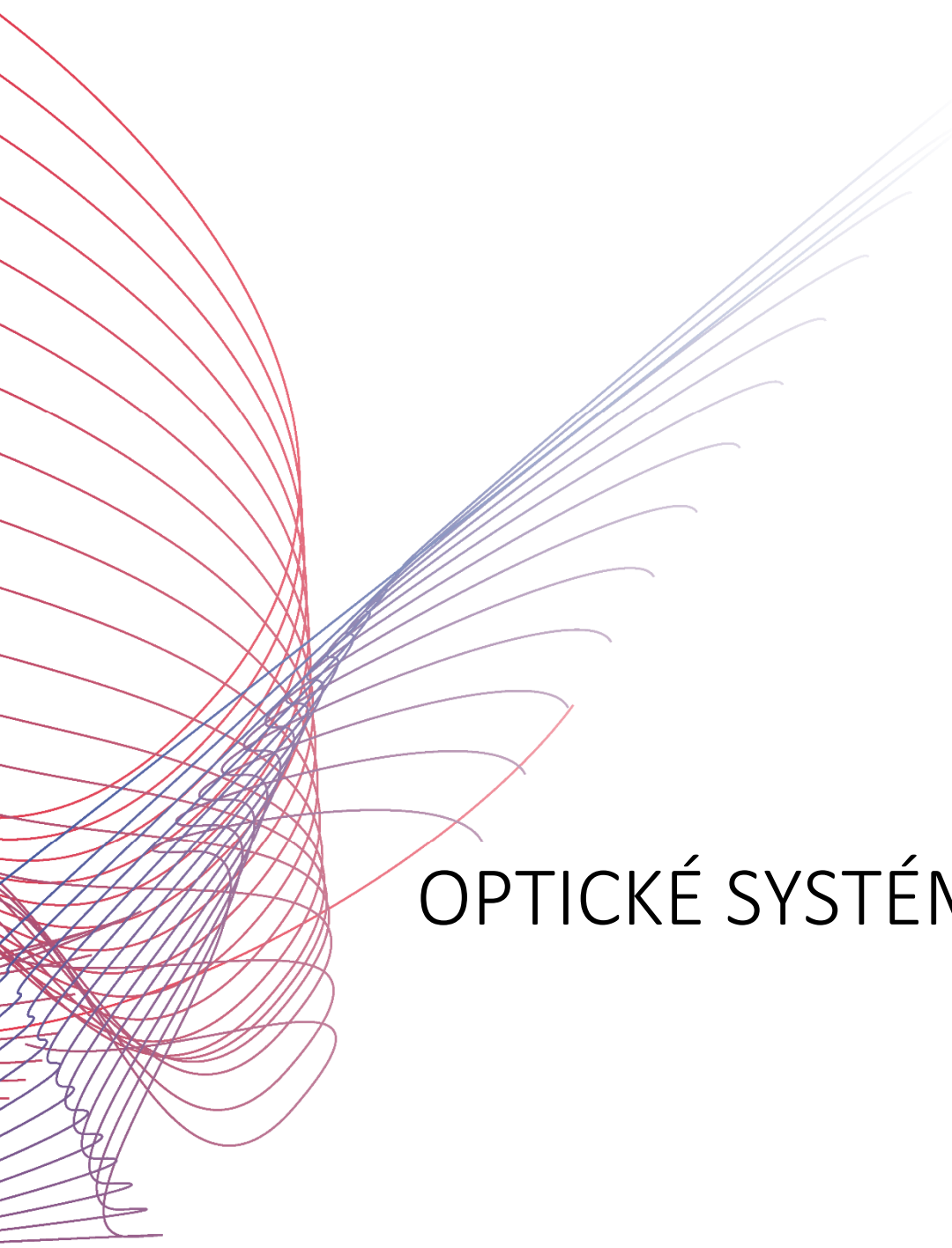




TECH
pedia



OPTICKÉ SYSTÉMY A SIETE

MICHAL LUCKI

Názov: Optické systémy a siete
Autor: Michal Lucki
Preložil: Ján Dúha
Vydalo: České vysoké učení technické v Praze
Fakulta elektrotechnická
Kontaktná adresa: Technická 2, Praha 6, Česká republika
Tel.: +420 224352084
Tlač: (iba elektronická)
Počet strán: 42
Edícia (vydanie): 1. vydanie, 2017
ISBN 978-80-01-06260-9

TechPedia

European Virtual Learning Platform for
Electrical and Information Engineering

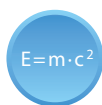
<http://www.techpedia.eu>



Tento projekt bol financovaný s podporou Európskej Komisie.

Táto publikácia (dokument) reprezentuje výlučne názor autora a Komisia nezodpovedá za akékoľvek použitie informácií obsiahnutých v tejto publikácii (dokumente).

VYSVETLIVKY



Definícia



Zaujímavosť



Poznámka



Príklad



Zhrnutie



Výhody



Nevýhody

ANOTÁCIA

Tento výučbový materiál popisuje optické siete – optické prístupové siete, technológie FTTx, aktívne a pasívne optické siete, optické systémy s vlnovým multiplexovaním - DWDM a CWDM. Uvádza základné parametre a pracovné režimy optických sietí, vrátane problematiky údržby siete (OTDR, zváranie) a obnovy signálu (EDFA, SOA, Ramanov zosilňovač, potlačenie disperzie).

CIELE

Študent sa naučí rozlišovať rôzne typy implementácie optických sietí a vyhodnocovať, či optická sieť spĺňa základné štandardné kritériá. Študent získa poznatky o plánovaní optických systémov, plne optickej obnove signálov a údržbe optických sietí.

LITERATÚRA

- [1] L. Bohac, M. Lucki, Optické komunikační systémy, skripta ČVUT, 2010, ISBN 978-80-01-04484-1.
- [2] G. Agrawal, Fiber Optic Communication Systems, Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, 2010. ProQuest ebrary. Web. 10 February 2015.
- [3] M. Sivalingam, Krishna and S. Subramaniam, Optical WDM Networks: Principles and Practice. Hingham, MA, USA: Kluwer Academic Publishers, 2000. ProQuest ebrary. Web. 10 February 2015.
- [4] B. Woodward, Bill, E. Husson, Fiber Optics Installer and Technician Guide. Alameda, CA, USA: Sybex, 2005. ProQuest ebrary. Web. 10 February 2015.
- [5] F. Lam, Cedric, Passive Optical Networks: Principles and Practice. Burlington, MA, USA: Academic Press, 2007. ProQuest ebrary. Web. 10 February 2015.
- [6] N. Dutta, Q. Wang, Semiconductor Optical Amplifiers. Singapore, SGP: World Scientific & Imperial College Press, 2006. ProQuest ebrary. Web. 10 February 2015.
- [7] I. Kaminov, T. Li, A. Willner, Optical Fiber Telecommunications VB, Systems and Networks, Elsevier, 2008, ISBN 978-0-12-374172-1.
- [8] M. Skop, M. Petrasek, J. Petrasek a P. Bocek, Synchronní digitální hierarchie SDH a WDM, ČTU, Prague, 2001. ISBN 80-01-02284-6.
- [9] M. Yasin, S. Harun, H. Arof, Recent Progress in Optical Fiber Research, Intech, Rijeka, 2012, ISBN 978-953-307-823-6.

- [10] R. Freeman, Fiber Optic Systems for Telecommunications, Wiley series in telecommunications and signal procesing, 2002, ISBN 0-471-41477-8.
- [11] M. John Senior, Optical Communications Principles and Practise. Prentice Hall, 1992, ISBN 0-13-635426-2.
- [12] Saeckinger, Eduard. Broadband Circuits for Optical Fiber Communication. Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, Incorporated, 2005. ProQuest ebrary. Web. 10 February 2015.

Obsah

1	Platné odporúčania ITU-T v oblasti optických prenosových systémov	7
1.1	Odporúčania ITU a IEEE pre siete PON.....	7
1.2	Odporúčania pre siete PON s predĺženým dosahom	9
2	Systémy s vlnovým multiplexovaním – raster CWDM a DWDM	10
2.1	Základný motív multiplexovania.....	10
2.2	Raster CWDM a DWDM	11
3	Druhy optických sietí, ich architektúra a základné parametre (OTH, FTTx)	12
3.1	Architektúra FTTx.....	12
3.2	Prístupové siete.....	13
3.3	Optická transportná hierarchia	15
4	Zváranie optických vlákien a inštalácia optických spojov	16
4.1	Cieľ.....	16
4.2	Postup	18
5	Testovanie optických trás reflektometrom OTDR.....	22
5.1	Reflektometer OTDR	22
6	Obnova signálu v optickej sieti použitím linkových zosilňovačov EDFA	25
6.1	Zosilňovač EDFA.....	25
7	Polovodičové optické zosilňovače (SOA) a Ramanov zosilňovač.....	28
7.1	Polovodičové optické zosilňovače	28
7.2	Ramanov zosilňovač.....	30
8	Kompenzátory disperzie pre optovláknové trasy.....	32
8.1	Disperzia v optických vláknach	32
8.2	Kompenzácia disperzie.....	35
8.3	Polarizačná vidová disperzia – PMD	38
9	Konvergencia a aktualizácia optických sietí.....	39
9.1	Konvergencia a aktualizácia optických sietí	39
10	Záver.....	42

1 Platné odporúčania ITU-T v oblasti optických prenosových systémov

1.1 Odporúčania ITU a IEEE pre siete PON



ITU (*International Telecommunication Union*) je Medzinárodná telekomunikačná únia, ktorá publikuje odporúčania pre pasívne optické siete **PON** (*Passive Optical Networks*), vrátane pasívnych optických sietí s predĺženým dosahom. Rozlišujeme celý rad variantov týchto systémov podľa triedy tlmenia siete, dosahu, použitých vlnových dĺžok a prenosových rýchlostí.



PON (*Passive Optical Network*) - pasívna optická sieť (jeden z hlavných druhov siete popisovaný v tomto výučbovom súbore) je viacbodová sieť, ktorá môže byť klasifikovaná podľa funkcionality prvkov na vyčleňovanie optických signálov. Sieť PON používa pasívne prvky (samozrejme okrem aktívnych laserov alebo iných zdrojov optického žiarenia), kde výkon postupne klesá so vzdialenosťou od zdroja optického signálu.

Základné odporúčania pre aktuálne siete PON – porovnanie odporúčaní IEEE a ITU-T.

Odporúčanie	10GEPON, IEEE 802.3av (2009)	EPON, IEEE 802.3ah (2004)	GPON, ITU-T G.984 (2003)	XG-PON, ITU-T G.987 (2010)
Varianty pre prenosovú rýchlosť	10G/10G symetrická alebo asymetrická	1G/1G symetrická	1.25G/1.25G symetrická, 2.5G/1.25G asymetrická, 2.5G/2.5G symetrická	10G/2.5G asymetrická
Prenosová rýchlosť na fyzickej vrstve	10,3125 Gbit/s, 1,25 Gbit/s	1,25 Gbit/s	1,24416 Gbit/s, 2,48832 Gbit/s	9,95328 Gbit/s, 2,48832 Gbit/s
Triedy tlmenia	PR10, PRX10, PR20, PRX20, PR30, PRX30	PX10, PX20	Trieda A, B, B+,C	Trieda Nominal 1, 2, Trieda Extended 1, 2
Vlnové dĺžky [nm]	Zostupný tok 1575-1580 Vzostupný tok 1260-1280 alebo 1260-1360	Zostupný tok 1480-1500 Vzostupný tok 1260-1360	Zostupný tok 1480-1500 Vzostupný tok pôvodne 1260-1360, teraz 1290-1330	Zostupný tok 1575-1580 Vzostupný tok 1260-1260
Fyzický dosah [km]	≤10, ≤20	≤10, ≤20	≤20	≤20 (v budúcnosti ≤40)
Maximálny deliaci pomer	1:16, 1:32 (v budúcnosti 1:64, 1:128)	1:16, 1:32	1:64 (autorizovaný 1:128)	1:256

1.2 Odporúčania pre siete PON s predĺženým dosahom

Pasívne optické siete v určitých prípadoch môžu používať optické zosilňovače na zvýšenie dosahu bez nutnosti výstavby rozsiahlej aktívnej infraštruktúry.

Odporúčania pre siete GPON s predĺženým dosahom, povolené zosilňovače

Trieda GPON	Optická distribučná sieť [dB]	Povolené tlmenie od poskytovateľa ku koncovému používateľovi [dB]	Maximálny fyzický dosah (fyzická vrstva) [km]
Trieda B+	13-28	13-28	40
Trieda C	15-30	15-30	40
Trieda C+	17-32	17-32	60

2 Systémy s vlnovým multiplexovaním – raster CWDM a DWDM

2.1 Základný motív multiplexovania

Základnou ideou pri zvyšovaní prenosovej rýchlosti a informačnej kapacity systému je využitie prenosu informácií viacerými kanálmi (na viacerých vlnových dĺžkach) súčasne. Siete väčšieho dosahu s prenosovou kapacitou desiatok Tbit/s pracujú na stovkách kanálov. Každý kanál je schopný prenášať desiatky Gbit/s.



i

DWDM (*Dense Wavelength Division Multiplexing*) - husté vlnové multiplexovanie, ktoré vyžaduje použitie úzkopásmových zdrojov optického žiarenia akými sú lasery DFB (*Distributed Feedback Lasers – Lasery s rozloženou spätnou väzbou*). Vyžarovaná vlnová dĺžka by mala byť stabilná (je všeobecne známe, že lasery sú teplotne laditeľné). Pre tieto účely sa odporúča použitie chladených laserov DFB, pracujúcich pri konštantnej teplote v rozmedzí 20 až 30°C.



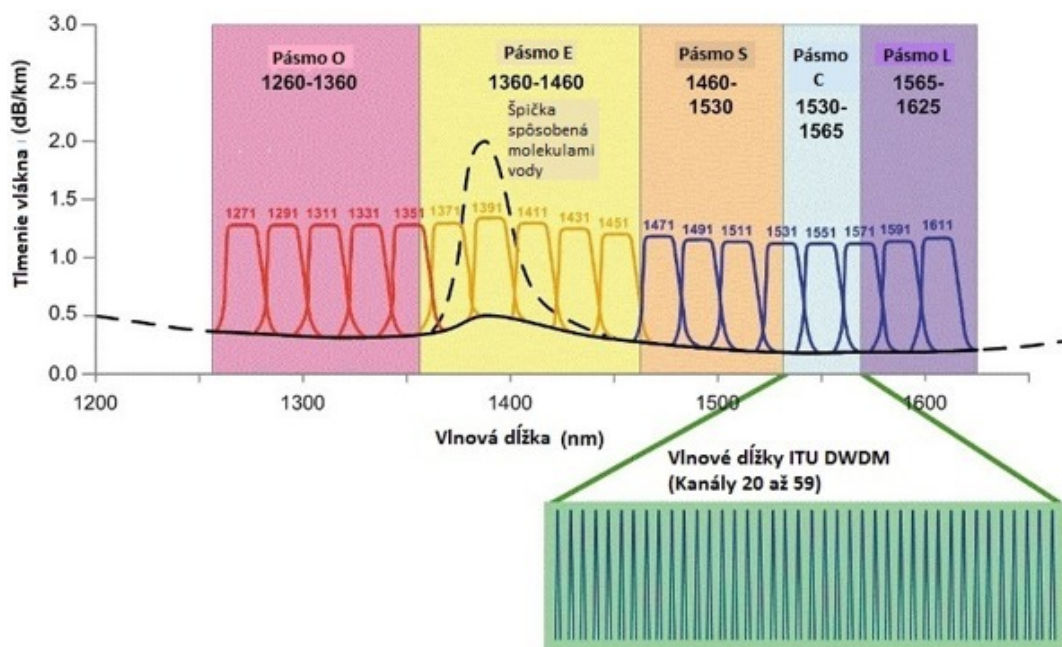
i

Metropolitné siete môžu pracovať s omnoho nižšou prenosovou rýchlosťou. Hrubé vlnové multiplexovanie **CWDM** (*Coarse Wavelength Division Multiplexing*) používa 4 až 16 kanálov s veľkým rozstupom 20 nm, ktorý umožňuje použitie laserov vyžarujúcich širšie spektrum vlnových dĺžok, napr. lasery Fabryho-Perota alebo nechladené lasery DFB. Takéto riešenie je finančne menej nákladné.

2.2 Raster CWDM a DWDM

Raster (rozstup kanálov) systémov CWDM a DWDM

Technológia	CWDM	DWDM – regionálne siete	DWDM – siete s dlhým dosahom
Počet kanálov (vlnových dĺžok)	4-16	32-80	80-160
Pásma	O, E, S, C, L	C, L	C, L, S
Rozstup kanálov	20 nm a viac (2500 GHz a viac)	0,8 nm, 100 GHz	0,4 nm a menej – 0,2 nm alebo 0,1 nm, (50 GHz alebo menej)
Prenosová kapacita na kanál	1,5 Gbit/s	10 Gbit/s	10-40 Gbit/s
Kapacita vlákna	20-40 Gbit/s	100-1000 Gbit/s	Desiatky Tbit/s
Druh lasera	Nechladené DFB alebo FP	Chladené DFB	Chladené DFB
Dosah	50-80 km	100 km	1000 km
Cena	Nízka	Vysoká	Najvyššia



Prevádzkové vlnové dĺžky CWDM a DWDM (vzorové)

3 Druhy optických sietí, ich architektúra a základné parametre (OTH, FTTx)

3.1 Architektúra FTTx

FTTx (*Fibre to the ...cabinet, curb, building, office, home – Vlákno do ... ústredne, skrinky, rozbočovača, budovy, úradu, domácnosti*) – prístupové siete založené na optických vláknach. Siete FTTO a FTTH predstavujú plne optické riešenie, kým FTTE_x, FTTC_{ab}, FTTC, FTTB sú hybridným riešením FTTx.

Hybridné riešenie

Všeobecné predpoklady:

Optické vlákna je možné kombinovať so symetrickými párami v prípade ADSL2+, VDSL2.

Optické vlákna je možné kombinovať s koaxiálnymi káblami v prípade káblovej televízie (**CATV**).

Signál z optickej siete je možné priviesť do bezdrôtovej siete.

- **FTTE_x** (*Fibre to the Exchange – Vlákno do ústredne*) – optické vlákna sú ukončené v lokálnej telefónnej ústredni, multiplexor DSLAM rozdelí signály do existujúcej metalickej infraštruktúry **xDSL** (*Digital Subscriber Line – Digitálne účastnícke vedenie*). FTTE_x je jedným z najbežnejších riešení, ale treba zdôrazniť, že sa nejedná o plne optické (perspektívne) riešenie.
- **FTTC_{ab}** (*Fibre to the Cabinet – Vlákno do rozbočovača*) – optické vlákna sú ukončené vo vonkajšom rozbočovači.
- **FTTC** (*Fibre to the Curb - Vlákno do skrinky*) – optické vlákna sú privedené ku skupine stavieb.
- **FTTB** (*Fibre to the Building – Vlákno do budovy*) – optické vlákna sú privedené k jednotlivým budovám, kde môžu byť ukončené vo vnútri budov napr. v telefónnych skrinkách alebo sa signál môže šíriť ďalej pomocou bezdrôtového pripojenia.

Plne optické riešenia

- **FTTO** (*Fibre to the Office – Vlákno do úradu*) – optické vlákna sú ukončené v kancelárii dôležitého zákazníka s požiadavkami na veľkú prenosovú kapacitu.
- **FTTH** (*Fibre to the Home – Vlákno do domu*) – optické vlákna sú ukončené v používateľskej zásuvke.

3.2 Prístupové siete

OAN (*Optical Access Networks*) sú optické prístupové siete:

- Simplexný prenos s priestorovým delením **SDM** (*Space Division Multiplexing*), pre každý smer prenosu sa používa jedno vlákno.
- Duplexný prenos s vlnovým delením **WDM** (*Wavelength Division Multiplexing*), signály sa prenášajú po jednom vlákne. Jeden smer prenosu je v oblasti okolo vlnovej dĺžky 1310 nm, opačný smer prenosu je v oblasti vlnovej dĺžky 1550 nm.
- Duplexný prenos s frekvenčným delením **FDM** (*Frequency Division Multiplexing*), signály sa prenášajú po jednom vlákne. Obidva smery prenosu sú lokalizované okolo jednej vlnovej dĺžky a sú od seba frekvenčne oddelené.
 - Krátky dosah (Short Haul)– max. tlmenie 16,5 dB CWDM, min. tlmenie 5 dB, dosah 30 – 50 km pre P2P.
 - Dlhý dosah (Long Haul)– max. tlmenie 25,5 dB CWDM, min. tlmenie 14 dB, dosah 50 – 80 km pre P2P.
 - Typický rozsah tlmenia siete CWDM je 3,5 až 7,5 dB. Zosilňovač EDFA môže predĺžiť dosah siete.

Aktívne optické siete

AON (*Active Optical Networks*) sú aktívne optické siete. Aktívna optická sieť umožňuje použitie aktívnych sieťových prvkov akými sú napr. zosilňovače.



Existujú pasívne optické siete s predĺženým dosahom **REPON** (*Reach Extended PON*), v ktorých je možné použiť zosilňovač EDFA (*Erbium Doped Fibre Amplifier* – Zosilňovač s erbiom dopovaným vláknom). Napriek tomu sa takáto sieť označuje ako „pasívna“.

Pasívne optické siete



PON - *Passive Optical Networks*: viacbodové siete, ktoré môžeme roztriediť podľa funkcionality prvkov vyčleňujúcich optické signály. Môžu to byť rozbočovače (splitter) alebo **AWG** (*Arrayed Waveguide Gratings*) – usporiadané vlnovodové mriežky. U systémov WDM je možné optické signály rozdeliť pomocou takzvaných add-drop multiplexorov.

- **BPON** (*Broadband PON Širokopásmová PON*) – pridaná rýchlosť 622,04 Mbit/s. Používajú sa dve vlákna pre obidva smery prenosu alebo jedno vlákno, v ktorom je vzostupný tok lokalizovaný v pásme WDM: 1260 - 1360 nm a zostupný tok v pásme 1480 - 1500 nm. Pásmo 1539 - 1565 nm je určené pre

16 + 16 kanálov DWDM s rozstupom 0,8 nm, pásmo 1550 - 1560 nm je určené na videoprenos.

- **GPON** (*Gigabit PON*) – odporúčanie ITU-T G.984 – nominálna prenosová rýchlosť 1,244 a 2,488 Gbit/s (max. 128 pripojených koncových používateľov).
- **EPON** (*Ethernet PON*). Optické pripojenie typu: P2MP (bod - viac bodov). Prenosová rýchlosť 1,25 Gbit/s je v súlade so štandardom 1000BASE-PX. Pre vzostupný tok sa používa vlnová dĺžka 1310 nm, pre zostupný tok sa používa vlnová dĺžka 1490 nm. Typ 1 – max. dosah siete je 10 km. Typ 2 – max. dosah 20 km.

3.3 Optická transportná hierarchia



OTH – *Optical Transport Hierarchy* - optická transportná hierarchia. Signály optickej hierarchie sú v literatúre označované ako **OTM** (*Optical Transport Module*) – optické transportné moduly. Najjednoduchší variant (takzvaný nultý stupeň) predpokladá prenos bez vlnového multiplexovania. Optický transportný modul sa označuje ako OTM-n.m, kde n je počet kanálov (vlnových dĺžok) a m vyjadruje typ signálu. Rôzne základné prenosové rýchlosti je možné násobiť. Potenciálne kombinácie môžu zahŕňať OTM-n.1 2 3 (teda 2,5; 10; 40 Gbit/s).

Optická transportná hierarchia OTH – transportné moduly bez vlnového multiplexovania

Stupeň hierarchie	Prenosová rýchlosť [Mbit/s]	Je možné prenášať STM-N
OTM-0.1	2488,32	STM-16
OTM-0.2	9953,28	STM-64
OTM-0.3	39813,12	STM-256



STM (*Synchronous Transport Module*) je synchronný transportný modul, základná prenosová jednotka v hierarchii **SDH** (*Synchronous Digital Hierarchy*) – synchronnej digitálnej hierarchii, kde n znamená násobok základnej jednotky prenosovej kapacity.

Optické transportné moduly s vlnovým multiplexovaním

Stupeň hierarchie	Prenosová rýchlosť [Mbit/s]	Možné je prenášať
OTM-n.1	n x 2488,32	n x STM-16
OTM-n.2	n x 9953,28	n x STM-64
OTM-n.3	n x 39813,12	n x STM-256

4 Zváranie optických vlákien a inštalácia optických spojov

4.1 Cieľ

Cieľom zvárania optických vlákien je trvalé spojenie dvoch samostatných úsekov vlákien.



Použitie optických konektorov predstavuje flexibilnejšie riešenie, optické zvary však v porovnaní s ním umožňujú dosiahnutie nižších strát. Zváranie sa javí ako vhodnejšie v prípadoch, keď sa nepredpokladá, že vlákna budú v budúcnosti rozpojované. Zváranie nachádza uplatnenie pri opravách vlákien, keď je potrebné vymeniť úsek poškodeného vlákna.

Prípadné opravy vlákien sú dôvodom na ponechanie určitej rezervy vlákna pri výstavbe siete. Rezervu je možné použiť ako náhradu v prípade krátkeho úseku poškodeného vlákna a navyše pri príprave zvárania sa zakaždým optické vlákno skrakuje.



Optická zvaračka – typ Fujikura 18s.



Vybavenie na zváranie optických vlákien:

- Optické vlákna na zvarenie.
 - Špeciálne kliešte na odstránenie vonkajšej ochrany vlákna.
 - Zalamovačka na rez vlákna tak, aby konce boli hladké.
 - Zváračka umožňujúca nastavenie koncov vlákien a ich zvarenie.
 - Izopropylalkohol na odstránenie zvyškov tmelu na vláknach a tkanina na odstránenie prebytku alkoholu.
-

4.2 Postup

- Zvárať je možné dve vlákna o dĺžke približne aspoň 100 mm.
- Pomocou špeciálnych klieští treba odstrániť na oboch koncoch primárnu a sekundárnu ochranu vlákna v dĺžke približne 50 mm. Ponecháme neporušený len plášť a jadro.
 - Tkaninou s izopropylalkoholom odstránime zvyšky tmelu.
- Takto pripravené vlákna treba zalomiť špeciálnou zalamovačkou. Cieľom je dosiahnuť plochý a kolmý rez vlákna.
- Vlákna sa umiestnia do špeciálnej drážky v zalamovačke. Koniec vlákna by mal dosahovať koniec drážky tak, aby napnuté vlákno bolo zalomené. V opačnom prípade sa vlákno len ohne.
- Vlákno sa aretuje špeciálnou klapkou.
 - Na uskutočnenie rezu treba odblokovať mechanizmus v spodnej časti zalamovačky. Zalamovací hrot udrie do vlákna a urobí rez. Nie je správne používať veľkú silu. Kvalitný rez je otázkou napnutia vlákna a presného umiestnenia vlákna do drážky.

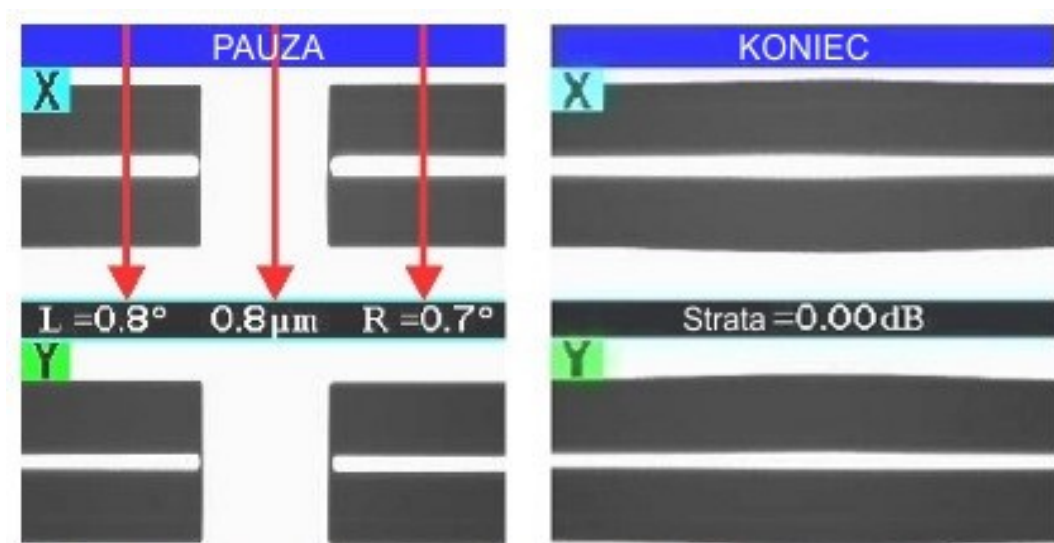


Zalamovačka s vláknom pripraveným na zalomenie.

- Po uskutočnení rezu nasleduje zvarenie vlákien.
- Konce obidvoch vlákien sa umiestnia do špeciálnych drážok zväračky.
 - Pozn.: Ochranné vrstvy vlákna nesmú presahovať aretovacie klapky, respektíve vyznačené políčka drážky. V opačnom prípade bude nastavenie polohy vlákien zaťažené chybou nastavenia uhla, ktorá vedie k nekvalitnému zvaru. Konce vlákien by mali byť čo najbližšie pri zväracích elektródach, nesmú však presahovať priamku prechádzajúcu ich stredom. Keď je poloha vlákien správne nastavená, treba zatvoriť aretovacie klapky a kryt zväračky.
- Zväračka sa zapína stlačením tlačidla 'Set' – zväračka automaticky upraví polohu vlákien, nastaví osi vlákien a vzdialenosť čelných plôch.



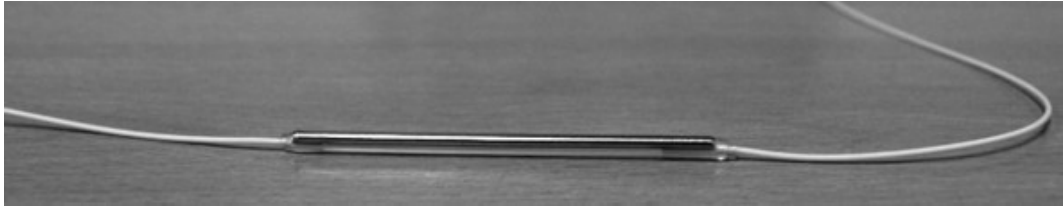
Zváračka s optickými vláknami umiestnenými čo najbližšie ku zvaracím elektródam v strede, pridržiavanými pomocou odpružených svoriek.



Automatické nastavenie vlákien zváračkou a zvarené vlákna.



V prípade, že nastavenie polohy vlákien alebo rezy vlákien nie sú správne, zváračka zobrazí na displeji varovanie a vlákna môžu byť odstránené alebo sa znova upraví ich poloha, prípadne sa znova zalomia. V prípade, že nastavenie vlákien je dostatočne dobré, je možné urobiť zvar opätovným stlačením tlačidla 'Set'. Na elektródy je privedené napätie, ktoré zvarí optické vlákna.



Vzhľad optického zvaru s navlečenou ochrannou vrstvou.

5 Testovanie optických trás reflektometrom OTDR

5.1 Reflektometer OTDR

Optický reflektometer **OTDR** (*Optical Time-Domain Reflectometer*) je meracie zariadenie, ktoré sa používa na testovanie optických komunikačných systémov. Pomocou záznamu intenzity spätne odrazeného Rayleighovho rozptylu zdroja žiarenia (obyčajne impulzový laser) v časovej oblasti umožňuje približne určiť vzdialenosť, kde bolo žiarenie odrazené za predpokladu známej hodnoty indexu lomu materiálu, z ktorého je vlákno vyrobené.



Keď je známa miera spätne odrazeného svetla, je možné určiť tmenie v rôznych vzdialenostiach od začiatku vlákna. Napríklad tmenie zvarov a optických konektorov. Lokalizácia miest, kde sa nachádzajú potenciálne zdroje zvýšeného tmenia v komunikačnom systéme je hlavným dôvodom, prečo sa reflektometer používa.



Reflektometer OTDR (Optical Time Domain Reflectometer).



Na uskutočnenie meraní je potrebné pripojiť jeden koniec meraného vlákna k reflektometru. Meranie je možné do vzdialenosti desiatok kilometrov a reflektometer je tak schopný zaznamenať veľké množstvo konektorov a zvarov po celej trase.

- Reflektometer OTDR je možné konfigurovať na impulzy so strednou vlnovou dĺžkou buď 1550 nm alebo 1310 nm, trvanie impulzov je možné voliť v rozsahu 10 ns až 10 μ s.
- Dosah a rozlišovacia schopnosť merania je vždy kompromisom, ktorý je daný voľbou trvania testovacích impulzov.
- Kratšie impulzy umožňujú lepšie rozlíšenie merania, ale meranie je možné len na kratších vzdialenostiach.
- Pre danú trasu existuje optimálne trvanie impulzu, je potrebné hľadať najlepšie možné rozlíšenie pri danej vzdialenosti.
- Existujú vlákna (a konektory), pre ktoré sa nedá dosiahnuť adekvátne kvalita merania.



-
- Jednoduché riešenie pri tomto probléme je pripojiť reflektometer k opačnému koncu trasy, aby sa dosiahlo správne zobrazenie výsledkov vo väčších vzdialenostiach od začiatku trasy.
-

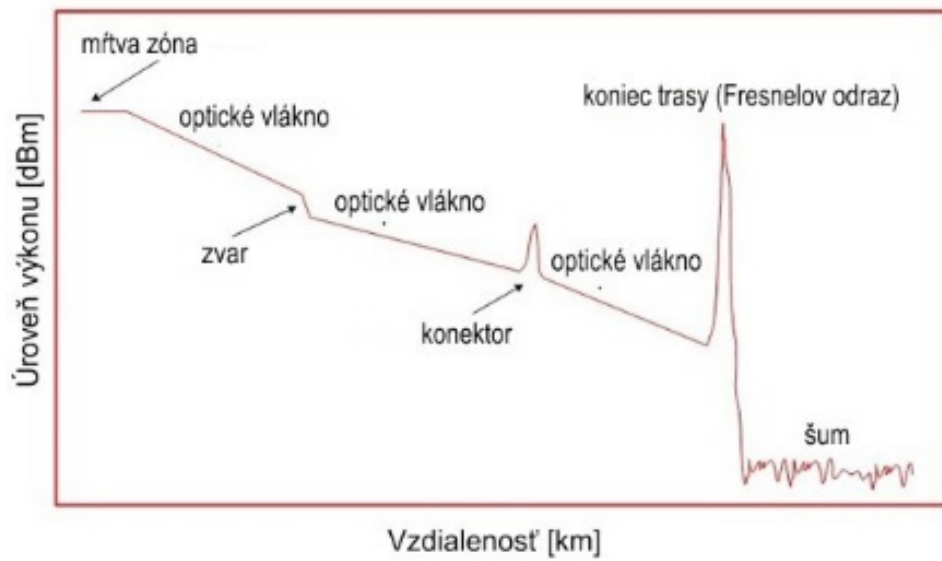
Interpretácia nameraných dát

Výsledky namerané reflektometrom sú zobrazené na nasledujúcom obrázku.

- OTDR identifikuje jednotlivé sieťové prvky, konektory a zvary, ktoré sa odlišujú charakterom tlmenia.
- Krátky a ostrý pokles výkonu indikuje optický zvar.
- Výkonová špička zodpovedá konektoru, na pravej strane špičky vidieť značný pokles výkonu.

Dôvodom je lepšie naviazanie žiarenia v prípade zvarov. Lokálne maximum intenzity žiarenia v prípade konektorov je následkom zvýšeného spätného odrazu od čela konektora.

Výkonová špička je v skutočnosti istou nepresnosťou merania. Pramení z predpokladu, že miera spätných strát je úmerná tlmeniu. V skutočnosti tlenie konektora nie je vzťahované k výške tejto výkonovej špičky (spôsobenej odrazom a nie Rayleighovým rozptylom) ale k poklesu výkonu, ktorý sa počíta od miesta tesne pred špičkou (úroveň výkonu vstupujúceho do konektora) až k miestu, kde prudký pokles výkonu končí (úroveň výkonu vstupujúceho do ďalšieho vlákna).



Priebeh tlmenia nameraný reflektometrom OTDR.



Konektory a zvary zobrazené na OTDR.

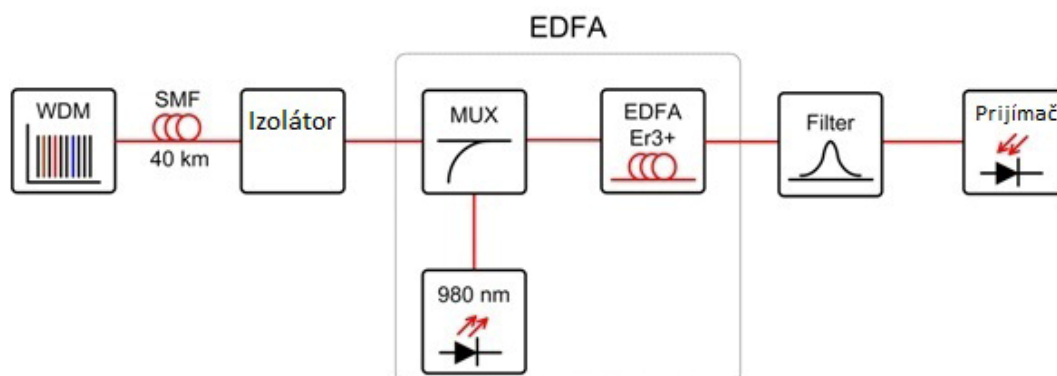
6 Obnova signálu v optickej sieti použitím linkových zosilňovačov EDFA

6.1 Zosilňovač EDFA

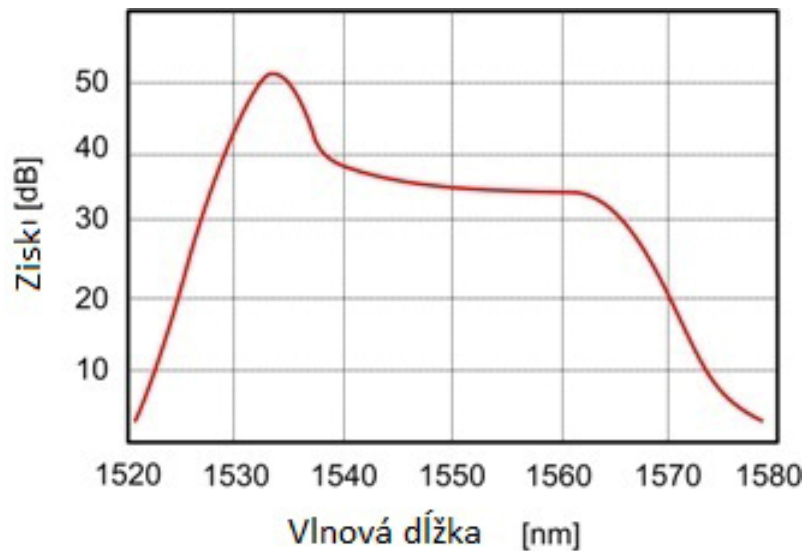
Dotované vlákna sa často používajú ako optické zosilňovače v optických sieťach. Najčastejšie používanou dotovacou prímiesou je erbium. Z toho vyplýva, že zosilňovač s erbiom dotovaným vláknom **EDFA** (*Erbium Doped Fibre Amplifier*) je najbežnejším zo zosilňovačov tohto typu. Zosilňovač EDFA využíva čerpanie v podobe laserovej diódy pracujúcej na vlnovej dĺžke 980 nm, ktorá sa multiplexuje so signálom, ktorý prenáša informáciu v optickom vlákne. Optické čerpanie excituje ióny prímiesy pozdĺž dotovaného vlákna.

$$E = m \cdot c^2$$

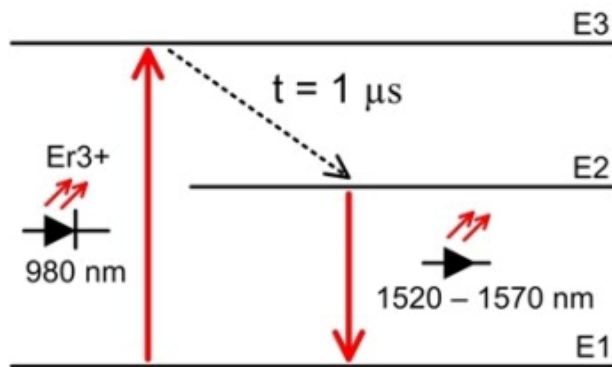
Excitované ióny erbia veľmi rýchlo prechádzajú na nižšiu energetickú hladinu. Tento prechod je nežiarivý. Ďalej potom nasleduje pomalšia relaxácia na základnú energetickú hladinu s vyžiarovaním kvanta optického žiarenia. Relatívne časy týchto prechodov sú kľúčové na dosiahnutie populačnej inverzie (väčšina iónov sa v stave populačnej inverzie nachádza v excitovanom stave), ktorá je podmienkou na prevahu stimulovanej emisie žiarenia nad spontánnou emisiou. V praxi to znamená veľký odstup signálu od šumu a väčšiu schopnosť efektívneho zosilňovania.



EDFA pracujúci ako linkový zosilňovač.



Rozsah pracovných vlnových dĺžok a zisk EDFA.



Pásmový (energetický) model EDFA.

Na experiment „Zosilňovanie zosilňovačom EDFA“ sú potrebné nasledujúce prvky a zariadenia: DFB (*distributed feedback – rozložená spätná väzba*) laser na generovanie signálu na 1550 nm, pracujúci na vlnovej dĺžke 980 nm, multiplexor, EDFA a spektrálny analyzátor. Výstupné signály z DFB lasera a čerpaceho modulu sa združia pomocou multiplexora a prenášajú sa erbiom dopovaným vláknom EDFA.

Výhody



- Široké prevádzkové pásmo (pásmo C+L – 1530 nm až 1680 nm).
- Veľký zisk 20 až 50 dB (trendom je nastavenie pracovného bodu zosilňovača tak, že zisk nepresiahne hodnotu 20 dB z dôvodu, aby nedochádzalo k nelineárnym javom. Tie vznikajú pri veľkom optickom výkone. Jedným z nich je štvorvlnové zmiešavanie **FWM** (*Four Wave Mixing*), ktoré postihuje optické siete pracujúce na vysokých rýchlostiach).
- Konštrukcia – vlákno a optické čerpanie.

- Pomerne plochá charakteristika zisku, vhodná pre transparentné optické siete **WDM**. (*Wavelength Division Multiplexing*).
 - Nízka cena.
 - Aplikácia ako linkový zosilňovač.
-

Nevýhody

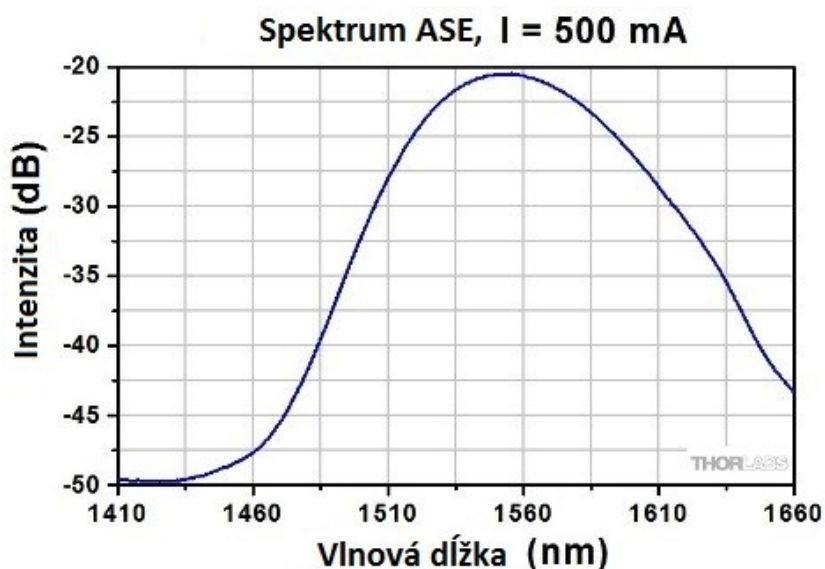


- Značný šum **ASE** (*Amplified Spontaneous Emission*) – zosilnená spontánna emisia.
 - Nedá sa použiť ako výkonový zosilňovač (na začiatku trasy, kde sú pomerne veľké vstupné výkony) pre neschopnosť spracovať veľký vstupný výkon (saturácia zisku).
 - Nedá sa použiť ako predzosilňovač (pred obvodmi detekcie) z dôvodu značného šumu, ktorý generuje (vyžaduje použitie špeciálnych filtrov).
-

7 Polovodičové optické zosilňovače (SOA) a Ramanov zosilňovač

7.1 Polovodičové optické zosilňovače

Polovodičový optický zosilňovač **SOA** (*semiconductor optical amplifier*) využíva polovodičový materiál ako ziskové médium, ktoré vyžaduje elektrické čerpanie. Zosilňovač SOA je možné prirovnať k laserovým diódam s rezonátorom, ktorého čelné steny sú na rozdiel od laserov pokryté antireflexnou vrstvou. Signál je zosilnený stimulovanou emisiou v elektricky excitovanej aktívnej vrstve.

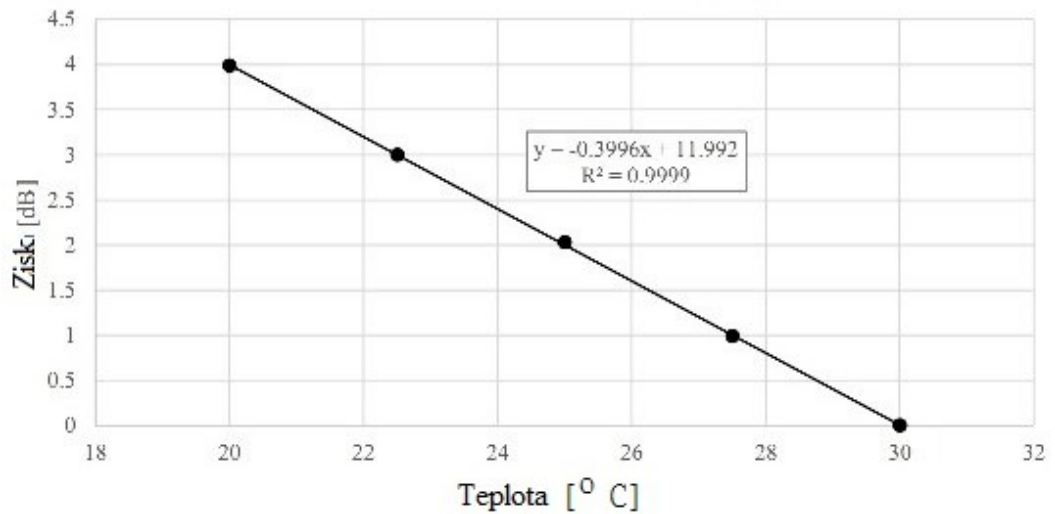


Spektrálna charakteristika zosilňovača SOA.



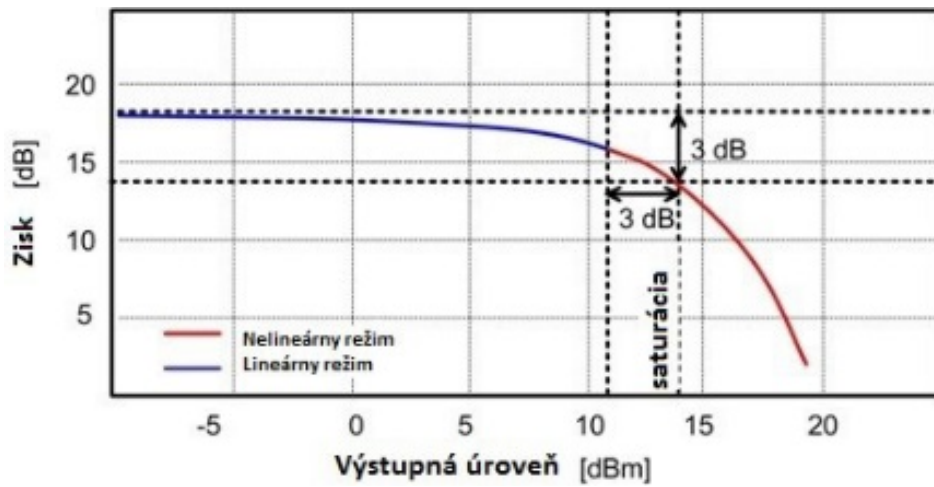
Teplota čipu SOA má silný lineárny vplyv na zisk média. Za účelom stabilizácie zisku je potrebné zaistiť konštantnú teplotu. Pri nižších teplotách je možné dosiahnuť aj maximálny zisk.

Závislosť zisku SOA od teploty



Teplotná závislosť zisku zosilňovača SOA.

Rozlišujeme dva režimy činnosti zosilňovača SOA: lineárny a nelineárny. Vymedzenie týchto režimov činnosti je dôležité z hľadiska aplikácie – vo väčšine prípadov je činnosť v nelineárnom režime neoptimálna.



Lineárny a nelineárny režim činnosti SOA.

7.2 Ramanov zosilňovač

Ramanovo zosilnenie je výsledkom stimulovaného Ramanovho rozptylu **SRS** (*Stimulated Raman Scattering*).

$$E = m \cdot c^2$$

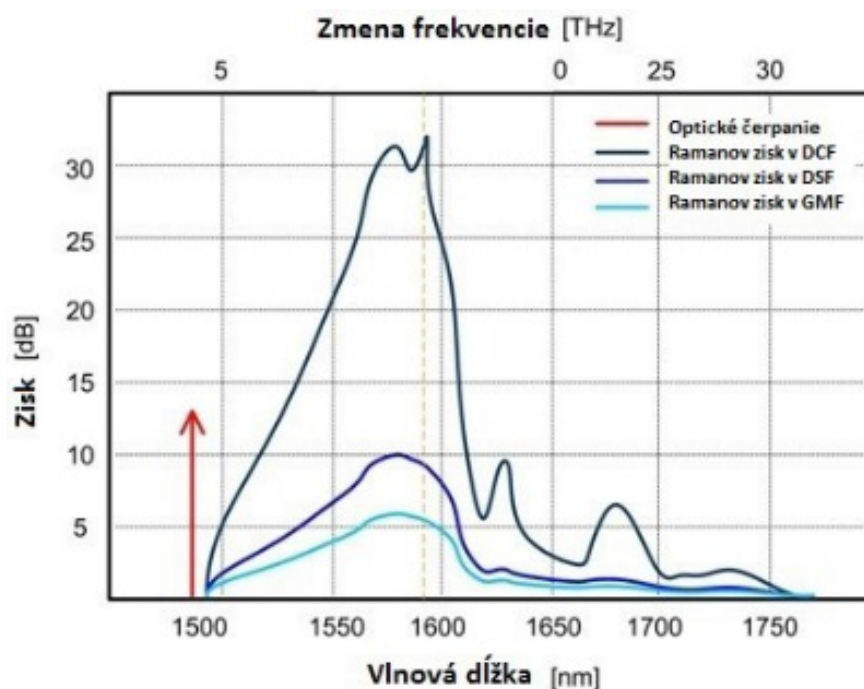
Fotón s väčšou vlnovou dĺžkou spôsobuje neelastický rozptyl čerpaceho fotónu s kratšou vlnovou dĺžkou (materská vlnová dĺžka) v optickom vlákne. Výsledkom je vznik nového fotónu na vlnovej dĺžke posunutej približne o 100 nm (toto tvrdenie platí pre väčšinu štandardných telekomunikačných vlákien).

Tento jav sa úspešne používa pri realizácii optického zosilňovača. Ak sa Ramanovo čerpanie umiestni lokálne, takýto zosilňovač pracuje ako takzvaný:

- **sústredený Ramanov zosilňovač LRA** (*Lumped Raman Amplifier*) – čerpanie na rovnakom mieste.

Nakoľko jav SRS narastá s dĺžkou vlákna, v niektorých aplikáciách je omnoho vhodnejšie umiestniť čerpanie na protiľahlom konci trasy:

- **distribuívaný Ramanov zosilňovač DRA** (*Distributed Raman Amplifier*) – čerpanie na vzdialenom konci.



Ramanov zisk v rôznych typoch optických vlákien: jednovidové vlákno SMF (Single Mode Fibre), vlákno s posunutou disperziou DSF (Dispersion Shifted Fibre) a disperziu kompenzujúce vlákno DCF (Dispersion Compensating Fibre).



Komerčne dostupné EDFA, SOA a Ramanove zosilňovače.



Ramanov jav, ktorý sa využíva pri realizácii optického zosilňovača, nie je vždy žiaduci. V systémoch DWDM zapríčiňuje SRS vznik presluchovej medzi prenosovými kanálmi. Nekontrolovaný Ramanov preslech je všeobecne nežiaduci nelineárny optický jav, spôsobujúci v sieťach krátkodobé poruchy vo vlákne. Je to efekt neelastického rozptylu fotónu (to znamená zmeny energie fotónu). Prakticky to môže znamenať presluchy medzi kanálmi a migráciu výkonu kanála z kratších na dlhšie vlnové dĺžky alebo z vyšších frekvencií na nižšie.

8 Kompenzátory disperzie pre optovláknové trasy

8.1 Disperzia v optických vláknach



Disperzia spôsobuje rozšírenie optických impulzov (alebo kompresiu optických impulzov v prípade záporného koeficienta disperzie) v časovej oblasti. Môže spôsobiť medzysymbolovú interferenciu. Uvažujme, že dva susedné impulzy prenášajú logickú jednotku a medzera medzi nimi vyjadruje logickú nulu. V prípade, keď sa susedné logické jednotky začnú čiastočne prekrývať, dekódovač nebude schopný prijať logický symbol "0", ktorý bol prenášaný medzi nimi.



Jednotkou disperzie je [ps/nm] (pikosekunda na nanometer), ale vo vláknovej optike, kde je dĺžka vlákna kľúčovým parametrom, je disperzia vzťahnutá k jednotke dĺžky [ps/nm/km]. Disperzia, ktorá sa rovná 1 ps/nm/km znamená, že vo vzdialenosti 1 km od referenčného bodu (alebo od začiatku trasy) bude namerané oneskorenie 1 ps medzi najnižšou a najvyššou frekvenčnou zložkou optického impulzu, ktorého šírka je 1nm.

Chromatická disperzia

Chromatická disperzia sa skladá z dvoch zložiek: materiálovej disperzie a vlnovodovej disperzie.

Materiálová disperzia (DMat) vzniká z dôvodu nenulovej šírky pásma žiarenia laserového zdroja. Vyžarované spektrum vlnových dĺžok nie je nekonečne úzke. V praxi neexistuje „ideálne monochromatické“ svetlo, ktoré by obsahovalo jednu, „nekonečne úzku frekvenciu“. Laserové žiarenie vždy obsahuje určité, konečné množstvo frekvencií. Každú frekvenciu je možné charakterizovať určitou fázovou konštantou šírenia – môžeme uvažovať rôzne hodnoty indexu lomu pre rôzne „farby“. Každá frekvencia (presnejšie informácia na danej frekvencii) sa šíri inou fázovou rýchlosťou a na koniec vlákna dorazia v inom časovom okamihu.

- Materiálová disperzia je vlastnosťou jednovidových aj mnohovidových vlákien.
- Materiálová disperzia môže mať kladné aj záporné hodnoty.

Vlnovodová disperzia WD (waveguide dispersion) je spôsobená zmenou rozloženia poľa optického vidu na určitej vzdialenosti. Táto zmena je spôsobená zmenami geometrie vlákna, ktoré ovplyvňujú skupinovú rýchlosť šírenia elektromagnetickej vlny ako funkcie vlnovej dĺžky (takzvaná zmena „obálky“ impulzu). Vlnovodová disperzia je výhodný nástroj na dosiahnutie optimálnej disperzie vlákna. Optimalizáciu disperzie je možné realizovať vhodným návrhom geometrie vlákna, ktorá ovplyvňuje vlnovodovú disperziu a teda ovplyvňuje celkovú disperziu vlákna.

- Vlnovodová disperzia je vždy záporná a preto sa môže použiť na potlačenie kladnej materiálovej disperzie vhodnou voľbou usporiadania geometrie vlákna, od ktorej vlnovodová disperzia závisí.



Riešenie: použitie vlákna kompenzujúceho disperziu **DCF** (*Dispersion Compensating Fibres*) alebo špeciálnych optovláknových mriežok.

Vidová disperzia

V prípade vidovej disperzie **MD** (*modal dispersion*) sa každý vid optického žiarenia šíri inou trajektóriou. Najkratšia dráha je pozdĺž osi symetrie vlákna. Najdlhšia optická dráha sa týka vidu, ktorý zaznamenáva veľké množstvo odrazov na rozhraní jadra a plášťa vlákna. S narastajúcim uhlom naviazania žiarenia do vlákna (väčšia numerická apertúra NA) rastie počet odrazov behom šírenia sa vidu a optická dráha je dlhšia. Jednotlivé lúče (vidy) dorazia na koniec vlákna v rozličných časových okamihoch. Nakoľko sú detekované ako superpozícia, výsledkom je rozšírený prúdový impulz na výstupe fotodetektora.

- Vidová disperzia je merateľná len u mnohovidových vlákien. U jednovidových vlákien sa šíri len jeden vid, ak sa vlákno používa na vlnových dĺžkach pre ktoré je určené. Vidová disperzia predstavuje hodnoty až niekoľko ns/nm/km.



Vidová disperzia NIE JE spôsobená rôznou rýchlosťou jednotlivých zložiek (lúčov, vidov) – analyticky sa predpokladá, že všetky zložky sa šíria rovnakou fázovou a skupinovú rýchlosťou (odlišná rýchlosť sa predpokladá v prípade chromatickej disperzie). Vidová disperzia preto nie je funkciou vlnovej dĺžky.

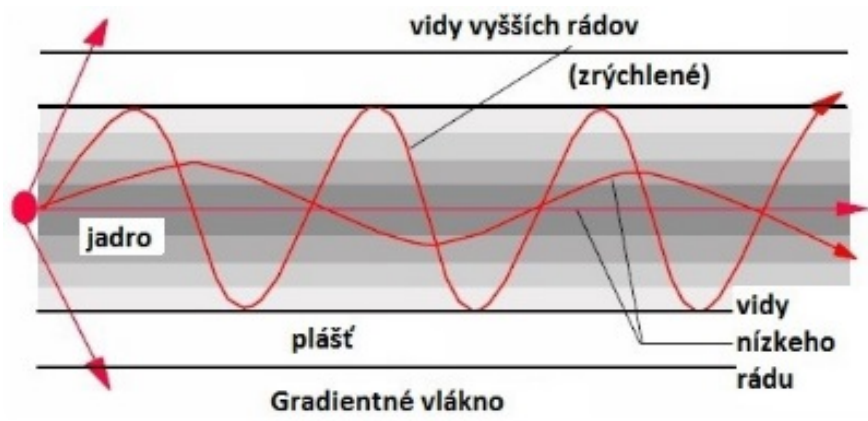
Mnohovidové vlákna s gradientnou zmenou indexu lomu



Riešene: spomaliť vidy šíriace sa najkratšou optickou dráhou, zrýchliť vidy šíriace sa najdlhšou optickou dráhou.



U mnohovidových vlákien s gradientnou zmenou indexu lomu **MM-GI** (*Multi-mode Graded Index*) index lomu jadra nie je konštantný. Postupne klesá so vzdialenosťou od stredu jadra. Opticky najhustejší materiál sa nachádza v strede jadra vlákna, vrstvy okolo neho predstavujú čím ďalej nižšiu hustotu. Čím väčšia je vzdialenosť od stredu jadra, tým je hodnota indexu lomu nižšia. Nastáva refrakcia na styku vrstiev a odraz žiarenia na rozhraní plášťa a vonkajšej vrstvy jadra. Vid, ktorý sa šíri pozdĺž osi symetrie vlákna prechádza najkratšou optickou dráhou, ale jeho rýchlosť je najnižšia z dôvodu vysokého indexu lomu v strede jadra. Naopak vidy, ktoré sa šíria dlhšími dráhami sa postupne dostávajú do „rýchlejšieho“ materiálu s menším indexom lomu.

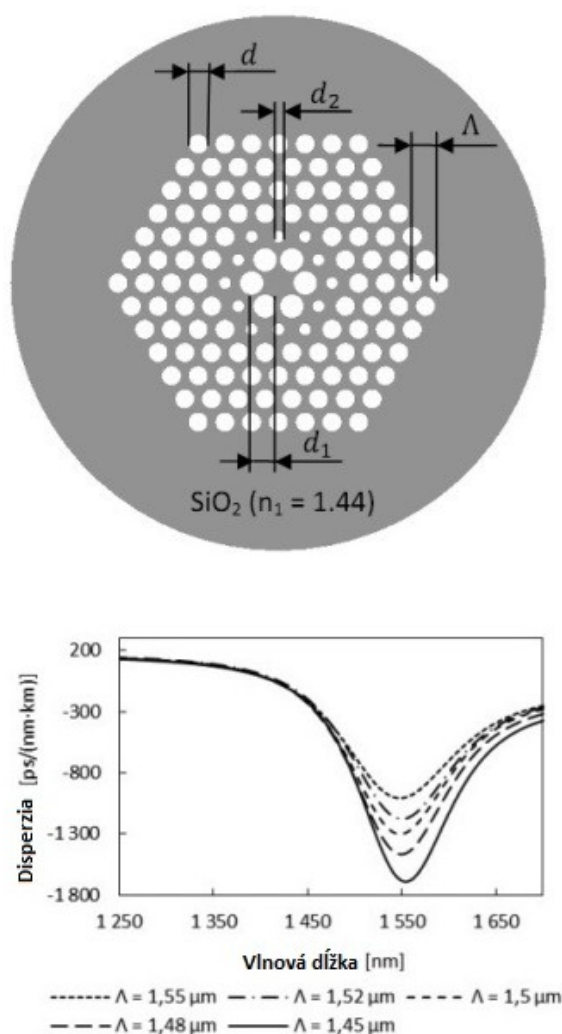


Vidová disperzia u mnohovidových vlákien s gradientnou zmenou indexu lomu.

8.2 Kompenzácia disperzie

Vlákna kompenzujúce disperziu

Vlákna kompenzujúce disperziu DCF (*Dispersion Compensating Fibres*) sa vyznačujú malou zápornou hodnotou koeficienta disperzie ~ -100 ps/nm/km až ~ -10000 ps/nm/km (existuje mnoho vedeckých prác, ktoré uvádzajú ešte väčší rozsah teoretických hodnôt). Vlákna DCF sú schopné kompenzovať kumulujúcu sa disperziu. Vlákna DCF sa líšia od štandardných konvenčných vlákien SMF geometriou a materiálovým zložením. Najpokročilejšie návrhy vlákien DCF vychádzajú z fotonických mikroštruktúrnych vlákien, známych v literatúre ako fotónovo-kryštalické vlákna **PCF** (*Photonic Crystal Fibres*).

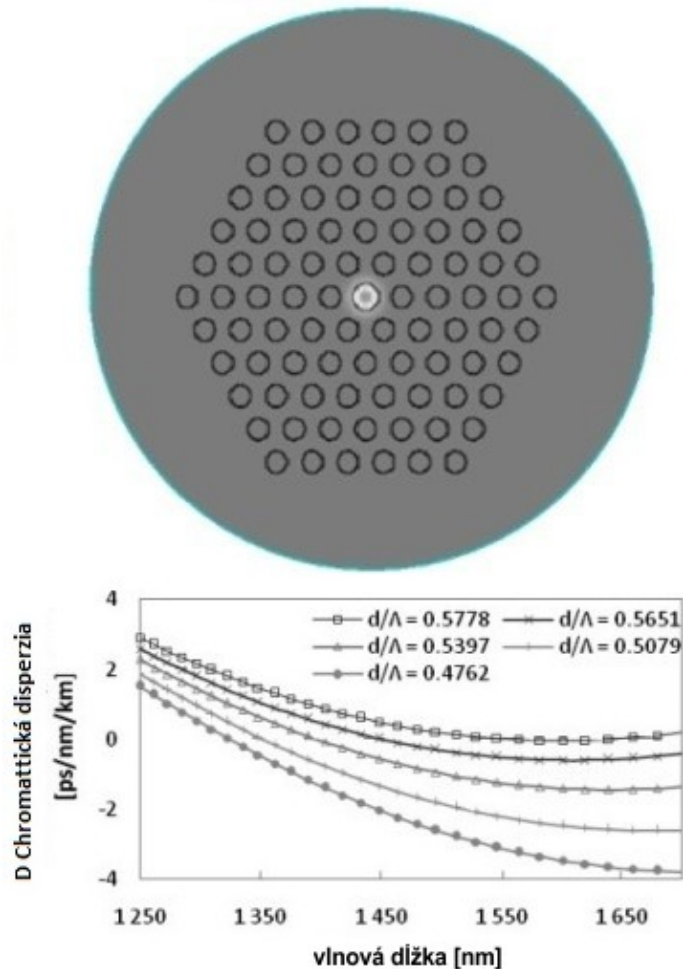


Príklad návrhu vlákna kompenzujúceho disperziu a priebeh disperzie ako funkcie vlnovej dĺžky.

Niektoré vlákna DCF sú navrhnuté pre prevádzku na určitej vlnovej dĺžke. Priebeh disperzie ako funkcie vlnovej dĺžky je parabolický, má jedno minimum disperzie a dve vlnové dĺžky, na ktorých je disperzia nulová **ZDW** (*zero dispersion wavelength*).



Vlákná DCF pre systémy DWDM môžu kompenzovať disperziu vo všetkých kanáloch súčasne. Širokopásmové DCF sa vyznačujú vysokou zápornou hodnotou koeficienta disperzie dostupnou vo všetkých telekomunikačných oknách, v ktorých sú optické vlákna transparentné. Priebeh disperzie ako funkcie vlnovej dĺžky vlákna DCF kopíruje opačný sklon štandardných vlákien, disperzia ktorých sa kompenzuje v širokom spektre vlnových dĺžok.



Disperzia v širokopásmovom vlákne DCF.

Optovláknová Braggova mriežka

Ďalšou možnosťou je použitie takzvanej *vláknovej Braggovej mriežky* **FBG** (*fibre Bragg grating*) v optickom vlákne pozdĺž jadra (pozn.: nejedná sa o mikroštruktúrne Braggovo vlákno).

Nevýhody:



- Pracuje na určitej vlnovej dĺžke. Mriežku je možné preladiť (zmenou periódy mriežky), ale pre aplikácie v systémoch DWDM jedna mriežka nestačí na

potlačenie disperzie na niekoľkých vlnových dĺžkach. Viac kanálov = viac mriežok.

- Mriežku je možné preladiť, napriek tomu postačuje len na kompenzáciu disperzie na jednej konkrétnej vlnovej dĺžke.
- Počet vlnových dĺžok = počet mriežok

Schémy kompenzácie

Môžeme uvažovať rôzne varianty na potlačenie disperzie: predkompenzáciu alebo postkompenzáciu disperzie. Odpoveď na otázku, ktorý variant je vhodnejší pre danú sieť, uľahčí numerická simulácia optickej siete.

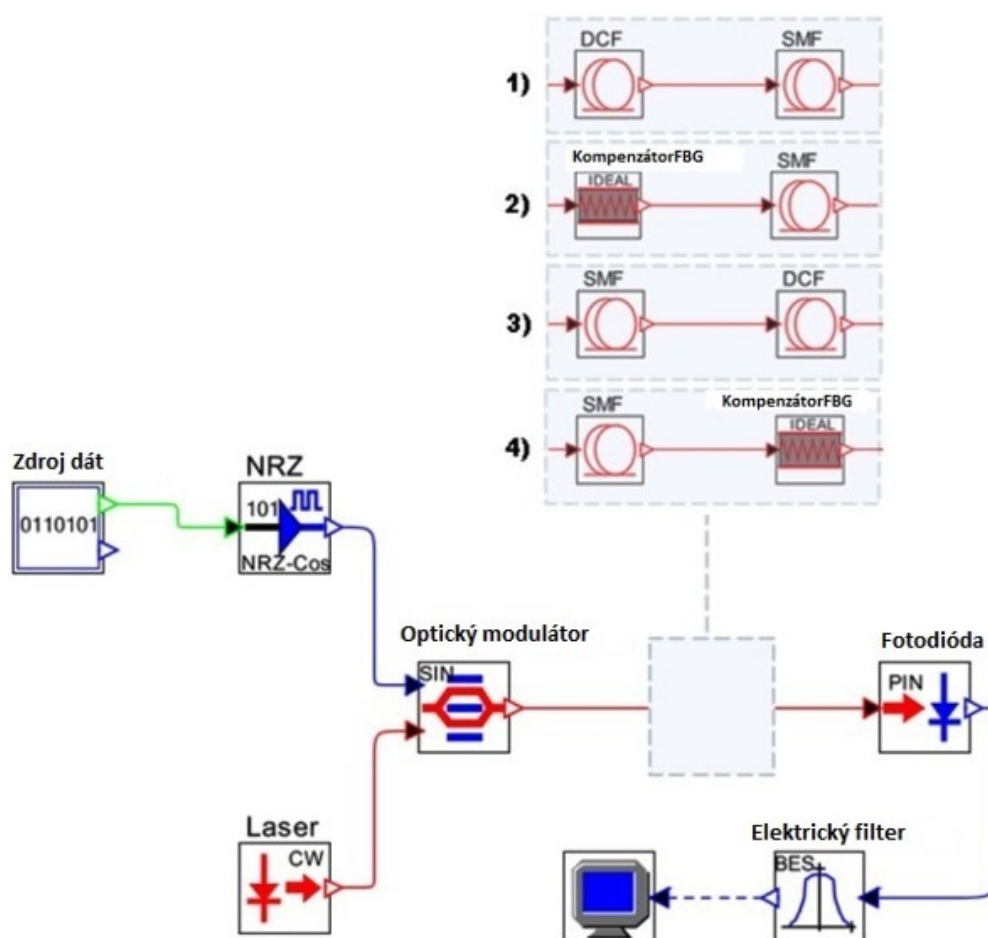


Schéma kompenzácie pre optické siete.

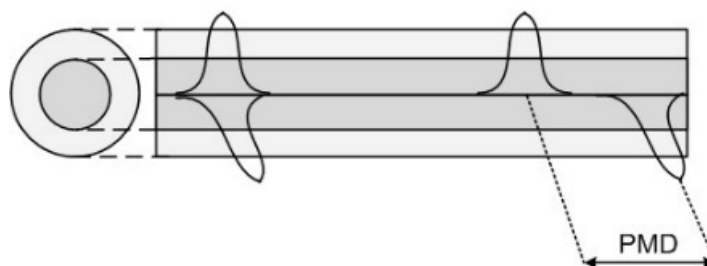
Pri procese potlačenia disperzie treba dávať pozor, aby nebola dosiahnutá presne nulová hodnota disperzie. Z jednej strany nulová disperzia znamená, že optické impulzy sa nebudú rozširovať. Z druhej strany je nulová disperzia jednou z podmienok vzniku nelineárnych javov, ktoré skresľujú optický prenos. Takýmto nelineárnym javom je štvorvlnové zmiešavanie **FWM** (*Four Wave Mixing*). Preto je optimálnym riešením ponechanie malej (ale nenulovej) disperzie, ktorá spôsobí zanedbateľné rozšírenie impulzov a zároveň zamedzí nelineárnym javom.

8.3 Polarizačná vidová disperzia – PMD

Polarizačná vidová disperzia PMD (*Polarization Mode Dispersion*) vzniká z dôvodu odlišnej hodnoty indexu lomu pre rôzne polarizované zložky (polarizácia v praxi znamená oscilácie vektorov E alebo H pozdĺž určitého smeru). Inými slovami, z dôvodu inej hodnoty indexu lomu pre os “x” a os “y”. Rozlišujeme takzvanú rýchlu a pomalú os. Takáto látka je anizotropná. PMD obvykle predstavuje malé hodnoty, rádovo niekoľko pikosekúnd, ale i takéto hodnoty môžu predstavovať problém pre vysokorychlostné prenosové systémy.



Nájdienie optimálneho riešenia je problematické, nakoľko PMD je náhodným procesom. Existujú špeciálne korektory disperzie, ktoré sa nasadzujú pre správny príjem dát. Aby sa predišlo problému PMD, používajú sa špeciálne dvojlomové vlákna, ktoré sa vyznačujú značnou asymetriou.



PMD v optickom vlákne.

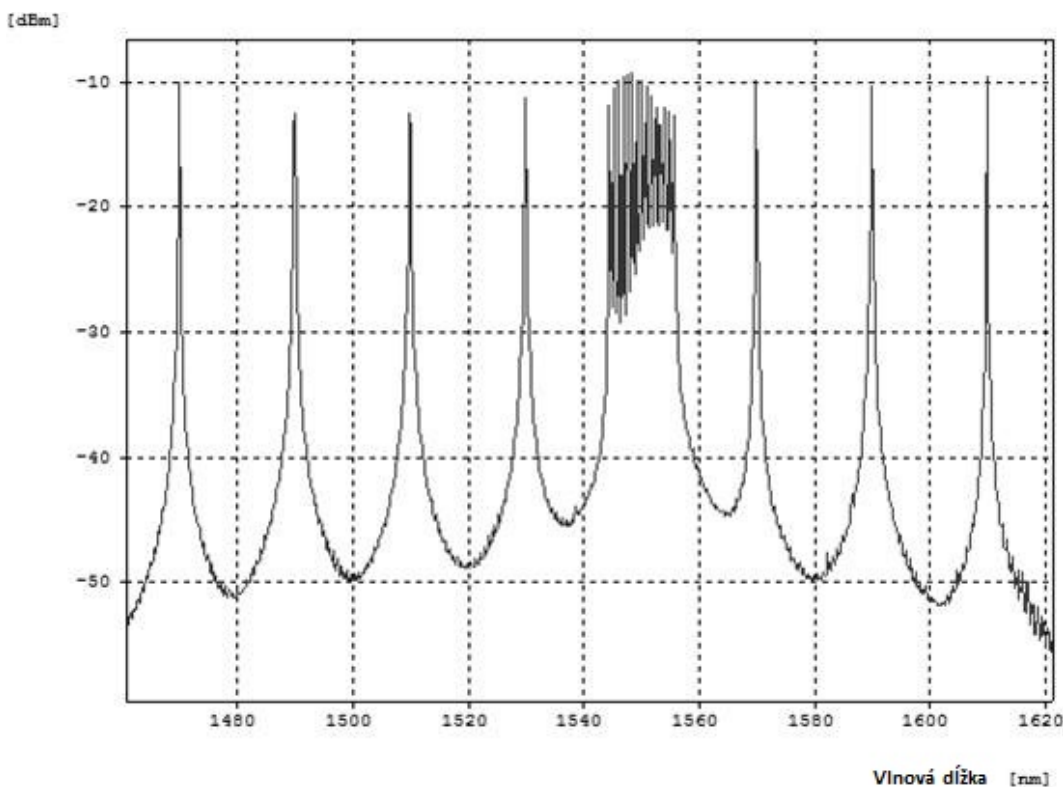
9 Konvergencia a aktualizácia optických sietí

9.1 Konvergencia a aktualizácia optických sietí

Požiadavky na väčšiu prenosovú kapacitu a bitovú rýchlosť vyžadujú aktualizáciu optických systémov alebo prevádzku viacerých systémov na jednom vlákne. Koexistencia optických systémov sa týka predovšetkým sietí CWDM a DWDM, ktoré môžu spoločne využívať pasívnu optickú infraštruktúru.

„DWDM po CWDM“

- CWDM
 - 8 kanálov x 10 Gbit/s - 1470 nm - 1610 nm.
- CWDM/DWDM
 - Nahradenie piateho kanála CWDM (1550 nm).
 - DWDM s kanálmi 15x10 Gbit/s s rozstupom 100 GHz.
 - Činiteľ kvality Δ sa zmení o menej ako 0,1 dB.

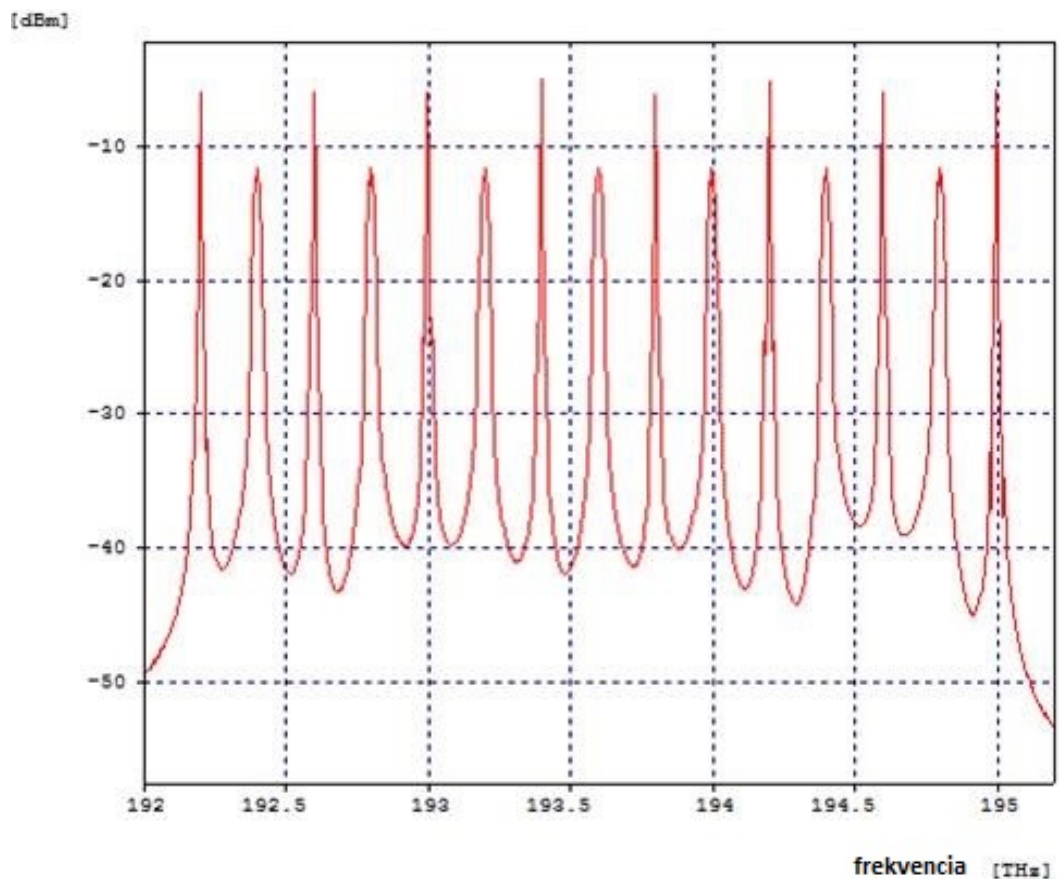


Príklad riešenia systému „DWDM po CWDM“ – rozmiestnenie kanálov.

Hybridné riešenie

Hybridný DWDM 10G/40G

- Pôvodne systém 10G DWDM
 - 15x10 Gbit/s, NRZ-OOK, rozstup kanálov 50 GHz.
 - 6x80km SSMF (dvojfázové zosilňovače, postkompenzácia disperzie).
- Hybridný DWDM 10G/40G s prekladaním kanálov
 - Kombinácia so systémom 7x40 Gbit/s.
 - Duobinárna modulácia, modulačné formáty P-DPSK, RZ-DQPSK.
 - Vplyv 10 Gbit/s kanálov na kanály 40 Gbit/s (presluchy).
 - Problém so vznikom krížovej fázovej modulácie **XPM** (*Cross Phase Modulation*).

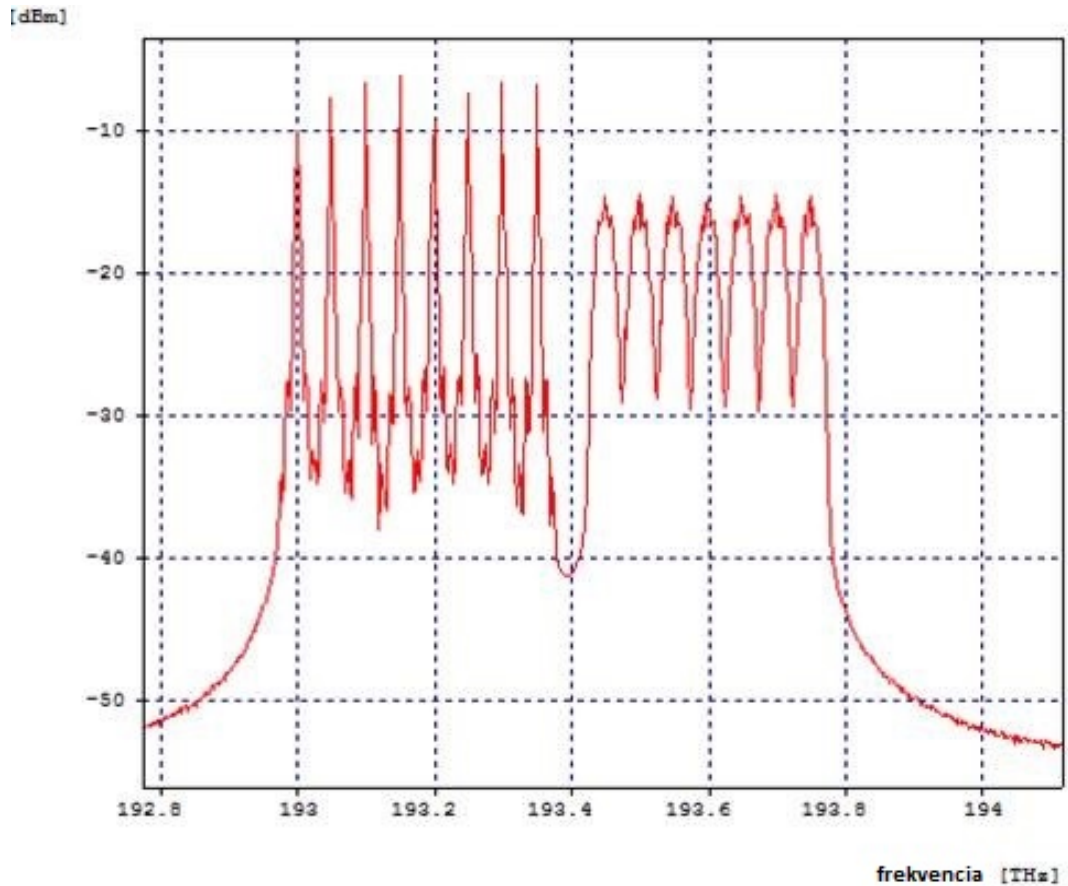


Optické spektrum DWDM s prekladaním kanálov.

Hybridný systém DWDM 10G/40G s ochranným pásmom



Oddelenie spektier 10G a 40G systémov ochranným pásmom môže vyriešiť problém krížovej fázovej modulácie z 10G systému.



Ochranné pásmo (100 GHz) oddeľujúce dva systémy (kanály RZ-DQPSK a P-DPSK 40G).

10 Záver



FTTx zahŕňajú optické siete, v závislosti od kapacity siete a dosahu ich pokrytia ich delíme na:

- *Pasívne optické siete (PON)* – sú lacné, ale poskytujú prenosovú rýchlosť 10 Gbit/s a dosah optického vlákna rádovo desiatok kilometrov.
 - *Aktívne optické siete (AON)* – umožňujú dosiahnuť bitové rýchlosti rádovo Tbit/s s použitím technológie DWDM. Pre tieto účely je často nevyhnutné splniť nasledujúce kritériá:
 - Pri plánovaní siete optimálne riešiť topológiu, tlmenie, disperziu a nelineárne javy.
 - Rýchlosť na kanál aspoň 100 Gbit/s.
 - Prevádzkovanie aspoň 40 G DWDM po 10 G DWDM.
 - Potenciálna koexistencia alebo konvergencia rôznych systémov s odlišnou špecifikáciou.
-