarizačních rovin. Tento jev se zhoršuje při jakékoliv kruhové nesymetrii optického vlákna. Polarizační vidová disperze je vyjádřena koeficientem *PMD* podle vztahu:

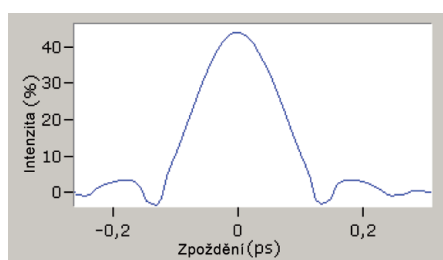
$$PMD = \Delta t \sqrt{L}, \text{ [ps}/\sqrt{\text{km}}; \text{ps}; \text{km}], \quad (4)$$

kde zpoždění signálu Δt je také označováno jako střední hodnota diferenciálního skupinového zpoždění (Differential Group Delay, DGD) a L je délka vlákna.

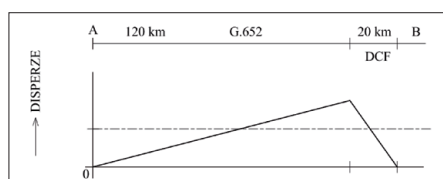
Vliv na *PMD* má kromě vlastní výroby vlákna také výroba kabelu jako celku. Také další vlivy způsobující mikrohyby, pnutí a deformace do značné míry ovlivňují hodnotu *PMD*. Jde tedy o značně náhodný parametr závislý také na kvalitě montáže a okolních podmínkách. Z toho důvodu je prakticky nevypočitatelný a zcela náhodný i pro vlákna ve stejném kabelu. Jedinou možností zjištění přesné hodnoty je tedy měření. V praxi autoři vyzkoušeli metodu interferometrickou a metodu reflektometrickou. Potřeba měření vzrostla především s nástupem vyšších přenosových rychlostí. Vliv *PMD* je v porovnání s chromatickou disperzí výrazně nižší a projevuje se až od přenosových rychlostí 10 Gb/s, kdy musí být koeficient *PMD* menší než 0,5 ps/ $\sqrt{\text{km}}$. Aby byla zaručena požadovaná hodnota *PMD*, je nutné ji kontrolovat již během výroby, při montáži trasy a před nasazením systému, aby bylo možné včasné lokalizovat a vyměnit úseky s nevyhovující hodnotou *PMD*.

Pro měření byl použit přístroj EXFO FTB-400 s modulem FTB-5500B. Jako

zdroj byl použit FLS-5834A se širokospektrální diodou LED s polarizovaným výstupem. Modul FTB-5500B provádí měření interferometrickou metodou GINTY (Generalized Interferometric Method). Pro určení koeficientu *PMD* [ps/ $\sqrt{\text{km}}$] nemůže být použita okamžitá hodnota *DGD*, protože náhodně kolísá kolem průměrné (střední) hodnoty, jak ukazuje obr. 10 změřeného průběhu interferometrickou metodou. Pro určení *PMD* zpoždění Δt [ps] se používá střední hodnota *DGD* měřená v rozsahu určitých vlnových délek. Ze znalosti hodnoty *DGD* se vypočítá koeficient *PMD* podle vztahu 4. Interferometrickou metodou byla změřena střední hodnota *DGD* = 0,024 ps



Obr. 10 Křivka Gaussova rozložení diferenciálního skupinového zpoždění změřená interferometrickou metodou



Obr. 11 Příklad kompenzace chromatické disperze optické trasy

Tabulka 1 Hodnoty *PMD* změřené modulem FTB-5700 a vyhodnocené programem FastReporter

Výsledky	
Hodnota <i>PMD</i>	0,07 ps
Koeficient <i>PMD</i>	0,0274 ps/ $\sqrt{\text{km}}$
Hodnota <i>PMD</i> 2. řádu	0,002 ps/nm
Délka měřeného vlákna	5,759 km

a následně vypočten koeficient *PMD* = 0,0100 ps/ $\sqrt{\text{km}}$.

Pro srovnávací měření koeficientu *PMD* vybraných tras byla použita metoda POTDR (Polarization OTDR). Tato metoda kombinuje měření *PMD* s metodou reflektometrickou. Umožňuje tedy změřit celou trasu a lokalizovat úsek se zvýšenou hodnotou *PMD*.

Pro kontrolní měření bylo použito měřidlo EXFO FTB-200 s modulem FTB-5700. Měřicí metoda tohoto modulu je založena na analýze náhodně se měnícího stavu polarizace SSA (Scrambled State-of-polarization Analysis). Modul FTB-5700 vyhodnotí trasu, jestli vyhovuje nebo nevyhovuje a zobrazí klíčové parametry trasy. Výsledky měření vyhodnocené v programu FastReporter jsou v tabulce 1.

Hodnota *PMD* odpovídá hodnotě *DGD*. Hodnoty změřené metodou POTDR jsou

větší než interferometrickou metodou. Měření bylo ovlivněno hlavně pohybem měřicí šňury. Na druhou stranu je vidět, že změřená hodnota *PMD* koeficientu je stále vyhovující i pro systémy s přenosovou rychlostí 40 Gb/s. Hodnota zpoždění *PMD* druhého řádu [ps/nm] vyjadřuje změnu zpoždění v závislosti na vlnové délce. Tento parametr má smysl sledovat při nasazování DWDM systémů s přenosovými rychlostmi překračujícími 40 Gb/s. Změřená hodnota je prakticky zanedbatelná, protože větší vliv na přenášený signál bude mít disperze chromatická.

Porovnáme-li obě měřicí metody, pak interferometrická metoda je výrazně rychlejší (15 s trvalo jedno měření) a není tolik ovlivněna pohybem měřicí šňury. Na druhou stranu je nutné připojit na druhý konec trasy zdroj polarizovaného záření. Metoda POTDR poskytuje rychlou informaci o měřené trase z jednoho měřicího místa a umožňuje lokalizovat délky s nevyhovující hodnotou *PMD* koeficientu

Možnosti korekce disperzí

Zjistí-li se měřením, že některá vlákna nespĺňují předepsané limity tolerancí, je možné využít několik metod, jak přenosové podmínky vlákna zlepšit. Pro snížení chromatické disperze, což je častý problém u starších, již položených optických kabelů, lze využít pasivní optickou kompenzaci. Používají se speciální kompenzační vlákna DCF (Disperzion Compensation Fiber) s vysokou hodnotou záporné chromatické disperze. Metoda spočívá v napojení „cívky“ tohoto vlákna na konci trasy (asi 1/6 skutečné délky), a tímto způsobem se vykompenzuje hodnota disperze. Příklad kompenzace trasy uvádí obr. 11.

V současné době jsou již nabízeny nové typy kompenzačních vláken s dostatečným záporným sklonem disperzní charakteristiky vhodným pro kompenzaci konvenčních i NZDF (Non Zero Dispersion Fibre) vláken. Umožňují to např. i speciální mnohovidová vlákna HOM (High Order Mode Fiber). Koeficient chromatické disperze těchto HOM vláken je navíc přibližně 3krát vyšší než u klasických DCF vláken, a stačí tudíž oproti nim použít jen třetinu délky kompenzačního vlákna. HOM vlákna mají též malý měrný útlum a jsou odolná na nelineární jevy. Další možná kompenzace je s využitím Braggovské mřížky. Takovou mřížku s proměnnou periodou mřížky je možné použít obdobně jako kompenzační vlákno, ale obvykle jen pro poměrně úzkou spektrální oblast několika nm (do cca 6 nm). Pro kompenzaci chromatické disperze více spektrálních kanálů je nutné v tomto případě použít kaskádu takových mřížek. Dnes jsou již ovšem nabízeny rovněž širokospektrální kompenzátory s Braggovskou mřížkou pro pásmo široké až 35 nm.

Typický v praxi používaný fixní kompenzátor chromatické disperze založený na technologii Braggových mřížek pro vysokorychlostní optické sítě může být využit pro jednokanálový nebo širokopásmový přenos, a to v reálném čase nebo pro statickou kompenzaci.

Typické vlastnosti jsou následující:

- kompenzuje jeden nebo současně několik kanálů,
- vložný útlum je menší než 3,5 dB,
- vyrovnává sklon disperzní křivky přenosového vlákna,
- malé rozměry.

Typické aplikace jsou:

- alternativa k disperzi kompenzujícímu vláknu DCF,
- metropolitní a dálkové DWDM sítě,
- SDH/SONET a CATV přenosové trasy, kompenzace v koncových nebo vysílacích bodech přenosové trasy,
- korekce reziduální chromatické disperze a sklonu disperzní křivky.

Pokud se týče PMD, jedná se o nepříznivé vlivy nahodilé, případně způsobené vadou při výrobě, dopravě apod. V některých případech jedna kabelová délka může způsobit výslednou špatnou hodnotu celé trasy. V současné době trh nabízí přístroje, které jsou schopny zaměřit tu jed-

nu, např. špatnou délku (POTDR), kdy se po její výměně zlepší hodnoty PMD celé trasy.

Závěr

Akademická síť bude mít v budoucnu využití především pro lékařské a univerzitní účely. Cílem je využití informatiky v medicíně pro zvýšení kvality lékařské péče, zlepšení podmínek pro medicínský výzkum a výuku absolventů medicíny. Velmi významnou výhodou projektu je jeho velká podpora technologií výukového a výzkumného pod-systému, od kterého se očekává významné zlepšení úrovně výuky studentů.

Hlavním cílem provedeného měření bylo ověřit přenosové parametry optické sítě. Měření útlumu, útlumu odrazu, chromatické disperze a polarizační vidové disperze prováděli autoři jak metodami přímými, tak i reflektometrickými. Obecně lze říci, že přímé metody pro měření jsou rychlejší a dávají přesnější výsledky. Z toho důvodu jsou uvedeny v doporučeních ITU jako referenční. Reflektometrické metody mají výhodu především z důvodu jednosměrného měření. Pomocí jednoho přístroje s dvěma měřicími kartami lze tak měřit požadované přenosové parametry z jednoho místa. To je důležité zvláště u tras dlouhých stovky kilometrů. Reflektometrické metody také dají náhled na průběh parametrů po

celé délce trasy. Je možné tak snadno lokalizovat chybné úseky a provést jejich výměnu. Měřicí modul FTB-7400 umožnil měřit jak útlum trasy, tak i útlum odrazu. Měřicí modul FTB-5700 v sobě navíc kombinuje měřidlo chromatické i polarizační vidové disperze na jediném portu. Při měření nedošlo k překročení limitní hodnoty žádného z měřených parametrů [3], a tak lze konstatovat, že brněnská akademická počítačová síť splňuje požadavky pro nasazení vysokorychlostních systémů s vlnovým dělením.

LITERATURA

- [1] Filka, M., Dostál, O.: *BASP – Brněnská akademická počítačová síť – vývoj, využití a perspektivy*. In *Proceedings of the 36th conference on Measurement and maintenance of the telecommunications cables*. České Budějovice, 2006.
- [2] Filka, M.: *Optoelectronic for telecommunications and informatics*. Dallas, Texas: OPTOKON CO., LTD., & METHODE ELECTRONIC. 2009. 404 s. ISBN 978-0-615-33185-0.
- [3] Reichert, P., Tejkal, V., Filka, M., Šporik, J.: *Měření optických přenosových parametrů brněnské akademické počítačové sítě*. *Elektrorevue – Internetový časopis* (<http://www.elektrorevue.cz>), 2010, roč. 2010, č. 3, s. 1–6. ISSN: 1213-1539.