CHROMATICKÁ DISPERZE JEDNOVIDOVÝCH OPTICKÝCH VLÁKEN A JEJÍ MĚŘENÍ

Martin Hájek, Petr Holomeček

Úvod

Překotně stoupající požadavky na přenosovou kapacitu telekomunikačních spojů nutí jejich provozovatele přenosové trasy neustále zdokonalovat. V případě optických tras to znamená zabývat se neustále dalšími a dalšími parametry optických vláken a jejich měřením. V tomto článku bychom se chtěli zabývat chromatickou disperzí jednovidových optických vláken a jejím měřením. Chtěli bychom zde shrnout základní rysy tohoto jevu a jeho účinky na optický komunikační systém, věnovat se metodám jejího měření a také se podělit o praktické zkušenosti s takovými měřeními na vláknech v terénu přímo v ČR.

Ačkoliv je chromatická disperze již po dlouhou dobu známá všem, kdo pracují s optickými vlákny, její měření na trasách se zatím u nás prakticky neprovádělo. Tato situace se ovšem s přechodem na stále vyšší přenosové kapacity mění. Vyvstává zde nutnost kompenzace chromatické disperze optických tras. Nutnost kompenzace se dále s nástupem systémů hustého vlnového multiplexu DWDM (Dense Wavelength Division Multiplex), při kterém se vláknem najednou přenáší více spektrálních kanálů, rozšiřuje do celé spektrální oblasti užité pro přenos. S tím samozřejmě roste nutnost exaktní znalosti hodnoty chromatické disperze trasy a v případě použití DWDM i její spektrální závislosti.

Chromatická disperze v jednovidových optických vláknech

Konstrukcí jednovidových vláken se odstranil hlavní faktor omezující přenosovou rychlost v mnohovidových vláknech – vidová disperze. Ta byla způsobena šířením signálu vláknem prostřednictvím mnoha vidů, z nichž každý procházel vláknem různou dráhou. Z tohoto důvodu se každý vid šířil vláknem i různě dlouho, jednotlivé vidy se oproti sobě navzájem zpožďovali a impuls obsahující velké množství vidů byl na konci vlákna časově roztažený. V jednovidových vláknech, kterými se signál šíří pouze prostřednictvím jediného vidu, se vidová disperze neuplatňuje a hlavním faktorem omezujícím rychlost přenosu se stává chromatická disperze.

Základní příčina chromatické disperze spočívá v tom, že různé spektrální složky signálu (na odlišných vlnových délkách) se šíří optickým vláknem rozdílnou rychlostí. Jestliže tedy vyšleme do vlákna impuls signálu, který nutně vždy více spektrálních složek obsahuje, některé jeho spektrální části se budou při průchodu vláknem zpožďovat oproti jiným, impuls se při průchodu vláknem bude časově roztahovat a může zasahovat i do vedlejších bitových mezer, a tím zkreslovat přenášenou informaci. K účinku chromatické disperze na signál a přenosový systém se dostaneme později, teď se podívejme na její vlastní původ.

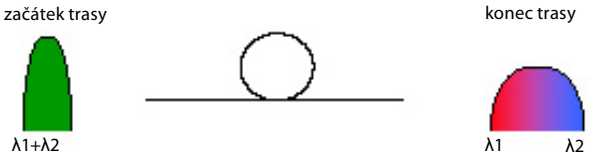
Chromatická disperze optického vlákna je tvořena dvěma složkami: materiálovou a vlnovodovou disperzí. Materiálová disperze spočívá v závislosti indexu lomu materiálu použitého pro výrobu vláken na vlnové délce záření (základním materiálem je sklo SiO2). Tím se každá vlnová délka šíří materiálem různě rychle (rychlost optického záření v daném prostředí v = c / n, kde c je rychlost ve vakuu a n index lomu daného prostředí). Druhý uvedený jev – vlnovodová disperze je způsobena tím, že také geometrické vlastnosti vlákna šířící se signál ovlivňují. Jmenovitě to jsou profil indexu lomu ve vláknu a poměr poloměru jádra vlákna a vlnové délky signálu. Také vlnovodová disperze se projevuje jako závislost rychlosti šíření záření vláknem na vlnové délce. Ve výsledku působí oba tyto vlivy v optickém vláknu společně a toto působení nazýváme chromatickou disperzí.

(Pozn. Každý kdo měří optické trasy přístrojem OTDR se s původem chromatické disperze setkává při zadávání index lomu, který je rozdílný pro různé vlnové délky.)

Působení chromatické disperze na přenášený optický signál

Uvedli jsme, že v důsledku chromatické disperze se budou různé spektrální složky tvořící přenášený impuls šířit vláknem různou rychlostí a tudíž bude pak impuls na konci trasy roztažený v čase – viz. obr. 1.

Obr. č. 1



Z tohoto důvodu může dojít k tomu, že roztažený impuls bude zasahovat do sousedních bitových intervalů a dojde ke zkreslení přenášené informace viz. obr. č. 2. Pro vyšší přenosové rychlosti s užšími impulsy je samozřejmě degradující vliv roztažení impulsů silnější.

Obr. č. 2

Z obrázku je dále patrný další neblahý jev související s roztahováním impulsů. Tím, že se impuls v čase roztahuje, klesá jeho energie soustředěná v jeho vlastní bitové mezeře, a tím se snižuje odstup přenášeného signálu od šumu (SNR). Toto je možné do určité míry kompenzovat zvýšením výkonové úrovně vysílaných impulsů.

Velikost chromatické disperze optického vlákna charakterizuje tzv. koeficient chromatické disperze:

$$D(\lambda) = \frac{dt_g(\lambda)}{d(\lambda)} \quad \left[\frac{ps}{nm \times km}\right]$$

udávající změnu skupinového zpoždění signálu tg při průchodu vláknem v závislosti na vlnové délce l. Hodnota koeficientu udává rozšíření impulsu (Gaussovského) v ps, při užití zdroje záření se spektrální položířkou 1 nm, po průchodu vláknem délky 1 km.

Z toho, co jsme si řekli vyplývá, že velikost roztažení impulsů vlivem chromatické disperze roste s:

*a) velikostí koeficientu chromatické disperze vlákna **D***

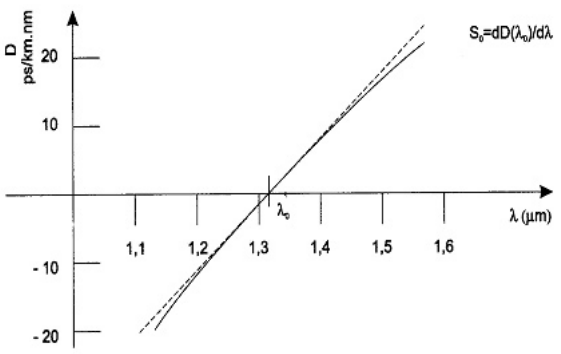
b) spektrální šířkou zdroje záření $\Delta\lambda$ – tím budou rozdílnější spektrální složky impulsu, které se šíří vláknem odlišnou rychlostí

*c) délkou optické trasy **L**.*

Na obr. č. 3 [1] je zobrazena typická spektrální závislost koeficientu chromatické disperze D pro konvenční jednovidové vlákno (dle doporučení ITU-T G.652).

*Jsou na ní vyznačeny i další dva důležité parametry: **vlnová délka nulové chromatické disperze λ_0 [nm] a sklon disperzní charakteristiky v místě nulové chromatické disperze S_0 [ps/(nm²×km)]**. Hodnoty těchto parametrů jsou, spolu s koeficientem chromatické disperze D (pro určité vlnové délky), běžně udávané mezi katalogovými údaji výrobců vláken a lze je také použít k poměrně přesným výpočtům tohoto koeficientu pro další vlnové délky.*

Obr. č. 3



Z obr. č. 3 je také patrné, že ve spektrální oblasti nad vlnovou délkou nulové chromatické disperze λ_0 *je koeficient chromatické disperze* ***D*** *kladný, tzn. že delší vlnové délky se ve vláknu zpožďují oproti kratším. Ve spektrální oblasti pod* λ_0 *je tomu naopak. Spektrální oblast s kladným koeficientem chromatické disperze* ***D*** *se také nazývá oblastí s anomální chromatickou disperzí, zatímco oblasti se záporným koeficientem* ***D*** *říkáme oblast s normální chromatickou disperzí.*

Vlnová délka λ_0 *je pro konvenční vlákna v oblasti 1300 – 1324 nm [9]. Koeficient* ***D*** *pro určitou vlnovou délku může být u konvenčních vláken též vypočítán s poměrně vysokou přesností pomocí vlnové délky nulové chromatické disperze* λ_0 *a sklonu na této vlnové délce* S_0 *podle vztahu:*

$$D(\lambda) = \left(\frac{S_0}{4}\right) \times \left[\lambda - \left(\frac{\lambda_0^4}{\lambda^3}\right)\right] \qquad \left[\frac{ps}{nm \times km}\right]$$

který je i normalizován [9, 10]. V současnosti je pro přenos nejvýznamnější spektrální oblast okolo 1550 nm, kde dosahuje hodnota ***D*** *konvenčních vláken cca 18 ps/(nm×km). To je již poměrně vysoká hodnota, jak uvidíme dále, a proto je snaha ji zmenšovat.*

Chromatická disperze a optický přenosový systém

Obecně lze říci, že impuls vysílaný zdrojem záření se spektrální položířkou $\Delta\lambda$ *[nm], bude po průchodu optickým vláknem délky* ***L*** *[km], s vláknem o koeficientu chromatické disperze na dané vlnové délce* ***D*** *[ps/(nm×km)] časově rozšířen o* Δt *[ps]:*

$$\Delta t = D(\lambda)\,\Delta\lambda\,L \qquad [\text{ ps; ps/(nm×km); nm; km }]$$

Pro vyšší přenosové rychlosti s užšími impulsy blíže u sebe působí rozšiřování impulsů větší zkreslení a tím pádem představuje chromatická disperze silný omezující faktor přenosové rychlosti systému.

Podívejme se na to, jak ovlivňuje použitý zdroj záření působení chromatické disperze na přenosový systém. Budeme zkoumat vzájemný vztah maximální přenosové rychlosti systému ***B****, délky trasy* ***L****, koeficientu chromatické disperze vlákna* ***D*** *a spektrální položířky zdroje záření* $\Delta\lambda$*.*

Při použití zdroje záření s relativně širokou spektrální položířkou $\Delta\lambda$*, proti níž je zanedbatelná spektrální šířka způsobená modulací přenášeného signálu, tedy* $\Delta\lambda_{zdroje} >> B$*, lze zjednodušeně říci, že platí vztah [s použitím 2, 3]:*

$$L \approx \frac{1000k}{B\,D\,\Delta\lambda} \qquad [\text{ km; Gbit/s; ps/(nm×km); nm }]$$

kde ***k*** *je konstanta vyjadřující odolnost systému na rozšiřování impulsů (např.* ***k*** *= 0,5 při odolnosti na roztažení impulsu o 1/2 bitového intervalu).*

Vztah přibližně platí pro zdroje záření: LED diody ($\Delta\lambda \sim x10$ *nm), klasické Fabry-Perotovy laserové diody (*$\Delta\lambda \sim x$ *nm), ale třeba i pro přímo modulované DFB laserové diody. Samotné DFB laserové diody jsou extrémně úzkospektrální, v kontinuálním režimu mají např.* $\Delta\lambda \sim 0{,}000x$ *nm. Přímou modulací, kdy je signálem přímo modulován elektrický proud generující záření laserové diody, dochází však k rozšíření spektra vlivem tzv. čirpu tj. kolísáním vlnové délky s průběhem impulsu. Tím se* $\Delta\lambda$ *může rozšířit např. až na ~ 0.5 nm. U všech uvedených zdrojů záření je jejich spektrální položířka daleko větší než spektrální šířka modulace přenášeného signálu (např. pro rychlost 2,5 Gbit/s je spektrální šířka modulovaného signálu kolem 0,02 nm v oblasti 1550 nm).*

*Příklad: Máme-li přenosový systém s F-P laserem se spektrální položířkou 1 nm, který je odolný na rozšíření impulsu až o 1 bitový interval (****k*** *= 1), používající konvenční vlákno (G.652) na 1550 nm s* ***D*** *= 18 ps/(nm×km), pro přenosovou rychlost 2,5 Gbit/s bude maximální vzdálenost jen cca. 22 km. Závislost je lineární, tzn., že při zvýšení přenosové rychlosti na 10 Gbit/s by klesla vzdálenost na cca. 5,5 km.*

*Uvedené vzdálenosti jsou velmi krátké, což vedlo k různým cestám, jak vliv chromatické disperze zmírnit. Velmi používaná a vhodná je změna zdroje záření např. za úzkospektrální DFB laser s externím modulátorem (např. na principu Mach-Zehnderova interferometru). V takovém případě bude spektrální položířka samotného zdroje záření daleko menší než spektrální šířka modulace přenášeného signálu (****B*** *>>* $\Delta\lambda_{zdroje}$*). Když ji oproti ní zanedbáme, bude spektrální šířka záření ve vláknu tvořena jen spektrální šířkou modulace samotného signálu, tj. ve vztahu bude* $\Delta\lambda \sim B$*. Pak zjednodušeně platí vztah:*

$$L \approx \frac{X}{B^2\,D} \qquad [\text{ km; Gbit/s; ps/(nm×km) }]$$

kde ***x*** *je konstanta charakterizující odolnost systému na roztahování impulsů a obsahuje též přepočet Gbit/s na nm a charakteristiku spektra přenášeného signálu (pro náš příklad externě modulovaného DFB laseru na 1550 nm bude přibližně* ***x*** *~ 104 000* ***k****, kde* ***k*** *viz. předchozí vztah).*

V případě našeho přenosového systému tentokrát s externě modulovaným DFB laserem a stejnými ostatními parametry (konvenční vlákno na 1550 nm s ***D*** *= 18 ps/(nm×km) a systém s* ***k*** *= 1) vzroste maximální vzdálenost pro přenosovou rychlost 2,5 Gbit/s na cca 924 km.*

Závislost ovšem již není lineární a vzdálenost klesá s kvadrátem přenosové rychlosti: při zvýšení na 10 Gbit/s klesne vzdálenost na necelých 58 km.

Oba uvedené případy a příklady jsou nejen zjednodušené, ale zároveň i do značné míry mezní, jelikož jsme vždy jednu část tvořící spektrum signálu zanedbali. Reálné systémy se budou pohybovat někde mezi nimi, i když většinou se budou blížit jednomu nebo druhému uvedenému případu. V praxi bývá u systémů v katalogových hodnotách uvedena maximální přípustná hodnota chromatické disperze trasy v jednotkách ps/nm, z které lze jednoduše spočítat dosah systému. Např. u systému s maximální hodnotou chromatické disperze trasy 800 ps/nm je dosah s konvenčním vláknem (18 ps/(nm×km)) cca 44 km.

Možnosti snižování vlivu chromatické disperze na optický přenosový systém

Kromě změny zdroje záření existuje celá řada možností jak snižovat nežádoucí dopady chromatické disperze, z nichž některé bychom zde chtěli zmínit.

Prvotní parametr ovlivňující chromatickou disperzi je její koeficient v optickém vláknu ***D****, a proto mu byla a je věnována výrobci vláken značná pozornost. Jak bylo uvedeno v kapitole o jejím původu, chromatická disperze se skládá ze dvou složek: materiálové a vlnovodové disperze. Obě tyto složky jsou jednoznačně dány již výrobou vlákna a chceme-li jejich hodnotu ovlivnit, musíme tak učinit již v procesu výroby. Zatímco materiálovou disperzi danou pouze vlastnostmi materiálu prakticky ovlivnit nelze, volba vhodného profilu indexu lomu mění hodnotu vlnovodové disperze, a tudíž celkové chromatické disperze. Tímto způsobem – změnami profilu indexu lomu ve vláknu – byla vyvinuta řada typů vláken s různě změněnou spektrální závislostí chromatické disperze.*

Na obr. č. 4 [1] jsou uvedeny některé typy vláken s různým profilem indexu lomu a různou spektrální charakteristikou chromatické disperze. Je zde vyznačena kromě spektrální závislosti celkové chromatické disperze D_{total} *(s vyznačenou vlnovou délkou nulové chromatické disperze* λ_0*) i spektrální charakteristika obou jejích složek. Je patrné, že zatímco spektrální průběh materiálové disperze je pro všechna vlákna stejný* D_m *(*SiO_2*), závislost vlnovodové disperze* D_w *je velmi odlišná, což je způsobeno různými profily indexu lomu ve vláknu, které jsou naznačeny vždy vlevo nahoře. Ze všech obrázků je dobře patrné, že pro vlnovou délku s nulovou chromatickou disperzí* λ_0 *se vlastně vzájemně kompenzuje vliv obou jejích složek.*

*Na obr. č. 4a je uvedeno klasické konvenční vlákno (dle ITU-T G.652). Snaha výrobců po snižování hodnoty chromatické disperze v oblasti 1550 nm vedla k vývoji vlákna s posunutou disperzní charakteristikou DSF (****Dispersion Shifted Fiber****, dle ITU-T G.653), která mají posunutou vlnovou délku nulové chromatické disperze l0 do oblasti 1550 nm (obr. č. 4b) a tudíž velmi nízkou chromatickou disperzi v této spektrální oblasti.*

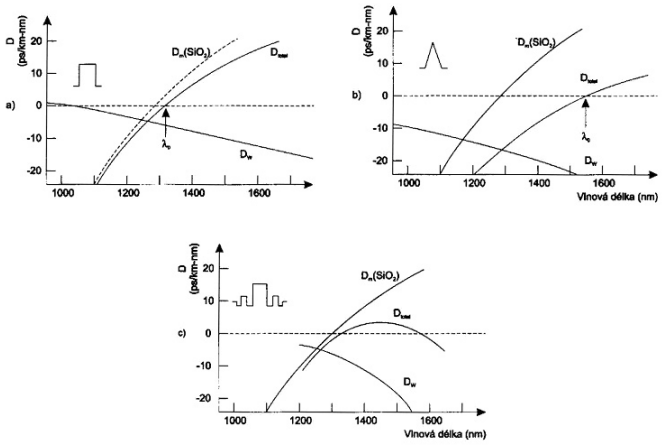
V některých částech světa si toto vlákno získalo značnou oblibu (např. v Japonsku).

*Objevily se ovšem systémy s hustým vlnovým multiplexem DWDM, u kterých se šíří vláknem najednou i mnoho desítek vysoce výkonových spektrálních kanálů v oblasti kolem 1550 nm, jejichž nosné vlnové délky jsou spektrálně velice blízko sebe (typicky 0,8 nm a 0,4 nm). Ukázalo se, že při nulové či velmi nízké hodnotě chromatické disperze ve vlákně dochází mezi kanály k vzájemnému ovlivňování v důsledku nelineárních jevů a to zejména vlivem tzv. čtyřvlnného směšování FWM (**Four Wave Mixing**). Jako výsledek FWM mohou vzniknout další spektrální intermodulační produkty, jichž může být značný počet a mohou vznikat i na místech přenosových kanálů. Tím je samozřejmě přenos užitečné informace rušen, zkreslován a snižuje se odstup signálu od šumu. Z důvodu působení nelineárních jevů se tedy ukázala být hodnota nulové chromatické disperze ve spektrální oblasti určené pro přenos u DWDM systémů nevýhodná.*

*Další vývoj se ubíral cestou vývoje vlákna s nízkou, nicméně dostačující hodnotou chromatické disperze. Tato vlákna v současnosti zažívající rozmach jsou označována jako vlákna s nenulovou disperzí NZDF (**Non Zero Dispersion Fiber**, dle ITU-T G.655). Jejich spektrální charakteristika chromatické disperze je obdobná vláknům DSF (na obr. č. 4b), přičemž vlnová délka nulové chromatické disperze leží mimo spektrální oblast určenou pro přenos.*

*V ní je hodnota koeficientu chromatické disperze D nízká, ale z hlediska FWM dostatečná (např. pro vlákno LEAF od firmy Corning D = 2 ÷ 6 ps/(nm×km) pro 1530 ÷ 1565 nm [5]). S příchodem DWDM také vzrostl význam sledování sklonu spektrální charakteristiky chromatické disperze **S**. Z důvodu zajištění přibližně stejné hodnoty chromatické disperze pro všechny přenášené spektrální kanály je vhodné, aby byla tato charakteristika v užívané spektrální oblasti co nejplošší.*

Obr. č. 4



*Na obr. č. 4c je uvedeno vlákno, které je oproti dříve uvedeným typům jen velmi málo používané a je zde jen jako další příklad. Je to vlákno s tzv. plochou disperzní charakteristikou DFF (**Dispersion Flattened Fiber**, dle ITU-T G.654), které má nízkou hodnotou chromatické disperze ve spektrální oblasti 1310 – 1550 nm, přičemž ta v obou přenosových oknech (oblasti 1310 nm a 1550 nm) dosahuje i nulové hodnoty.*

*Jak bylo několikrát uvedeno, koeficient chromatické disperze **D** [ps/(nm×km)] je parametr vlákna ovlivnitelný pouze při jeho výrobě. Fakt, že **D** je prakticky nezávislý na okolních podmínkách (teplotní a další vlivy můžeme zanedbat), ani na kvalitě montáže optické trasy (ohyby atd.), je velmi důležitý. Velikost chromatické disperze optické trasy lze tudíž v mnoha případech stanovit s dostatečnou přesností poměrně jednoduchým výpočtem z katalogových hodnot vlákna. Uvedli jsme navíc v úvodní části i vztah pro výpočet koeficientu **D** u konvenčního vlákna dokonce pro různé vlnové délky. Pro ostatní zmíněné typy vláken by byl takový vztah složitější, neboť je ovlivněný profilem indexu lomu vlákna, avšak i pro takové typy vláken někteří výrobci obdobný vztah v katalogových údajích uvádějí.*

To, že se vliv chromatické disperze časem nemění, má také velký význam pro jeho kompenzaci či potlačování. Způsob této kompenzace může být statický – oproti kompenzaci např. polarizační vidové disperze PMD, která je silně závislá na řadě vlivů včetně montáže či teplotních změn a její kompenzace je tudíž obtížná, drahá a i méně efektivní.

*Kromě změny vlákna a zdroje záření existuje řada systémových nástrojů na zmírnění vlivu chromatické disperze na přenos: počínaje zvyšováním úrovně přenášených impulsů z důvodu zvýšení odstupu signál - šum, přes vhodnou předmodulaci impulsů signálu jakýmsi předčirpem, spektrální konverzi vlnových délek impulsu signálu uprostřed trasy, až po různé metody obnovy signálu v přijímači. Celosvětově je také věnována velká pozornost výzkumu tzv. solitonového přenosu, při kterém je vliv chromatické disperze eliminován nelineárním jevem **vlastní fázové modulace** SPM.*

*Nakonec bychom chtěli zmínit velmi významnou možnost potlačování chromatické disperze, jíž je její optická kompenzace na trase. Již dlouho existují na trhu kompenzační vlákna DCF (**Dispersion Compensation Fiber**) s vysokou hodnotou záporné chromatické disperze. V tomto vláknu, které se obvykle připojuje na začátek nebo konec trasy (délka bývá pro konvenční vlákna cca. 1/6 délky vlákna trasy), dochází k opačnému disperznímu jevu než na trase a vyrovnává se zpoždění mezi složkami na různých vlnových délkách. Použití těchto vláken přináší ale i nevýhody.*

*Tato vlákna mají poměrně vysokou hodnotu měrného útlumu (~ 0,5 dB/km) a jsou náchylnější na působení nelineárních jevů. U systémů DWDM navíc vyvstává požadavek pokud možno stejné kompenzace pro všechny přenášené spektrální kanály – tzn. kompenzace i sklonu disperzní charakteristiky **S** [ps/(nm^2×km)].*

Klasická DCF vlákna mají sice sklon disperzní charakteristiky opačný než konvenční či NZDF vlákna (záporný), nicméně nedostatečný pro kompenzaci sklonu disperzní charakteristiky konvenčních či NZDF vláken.

Dnes jsou již nabízeny nové typy kompenzačních vláken s dostatečným záporným sklonem disperzní charakteristiky vhodným pro kompenzaci konvenčních i NZDF vláken. Umožňují to např. i speciální vícevidová vlákna HOM (High Order Mode fiber) [6].

Koeficient chromatické disperze těchto HOM vláken je navíc přibližně 3x vyšší než u klasických DCF vláken, a stačí tudíž oproti nim použít jen třetinu délky kompenzačního vlákna. HOM vlákna mají též nízký měrný útlum a jsou odolná na nelineární jevy.

Další možnost kompenzace chromatické disperze představují vláknové čerpované Braggovské mřížky. Takovou mřížku s proměnnou periodou mřížky lze použít pro obdobnou funkci jako kompenzační vlákno, ale obvykle jen pro poměrně úzkou spektrální oblast několika nm (typicky do cca 6 nm [7]). Pro kompenzaci chromatické disperze více spektrálních kanálů je nutné v tomto případě použít kaskádu takových mřížek. Dnes již ovšem jsou nabízeny také širokospektrální kompenzátory s Braggovskou mřížkou pro pásmo široké až 35 nm.

Zde bychom ještě chtěli upozornit na jev, jenž má odlišný původ než samotná chromatická disperze, i když se projevuje obdobně – totiž rozšiřováním impulsů v závislosti na spektrální šířce použitého zdroje záření a délce trasy. Tímto jevem je polarizační vidová disperze 2. řádu (PMD 2. řádu). Tento jev, který tu nechceme podrobněji rozebírat, má náhodný charakter a vzniká spektrální fluktuací polarizační vidové disperze 1. řádu (značené většinou jen PMD). PMD 2. řádu udáváme ve stejných jednotkách jako chromatickou disperzi [ps/(nm×km)]. Jelikož je to náhodný jev, ovlivňovaný řadou dalších vlivů, lze jej jen velmi obtížně a nepříliš účinně kompenzovat, přičemž komerčně není taková kompenzace stále ještě dostupná. Působení PMD 2. řádu je ve srovnání s chromatickou disperzí opravdu velmi slabé a ve většině dnešních aplikací se jím není třeba zaobírat, přesto však s ním zůstává slabě ve vláknu i po úplné kompenzaci samotné chromatické disperze naše známé - výše popsané - působení na optický signál.

Měření chromatické disperze

Na úvod části o měření bychom se chtěli vrátit k tomu, proč vlastně roste poptávka po měření chromatické disperze, když bylo řečeno, že chromatickou disperzi je relativně jednoduché s poměrně vysokou přesností spočítat.

Za prvé se jedná o zvyšování bitové rychlosti. Impulsy nesoucí informaci jsou blíže u sebe a disperze více omezuje dosah spoje. Roste pak i nutnost dokonalejší a přesnější eliminace či kompenzace vlivů chromatické disperze a vzrůstá tudíž i potřeba jejího stále přesnějšího stanovování – tedy měření. Navíc s dalším zvyšováním přenosových rychlostí až na 40 Gbit/s vyvstávají další obtíže, které byly u nižších přenosových rychlostí zanedbatelné – např. se zkoumá dosud zcela zanedbatelná teplotní nestabilita hodnoty chromatické disperze vlákna a kompenzačního prvku a z toho plynoucí možná potřeba kompenzace dynamické. Z toho plyne další zvyšování požadavků na přesné stanovení hodnoty chromatické disperze.

Další oblast, kde může být měření chromatické disperze nutné, je nasazování hustého vlnového multiplexu DWDM. Při nasazení tohoto přenosového systému využíváme, narozdíl od klasických jednokanálových systémů, širokou spektrální oblast (dnes většinou tzv. C a L pásmo od 1530 nm do 1625 nm). Zajímá nás potom chromatická disperze v celé použité spektrální oblasti. S tím ještě souvisí zlepšování parametrů optických vláken, které umožňují kromě C a L pásma využít daleko širší spektrální rozsah (u jednovidových vláken je to teoreticky od 1260 nm do 1675 nm). Posledním důvodem je skutečnost, že s postupnou liberalizací telekomunikačního trhu může být signál přenášen po různých vláknech různých provozovatelů. V takovém případě již nemusí být úplně jednoduché zjistit a spočítat chromatickou disperzi pro určitou trasu.

Jak bylo řečeno, chromatická disperze optického vlákna způsobuje rozdílné zpoždění různých spektrálních složek signálu. Toto zpoždění můžeme v zásadě zjišťovat buď přímým měřením časového zpoždění signálů o různých vlnových délkách nebo měřením jejich fázového zpoždění. Dopředu si můžeme říci, že ve většině případů budeme toto zpoždění měřit pro několik vybraných vlnových délek, a proto pak musíme pro stanovení samotné chromatické disperze použít ještě matematickou aproximaci, o které bude řeč později. (Plyne to z definice chromatické disperze jako změny skupinového zpoždění signálu v závislosti na vlnové délce – viz. definice výše).

Principy základních metod měření chromatické disperze jsou známy již dlouhou dobu a jejich uplatnění v praxi závisí hlavně na technologickém vývoji a jeho možnostech.

Každá z dále uvedených metod existuje v různých modifikacích podle výrobce, a proto se budeme snažit vysvětlit základní principy jednotlivých metod s popisem některých z možných řešení.

Obecně se dá o metodách pro měření chromatické disperze říci, že se jedná o metody velmi přesné a to z toho důvodu, že vždy jde v podstatě o měření času, které patří mezi nejpřesnější měření vůbec. Přesnost měření je vždy závislá na konkrétním měřicím přístroji, na parametrech jeho komponent a jejich stabilitě.

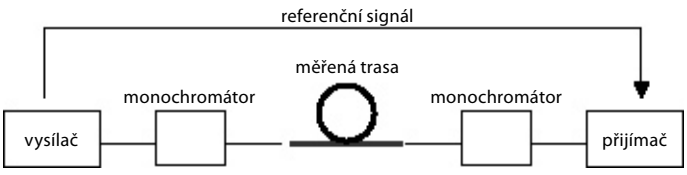
Lze však říci, že u všech základních metod dnes dosahujeme přesnosti stanovení koeficientu chromatické disperze v desetinách i setinách ps/(nm×km) a přesnosti stanovení vlnové délky nulové chromatické disperze až v desetinách nm [13].

Měření chromatické disperze metodou fázového posuvu a diferenciálního fázového posuvu

Metoda fázového posuvu je dle doporučení ITU-T G.650 uvedena jako referenční metoda pro měření chromatické disperze optických vláken. Princip měření je znázorněn na obrázku č.5.

Pro měření se využívá modulovaný signál, šířící se prostřednictvím několika vlnových délek měřeným vláknem optické trasy. Po průchodu trasou je signál detekován a pomocí přístroje pro měření fáze (například vektorvoltmetr) je zjištěna jeho fáze. U metody fázového posuvu je tato měřená fáze porovnána s fází vstupního signálu a z tohoto porovnání získáme změnu fáze signálu po průchodu měřenou trasou – z čehož zjistíme zpoždění. Proto je nutné u této metody použít další tzv. referenční trasu např. jiné vlákno v kabelu. Pomocí té přenášíme k přijímači informaci o fázi vstupního signálu.

Obr. č. 5 Metoda fázového posuvu



V praxi se více používá metoda diferenciálního fázového posuvu, u které měříme vzájemný rozdíl fází signálů na různých vlnových délkách. Z toho důvodu není nezbytné přenášet referenční signál na detekční stranu trasy. Blokové schéma pro tuto metodu je stejné jako pro metodu fázového posunu bez nutnosti spojení referenčního signálu (viz. obr. č. 5). V praktických uspořádáních se však i u této metody většinou používá při měření dvou vláken: jedno měřené a jedno komunikační. Po komunikačním vlákně se přenášejí informace z výstupu na vstup, kterými je možné ovládat vysílač – např. nastavování vlnové délky a měřicí modulační frekvence, o které bude řeč dále.

Jako zdroj záření měřicí soustavy je možné využít širokospektrální zdroj (LED nebo zdroj ASE – zesílená spontánní emise vláknových zesilovačů EDFA), přičemž jednotlivé vlnové délky jsou vybírány pomocí monochromátoru a to buď ihned za zdrojem záření nebo před detekční soustavou. Další možností je využít skupinu laserových diod. Každé z těchto řešení má samozřejmě své výhody i nevýhody. Použití širokospektrálního zdroje záření má oproti sadě laserových diod výhodu ve větší stabilitě vlnové délky vybírané monochromátorem, zatímco v druhém případě lze dosáhnout vyššího dynamického rozsahu.

Jak už bylo řečeno, zdroj optického záření je modulován signálem o určité frekvenci. Ta se pohybuje v řádu stovek MHz (100, 300 MHz) až desítek GHz. Modulační frekvence je volena tak, aby byl zajištěn rozdíl vstupní a výstupní fáze pouze během jedné periody, tak aby byla vyloučena nejednoznačnost měření. Modulační frekvence nám také udává, jaké největší zpoždění (disperzi) je možné měřit. Např. pro modulační frekvenci 100 MHz se jedná o celkové maximální měřitelné zpoždění 10 ns. Pro měření většího zpoždění by byla nutná volba nižší modulační frekvence. Důvodem, proč se nepoužívají nižší modulační frekvence, je nutnost dostatečné přesnosti měření, která se s nižší modulační frekvencí snižuje. Ideální by z tohoto pohledu byla možnost volby modulační frekvence.

Metody, při kterých je měřena fáze (rozdíl fází), se pro měření chromatické disperze používají nejdéle. Doba měření jednoho vlákna se pohybuje řádově v desítkách sekund až jednotek minut a je závislá zejména na počtu měřených vlnových délek.

Přesnost měření je u této metody ovlivněna zejména stabilitou zdroje signálu o požadované frekvenci a zdroje optického záření.

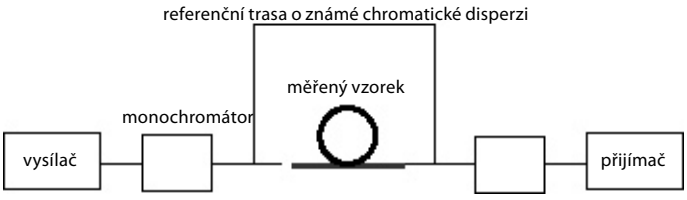
Jednou ze zajímavých modifikací této metody je přímé měření chromatické disperze. Jako zdroje záření je totiž možné využít laditelný zdroj záření (nebo laditelný filtr), kterým je možné plynule měnit vlnovou délku. Takovým způsobem je potom možné měřit přímo chromatickou disperzi, protože je možné sledovat změnu zpoždění v závislosti na změně vlnové délky, což je vlastně samotná chromatická disperze (viz. definice výše). Používá se i jiný způsob přímého měření chromatické disperze.

Měří se v několika spektrálních bodech, ve kterých se změna vlnové délky neprovádí laditelným zdrojem záření, ale dalším modulačním signálem o nízké frekvenci (např. ~ 200 Hz). Tímto signálem je modulován výstupní signál ještě poté, co byl modulován zmíněným měřicím modulačním signálem (např. 100 MHz). Docílí se tím jemného rozmítání vlnové délky v daných spektrálních bodech [13].

Měření chromatické disperze interferometrickou metodou

Základem této metody je interference. K měření se využívá nejčastěji Michelsonova nebo Mach-Zehnderova interferometru. Princip této metody je znázorněn na obrázku č.6. Měřený vzorek tvoří jedno rameno Mach-Zehnderova interferometru, zatímco pro druhé rameno je použita referenční cesta se známou chromatickou disperzí. Na detekční straně dochází k interferenci mezi signály z obou ramen. Měníme-li délku referenční cesty, můžeme sledovat pomocí interference vzájemný fázový rozdíl signálů z obou ramen. Pro referenční cestu může být použito krátké optické vlákno (patchcord) nebo může být optický paprsek veden pouze vzduchem za pomocí optické soustavy.

Obr. č. 6 Metoda interferometrická



Jelikož měřené vlákno srovnáváme s referenční větví, používá se tato metoda pro měření jen velmi malých hodnot zpoždění vlivem chromatické disperze – jen krátkých úseků optického vlákna (do 10 m [10]). Metoda není tedy vhodná pro měření optických tras v terénu a používá se pro přesná laboratorní měření krátkých vláken či pro měření součástek. S touto metodou se např. měří závislost chromatické disperze optického vlákna na teplotě.

Jako zdroj záření měřicí soustavy se využívá sada laserových diod nebo širokospektrální zdroj (např. LED nebo zdroj ASE), přičemž pro výběr jednotlivých vlnových délek slouží monochromátor umístěný za zdrojem záření nebo před detektorem.

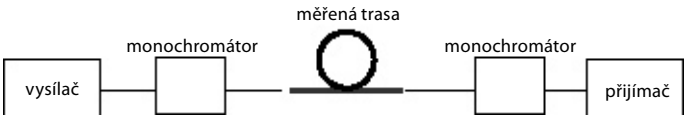
Jelikož se tato metoda nepoužívá pro měření optických tras, leží poněkud stranou našeho hlavního zájmu.

Měření chromatické disperze metodou zpoždění impulsů v časové oblasti

V případě této metody jsou do měřené trasy za sebou vyslány optické impulsy o různých vlnových délkách a to v přesných časových rozestupech. Z porovnání rozestupů jednotlivých optických impulsů na vstupu a na výstupu měřené trasy se potom určuje zpoždění vlivem chromatické disperze. Princip této metody je naznačen na obrázku č. 7.

Jako zdroj záření měřicí soustavy je možné využít opět skupinu laserových diod nebo širokospektrální zdroj, kdy jednotlivé vlnové délky budou vybírány pomocí monochromátoru (buď ihned za zdrojem záření nebo před detekční soustavou). Rozestup impulsů na vstupu měřené trasy nám udává, jaké největší zpoždění (disperzi) je možné měřit. Bude-li totiž zpoždění větší než je rozestup impulsů, dojde k záměně pořadí impulsů, a tedy k chybnému měření. Tento jev by bylo možné odstranit spektrálně selektivní přijímací soustavou. Toto řešení je však velmi technicky a ekonomicky náročné.

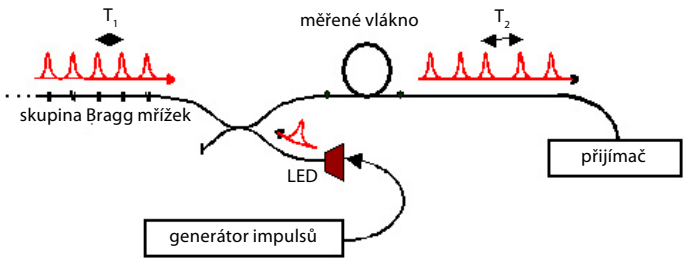
Obr. č. 7 Metoda zpoždění impulsů v časové oblasti



Na obrázku č. 8 je ukázka možné konfigurace této metody. Generátor impulsů moduluje záření širokospektrálního zdroje, což je LED dioda. Jako monochromátor funguje kaskáda Braggovských mřížek. Ta z přicházejícího impulsu odráží zpět do měřené trasy složky o vybraných vlnových délkách s určitými časovými rozestupy. To je dané tím, že kaskáda je tvořena odlišnými mřížkami, mezi nimiž jsou úseky optického vlákna a každá mřížka odráží záření o různé vlnové délce.

Tím přichází do měřeného vlákna trasy sled impulsů o různých vlnových délkách s danými časovými rozestupy. Po průchodu trasou se vlivem chromatické disperze časové rozestupy impulsů změní. Porovnáním rozestupů na vstupu a výstupu měřené trasy zjistíme hodnoty zpoždění vlivem chromatické disperze.

Obr. č. 8 Příklad možné konfigurace metody zpoždění impulsů v časové oblasti



Metoda zpoždění impulsů v časové oblasti nemá většinou možnost nastavování vstupních rozestupů mezi impulsy. Ty jsou dány přímo mechanickou konstrukcí přístroje. K měření se vzhledem k tomu používá pouze jedno optické vlákno (přímo měřená trasa), protože přijímací strana zná vstupní rozestup impulsů a není třeba referenční cesty.

Tato metoda byla dovedena k praktickému použití před dvěma lety. Jedná se o velmi rychlou metodu, u které doba měření jednoho vlákna netrvá déle než několik sekund (neplatí pro modifikaci OTDR, o které bude řeč dále). Přesnost měření je dána na jedné straně zejména částí měřicí soustavy, která určuje rozestupy mezi jednotlivými impulsy, jež jsou do vlákna posílány (v uvedeném případě to byla kaskáda Braggovských mřížek). Na straně druhé je též přesnost ovlivněna faktem, že vlivem chromatické disperze se impulsy od sebe nejen navzájem vzdalují, ale také sami roztahují. To je způsobeno tím, že i každý impuls je tvořen zářením o určité spektrální šířce, v našem případě dané příslušnou Braggovskou mřížkou v kaskádě. Roztahování impulsů může působit jisté problémy při přesném stanovení jejich časové polohy a tudíž i jejich vzájemných rozestupů. Z tohoto důvodu u této metody přesnost měření závisí také na velikosti měřené chromatické disperze.

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

Zpracování výsledků měření

Chromatická disperze je definována jako závislost změny skupinového zpoždění na vlnové délce. Z uvedených metod plyne, že ve většině případů tuto změnu neměříme (výjimkou je jedna zmíněná modifikace metody diferenciálního fázového posunu). To, co zpravidla měříme, je jen zpoždění signálů na různých vlnových délkách. Samotnou chromatickou disperzi musíme z naměřených hodnot stanovit pomocí matematické aproximace – proložíme naměřené hodnoty určitou křivkou. Její sklon v každém spektrálním bodě nám pak dává hodnotu chromatické disperze na dané vlnové délce.

Pro konvenční jednovidová vlákna (dle ITU-T G.652) se pro aproximaci používá tříčlenný Sellmeierův vztah:

$$tg\,(\lambda) = A + B\,\lambda^2 + C\lambda^{-2}$$

Uvedená rovnice je pro výpočet dostatečně přesná ve spektrální oblasti nulové chromatické disperze (1270 – 1314 nm). Pro spektrální oblast okolo 1550 nm je rovnice též použitelná s poněkud menší přesností aproximace.

Pro jednovidová vlákna s posunutou disperzní charakteristikou (DSF dle ITU-T G.653) a pro jednovidová vlákna s nenulovou chromatickou disperzí v oblasti 1550 nm (NZDF dle ITU-T G.655) se používá kvadratická aproximace:

$$t_g\,(\lambda) = A\,\lambda^2 + B\lambda + C$$

Uvedená rovnice je dostatečně přesná ve spektrální oblasti okolo 1550 nm (oblast nulové chromatické disperze těchto vláken). Rovnice se ovšem v tomto případě nedá použít pro pásmo okolo vlnové délky 1310 nm. Pro zjištění chromatické disperze v této spektrální oblasti je třeba provést další měření přímo v dané oblasti.

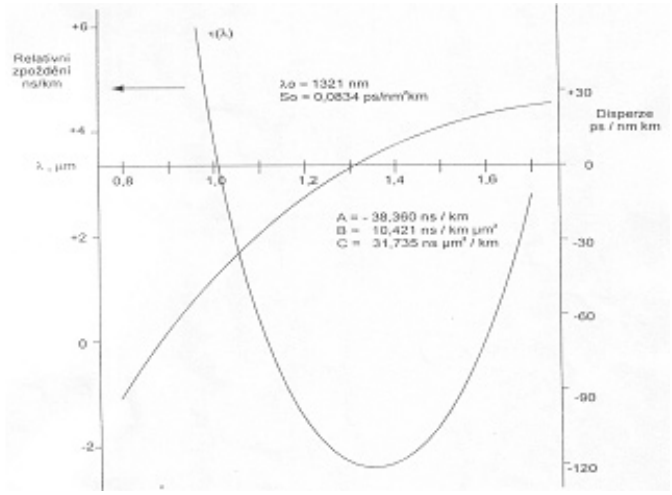
Pro jiné speciální typy vláken (např. kompenzační DCF vlákna) je vhodné použít pětičlenný Sellmeierův vztah:

$$t_g\,(\lambda) = A + B\,\lambda^2 + C\,\lambda^{-2} + D\,\lambda^4 + E\,\lambda^{-4}$$

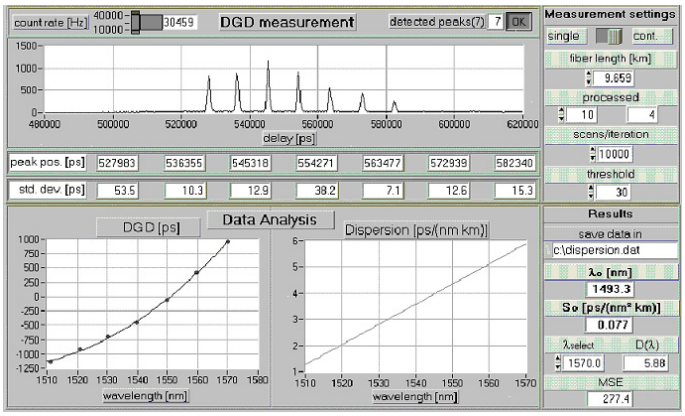
Koeficienty ve všech rovnicích se vypočítávají z naměřených hodnot jako příslušná soustava rovnic. Veškeré uvedené aproximační rovnice jsou určeny zejména pro oblast nulové chromatické disperze, kde je přesnost měření nejkritičtější. Výsledky měření jsou tedy ovlivněny nejen výběrem vhodné aproximace, ale také spektrální oblastí měření. Uvedené vztahy též udávají nutný počet měřicích vlnových délek – kromě speciálních vláken alespoň tři. A vždy platí, že nejpřesnějšího vyhodnocení docílíme, pokud jsou ve spektrální oblasti, pro kterou chromatickou disperzi zjišťujeme nebo v oblasti nulové chromatické disperze daného vlákna (viz. zmíněné úskalí metody OTDR – obvykle s několika málo vlnovými délkami pokrývajícími velmi široké spektrální pásmo).

Obrázek č. 9 ukazuje výsledek měření chromatické disperze konvenčního vlákna G.652 [8]. Pro vyhodnocení byl užitý zmíněný tříčlenný Sellmeierův aproximační vztah. Vlnová délka nulové chromatické disperze byla stanovena na 1321 nm.

Obr. č. 9



Obr. č. 10



Praktické zkušenosti s měřením chromatické disperze

Měli jsme možnost si prakticky vyzkoušet měření se dvěma měřicími přístroji pro měření chromatické disperze, pracujícími na odlišných metodách: metodě diferenciálního fázového posuvu a metodě zpoždění impulsů v časové oblasti. Oba přístroje měly společné to, že se skládaly ze dvou částí (přijímač a vysílač), používaly pro měření pouze jedno (měřené) vlákno, nebylo nutné při měření stanovovat referenční hodnotu a ovládání obou dvou bylo jednoduché.

Měření s přístrojem na bázi metody diferenciálního fázového posuvu:

S tímto přístrojem jsme neměli možnost měřit přímo na trasách v terénu, ale pouze v laboratoři. Naše měřicí souprava pokrývala spektrální oblast 1550 nm. Na přijímači bylo třeba zadat jen typ aproximace (dle typu vlákna) a délku měřeného vlákna pro určení koeficientu chromatické disperze. Bylo možné zvolit též počet měřicích spektrálních bodů (až 475 bodů) a nastavit spektrální vzdálenost mezi nimi (minimální vzdálenost mezi body byla až 0,2 nm). Výhodou tohoto přístroje byla tedy možnost měření na velmi vysokém počtu spektrálních bodů, které zpřesňují, ale zároveň i prodlužují měření, jelikož doba měření je na počtu zvolených spektrálních bodů závislá (měření každého bodu trvalo typicky 2 vteřiny). Tento přístroj také obsahoval větší výběr aproximačních charakteristik. Výsledkem měření byly pro jednotlivé vlnové délky:

změřené hodnoty skupinového zpoždění, výsledné hodnoty chromatické disperze získané přepočtem pomocí aproximace a střední chyba aproximace (použití metody nejmenších čtverců). Naměřené hodnoty chromatické disperze se velmi dobře shodovaly s vypočtenými hodnotami pro vlnovou délku 1550 nm z katalogových údajů měřeného vlákna.

Měření s přístrojem na bázi metody zpoždění impulsů v časové oblasti:

S tímto přístrojem jsme měli příležitost měřit přímo na optických trasách v terénu. Naše měřicí sestava umožňovala měřit v pásmu 1310 nm a 1550 nm. Nastavování přístroje bylo opět jednoduché, na přijímači bylo potřeba jen nastavit, v jakém pásmu vlnových délek budeme chtít výsledky vyhodnocovat, jaká bude použita aproximace naměřených hodnot a délka měřeného vlákna pro určení koeficientu chromatické disperze. Měřicí souprava využívala impulzy na sedmi blízkých vlnových délkách. Samotné měření pak probíhalo pouze několik sekund. Výsledné hodnoty měření měly obdobný charakter jako u předchozí metody (tj. pro měřené vlnové délky: změřené hodnoty skupinového zpoždění, pomocí aproximace získané hodnoty chromatické disperze a střední chyba aproximace).

Ukázka výsledku měření vlákna NZDF (G.655) touto metodou je na obrázku č. 10.

Ve spodní polovině jsou naměřené hodnoty skupinového zpoždění (DGD) a koeficientu chromatické disperze (pro všechny metody vypadají výsledky obdobně). V horní polovině jsou potom vidět jednotlivé impulsy a rozestupy mezi nimi.

Bylo měřeno několik desítek tras s vlákny dle G.652 a G.655. Naměřené výsledky chromatické disperze korespondovaly s předpoklady učiněnými na základě znalostí parametrů těchto vláken. Měření ukázalo, že velikost chromatické disperze vláken je prakticky nezávislá na mechanickém namáhání vzniklém při montáži trasy, též zvýšený útlum vlákna se na zvýšení chromatické disperze neprojevil. Měření ukázalo také dobrou shodu naměřených a teoreticky spočítaných hodnot z katalogových údajů pro vlnové délky 1310 nm a 1550 nm při měření na trasách obsahujících jeden typ vlákna.

Literatura

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

[2] Optical fiber telecommunications IIIA/[edited by] Kaminow, I. P., Koch, T. L., Chapter 7, Gnauck, A. H., Jopson R. M.: Dispersion compensation for optical fiber systems, ACADEMIC PRESS, 1997

[3] Saleh, B. E. A., Teich, M. C.: Základy fotoniky 4, MATFYZPRESS, Praha 1996

[4] David, I., Dubský, P.: Optický balancovaný kabel - Světová premiéra SPT TELECOM, a.s., TELEKOMUNIKACE č. 5, 6/1998

[5] firemní literatura firmy Corning

[6] Danziger, Y., Askegard D.: Full-band chromatic-dispersion management improves performance, LIGHTWAVE July 2000

[7] Bradford, Ch.: Managing chromatic dispersion increases bandwidth, WDM solutions (Laser Focus World), February 2001

[8] Norma ČSN EN 188000

[9] Norma ČSN EN 188101

[10] Norma ITU-T Recommendation G.650

[11] Derickson D.: Fiber Optic Test and Measurement, Prentice Hall PTR, 1998

[12] Standard Reference Material® 2524, Optical fibre chromatic dispersion standard, T.E. Gills, Gaihersburg 1997

[13]firemní literatura a katalogové listy firem Luciol Instruments, Perkin Elmer Optoelectronics, NetTest a EXFO Electro-Optical Engineering

Ing. Martin Hájek *martin.hajek@mikrokom.cz*

Ing. Petr Holomeček *petr.holomecek@mikrokom.cz*

MIKROKOM s.r.o.

Pod Vinicí 622

143 00 Praha 4

tel.: 417 60 100

fax.: 417 64 822

www.mikrokom.cz