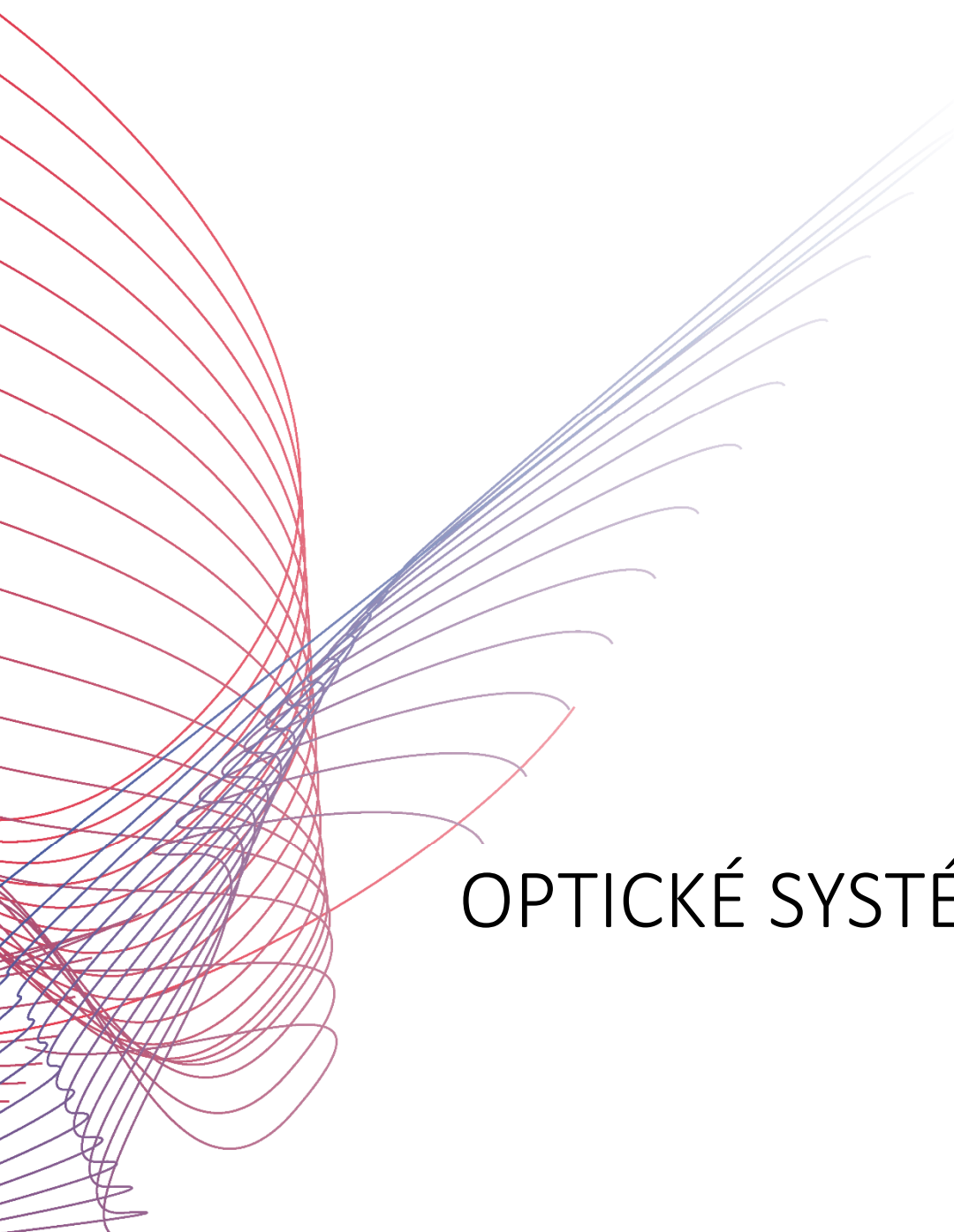




TECH pedia



OPTICKÉ SYSTÉMY A SÍTĚ

MICHAL LUCKI

Název díla: Optické systémy a sítě
Autor: Michal Lucki
Vydalo: České vysoké učení technické v Praze
Fakulta elektrotechnická
Kontaktní adresa: Technická 2, Praha 6
Tel.: +420 224352084
Tisk: (pouze elektronicky)
Počet stran: 42
Edice (vydání): 1. vydání, 2017
ISBN 978-80-01-06256-2

TechPedia

European Virtual Learning Platform for
Electrical and Information Engineering

<http://www.techpedia.eu>

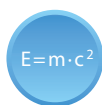


Tento projekt byl realizován za finanční podpory
Evropské unie.

Za obsah publikací odpovídá výlučně autor.

Publikace (sdělení) nereprezentují názory Evropské
komise a Evropská komise neodpovídá za použití
informací, jež jsou jejich obsahem.

VYSVĚTLIVKY



Definice



Zajímavost



Poznámka



Příklad



Shrnutí



Výhody



Nevýhody

ANOTACE

Tento výukový materiál popisuje optické sítě – optické přístupové sítě, technologií FTTx, aktivní a pasivní optické sítě, optické systémy s vlnovým multiplexováním: DWDM a CWDM. Uvádí základní parametry a pracovní režimy optických sítí, včetně problematiky údržby sítě (OTDR, svařování) a obnovy signálu (EDFA, SOA, Ramanův zesilovač, potlačení disperze).

CÍLE

Student se naučí rozlišovat různé typy implementace optických sítí a vyhodnocovat, zda optická síť splňuje základní standardní kritéria. Student získá znalosti o plánování optických systémů, plně optické obnově signálů a údržbě optických sítí.

LITERATURA

- [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	Platná doporučení ITU-T v oblasti optických přenosových systémů	7
1.1	Doporučení ITU a IEEE pro PON sítě	7
1.2	Doporučení pro sítě PON s prodlouženým dosahem	9
2	Systémy s vlnovým multiplexováním - CWDM a DWDM	10
2.1	Myšlenka vlnového multiplexu	10
2.2	Rastr CWDM a DWDM	11
3	Druhy optických sítí, jejich architektura a základní parametry (OTH, FTTx)	12
3.1	Architektura FTTx.....	12
3.2	Přístupové sítě	13
3.3	Optická transportní hierarchie	15
4	Svařování optických vláken a instalace optických přípojek	16
4.1	Cíl	16
4.2	Postup	18
5	Testování optických přípojek reflektometrem OTDR	22
5.1	Reflektometr OTDR	22
6	Obnova signálu v optické síti použitím linkových EDFA zesilovačů	25
6.1	EDFA zesilovač.....	25
7	Polovodičové optické zesilovače (SOA) a Ramanův zesilovač	28
7.1	Polovodičové optické zesilovače.....	28
7.2	Ramanův zesilovač.....	30
8	Kompenzátory disperze pro optovláknové trasy	32
8.1	Disperze v optických vláknech.....	32
8.2	Kompenzace disperze.....	35
8.3	PMD – Polarizační vidová disperze	38
9	Konvergence a upgrade optické sítě	39
9.1	Konvergence a upgrade optické sítě.....	39
10	Závěr	42

1 Platná doporučení ITU-T v oblasti optických přenosových systémů

1.1 Doporučení ITU a IEEE pro PON sítě



ITU (*International Telecommunication Union*) je mezinárodní telekomunikační unie, která publikuje doporučení pro pasivní optické sítě, *Passive Optical Networks* (**PON**), včetně pasivních optických sítí s prodlouženým dosahem. Lze rozlišovat celou řadu variant tohoto systému podle útlumové třídy sítě, dosahu, použitých vlnových délek a přenosových rychlostí.



PON - *Passive Optical Networks*, pasivní optická síť (jeden z hlavních druhů sítě popisovaný v tomto výukovém souboru) je mnohobodová síť, která může být klasifikovaná podle funkcionality prvků pro vyčleňování optických signálů. PON síť používá pasivní prvky (samozřejmě kromě aktivních laserů nebo jiných zdrojů optického záření), kde výkon postupně klesá se vzdáleností od zdroje optického signálu.

Základní doporučení pro aktuální PON sítě – porovnání doporučení IEEE a ITU-T.

Doporučení	10GEPON, IEEE 802.3av (2009)	EPON, IEEE 802.3ah (2004)	GPON, ITU-T G.984 (2003)	XG-PON, ITU-T G.987 (2010)
Varianty pro přenosovou rychlost	10G/10G symetrická nebo asymetrická	1G/1G symetrická	1,25G/1,25G symetrická, 2,5G/1,25G asymetrická, 2,5G/2,5G symetrická	10G/2,5G asymetrická
Přenosová rychlost na fyzické vrstvě	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
Útlumové třídy	PR10, PRX10, PR20, PRX20, PR30, PRX30	PX10, PX20	Třída A, B, B+,C	Třída Nominal 1, 2, Třída Extended 1, 2
Vlnové délky [nm]	Downstream (směr k uživateli) 1575-1580 Upstream (směr od uživatele) 1260-1280 nebo 1260- 1360	Downstream 1480-1500 Upstream 1260-1360	Downstream 1480-1500 Upstream původně 1260-1360, nově 1290- 1330	Downstream 1575-1580 Upstream 1260-1260
Fyzický dosah [km]	≤10, ≤20	≤10, ≤20	≤20	≤20 (v budoucnu ≤40)
Max. dělicí poměr	1:16, 1:32 (v budoucnu 1:64, 1:128)	1:16, 1:32	1:64 (proprietární 1:128)	1:256

1.2 Doporučení pro síť PON s prodlouženým dosahem

Pasivní optické sítě v určitých případech mohou používat optické zesilovače pro prodloužení dosahu, bez nutnosti výstavby rozsáhlé aktivní infrastruktury.

Doporučení pro GPON síť s prodlouženým dosahem, povolené zesilovače

GPON třída	Optická distribuční síť [dB]	Povolený útlum od dodavatele ke koncovému uživateli [dB]	Max. fyzický dosah (fyzická vrstva) [km]
Třída B+	13-28	13-28	40
Třída C	15-30	15-30	40
Třída C+	17-32	17-32	60

2 Systémy s vlnovým multiplexováním - CWDM a DWDM

2.1 Myšlenka vlnového multiplexu

Řešení pro myšlenku navyšování přenosové rychlosti a informační kapacity optického systému spočívá v přenosu informace v mnoha kanálech (na více vlnových délkách) současně. Síť většího dosahu s přenosovou kapacitou desítek Tbit/s pracují na stovkách kanálů; každý kanál je schopen přenášet desítky Gbit/s.

i

DWDM - *Dense Wavelength Division Multiplexing*, husté vlnové multiplexování, které vyžaduje použití úzkopásmových zdrojů optického záření, jakými jsou DFB lasery - *Distributed Feedback Lasers (DFB)*. Vyzařovaná vlnová délka by měla být stabilní (je obecně známo, že lasery jsou teplotně laditelné); pro tyto účely se doporučuje používat chlazené DFB lasery, pracující při konstantní teplotě z rozmezí 20 až 30°C.

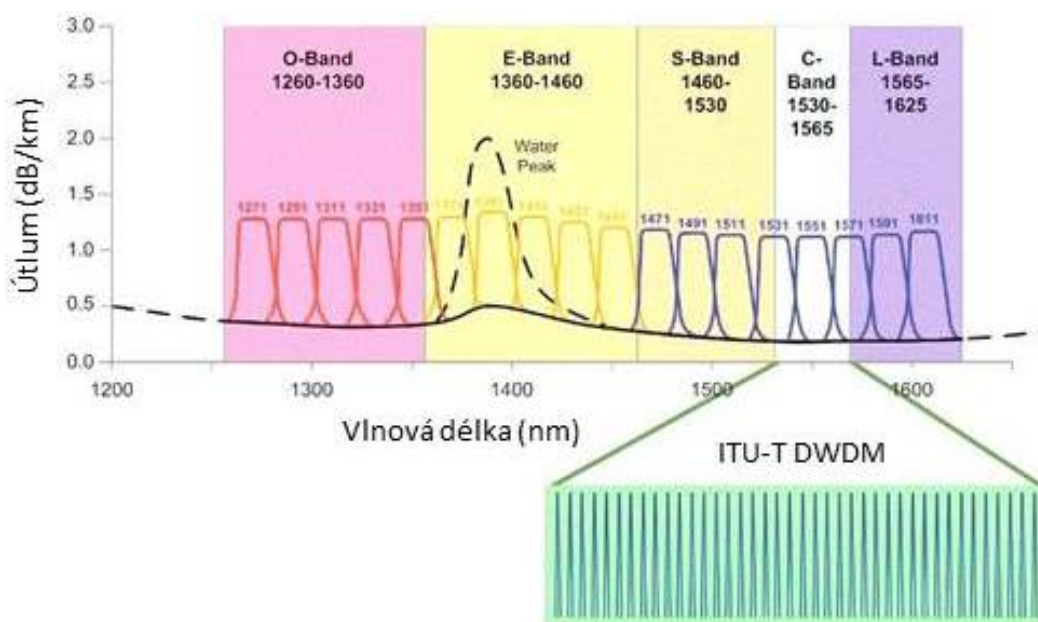
i

Metropolitní sítě mohou pracovat při mnohem nižší přenosové rychlosti. **CWDM** - *Coarse Wavelength Division Multiplexing* – hrubé vlnové multiplexování používá 4 až 16 kanálů s velkou roztečí 20 nm, která umožňuje použití laserů vyzařujících širší spektrum vlnových délek, např. Fabry-Perot lasery nebo nechlazené DFB lasery. Takové řešení je finančně méně nákladné.

2.2 Rastr CWDM a DWDM

Rastr (rozestup kanálů) u CWDM a DWDM systémů

Technologie	CWDM	DWDM – regionální síť	DWDM – síť s dlouhým dosahem
Počet kanálů (vlnových délek)	4-16	32-80	80-160
Pásma	O, E, S, C, L	C, L	C, L, S
Rozestup kanálů	20 nm a více (2500 GHz a více)	0,8 nm, 100 GHz	0,4 nm a méně – 0,2 nm nebo 0,1 nm, (50 GHz nebo méně)
Přenosová kapacita na kanál	1,5 Gbit/s	10 Gbit/s	10-40 Gbit/s
Kapacita vlákna	20-40 Gbit/s	100-1000 Gbit/s	Desítky Tbit/s
Druh laseru	Nechlazené DFB nebo FP	Chlazené DFB	Chlazené DFB
Dosah	50-80 km	100 km	1000 km
Cena	Nízká	Vysoká	Nejvyšší



Pracovní vlnové délky CWDM a DWDM – příkladové porovnání.

3 Druhy optických sítí, jejich architektura a základní parametry (OTH, FTTx)

3.1 Architektura FTTx

FTTx (*Fibre to the ...cabinet, curb, building, office, home*) – optovláknové přístupové sítě. Sítě FTTO a FTTH představují plně optické řešení. FTTE_x, FTTC_{ab}, FTTC, FTTB jsou hybridním řešením (kombinujícím optiku a metalickou nebo bezdrátovou infrastrukturu).

Hybridní řešení

Obecné předpoklady:

- Optická vlákna lze kombinovat se symetrickými páry v případě ADSL2+, VDSL2.
- Optická vlákna lze kombinovat s koaxiálními kabely v případě *Cable TV* (CATV).
- Signál z optické sítě lze navázat do bezdrátové sítě.
- **FTTE_x** (*Fibre to the Exchange*) – optická vlákna jsou ukončena v lokální telefonní ústředně, DSLAM multiplexor navazuje signály do stávající metalické infrastruktury **xDSL** (*Digital Subscriber Line*). FTTE_x je jedním z nejběžnějších řešení, ale je třeba zdůraznit, že se nejedná o plně optické (perspektivní) řešení.
- **FTTC_{ab}** (*Fibre to the Cabinet*) – optická vlákna jsou ukončena ve venkovním rozbočovači.
- **FTTC** (*Fibre to the Curb*) – optická vlákna jsou přivedena ke skupině staveb.
- **FTTB** (*Fibre to the Building*) – optická vlákna jsou přivedena k jednotlivým budovám, kde mohou být ukončena uvnitř budov např. v telefonních skřínkách nebo signál se může šířit dál pomocí bezdrátového připojení.

Plně optická řešení

- **FTTO** (*Fibre to the Office*) – optická vlákna jsou ukončena v kanceláři důležitého zákazníka s požadavky na velkou přenosovou kapacitu.
- **FTTH** (*Fibre to the Home*) – optická vlákna jsou ukončena v uživatelské zásuvce.

3.2 Přístupové sítě

OAN - *Optical Access Networks* – optická přístupová síť

- Simplexní přenos s prostorovým dělením, **SDM** (*Space Division Multiplexing*), pro každý směr přenosu se používá jedno vlákno.
- Duplexní přenos s vlnovým dělením, **WDM** (*Wavelength Division Multiplexing*), signály se přenášejí po jednom vlákně, jeden směr přenosu je v oblasti kolem vlnové délky 1310 nm, opačný směr přenosu je v oblasti vlnové délky 1550 nm.
- Duplexní přenos s frekvenčním dělením, **FDM** (*Frequency Division Multiplexing*), signály se přenášejí po jednom vlákně, oba směry přenosu jsou lokalizovány kolem jedné vlnové délky a jsou od sebe frekvenčně odděleny.
 - Short Haul (krátký dosah) – max. útlum 16,5 dB CWDM, min. útlum 5 dB, dosah 30 – 50 km pro P2P.
 - Long Haul (dlouhý dosah) – max. útlum 25,5 dB CWDM, min. útlum 14 dB, dosah 50 – 80 km pro P2P.
 - Typický rozsah útlumu CWDM sítě je 3,5 až 7,5 dB. EDFA zesilovač může prodloužit dosah sítě.

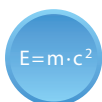
Aktivní optické sítě

AON - *Active Optical Networks*, aktivní optická síť. Aktivní optická síť umožňuje použití aktivních síťových prvků, jakými jsou např. zesilovače.



Existují *Reach Extended PON (REPON)*, pasivní optické sítě s prodlouženým dosahem, ve kterých lze použít EDFA zesilovač, angl. *Erbium Doped Fibre Amplifier (EDFA)*, přesto se taková síť nazývá „pasivní“.

Pasivní optické sítě



PON - *Passive Optical Networks*: mnohobodové sítě, které lze třídit podle funkcionality prvků vyčleňujících optické signály. Může se jednat o splitty (rozbočovače) nebo *Arrayed Waveguide Gratings (AWG)* – matice s uspořádanými mřížkami a vlnovody. U WDM systémů lze signál rozdělit optickým filtrem s použitím takzvaných add-drop multiplexorů (angl. add-drop: přidej-vyčleň).

- **BPON** - *Broadband PON* – přidána rychlost 622,04 Mbit/s, používají se dvě vlákna pro oba směry přenosu nebo jedno vlákno, ve kterém je směr pro upload lokalizován v pásmu WDM: 1260 - 1360 nm a download v pásmu 1480 - 1500 nm. Pásmo 1539 - 1565 nm je určeno pro 16 + 16 DWDM kanálů s roztečí 0,8 nm, pásmo 1550 - 1560 nm je určeno pro přenos videa.

- **GPON** - *Gigabit PON* – doporučení ITU-T G.984 – nominální přenosová rychlost 1,244 a 2,488 Gbit/s (max. 128 připojených konečných uživatelů).
- **EPON** - *Ethernet PON*. Optické připojení typu: P2MP (point-to-multipoint neboli bod-mnoho bodů). Přenosová rychlost 1,25 Gbit/s je v souladu se standardem 1000BASE-PX. Pro upstream (směr od uživatele k poskytovateli služby) se používá vlnová délka 1310 nm, pro downstream (směr od poskytovatele k uživateli) se používá vlnová délka 1490 nm. Typ 1 – max. dosah sítě je 10 km. Typ 2 – max. dosah 20 km.

3.3 Optická transportní hierarchie



OTH – *Optical Transport Hierarchy* - optická transportní hierarchie. Signály optické hierarchie jsou v literatuře známy jako **OTM** (*Optical Transport Module*) – optické transportní moduly. Nejjednodušší varianta (takzvaný nulový stupeň) předpokládá přenos bez vlnového multiplexování. Optický transportní modul je označován jako OTM-n.m, kde n je počet kanálů (vlnových délek) a m vyjadřuje typ signálu. Lze násobit různé základní přenosové rychlosti; potenciální kombinace mohou zahrnovat OTM-n.1 2 3 (tedy 2,5; 10; 40 Gbit/s).

Optická transportní hierarchie OTH – transportní moduly bez vlnového multiplexování

Hierarchický stupeň	Přenosová rychlost [Mbit/s]	Lze přenášet STM-N
OTM-0.1	2488,32	STM-16
OTM-0.2	9953,28	STM-64
OTM-0.3	39813,12	STM-256



STM je *Synchronous Transport Module*, synchronní transportní modul, základní přenosová jednotka v hierarchii **SDH** (*Synchronous Digital Hierarchy*) – synchronní digitální hierarchii; „n“ znamená multiplexaci základní jednotky přenosové kapacity.

Optické transportní moduly s vlnovým multiplexováním

Hierarchický stupeň	Přenosová rychlost [Mbit/s]	Lze přenášet
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 Svařování optických vláken a instalace optických přípojek

4.1 Cíl

Cílem svařování optických vláken je permanentní spojení dvou úseků vláken.



Použití optických konektorů představuje flexibilnější řešení, přesto optické svary umožňují dosažení nižších ztrát. Svařování se jeví jako vhodnější všude tam, kde se nepředpokládá, že vlákna budou v budoucnu rozpojována. Svařování nachází uplatnění u oprav vláken, kde je zapotřebí vyměnit úsek poškozeného vlákna.

Potenciální opravy vláken jsou důvodem pro ponechání jisté rezervy vlákna během výstavby sítě – rezervu lze použít pro náhradu (v případě krátkého úseku poškozeného vlákna), navíc během přípravy svařování se pokaždé optické vlákno zkracuje.



Optická svářečka – typ Fujikura 18s.



Vybavení pro svařování optických vláken:

- Optická vlákna ke svaření;
- Speciální kleště pro odstranění vnější ochrany vlákna;

- Zalamovačka pro provedení kolmého řezu vlákna;
 - Optická svářečka pro nastavení polohy vláken a provedení svaru;
 - Izopropylalkohol pro odstranění zbytku tmelu pod primární ochranou vlákna.
-

4.2 Postup

- Lze svářet dvě vlákna o délce alespoň 100 mm (přibližně).
- Za pomoci speciálních kleští je třeba odstranit primární a sekundární ochranu vlákna v délce přibližně 50 mm, po odstranění ochrany necháme jádro a plášť nezbytné pro vedení optického paprsku.
 - Kapesníkem s izopropylalkoholem odstraníme zbytky tmelu.
- Takto připravená vlákna je třeba zalomit speciální zalamovačkou, cílem je dosažení plochého a kolmého řezu vlákna.
- Vlákna se umísťují do speciální drážky v zalamovačce, konec vlákna by měl dosahovat konce drážky tak, aby napnuté vlákno bylo zalomeno, v opačném případě se vlákno pouze ohne.
- Vlákno se aretuje speciální klapkou.
 - Pro provedení řezu je třeba odblokovat mechanismus ve spodní části zalamovačky a zalamovací hrot udeří do vlákna a provede řez. Není správné používat velkou sílu, kvalitní řez je otázkou napnutí vlákna a přesného umístění vlákna do drážky.

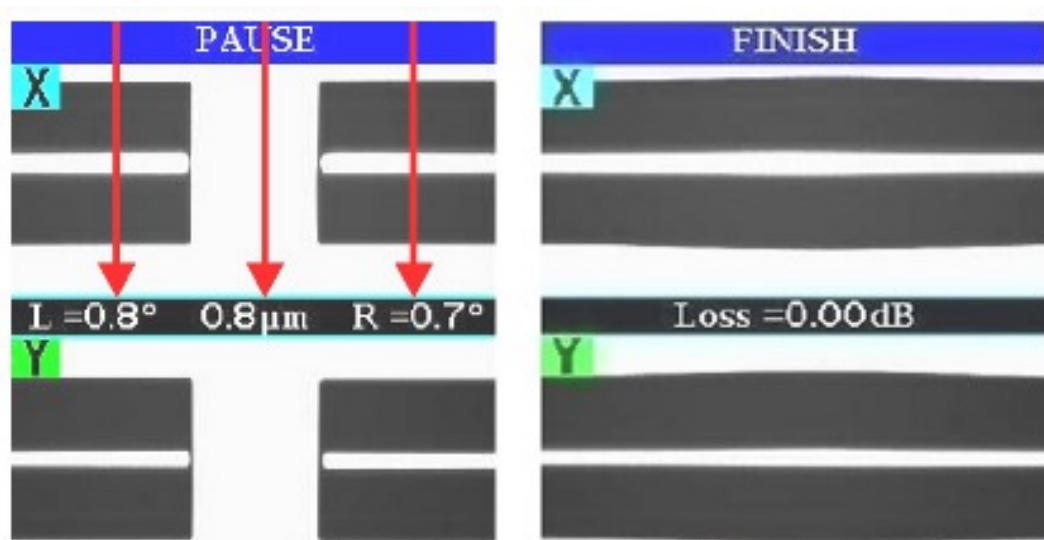


Zalamovačka s vláknem připraveným k zalomení.

- Po provedení řezu následuje svaření vláken.
- Konce obou vláken se umísťují do speciálních v-drážek svářečky.
 - Pozn.: ochranné vrstvy vlákna nesmí přesahovat aretovací klapky, respektive vyznačená políčka drážky, v opačném případě bude nastavení polohy vláken zatíženo chybou nastavení úhlu, která vede k nekvalitnímu svaru. Konce vláken by měly být co nejbližší svařovací elektrody, avšak nesmí elektrodu přesahovat. Pokud je poloha vláken správně nastavená, je třeba zavřít aretovací klapky a kryt svářečky.
- Svářečka se zapíná stisknutím tlačítka ‘Set’ – svářečka automaticky upraví polohu vláken, nastaví osy vláken a vzdálenost čelních ploch.



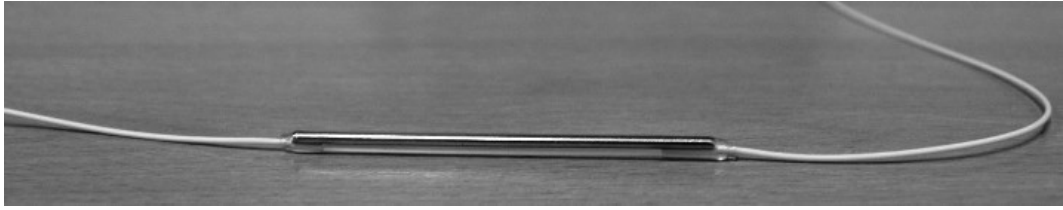
Svářečka s optickými vlákny umístěnými co nejbližše svařovacích elektrod uprostřed; pružinové přichytky je drží na místě.



Automatické nastavení vláken svářečkou a svařená vlákna.



V případě, že je nastavení polohy vláken nebo zalomení vláken špatné, zobrazí svářečka varování a zvukové znamení vyzve k opětovnému zalomení vláken nebo k opětovné manuální úpravě vstupní polohy vláken. V případě, že je nastavení vláken dostatečně dobré, lze zhotovit svar opětovným stisknutím tlačítka 'Set'. Elektrody aplikují napětí, které optická vlákna svaří.



Vzhled optického svaru s navlečenou ochrannou vrstvou.

5 Testování optických přípojek reflektometrem OTDR

5.1 Reflektometr OTDR

Optický reflektometr, *Optical Time-Domain Reflectometer (OTDR)* je měřicí zařízení, které se používá pro testování optických komunikačních systémů. Zaznamenání intenzity zpětně odraženého Rayleighova rozptylu zdroje záření (obvykle laser) v časové doméně umožňuje odhadnout vzdálenost, ve které bylo záření odraženo, a to za předpokladu známé hodnoty indexu lomu materiálu, ze kterého je vlákno vyrobeno.



Znalost míry zpětně odraženého světla umožňuje odhadnout útlum na různých vzdálenostech od počátku vlákna, např. útlum svarů a optických konektorů. Lokalizace míst, kde se nachází potenciální zdroje zvýšeného útlumu v komunikačním systému, je hlavním důvodem, proč se reflektometr používá.



Reflektometr OTDR (Optical Time Domain Reflectometer).



Pro provedení měření je zapotřebí připojit jeden konec měřeného vlákna k reflektometru. Měření je možné na vzdálenosti desítek kilometrů, kde je reflektometr schopen zaznamenat velké množství konektorů a svarů po celé trase.

- Reflektometr OTDR lze konfigurovat pro pulzy pracující na vlnové délce 1550 nm nebo 1310 nm, délku pulzů lze volit v rozmezí 10 ns až 10 us.
- Dosah měření (délka trasy) a přesnost (rozlišení) měření je vždy kompromisem, který je dán volbou délky testovacích pulzů.
- Kratší pulzy umožňují lepší rozlišení měření, ale měření je možné pouze na kratších vzdálenostech.
- Pro danou trasu existuje optimální délka pulzu, je zapotřebí hledat nejlepší možné rozlišení na dané vzdálenosti.
- Existují vlákna (a konektory), pro která nelze dosáhnout adekvátní kvality měření.



Jednoduché řešení pro tento problém je připojit reflektometr k opačnému konci trasy pro správné zobrazení výsledků na větších vzdálenostech od počátku trasy.

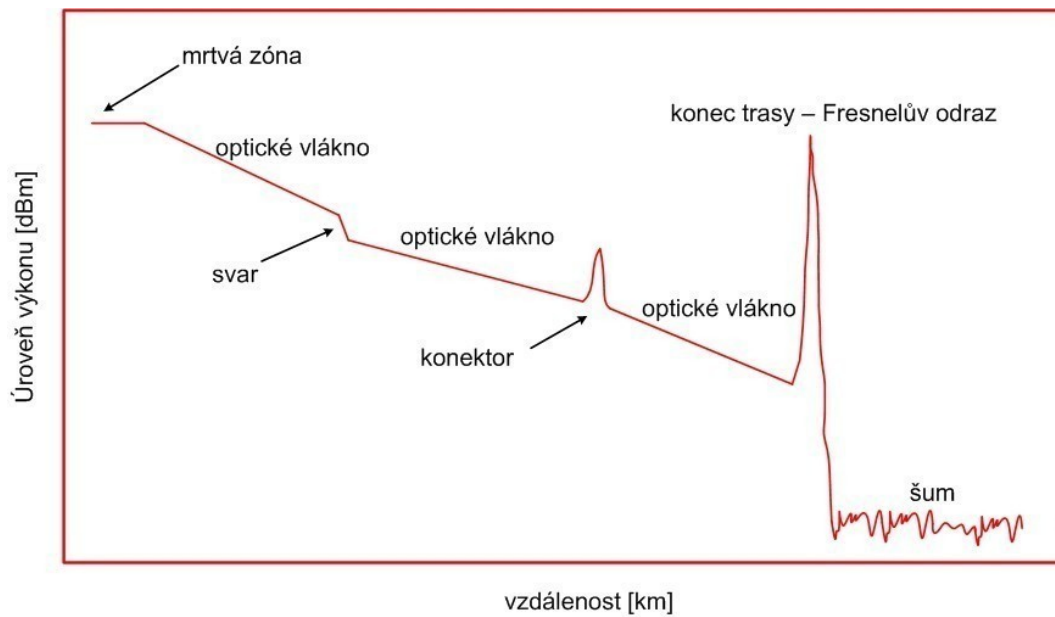
Interpretace měřených dat

Výsledky změřené reflektometrem jsou zobrazeny na následujícím obrázku.

- OTDR identifikuje jednotlivé síťové prvky, konektory, svary, které se odlišují charakterem útlumu.
- Krátký a ostrý pokles výkonu indikuje optický svar.
- Výkonová špička odpovídá konektoru, na pravé straně špičky lze vidět značný pokles výkonu.

Důvodem je lepší navázání záření v případě svarů. Lokální maximum intenzity záření v případě konektorů je následkem zvýšeného zpětného odrazu od čela konektoru.

Výkonová špička je ve skutečnosti jistou nepřesností měření, která pramení z předpokladu, že míra zpětných ztrát je úměrná útlumu. Ve skutečnosti není útlum konektoru vztažen k výšce této výkonové špičky (způsobené odrazem, nikoliv Rayleighovým rozptylem), ale k poklesu výkonu, který se počítá od místa těsně před špičkou (úroveň výkonu vstupujícího do konektoru) až k místu, kde prudký pokles výkonu končí (úroveň výkonu vstupujícího do dalšího vlákna).



Průběh útlumu změřený reflektometrem OTDR.



Konektory a svary zobrazené na OTDR.

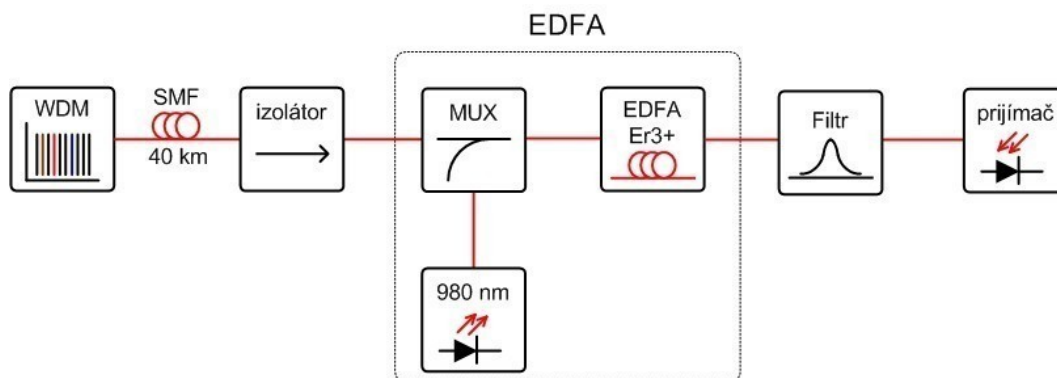
6 Obnova signálu v optické síti použitím linkových EDFA zesilovačů

6.1 EDFA zesilovač

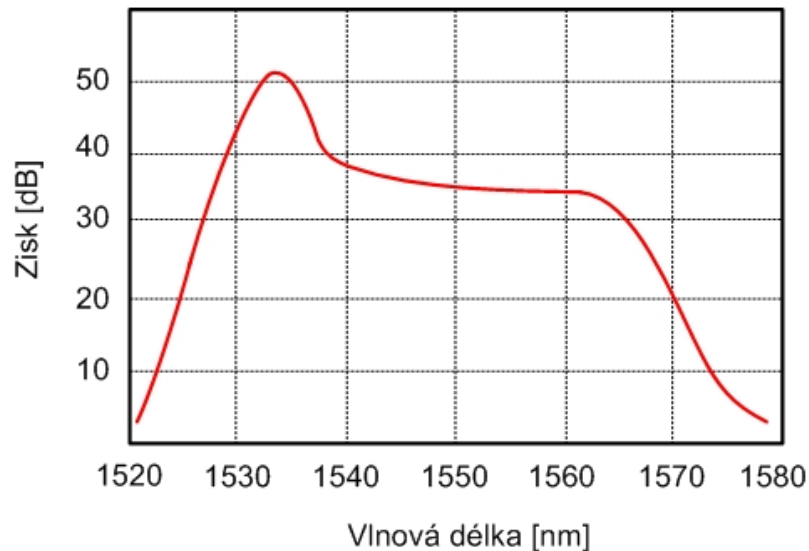
Dotovaná vlákna se často používají jako optické zesilovače v optických sítích. Jednou z příměsí používaných pro tyto účely je erbium, které slouží pro konstrukci erbiem dopovaného zesilovače - *Erbium Doped Fibre Amplifier (EDFA)*. EDFA zesilovač je jedním z nejběžnějších zesilovačů mezi vláknovými zesilovači s dotací. EDFA zesilovač využívá čerpání v podobě laserové diody pracující na vlnové délce 980 nm, která se multiplexuje se signálem, který přenáší informaci v optickém vlákně. Optické čerpání excituje ionty příměsí podél dotovaného vlákna.

$E = m \cdot c^2$

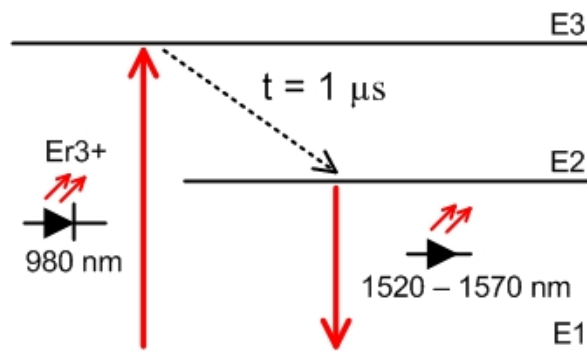
Excitované ionty erbia velice rychle přechází na nižší energetickou hladinu. Tento přechod je nezářivý. Dále pak následuje pomalejší relaxace na základní energetickou hladinu s vyzářením kvantu optického záření. Relativní časy těchto přechodů jsou klíčové pro dosažení populační inverze (většina iontů se ve stavu populační inverze nachází v excitovaném stavu), která je podmínkou pro převahu stimulované emise záření nad spontánní emisí. V praxi to znamená velký odstup signálu od šumu a větší schopnost efektivního zesilování.



EDFA pracující jako linkový zesilovač.



Rozsah pracovních vlnových délek a zisk EDFA.



Pásmový (energetický) model EDFA.

Pro experiment – zesílení EDFA zesilovačem – jsou potřebné následující prvky a zařízení: DFB laser pro vytvoření modelu signálu na 1550 nm, *distributed feedback (DFB)*, laser pro optické čerpání pracující na vlnové délce 980 nm, multiplexor, EDFA vlákno a spektrální analyzátor. Zdroj DFB se multiplexuje s optickým čerpáním za pomoci multiplexoru a smíšený signál se přenáší EDFA vlákem, kde je zesílen.

Výhody:



- Široké pracovní pásmo (C+L pásmo – 1530 nm až 1680 nm).
- Velký zisk 20 až 50 dB (trendem je ale nastavení pracovního bodu zesilovače tak, aby zisk nepřesahoval hodnoty 20 dB z důvodu zamezení nelineárními jevy, které vznikají při velkém optickém výkonu, jedním z těchto jevů je čtyřvlnné směšování - *Four Wave Mixing (FWM)*, které postihuje optické sítě o velkých rychlostech).
- Konstrukce – vlákno a optické čerpání.

- Poměrně plochá charakteristika zisku vhodná pro transparentní optické sítě **WDM** (*Wavelength Division Multiplexing*).
 - Nízká cena.
 - Aplikace jako linkový zesilovač.
-

Nevýhody:

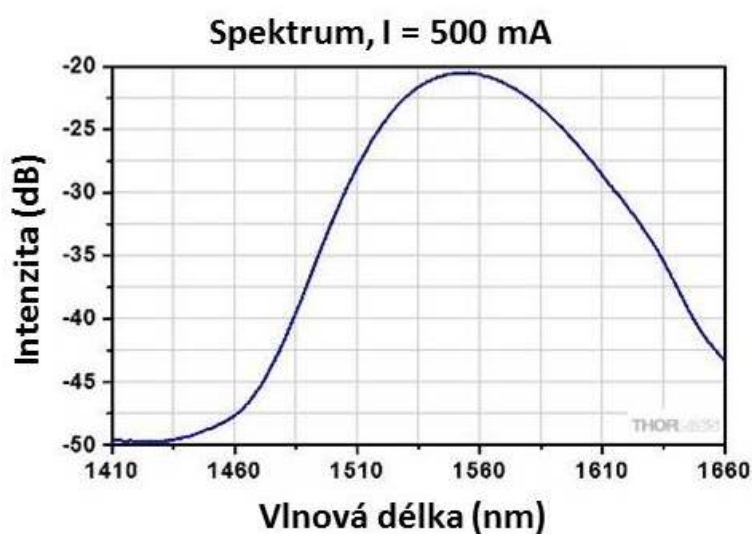


- Značný **ASE** šum (*Amplified Spontaneous Emission*) – zesílená spontánní emise záření.
 - Nelze použít jako výkonový zesilovač (na začátku trasy, kde jsou poměrně velké vstupní výkony) z důvodu neschopnosti pojmout velký vstupní výkon (saturace zisku).
 - Nelze použít jako předzesilovač (před obvody detekce) z důvodu značného šumu, který generuje (vyžaduje použití speciálních filtrů).
-

7 Polovodičové optické zesilovače (SOA) a Ramanův zesilovač

7.1 Polovodičové optické zesilovače

Polovodičový optický zesilovač, *semiconductor optical amplifier (SOA)* využívá polovodičový materiál jako ziskové medium, které vyžaduje elektrické čerpání. SOA zesilovač lze přirovnat k laserovým diodám s rezonátorem, jehož čelní stěny jsou na rozdíl od laserů pokryté antireflexní vrstvou. Signál je zesílen stimulovanou emisí záření v elektricky excitované aktivní vrstvě.

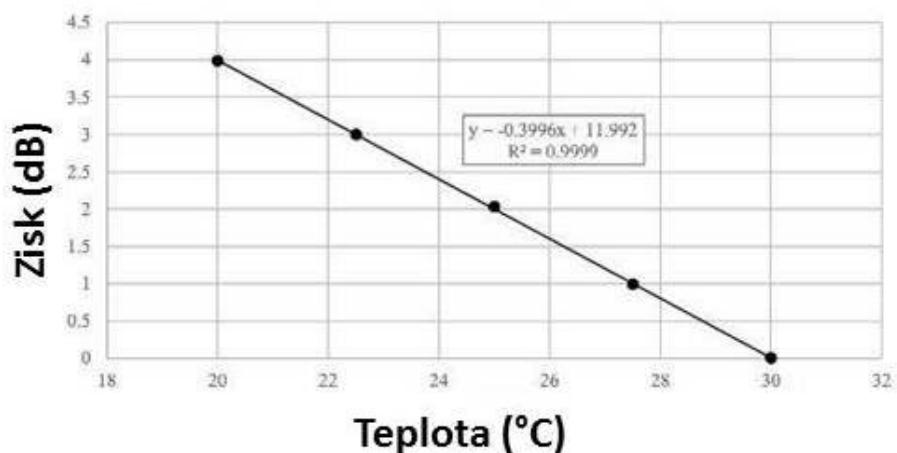


Spektrální charakteristika SOA zesilovače.



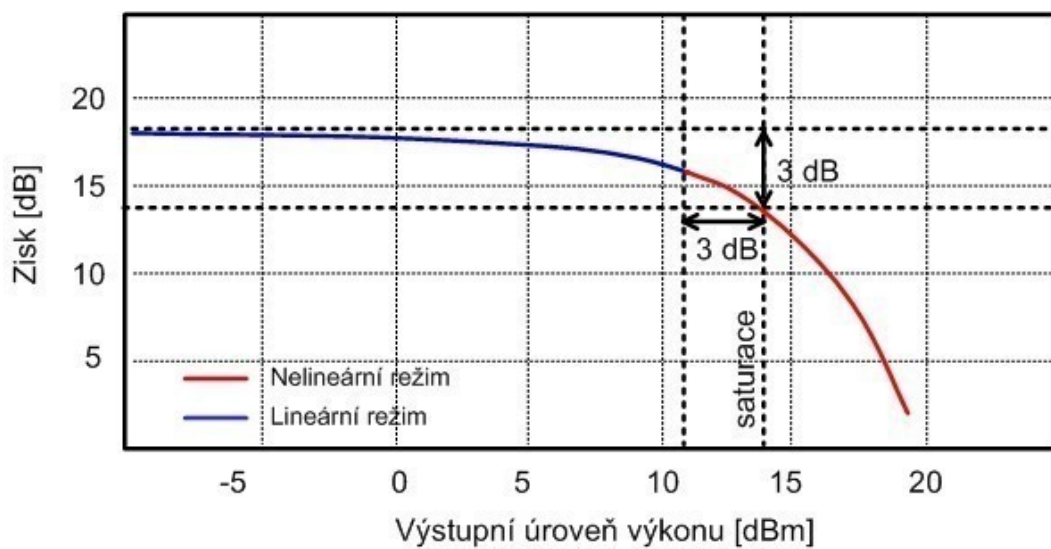
Teplota SOA čipu má silný lineární vliv na zisk media. Za účelem stabilizace zisku je zapotřebí zajistit konstantní teplotu. V nižších teplotách lze také dosáhnout maximálního zisku.

Teplotní závislost zisku SOA zesilovače



Teplotní závislost zisku SOA zesilovače.

Lze rozlišovat dva režimy práce SOA zesilovače: lineární a nelineární. Vymezení těchto režimů práce je důležité z hlediska aplikace – ve většině případů je práce v nelineárním režimu neoptimální.



Lineární a nelineární režim práce SOA.

7.2 Ramanův zesilovač

Ramanovo zesílení je výsledkem stimulovaného Ramanova rozptylu - *Stimulated Raman Scattering (SRS)*.

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

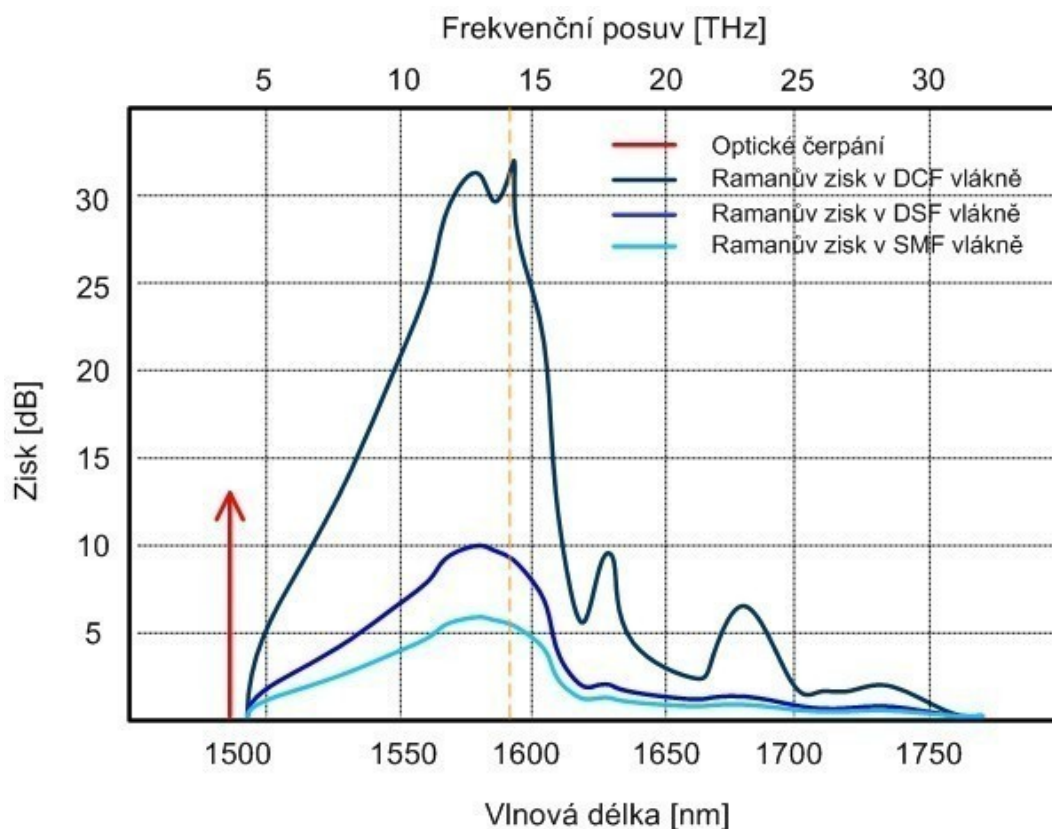
Foton o delší vlnové délce způsobuje neelastický rozptyl fotonu na kratší vlnové délce čerpání v optickém vlákně. Výsledkem je vznik nového fotonu na vlnové délce posunuté přibližně o 100 nm vůči vlně matce (toto tvrzení platí pro většinu standardních telekomunikačních vláken).

Tento jev lze pomyslně použít pro konstrukci optického zesilovače. Pokud se Ramanovo čerpání umístí lokálně, pracuje takový zesilovač jako takzvaný:

- **LRA** – *Lumped Raman Amplifier* – lokální Ramanův zesilovač (čerpání na stejném místě).

Jelikož jev SRS narůstá s délkou vlákna, je v některých aplikacích mnohem vhodnější umístit čerpání na protilehlém konci trasy:

- **DRA** – *Distributed Raman Amplifier* – distribuovaný Ramanův zesilovač (čerpání na vzdáleném konci).



Ramanův zisk v různých typech optických vláken: jednovláknové vlákno - Single Mode Fibre (SMF), vlákno s posunutou disperzí - Dispersion Shifted Fibre (DSF) a disperzi kompenzující vlákno - Dispersion Compensating Fibre (DCF).



Komerčně dostupné EDFA, SOA a Raman zesilovače.



Ramanův jev, který se používá pro konstrukci optického zesilovače, není vždy žádoucí. V DWDM systémech může SRS za vznik přeslechů mezi přenosovými kanály. Nekontrolovaný Ramanův přeslech je nežádoucí, protože neelastický rozptyl způsobuje změny energie, které v praxi mohou znamenat přeslechy a migrace informačních kanálů na různých vlnových délkách. Výkon v kanálech na kratších vlnových délkách bude přenesen na delší vlnové délky (nebo z vyšších frekvencí na nižší frekvence) a takto způsobí zkreslení přenosu v uvažovaných kanálech.

8 Kompenzátory disperze pro optovláknové trasy

8.1 Disperze v optických vláknech



Disperze způsobuje rozšíření optických pulzů (nebo kompresi optických pulzů v případě záporného koeficientu disperze) v časové doméně. Může vést k mezisymbolové interferenci. Uvažujme, že dva sousední pulzy přenáší logickou jedničku a mezera mezi nimi vyjadřuje logickou nulu; v případě, že se sousední logické jedničky začnou částečně překrývat, nebude dekodér schopen přijmout logický symbol „0“, který byl mezi nimi přenášen.



Jednotkou disperze je [ps/nm] (pikosekunda na nanometr), ale ve vláknové optice, kde je délka vlákna klíčovým parametrem, je disperze vztažena k jednotce délky [ps/nm/km]. Disperze, která se rovná 1 ps/nm/km, znamená, že na vzdálenosti 1 km od referenčního bodu (nebo od začátku trasy) lze změřit zpoždění 1 ps nejpomalejší frekvenci vzhledem k přenosu na nejrychlejší frekvenci, za předpokladu, že optický zdroj vyzařuje záření o šířce 1nm.

Chromatická disperze

Chromatická disperze se skládá ze dvou složek: materiálová disperze a vlnovodná disperze.

Materiálová disperze (DMat) vzniká z důvodu nenulové šířky pásma záření laserového zdroje. Vyzařované spektrum vlnových délek není nekonečně úzké, v praxi neexistuje „ideálně monochromatické“ světlo, které by obsahovalo jednu „nekonečně úzkou frekvenci“. Laserové záření vždy obsahuje určité konečné množství frekvencí. Každou frekvenci lze charakterizovat určitou fázovou konstantou šíření – lze uvažovat jiné hodnoty indexu lomu pro různé „barvy“. Každá frekvence (přesněji informace na dané frekvenci) se šíří s jinou fázovou rychlostí a na konec vlákna dorazí v jiném časovém okamžiku.

- Materiálová disperze je přítomná u jednovídných a u mnohovídných vláken.
- Materiálová disperze může představovat jak kladné tak také záporné hodnoty.

Vlnovodná disperze, angl. waveguide dispersion (WD) je způsobena změnou rozložení pole optického vidu na určité vzdálenosti. Tato změna je způsobena změnou geometrie vlákna, která ovlivňuje skupinovou rychlost šíření elektromagnetické vlny jako funkci vlnové délky (takzvaná změna „obálky“ pulzu). Vlnovodná disperze je výhodný nástroj dosažení optimální disperze vlákna, optimalizaci disperze lze provádět vhodným návrhem geometrie vlákna, která ovlivňuje vlnovodnou disperzi. Vlnovodná disperze může ve výsledku změnit celkovou disperzi vlákna.

- Vlnovodná disperze je vždy záporná, a proto ji lze použít pro potlačení kladné materiálové disperze vhodnou volbou uspořádání geometrie vlákna, na které vlnovodná disperze závisí.



Řešení: použití disperzi kompenzujícího vlákna, angl. *Dispersion Compensating Fibres (DCF)*, nebo speciálních optovláknových mřížek.

Vidová disperze

V případě vidové disperze – angl. *modal dispersion (MD)* se každý vid optického záření šíří jinou trajektorií. Nejkratší dráha je podél osy symetrie vlákna, nejdelší optická dráha se týká vidu, který zaznamenává velké množství odrazů na rozhraní jádra a pláště vlákna. S narůstajícím úhlem navázání záření do vlákna (větší numerická apertura NA) roste počet odrazů během šíření vidu a optická dráha je delší. Jednotlivé vidy dorazí na konec vlákna v jiném časovém okamžiku a jelikož jsou detekovány jako superpozice (součet) všech složek, jeví se detektorem přijímaný optický pulz jako delší.

- Vidová disperze je měřitelná pouze u mnohovidových vláken (u jednovidových vláken se šíří jen jeden vid, pokud se vlákno používá na vlnových délkách, pro které je určené). Vidová disperze představuje hodnoty až několik ns/nm/km.



Vidová disperze NENÍ způsobená různou rychlostí jednotlivých složek (vidy, paprsky) – analyticky se předpokládá, že všechny složky se šíří fázově a skupinově stejně rychle (odlišná rychlost se předpokládá v případě chromatické disperze). Vidová disperze proto není funkcí vlnové délky.

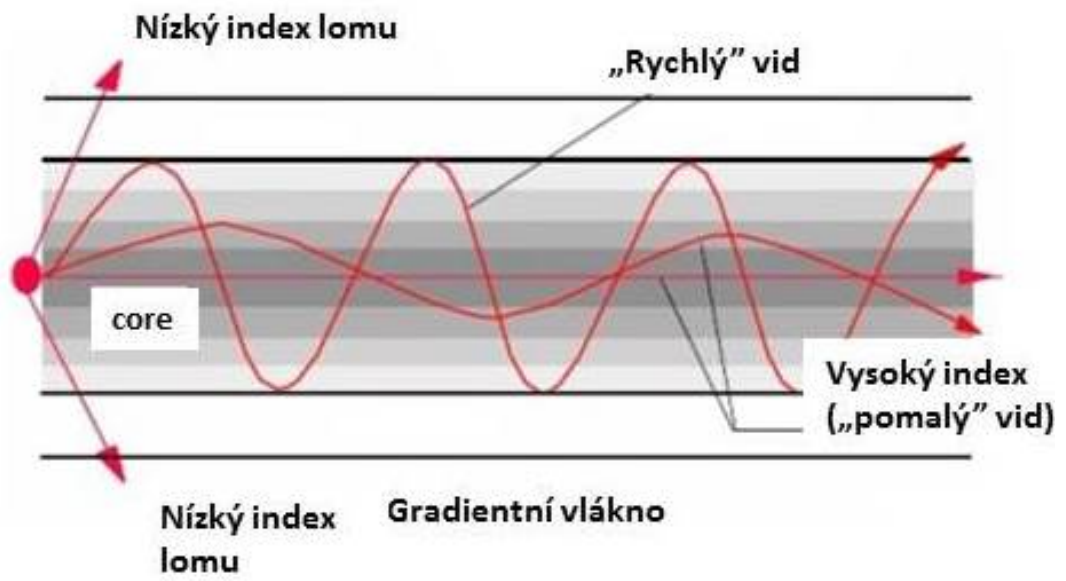
Mnohovidová vlákna s gradientní změnou indexu lomu



Řešení: zpomalit vidy šířící se nejkratší optickou drahou, urychlit vidy šířící se nejdelší optickou drahou.



U mnohovidových vláken s gradientní změnou indexu lomu, *Multi-mode Graded Index (MM-GI)*, není index lomu jádra konstantní; postupně klesá gradientem se vzdáleností od středu jádra. Opticky nejhustší materiál se nachází ve středu jádra vlákna, vrstvy kolem něj představují čím dál nižší hustotu. Čím větší je vzdálenost od středu jádra, tím je nižší hodnota indexu lomu. Nastává refrakce (zalomení) na mnoha vrstvách a odraz záření na rozhraní pláště a vnější vrstvy jádra. Vid, který se šíří podél osy symetrie vlákna, prochází nejkratší optickou drahou, ale jeho rychlost je nejpomalejší z důvodu vysokého indexu lomu ve středu jádra. Naopak vidy, které se šíří delšími trajektoriemi, jsou urychlovány, protože v blízkosti míst četných odrazů je index lomu nižší.

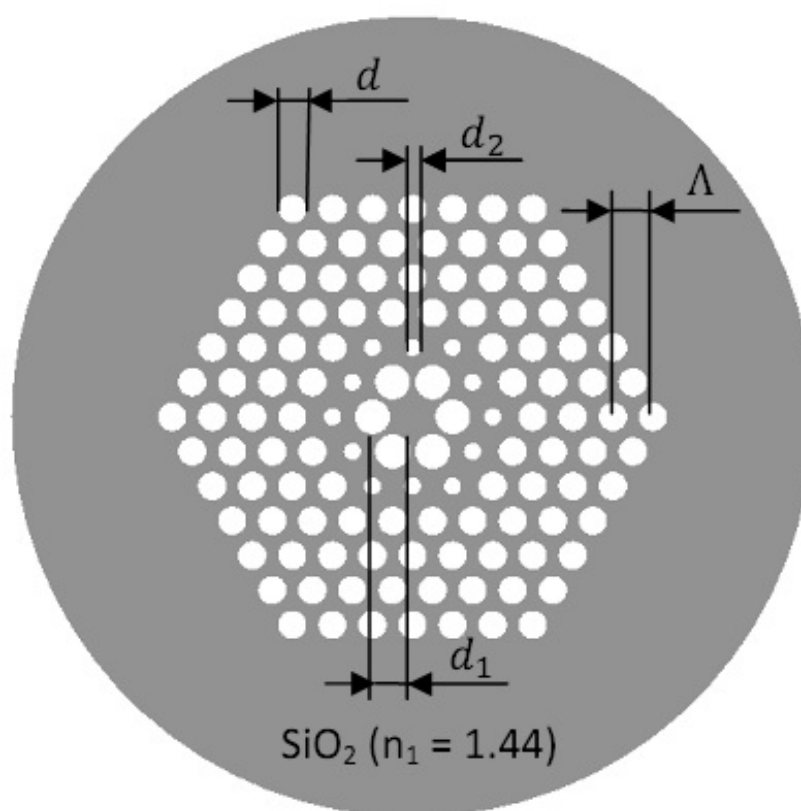


Vidová disperze u mnohovidových vláken s gradientní změnou indexu lomu.

8.2 Kompenzace disperze

Disperzi kompenzující vlákna

DCF (*Dispersion Compensating Fibres*), disperzi kompenzující vlákno se vyznačuje nízkou (zápornou) hodnotou disperzního koeficientu ~ -100 ps/nm/km až ~ -10000 ps/nm/km (existuje mnoho vědeckých prací, které uvádí ještě větší teoretické hodnoty). DCF vlákna jsou schopna kompenzovat kumulující se disperzi. DCF vlákna se liší od standardních konvenčních SMF vláken geometrií a materiálovým složením. Nejpokročilejší návrhy DCF vláken vychází z fotonických mikrostrukturních vláken, známých v literatuře jako *Photonic Crystal Fibres (PCF)*.



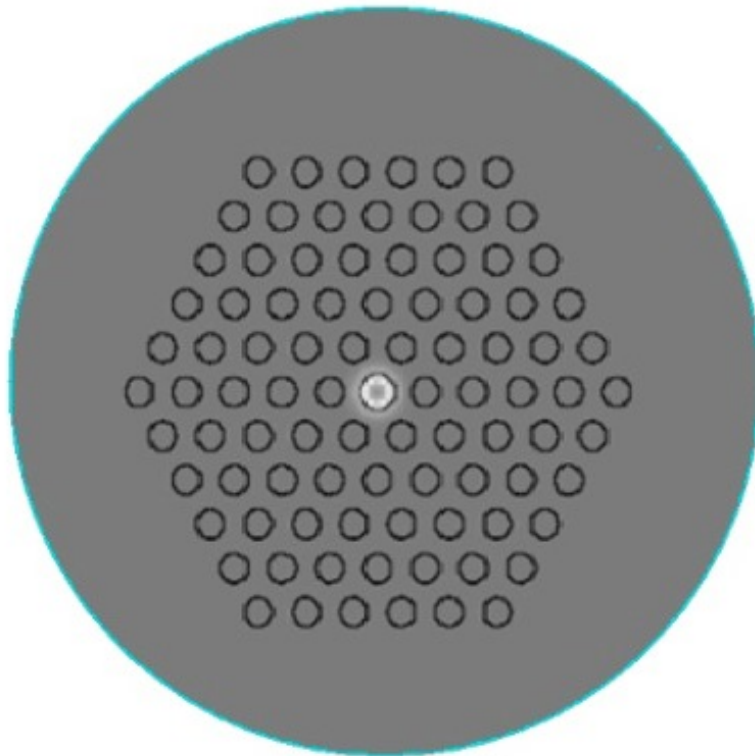
Příkladový návrh (průřez vláknem) disperzi kompenzujícího vlákna a průběh disperze jako funkce vlnové délky.

Některá DCF vlákna jsou navržena pro práci na určité vlnové délce, průběh disperze jako funkce vlnové délky je parabolický, má jedno disperzní minimum a dvě vlnové délky, na kterých je disperze nulová - *zero dispersion wavelength (ZDW)*.



DCF vlákna pro DWDM systémy mohou kompenzovat disperzi ve všech kanálech současně. Širokopásmová DCF se vyznačují vysokou zápornou hodnotou koeficientu disperze, dostupnou v celém telekomunikačním přenosovém pásmu, ve kterém jsou optická vlákna transparentní. Průběh disperze jako funkce vlnové délky

DCF vlákna kopíruje opačný sklon standardních vláken, jejichž disperze se kompenzuje v širokém spektru vlnových délek.



Disperze v širokopásmovém DCF vlákně.

Optovláknová Braggova mřížka

Další možností je použití takzvaných *vláknových Braggových mřížek* – **FBG** v optickém vlákně podél jádra (pozn.: nejedná se o mikrostrukturní Braggovo vlákno).

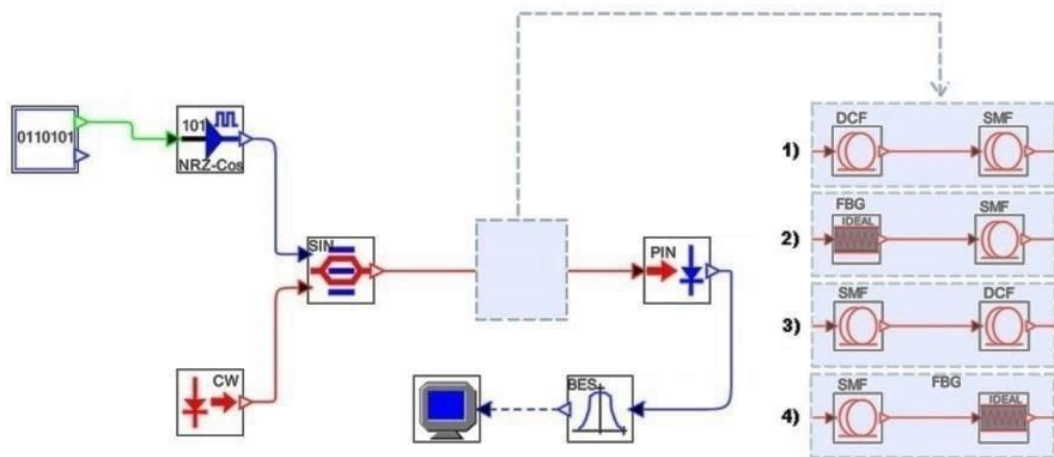
Nevýhody



- Pracuje na určité vlnové délce. Mřížku lze přeladit (změnou periody mřížky), ale pro aplikace u DWDM systémů nestačí jedna mřížka pro potlačení disperze na několika vlnových délkách. Mnoho kanálů = mnoho mřížek.
 - Mřížku lze teplotně přeladit, přesto pořád stačí pro kompenzaci disperze na jedné konkrétní vlnové délce.
 - Počet vlnových délek = počet mřížek.
-

Kompenzační schéma

Lze uvažovat různé varianty pro potlačení disperze: prekompenzací nebo postkompenzací disperze. Odpověď na otázku, která varianta je vhodnější pro danou síť, usnadní numerické simulace optické sítě.



Kompenzační schéma pro optické síť.

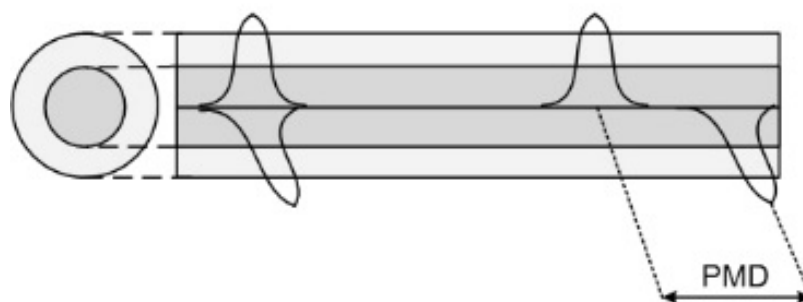
Během procesu potlačení disperze je třeba si dávat pozor, aby nebyla dosažena přesně nulová hodnota disperze. Na jedné straně nulová disperze znamená, že optické pulzy se nebudou rozšiřovat, na druhé straně je nulová disperze jednou z podmínek pro vznik nelineárních jevů, které zkreslují optický přenos. Takovým nelineárním jevem je čtyřvlnné směšování - **FWM** – *Four Wave Mixing*. Proto je optimálním řešením ponechání nízké, ale nenulové disperze, která způsobí zanedbatelné rozšíření pulzů a zároveň zamezí nelineárním jevům.

8.3 PMD – Polarizační vidová disperze

PMD – *Polarization Mode Dispersion*, polarizační vidová disperze vzniká z důvodu odlišné hodnoty indexu lomu pro různé polarizační složky (polarizace v praxi znamená oscilace vektorů E nebo H podél určitého směru), jinými slovy z důvodu jiné hodnoty indexu lomu pro osu „x” a „y”. Rozlišujeme takzvanou rychlou a pomalou osu. Taková látka je anisotropická. PMD obvykle představuje malé hodnoty v řádu několika pikosekund, nicméně i takové hodnoty mohou představovat problém pro vysokorychlostní přenosové systémy.



Nalezení optimálního řešení je problematické, jelikož PMD je náhodným procesem. Existují speciální korektory disperze, které se nasazují pro správný příjem dat. Pro předcházení problému PMD se používají speciální dvojlomná vlákna, která se vyznačují značnou asymetrií.



PMD v optickém vlákně.

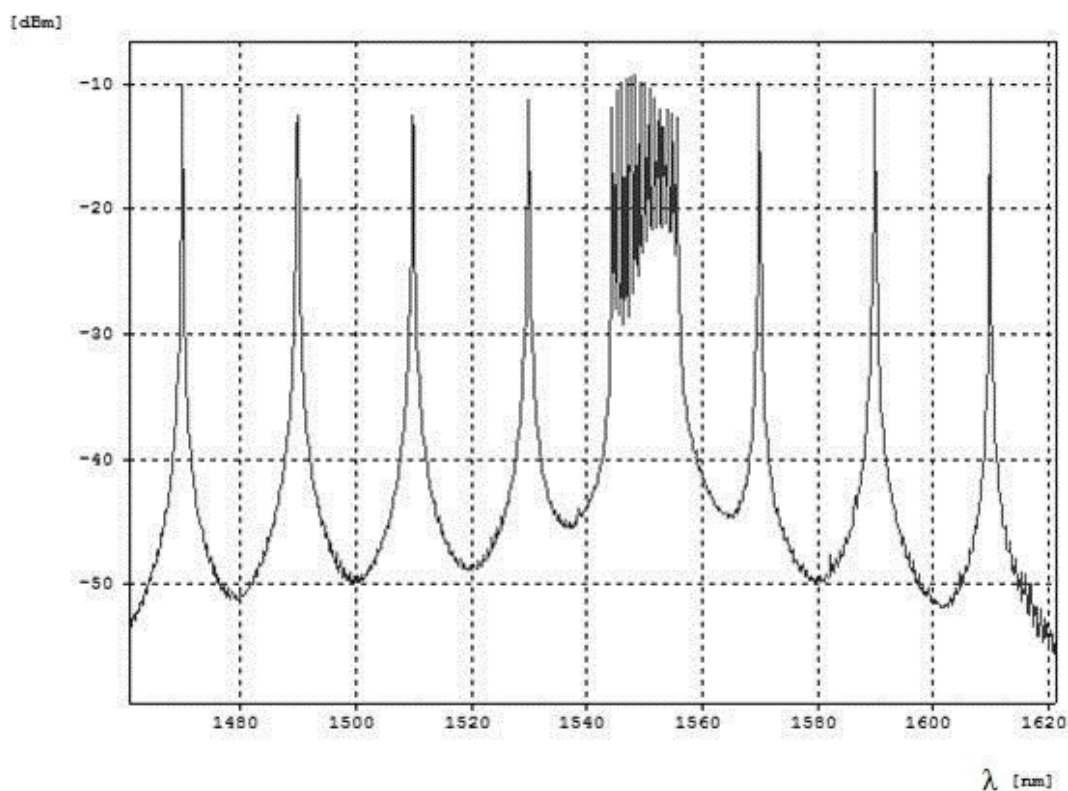
9 Konvergence a upgrade optické sítě

9.1 Konvergence a upgrade optické sítě

Požadavky na větší přenosovou kapacitu a bitovou rychlost vyžadují upgrade optických systémů nebo zprovoznění více systémů na jednom vlákně. Koexistence optických systémů se týká zejména sítí CWDM a DWDM, které mohou sdílet pasivní optickou infrastrukturu.

„DWDM over CWDM“

- CWDM
 - 8 kanálů x10 Gbit/s - 1470 nm - 1610 nm.
- CWDM/DWDM
 - Nahrazení pátého CWDM kanálu (1550 nm).
 - DWDM s 15x10 Gbit/s kanály s rozestupy 100 GHz.
 - Δ faktoru kvality se změní o méně než 0,1 dB.

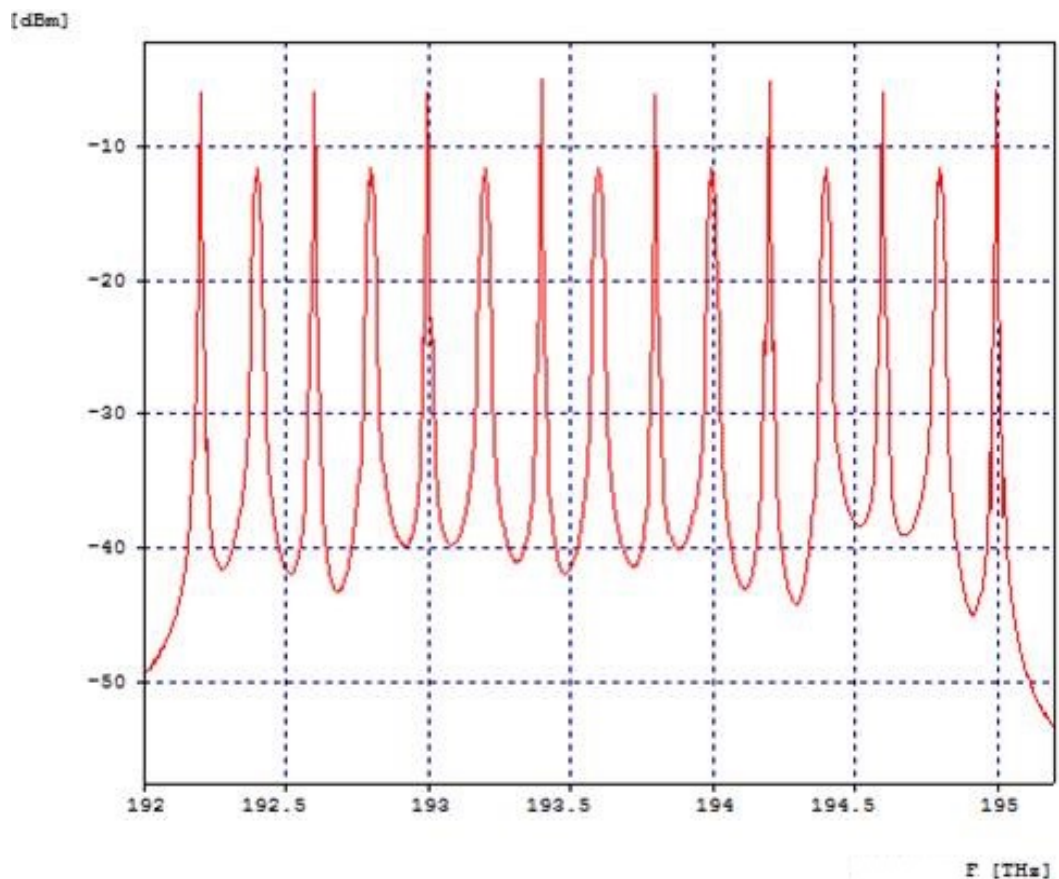


Příkladové řešení systému „DWDM over CWDM“ – rozmístění kanálů.

Hybridní řešení

Hybrid DWDM 10G/40G

- Původně systém 10G DWDM
 - 15x10 Gbit/s, NRZ-OOK, 50 GHz kanálová rozteč.
 - 6x80km SSMF (dvoufázové zesilovače, postkompenzace disperze).
- Hybridní DWDM 10G/40G s prokládáním kanálů
 - Kombinace s 7x40 Gbit/s systémem.
 - Duobinární modulace, modulační formáty P-DPSK, RZ-DQPSK.
 - Vliv 10 Gbit/s kanálů na kanály 40 Gbit/s (přeslechy).
 - Problém se vznikem nevlastní modulační fáze – *Cross Phase Modulation (XPM)*.

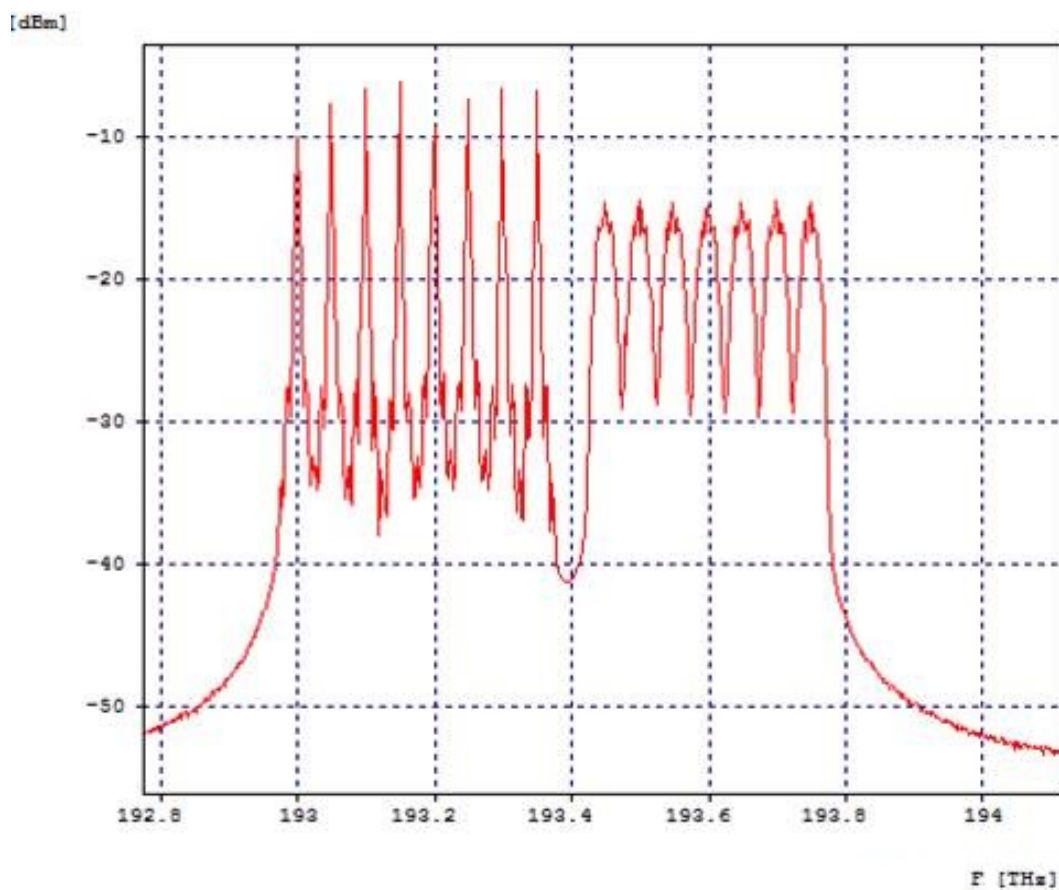


Optické spektrum DWDM s prokládáním kanálů.

Hybridní DWDM systém s 10G/40G a s ochranným oddělovacím pásmem



Spektrální oddělení 10G a 40G systémů ochranným pásmem může vyřešit problém nevlastní modulační fáze a energetických přeslechů z 10G systémů.



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

10 Závěr



FTTx zahrnují optické sítě, podle kapacity a dosahu lze rozlišovat:

- *Passive Optical Networks (PON)* – pasivní optické sítě: jsou levné, ale nabízejí přenosovou rychlost až 10 Gbit/s a dosah optického vlákna v řádu desítek kilometrů.
 - *Active Optical Networks (AON)* – aktivní optické sítě umožňují dosažení bitové rychlosti v řádu Tbit/s s použitím technologie DWDM; pro tyto účely je často zapotřebí splnit následující kritéria:
 - Optimálně vyřešená topologie, optimalizován útlum, potlačená disperze a nelineární jevy -(problematika plánování sítě).
 - Rychlost na kanál aspoň 100 Gbit/s.
 - Zprovoznění alespoň 40 G DWDM over 10 G DWDM.
 - Potenciální koexistence nebo konvergence různých systémů s odlišnou specifikací.
-