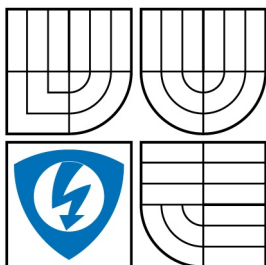


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNologiÍ
ÚSTAV TELEKOMUNIKACÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF TELECOMMUNICATIONS

DWDM V PŘÍSTUPOVÝCH SÍTÍCH

DWDM IN ACCESS NETWORKS

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Bc. RADIM ŠIFTA

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

prof. Ing. MILOSLAV FILKA, CSc.

BRNO 2011



VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

Ústav telekomunikací

Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor
Telekomunikační a informační technika

Student: Bc. Radim Šifta
Ročník: 2

ID: 72872
Akademický rok: 2010/2011

NÁZEV TĚMATU:

DWDM v přístupových sítích

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Navrhněte simulační model sítě xWDM v prostředí OptiSystem 9.0. Proveďte srovnání PON, GPON, WDM PON. Na realizované části sítě, simulační výsledky, srovnajte s reálnými výsledky měření na síti. Proveďte rozbor přenosových parametrů a kvality sítě.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

- [1] FILKA, M. Optoelektronika pro telekomunikace a informatiku. CENTA, Brno 2009.
- [2] FILKA, M. Přenosové média. Skripta laboratoře. VUT FEKT, Brno 2003.
- [3] TRULOVE, J. Síť LAN. Mc.Graw - Hill, N.Y. 2006. (Český překlad - Grada Publ.)

Termín zadání: 7.2.2011

Termín odevzdání: 26.5.2011

Vedoucí práce: prof. Ing. Miloslav Filka, CSc.

prof. Ing. Kamil Vrba, CSc.
Předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

Abstrakt:

Cílem této diplomové práce je vysvětlení problematiky optických přístupových sítí s vlnovým multiplexem, hlavním záměrem je demonstrace rozdílu mezi simulací a reálným měřením. Práce je rozdělena do několika základních tematických oblastí. V úvodu práce je nastíněno rozdělení základních multiplexních systémů, jsou zde diskutována základní známá řešení vlnových multiplexů a jejich možných kombinací. Následující kapitola se zabývá aktivními prvky, které jsou nezbytnou součástí xWDM systémů, jako jsou optické lasery, detektory a zesilovače. Další kapitola je zaměřena na pasivní prvky, zejména na pasivní filtry, které tvoří klíčovou část vlnových multiplexů. Metody měření C/DWDM sítí jsou rozebrány v následující části práce. V další kapitole jsou popsány používané topologie aktivních a pasivních optických sítí. Předposlední část práce je tvořena návrhy simulovaných modelů GPON a WDM-PON sítí a porovnáním jejich přenosových parametrů. Závěrečná část práce prezentuje výsledky praktického měření experimentální optické přístupové sítě s vlnovým multiplexem, současně jsou tyto výsledky porovnány s výstupy simulací.

Abstract:

The aim of this master's thesis is an explanation of the problem of optical access networks with wavelength division multiplex, main purpose is to demonstrate the difference between simulation and real measurement. The thesis is divided into several basic thematic areas. At the beginning of thesis is outlined the basic division of multiplexing system, there are discussed the basic solutions of wavelength multiplexes and their possible combinations. The next chapter deals with the active elements, which are an essential part of xWDM systems such as optical lasers, detectors and amplifiers. The following chapter is focused on the passive elements, especially on the passive filters, which form a key part of the wavelength multiplex. Methods of measurement C/DWDM networks are discussed in the next part of thesis. The next chapter describes the topology used by active and passive optical networks. Penultimate part of this thesis consists of designs simulated models PON and WDM-PON networks and comparing their transmission parameters. The final part presents the results of practical measurements of experimental optical access network with wavelength division multiplex, the results are simultaneously compared with results of simulations.

Klíčová slova:

Optická přístupová síť, vlnový multiplex, přenosový kanál, simulace, optický spektrální analyzátor.

Keywords:

Optical access network, wavelength division multiplex, transmission channel, simulation, optical spectrum analyzer.

Bibliografická citace práce

ŠIFTA, R. *DWDM v přístupových sítích*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2011. 99 s. Vedoucí diplomové práce prof. Ing. Miloslav Filka, CSc..

Prohlášení autora o původnosti práce

Prohlašuji, že svou diplomovou práci na téma „DWDM v přístupových sítích“ jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této diplomové práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

V Brně dne.....

.....

podpis autora

Poděkování

Děkuji vedoucímu diplomové práce prof. Ing. Miloslavu Filkovi, CSc., za užitečnou metodickou pomoc a cenné rady při zpracování diplomové práce. Zvláštní poděkování patří Ing. Janu Látalovi a Radku Pobořilovi z Vysoké školy báňské – technické univerzity Ostrava, Fakultě elektrotechniky a informatiky, Katedře telekomunikační techniky za poskytnutí zázemí při měření a za odborné rady. Další poděkování patří Ing. Miroslavu Hladkému ze společnosti PROFiber Networking s.r.o., za poskytnutí technického zázemí a odborných informací potřebných pro zpracování diplomové práce.

V Brně dne.....

.....

podpis autora

Obsah

Úvod.....	10
1. Rozdělení multiplexních systémů používaných v optoelektronice.....	11
2. Vlnové multiplexy.....	12
2.1 Technologie WWDM.....	12
2.2 Technologie DWDM.....	13
2.3 Technologie CWDM.....	15
2.4 Kombinace technologií CWDM a DWDM.....	17
2.4.1 Provoz xWDM systémů na jednom vlákně.....	17
3. Aktivní prvky.....	19
3.1 Zdroje optického záření.....	19
3.1.1 DFB Lasery.....	20
3.1.2 FP Lasery.....	21
3.2 Detektory optického záření.....	22
3.3 Optické zesilovače.....	23
3.3.1 EDFA zesilovač.....	23
3.3.2 Ramanovský zesilovač.....	24
4. Pasivní prvky.....	26
4.1 Muldexy.....	26
4.1.1 Vlnovody uspořádané do mřížky AWG.....	27
4.1.2 ROADM.....	31
4.2 Optické cirkulátory.....	33
4.3 Interleaver.....	33
4.4 Děliče.....	34
4.5 Ostatní aktivní a pasivní prvky.....	35
5. Měření C/DWDM systémů na úrovni přístupových sítí.....	36
5.1 Měření DWDM systémů.....	36
5.1.1 Optický spektrální analyzátor (OSA).....	38
5.1.2 Měřič vlnových délek.....	40

5.2 Měření CWDM systémů.....	41
5.3 Měření BER.....	42
5.3.1 Q-faktor.....	42
5.3.2 Bitová chybovost.....	43
5.3.3 Diagram oka.....	44
6. Základní uspořádání optických přístupových sítí.....	45
6.1 Aktivní optická síť (AON).....	46
6.2 Pasivní optická síť (PON).....	47
6.3 WDM PON.....	49
7. Simulace.....	53
7.1 GPON.....	53
7.1.1 Popis navrhované topologie GPON.....	53
7.1.2 Analýza přenosových parametrů.....	55
7.2 WDM-PON.....	59
7.2.1 Popis navrhované topologie WDM-PON.....	59
7.2.2 Analýza přenosových parametrů.....	62
7.3 Srovnání GPON x WDM-PON.....	69
8. Praktické měření WDM-PON.....	71
8.1 Popis experimentálního pracoviště.....	71
8.2 Měřicí přístroje.....	76
8.3 Soubor měřících testů.....	77
8.3.1 Měření optickým spektrálním analyzátozem OSA.....	77
8.3.2 Měření výkonu širokopásmového optického signálu.....	82
8.3.3 Měření útlumu trasy reflektometrickou metodou OTDR.....	83
8.3.4 Měření kvality služeb.....	85
8.4 Porovnání výsledků měření se simulacemi.....	88
9. Závěr.....	92
Seznam použitých zdrojů.....	93
Seznam použitých zkratk.....	96
Seznam příloh.....	99

Seznam Obrázků:

Obr. 2.1:	Princip vlnového multiplexu.....	12
Obr. 2.2:	Rastry DWDM [3].....	14
Obr. 2.3:	Využití pásma – kombinace DWDM + CWDM.....	17
Obr. 3.1:	a) FP laser. b) DFB laser [22].....	20
Obr. 3.2:	Struktura DFB laseru.....	21
Obr. 3.3:	Struktura FP laseru.....	22
Obr. 3.4:	EDFA zesilovač.....	24
Obr. 3.5:	Ramanovský zesilovač.....	25
Obr. 4.1:	AWG.....	28
Obr. 4.2:	Příklad ROADM.....	33
Obr. 4.3:	Aplikace optického cirkulátoru.....	33
Obr. 4.4:	Interleaver [29].....	34
Obr. 4.5:	Planární dělič.....	35
Obr. 4.6:	Fúzní dělič.....	35
Obr. 5.1:	OSA s dvoustupňovým monochromátorem [4].....	39
Obr. 5.2:	Michelsonův interferometr [4].....	41
Obr. 5.3:	Diagram oka.....	44
Obr. 6.1:	Základní funkční celky tvořící přístupovou síť.....	46
Obr. 6.2:	WDM-PON s využitím směrové odbočnice AWG.....	50
Obr. 6.3:	WDM-PON s využitím kombinace AWG a děličů.....	51
Obr. 6.4:	WDM-PON s využitím FP laserů v ONT jednotkách.....	52
Obr. 7.1:	Jednotka OLT u GPON.....	54
Obr. 7.2:	Optická distribuční síť u GPON.....	54
Obr. 7.3:	Vnitřní uspořádání ONT jednotky u GPON.....	55
Obr. 7.4:	Výstupy měřičů optického výkonu ve směru OLT -> ONT: a) před optickým vláknem (PM1), b) za optickým vláknem (PM2), c) za děličem... (PM3).....	55
Obr. 7.5:	Výstupy měřičů optického výkonu ve směru ONT -> OLT: a) na výstupu ONT jednotky (PM4), b) za děličem (PM5), c) za vláknem (PM6).....	56
Obr. 7.6:	Diagram oka na straně OLT.....	56
Obr. 7.7:	Diagram oka na straně ONT.....	57

Obr. 7.8:	Náměr OSA a) před děličem (OSA1), b) za děličem (OSA2).....	58
Obr. 7.9:	Náměr OTDV v sestupném směru: a) před děličem (OTDV1), b) za děličem (OTDV2).....	58
Obr. 7.10:	Náměr OTDV ve vzestupném směru: a) před děličem (OTDV3), b) za děličem (OTDV4).....	59
Obr. 7.11:	Jednotka OLT u WDM.PON.....	60
Obr. 7.12:	Vnitřní zapojení subsystému přijímače v OLT.....	61
Obr. 7.13:	Optická distribuční síť WDM-PON.....	61
Obr. 7.14:	Vnitřní zapojení subsystému jednotky ONT.....	62
Obr. 7.15:	Zapojení ONT jednotek.....	62
Obr. 7.16:	Výkonové úrovně optického signálu ve směru OLT -> ONT: a) na vstupu AWG (PM2), b) na výstupu AWG (PM3), c) za vláknem (PM5), d) na vstupu ONT (PM7).....	63
Obr. 7.17:	Výkonové úrovně optického signálu ve směru ONT -> OLT: a) na výstupu ONT (PM8), b) na výstupu AWG (PM6), c) za vláknem (PM4), d) na vstupu OLT (PM1).....	64
Obr. 7.18:	Diagram oka: a) na straně OLT, b) na straně ONT.....	65
Obr. 7.19:	Náměr OSA za multiplexerem v sestupném směru (OSA3).....	66
Obr. 7.20:	Náměr OSA za demultiplexerem pro jeden kanál v sestupném směru (OSA6).....	66
Obr. 7.21:	Náměr OSA za multiplexerem ve vzestupném směru (OSA8).....	67
Obr. 7.22:	Náměr OSA za demultiplexerem pro jeden kanál ve vzestupném směru (OSA2).....	67
Obr. 7.23:	Výstupy WDM analyzátoru: a) v sestupném směru (WDM Analyzer 1), b) ve vzestupném směru (WDM Analyzer 3).....	68
Obr. 8.1:	Konektivita laboratoře optických přístupových sítí katedry telekomunikační techniky 440.....	71
Obr. 8.2:	Schéma rozvodu optických vláken v laboratoři.....	72
Obr. 8.3:	Vybavení racku N311.....	73
Obr. 8.4:	WDM-PON LG-Ericsson EAST 1100.....	74
Obr. 8.5:	AWG filtr.....	75
Obr. 8.6:	LG-Nortel EARU 1112.....	75
Obr. 8.7:	Zapojení děliče na optickém patch panelu.....	78
Obr. 8.8:	Schéma měření OSA.....	79

Obr. 8.9:	Náměr OSA v sestupném směru.....	79
Obr. 8.10:	Ukázka reportu pro sestupný směr.....	80
Obr. 8.11:	Ukázka grafického rozhraní OSA.....	81
Obr. 8.12:	Ukázka reportu pro vzestupný směr.....	81
Obr. 8.13:	Schéma měření výkonu optického signálu.....	82
Obr. 8.14:	Schéma měření optickým reflektometrem.....	83
Obr. 8.15:	Závislost útlumu na délce vlákna: a) varianta 1, b) varianta 2, c) varianta 3.....	84
Obr. 8.16:	Výsledky reportu OTDR pro 3. variantu.....	85
Obr. 8.17:	Schéma zapojení měření kvality služeb EtherSAM.....	86
Obr. 8.18:	Porovnání spekter OSA simulace/měření v sestupném směru.....	90
Obr. 8.19:	Porovnání spekter OSA simulace/měření ve vzestupném směru....	91

Seznam Tabulek

Tab. 2.1:	Tabulka vlnových délek části pásma „C“ DWDM 100 GHz dle ITU-T G.694.1 [28].....	15
Tab. 2.2:	Tabulka vlnových délek CWDM podle standardu ITU-T G.694.2 [28].....	16
Tab. 4.1:	Parametry AWG [21].....	29
Tab. 4.2:	Závislost útlumu na počtu portů [26].....	34
Tab. 5.1:	Hlavní měřené parametry v systémech DWDM [4].....	37
Tab. 5.2:	Požadovaný odstup signál/šum (OSNR) [4].....	38
Tab. 5.3:	Parametry RBW u OSA [4].....	39
Tab. 5.4:	Parametry ORR u OSA [4].....	40
Tab. 7.1:	Porovnání hodnot BER a Q faktoru.....	70
Tab. 8.1:	Seznam měřících přístrojů.....	76
Tab. 8.2:	Parametry jednotlivých kanálů pro sestupný směr – report.....	80
Tab. 8.3:	Parametry jednotlivých kanálů vzestupný směr – report.....	82
Tab. 8.4:	Teoretický útlum trasy WDM-PON.....	83
Tab. 8.5:	Konfigurace služeb testu EtherSAM.....	86
Tab. 8.6:	Výsledky testu EtherSAM.....	87

Úvod

Od dob, kdy proběhly první úspěšné datové přenosy, uplynulo již mnoho let a komunikační technologie se dostaly do zcela jiných rozměrů. Avšak po celou dobu vývoje informačních a komunikačních systémů se řeší neustále stejný problém a tím je nedostačující šířka pásma. Metalické telekomunikační systémy se v mnoha případech dostaly na hranici svých možností a začaly být nahrazovány optickými kabely. Ty vytlačovaly metalické kabelážní systémy postupně z páteřních, transportních, metropolitních a dnes dokonce i z přístupových sítí. Vzhledem k tomu, že požadavky na šířku přenosového pásma v dnešní době rostou exponenciálně (a to především díky požadavkům koncových uživatelů na využívání nejmodernějších služeb např. IPTV (TV over Internet Protocol) apod.), začaly být i optické kabely z hlediska špatně využitě šířky pásma nedostačující. Proto bylo nutné tuto problematiku řešit multiplexováním. Ze všech dosud známých optoelektronických multiplexních systémů se nejvíce ujaly technologie DWDM (Dense Wavelength Division Multiplex) a CWDM (Coarse Wavelength Division Multiplex). Ty byly z počátku nasazovány do páteřních sítí. Postupně se začaly rozšiřovat i do sítí transportních a metropolitních. Je pouze otázkou času, kdy technologie CWDM a DWDM proniknou i do sítí přístupových. V České republice se nachází jediný systém tohoto druhu na Vysoké škole báňské – Technické univerzitě Ostrava, Fakultě elektrotechniky a informatiky, Katedře telekomunikační techniky (dále jen VŠB-TUO).

Práce je rozdělena do tří základních částí. První část je teoretická, uvádí základní principy vlnových multiplexů, aktivních a pasivních prvků, základní typy optických přístupových sítí a principy měření sítí s vlnovým multiplexem.

Druhá část práce se zabývá simulováním optických přístupových sítí GPON a WDM-PON v softwarovém prostředí OptiSystem 9.0. Obě navrhované topologie jsou analyzovány z hlediska přenosových parametrů a následně porovnány.

Třetí část práce je zaměřena na praktické měření optické přístupové sítě WDM-PON na experimentálním pracovišti VŠB-TUO. Bylo provedeno měření základních parametrů a kvality služeb, jejichž výsledky jsou v práci zpracovány a analyzovány. Závěrem je provedeno celkové porovnání mezi simulováním a skutečným měřením optických přístupových sítí s vlnovým multiplexem.

1. Rozdělení multiplexních systémů používaných v optoelektronice

Časový multiplex

Je založen na principu přidělení signálu k určitému časovému intervalu, na němž pracuje vysílač i přijímač. Přenosová cesta je pravidelně, podle předem známého a definovaného postupu, přidělována jednotlivým dílčím kanálům na předem známé a definované časové úseky.

Frekvenční multiplex

Přenosový kanál poskytuje širší frekvenční pásmo, než které je potřeba pro jednu komunikaci. Je možné tento kanál rozdělit na podkanály a tyto pak provozovat nezávisle. Vytváří se tzv. skupiny - vznikají přenesením jednotlivých signálů do vyšších kmitočtových pásem. Takto vytvořené skupiny se namodulují na optický signál. Možnosti tohoto multiplexu jsou omezeny parametry zdroje záření.

Elektronický multiplex

Po optickém vlákně je přenášen namísto binárního signálu signál vícestavový. Přenosová rychlost se tím zvětší n -krát.

Prostorový (vláknový) multiplex

Je ze všech multiplexních technik nejjednodušší a je realizován navyšováním počtu optických vláken pro přenos různých signálů.

Vlnový multiplex

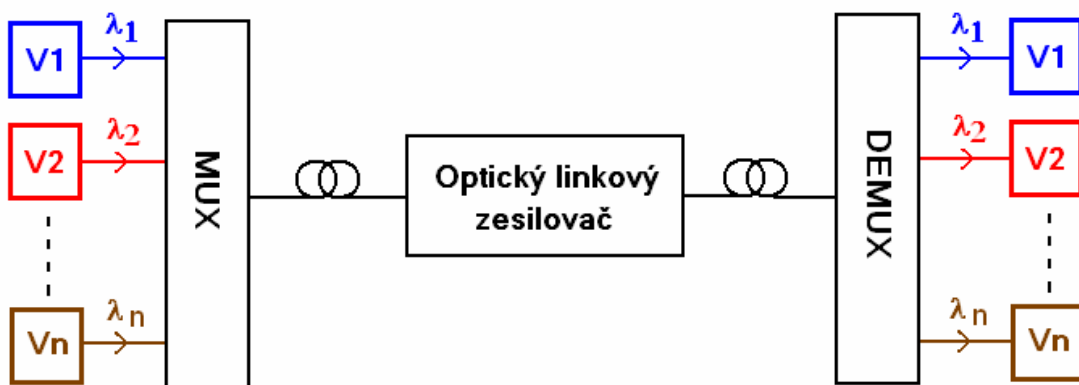
Více optických signálů je současně přenášeno v jednom optickém vlákně s použitím rozdílných vlnových délek, které jsou vysílány různými zdroji.

Hybridní multiplex

Využívá kombinace elektronického a vlnového multiplexu. Teoreticky tak umožňuje maximální využití přenosové kapacity vláken.

2. Vlnové multiplexy

WDM je založeno na myšlence sdružit několik optických kanálů, které bylo dříve nutné přenášet každý jedním vláknem, do vlákna jednoho na základě vlnového, čili v podstatě frekvenčního oddělení. Na každou z nosných frekvencí je ve vysílači namodulována přenášená informace. V multiplexeru se zkombinuje všech n příspěvkových optických kanálů do jednoho vlákna. Pokud chceme realizovat n kanálový spoj, je zapotřebí kromě jednoho multiplexeru a demultiplexeru také n modulátorů, zdrojů světla a demodulátorů. Na optické trase se nasazují podle vzdálenosti koncových zařízení optické zesilovače. V přijímacím linkovém zakončení dojde k jeho demultiplexování podle frekvenčních pásem na signály v okolí jednotlivých nosných frekvencí a ty jsou pak přijaty, vyhodnoceny a dále zpracovávány jednotlivými přijímači. Na rozhraní mezi optickým demultiplexerem a přijímači končí bitová a protokolová nezávislost.



Obr. 2.1: Princip vlnového multiplexu.

2.1 Technologie WWDM

Technologie tzv. „širokého“ vlnového multiplexu WWDM (Wide Wavelength Division Multiplex). Patří mezi starší techniky, avšak dodnes je občas používána, protože je cenově dostupnější než varianta CWDM či DWDM a v některých případech je dostačující. Nejčastěji se používají pouze čtyři vlnové délky v oblasti kolem 850 nm (u vícevidových vláken) a v oblasti kolem 1310 nm (jednovidová vlákna) [12]. Odstup mezi jednotlivými vlnovými délkami je >20 nm. Technologie WWDM je nejčastěji využívána pro přenos Gbit a 10Gbit Ethernetu [13].

2.2 Technologie DWDM

Technologie tzv. „hustého“ vlnového multiplexu DWDM patří mezi nejdokonalejší systémy, které jsou v optoelektronice používány. Odstup mezi jednotlivými kanály je pouze 0,8 nm, teoreticky až 0,1 nm (ultra DWDM). Z toho plyne, že umožňuje přenášet v jednom optickém vlákne desítky kanálů. Kanály jsou optickým vláknem přenášeny paralelně a nezávisle na sobě. To několikanásobně zvyšuje přenosovou kapacitu optického spoje. Dnešní systémy DWDM umožňují přenášet 2,5 až 10 Gbit/s v jednom optickém kanále a provozovat běžně 96 těchto kanálů na jednom fyzickém spoji. DWDM je technologie první vrstvy a je nezávislá na přenášeném protokolu. Je možno multiplexovat pomalé protokoly, až po vysokorychlostní 10Gbit Ethernet. Takto mohou být vedle sebe přenášeny různé protokoly a multiplexovány společně do jednoho vlákna.

Nástup této technologie byl umožněn zejména díky laserům DFB (Distributed FeedBack laser) s extrémně úzkou spektrální čarou, dále EDFA (Erbium Doped Fiber Amplifier) zesilovači a vysoce selektivními spektrálními filtry. Tato zařízení jsou velice citlivá na kmitočtovou a teplotní stabilitu. To je jedním z důvodů, proč je tato technologie velice nákladná [9].

Doporučení ITU-T G.694.1 „Spectral grids for WDM applications: DWDM frequency grid“ specifikuje jednotlivé přenosové kanály v oblasti vlnových délek v rozsahu od 1490 nm (200,95 THz) do 1620 nm (186,00 THz), (tzv. S, C a L pásmo). DWDM rastr vychází z normalizované pilotní frekvence 193,1 THz [13]. Od této frekvence se odvíjí rastr s rozestupy jednotlivých kanálů v rozsahu 100 GHz, 50 GHz, 25 GHz (ultra DWDM), ve vývoji je už i 12,5 GHz [3]. Pro správnou funkci a kvalitu přenosu je nutné, aby se vlnová délka neodchylovala od předepsané vlnové délky o více než 0,2 odstupu nosných, což odpovídá toleranci +/- 0,16 nm pro 100 GHz rastr [13].

Tab. 2.1: Tabulka vlnových délek části pásma „C“ DWDM 100 GHz dle ITU-T G.694.1 [28].

Frekvence [THz]	Kanál DWDM dle ITU-T	λ [nm]
192,5	925	1557,36
192,6	926	1556,55
192,7	927	1555,75
192,8	928	1554,94
192,9	929	1554,13
193,0	930	1553,33
193,1	931	1552,52
193,2	932	1551,72
193,3	933	1550,92
193,4	934	1550,12
193,5	935	1549,32
193,6	936	1548,51
193,7	937	1547,72
193,8	938	1546,92
193,9	939	1546,12
194,0	940	1545,32
194,1	941	1544,53
.....
195,2	952	1535,82
195,3	953	1535,04
195,4	954	1534,25
195,5	955	1533,47
195,6	956	1532,68
195,7	957	1531,90
195,8	958	1531,12
195,9	959	1530,33

2.3 Technologie CWDM

Tzv. „Hrubý“ multiplex CWDM, tato technologie vznikla jako levnější varianta DWDM. Prvky používané u CWDM nevyžadují tak přesné a technologicky náročné prvky jako u DWDM. Odstup mezi jednotlivými kanály je podstatně větší. Standard ITU-T G-694.2 – „Spectral grids for WDM applications: CWDM wavelength grid“ definuje velikost odstupe jednotlivých kanálů vlnových délek pro použití CWDM technologie tak, aby bylo možné jako zdroje záření použít laserové diody bez nároku na chlazení. Jednotlivé vlnové délky byly také zvoleny tak, aby byly kompatibilní s klasickými používanými vlnovými délkami 1310 nm a 1550 nm [28].

Standard G-694.2 předpokládá použití nechlazených laserových zdrojů s celkovou tolerancí od nominální střední vlnové délky v rozsahu +/- 6–7 nm. Vzhledem k toleranci, která je povolena standardem, se v praxi ustálila šířka pásma v rozsahu

6,5 nm, jak pro používané CWDM filtry, tak i pro toleranci vlnových délek laserových diod pro celý rozsah pracovních teplot [28].

Další standard pro technologii CWDM – ITU-T Recommendation G. 695 „Optical interfaces for coarse wavelength division multiplexing applications“ popisuje doporučené parametry optického rozhraní z důvodu vzájemné kompatibility zařízení CWDM různých výrobců [28].

CWDM umožňuje využití 18 kanálů, avšak pouze při použití vlákna typu G.652.C/D, které umožňují provoz v celém rozsahu vlnových délek a využívat tak všechna přenosová pásma, včetně rozšířeného pásma E, které je mezi vlnovými délkami 1360 - 1460 nm [28]. Při použití běžného vlákna G.652.A/B je možné využít přenosových kanálů jen 12.

Tab. 2.2: Tabulka vlnových délek CWDM podle standardu ITU-T G.694.2 [28].

Kanál CWDM dle ITU-T	Nominální vlnová délka [nm]	Pásmo
27	1270	O
29	1290	
31	1310	
33	1330	
35	1350	
37	1370	E
39	1390	
41	1410	
43	1430	
45	1450	
47	1470	S
49	1490	
51	1510	
53	1530	C
55	1550	
57	1570	
59	1590	
61	1610	L

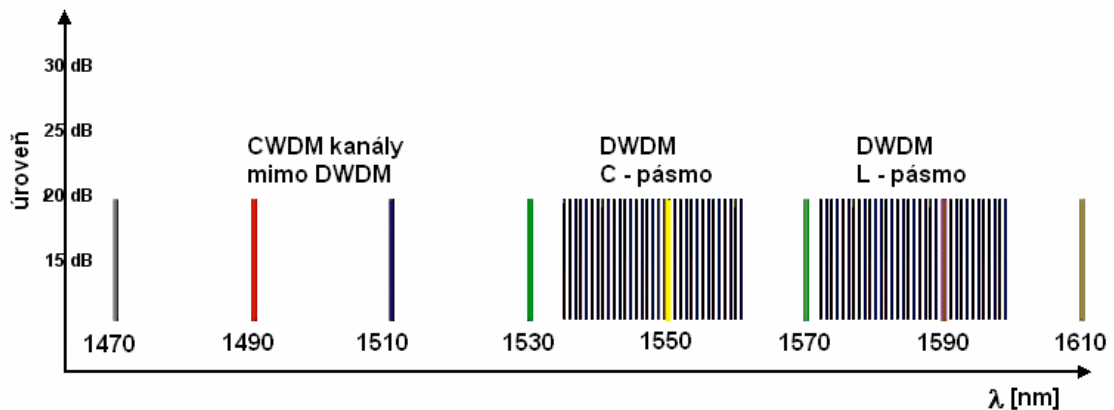
CWDM se zatím nejvíce uplatňuje v metropolitních sítích, kde se s výhodou může kombinovat s technologií DWDM a vytvářet tak topologie s velkými možnostmi šířky pásma. CWDM umožňuje přenášet v každém kanále Gbit Ethernet do vzdálenosti až 80 km, STM-16 s přenosovou rychlostí 2,5 Gbit/s do vzdálenosti 50 km [28].

Hlavní výhody CWDM:

- Snadné nasazení na stávající optické trasy.
- Nízká cena technologie v porovnání s DWDM.
- Nižší energetické a prostorové nároky v porovnání s DWDM.
- CWDM kanál může být použit pro přenos až 8 DWDM kanálů.
- Jednoduchý management.
- Široká nabídka vysílačů jako SFP, XFP apod. pro různé vzdálenosti.
- Tolerance střední vlnové délky kanálu: 6 - 7 nm.

2.4 Kombinace technologií CWDM a DWDM

Je-li kapacita CWDM kanálů nedostačující, je možné využít kombinace s technologií DWDM. Technologie DWDM se běžně používá v pásmech C + L, pro použití v kombinaci s CWDM je však vhodné použít pouze C pásmo. Při použití osmi-kanálového CWDM multiplexeru tedy máme k dispozici pro budoucí rozšíření jen dva kanály, kanál 53 a 55. Budeme – li uvažovat šířku CWDM kanálu 20 nm, pro použití systému DWDM je prakticky v tomto kanálu č. 55 (1551 nm) k dispozici 16 kanálů s odstupem 100 GHz. V kanálu č. 53 je v C pásmu k dispozici prakticky jen 8 kanálů DWDM s odstupem 100GHz. V případě nasazení DWDM systému na osmi-kanálovém CWDM systému, budeme mít k dispozici 6 CWDM kanálů + 24 DWDM kanálů [28].



Obr. 2.3: Využití pásma – kombinace DWDM + CWDM.

2.4.1 Provoz xWDM systémů na jednom vlákne

V případě použití 2 vláken, kdy každé je použito pro opačný směr přenosu, není třeba řešit, jakým způsobem oddělit přijímaný a vysílaný signál - každý má své vlákno. V případě že máme k dispozici pouze jedno vlákno, je nutné tuto záležitost řešit, neboť by mohlo dojít k vzájemným přeslechům, zkreslením apod. To není složité, použijeme-

li CWDM, nebo DWDM bez použití EDFA zesilovače. Využívají se sousední vlnové délky proti sobě, jak pro příjem, tak i pro vysílání a zvýšíme tím i izolaci mezi jednotlivými kanály. Počet přenosových kanálů, které jsou k dispozici tím pádem klesne na polovinu počtu použitých vlnových délek.

Pro delší trasy a větší počet kanálů DWDM, kdy je nutné nasazení EDFA zesilovačů, je nutné vhodně oddělit směr vysílání a příjmu. K oddělení příjmu/vysílání v DWDM je možné použít 4 způsoby [28]:

- Pokud provozujeme CWDM systémem, a stačí nám pouze dalších 8 DWDM kanálů, lze na rozdělení směrů příjem/vysílání použít přímo vlastní CWDM kanály. Pro jeden směr použijeme CWDM kanál 53 a pro druhý směr kanál 55.
- Pokud chceme provozovat DWDM systém na jednom vlákne, je jedním z nejjednodušších způsobů použití optického cirkulátoru, který umí rozdělit obousměrný signál z jednoho do dvou vláken a je vlnově nezávislý. Nevýhodou je, že jeho použití spolu s EDFA zesilovači přináší vlivem zpětného rozptylu světla ve vlákne zhoršení optického šumu v trase a je tedy tak pro delší vzdálenosti s více EDFA zesilovači nepoužitelný.
- Další možností je použití pásmového filtru, který rozdělí celé pásmo DWDM na dvě poloviny. Horní polovina pásma je určena pro jeden směr přenosu a dolní polovina pásma pro opačný směr. Toto řešení patří mezi nejvíce používané. Nevýhodou ve srovnání s následující metodou je nižší izolace mezi kanály.
- Nejlepší možností je použití tzv. interleaveru. Ten rozdělí původní DWDM pásmo s odstupem 100 GHz na dvě pásma s odstupem 200 GHz. Zvýší se tak izolace mezi jednotlivými kanály, avšak za cenu dražší použité optické součástky.

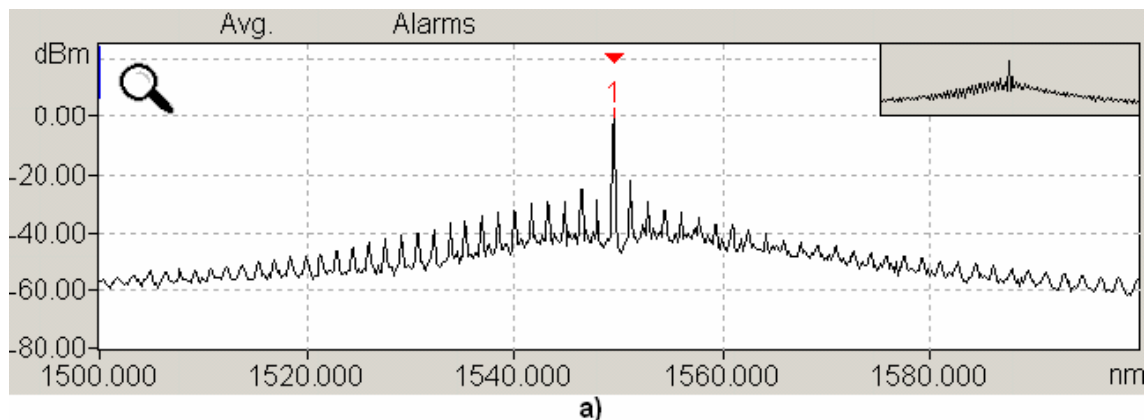
V systémech C/DWDM se používají optická vlákna s nenulovou disperzí. V opačném případě se šíří kanály stejnou rychlostí a dochází ke vzájemnému ovlivňování, čímž dochází ke vzniku intermodulačních produktů. Proto je výhodné při nasazování systémů C/DWDM použít optická vlákna G.656 a G.657.

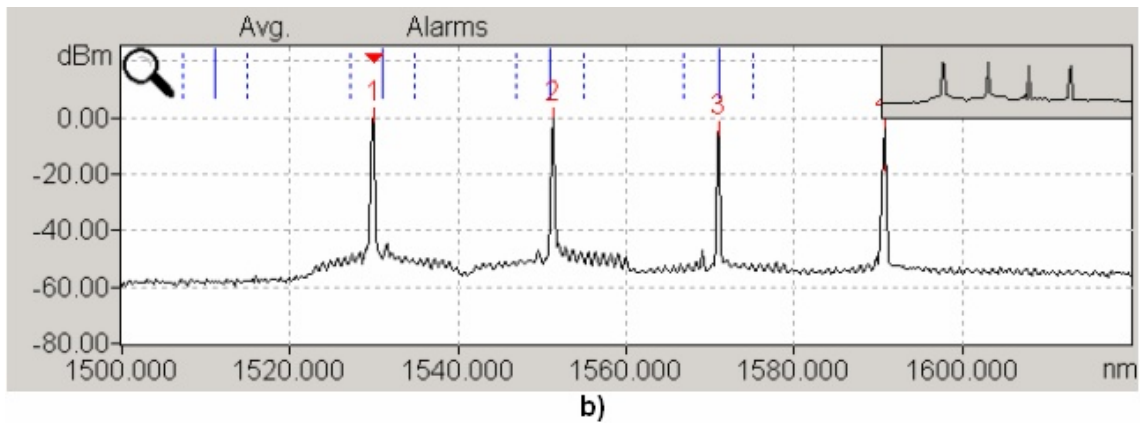
3. Aktivní prvky

3.1 Zdroje optického záření

Základní druhy zdrojů optického záření používaných pro optoelektronické přenosy obecně jsou LED diody a laserové diody LD. Hlavní rozdíl mezi LED a LD je, že LD vykazuje podstatně vyšší optický výkon a její spektrální čistota (koherence) je o několik řádů vyšší. Laserové diody, které mají spektrum až 1000x užší než spektrum LED, umožňují umístit do pracovní oblasti podstatně více kanálů [13]. Polovodičové lasery sice jsou zdroje koherentního záření, ale nejsou úplně dokonalé. Každý polovodičový laser vyzařuje záření, které není ideálně spektrálně „čisté“, vždy vykazuje určitou konečnou šířku spektra.

Pro vysílání signálu v downstream (sestupný směr) se používá termo-elektricky chlazených DFB (Distributed FeedBack) laserů. Pro opačný směr se využívá ve většině případech obousměrně modulovaného nechlazeného Fabry – Perotova laseru. Na obr. 3.1 jsou znázorněny spektra DFB a Fabry – Perotova laseru. DFB lasery jsou longitudinální SML (Single Longitudinal Mode) lasery s úzkou spektrální čarou. Proto jsou používány u DWDM, kde je tato vlastnost nezbytná. Pracují typicky v rozsahu 1530 až 1565 nm [28]. Fabry – Perotovy lasery nevyžadují teplotní nebo frekvenční stabilizaci, jsou také podstatně levnější. Jsou to MLM (Multi Longitudinal Mode) lasery, jejich spektrum je tvořeno periodickými vlnami.





Obr. 3.1: a) FP laser. b) DFB laser [23].

Požadavky na zdroje záření:

- Výkon zdroje musí být minimálně takový, aby vysílaný signál prošel optickým vláknem a detektor byl schopen přijímat signál s dostatečnou přesností detekovat.
- Zdroj musí umožnit odpovídající modulaci, aby mohlo být dosaženo požadované přenosové rychlosti.
- Přenosové systémy xWDM jsou velmi náročné na stabilitu jednotlivých nosných frekvencí, proto je nutné, aby se spektrální čára zdrojů záření neměnila vlivem změny okolní teploty, ani jiných okolností. Musí být také dostatečně úzká, aby nezasahovala do sousedních kanálů.
- Dalším požadavkem na zdroje záření je minimální vlastní šum.

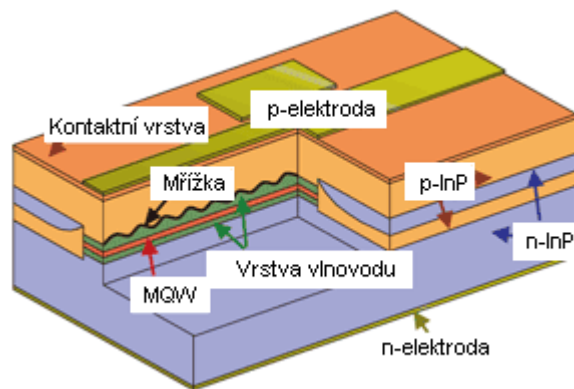
Technologie CWDM využívá zdrojů záření bez nároku na chlazení. Hodnoty vlnových délek pro jednotlivé kanály se uvádějí v hodnotách 1271 nm, 1291 nm apod. Je to z důvodu změny nominální střední vlnové délky v závislosti na teplotě, která je např. pro 1470 nm v rozmezí teplot 0 – 70°C +/- 3 nm. Provozní teplota laseru je 35°C, nominální hodnoty se však měří při teplotě 20°C [9].

3.1.1 DFB lasery

Tento druh laserových diod s rozloženou zpětnou vazbou, má aktivní oblasti pravidelně strukturovány jako difrakční mřížku. Struktura je tvořena jednorozměrnou interferenční mřížkou, která zajišťuje optickou zpětnou vazbu pro laser a využívá braggovského rozptylu. DFB laserové diody nepoužívají dvou diskretních zrcadel tvořících optické dutiny (jak je tomu u standardních laserových diod). Mřížka působí jako selektivní prvek vlnové délky pro alespoň jedno ze zrcadel a poskytuje zpětnou

vazbu, která odráží světlo zpět do dutiny a tvoří tak rezonátor. Mřížka je konstruována tak, aby odrážela pouze úzké pásmo vlnových délek (SLM). To je rozdíl oproti Fabry-Perotovu laseru, kde čip tvoří dvě zrcadla vytvářející zpětnou vazbu. V takovém případě jsou zrcadla širokopásmová, a laser pracuje na více podélných módech současně, nebo jednoduše skáče mezi podélnými módy. Změna teploty DFB diody je způsobena v důsledku změny závislosti indexu lomu na teplotě. Tato závislost je způsobena změnou „bandgap“(oblast mezi valenční a vodivostní vrstvou pevné látky, kde nemohou existovat elektrony) polovodičového laseru s teplotou a tepelnou roztažností. Změna indexu lomu na vlnové délce mění výběr mřížové struktury a tedy vlnovou délku na výstupu laseru - laditelný laser TDL (Tunable Diode Laser). Rozsah ladění je obvykle okolo 6 nm při změně teploty o 50 K [11]. Změnou napájecího proudu je laser také laditelný, neboť změna napájecího proudu způsobí změnu teploty uvnitř DFB. Tyto lasery bývají u DWDM chlazeny peltierovými články, z čehož plyne velký odběr elektrické energie [11].

Lasery s rozloženou zpětnou vazbou používané v optoelektronice jsou fázově posunuty ve středu odrazového pásma. Když je laser správně nastavený, pracuje v SLM módu ve vzdálenosti desítek kilometrů V podstatě je omezen přechodným šumem vyvolaným heterodynní koherencí [11].

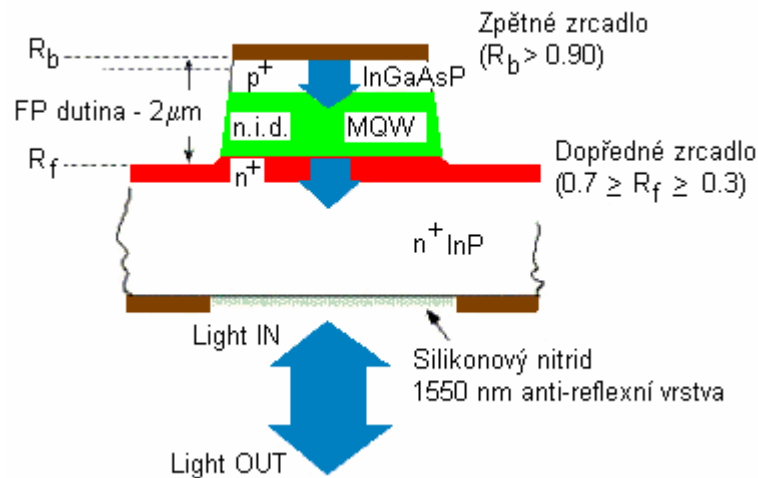


Obr. 3.2: Struktura DFB laseru.

3.1.2 FP lasery

Fabry – Perotův laser je tvořen dvěma vysoce odrážejícími polopropustnými zrcadly, které jsou umístěné ve vzdálenosti l na protilehlých stěnách polovodičového materiálu, mezi nimiž je aktivní oblast. Fabry – Perotova dutina odráží světlo zpět a dále, čímž vytváří stojaté vlnění. Za účelem dosažení lepší směrovosti záření bývá

rezonátor polopropustný pouze z jedné strany. FP-lasery mohou pracovat v jednovidovém i vícevidovém režimu [13].



Obr. 3.3: Struktura FP laseru.

3.2 Detektory optického záření

Detektory jsou prvky potřebné k detekci a demodulaci optického signálu. Dopadem optického signálu na fotodetektor a jeho přeměnou na elektrický signál končí optická vrstva. K vlastní detekci dochází po demultiplexování xWDM signálu na dílčí signály. Pro telekomunikační účely se používají fotodiody PIN a lavinové fotodiody APD (Avalanche - Photodiode). Tyto detektory musí být slučitelné s ostatními prvky optického přenosového řetězce, musí splňovat jisté parametry a provedení. Mezi nejdůležitější parametry uveďme např. vysoká citlivost v používaném pásmu, malý vlastní šum, rychlá časová odezva, necitlivost na změny teploty a napájecího napětí, malé rozměry [13].

Fotodiody PIN

- Velmi rozšířené.
- Rychlá odezva.
- Velký kvantový výtěžek 68 – 80% [13].
- Založena na principu optické excitace volných nosičů náboje a rekombinačních procesech.

Lavinové fotodiody APD

- Větší citlivost oproti PIN.
- Komplikovanější a dražší výroba.
- Nutnost předpětí.

- Větší úroveň šumu v napětí.
- Založeny na procesu multiplikace volných nosičů na základě ionizace v silném elektrickém poli.

Pro obousměrnou komunikaci je nutné, aby na straně vysílače i přijímače byly obsaženy jak detektor, tak zdroj záření a filtr pro rozdělení vlnových délek pro oba směry přenosu. Prvek, který všechny tyto části obsahuje, se nazývá **aktivní optický člen** [31].

3.3 Optické zesilovače

Optické zesilovače na rozdíl od opakovačů nevyžadují konverzi do elektronické podoby, jsou nezávislé na přenosových rychlostech, zesilují signál analogový i digitální. Vzhledem k tomu, že zesilují všechny příspěvkové optické kanály v signálu xWDM najednou, jsou tedy protokolově i bitově nezávislé. V oblasti xWDM systémů se používají optické vláknové zesilovače EDFA (Erbium Doped Fibres Amplification) a Ramanovský typ zesilovače. U systému CWDM je možné pomocí EDFA zesilovat pouze 1 až 2 kanály.

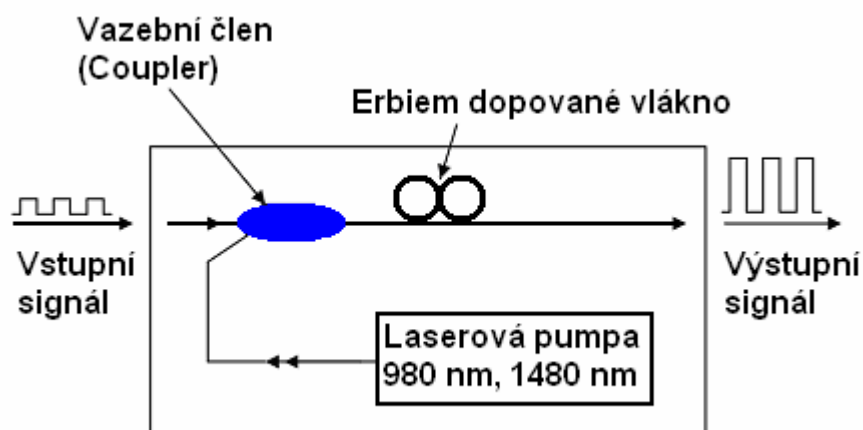
3.3.1 EDFA zesilovač

EDFA zesilovač je tvořen laserovou pumpou a speciálním aktivním, erbiem dopovaným vláknem (EDF) v délce jednotek až desítek metrů. Toto vlákno je navařené do optické trasy prostřednictvím směrové odbočnice. Přes další vstup směrových odbočnic je do EDF zaveden tzv. čerpací kanál z laserové pumpy. Vlivem záření z laserové pumpy dochází k excitaci atomů dopovaného prvku (erbia) na vyšší energetické hladiny. Tím je dočasně uložena energie získaná z laserové pumpy. Uvolnění nastane průchodem přenášeného signálu, kdy jeho energie způsobuje stimulovanou emisi záření o shodné vlnové délce a fázi. Kromě stimulované emise však vzniká i spontánní emise, která je parazitním jevem a má za následek vznik šumu. Za normálních podmínek ji však stimulovaná emise vysoce převyšuje. Tyto zesilovače umožňují zesílení úrovně přenášeného signálu až o 50 dB [13]. Běžně je zesilováno pouze C pásmo, vyrábí se však i zesilovače, které umožňují zesílení C+L pásma současně. EDFA zesilovače není možné používat v pásmech O, E a S, protože by docházelo ke vzniku $\frac{1}{4} \lambda$ zkreslení.

EDFA se obvykle nasazuje v následujících funkcích [13]:

- Jako Booster, který se umísťuje hned za optický vysílač a jeho funkcí je zesílení signálu na maximální úroveň, kterou je možné do vlákna navázat.
- In – line zesilovač umístěný na optické trase v místě, kde je úroveň signálu nedostačující, signál je tam opět zesílen na maximální úroveň.
- Předzesilovač, který se umísťuje před optický přijímač. Zesiluje nízkou úroveň signálu na úroveň vhodnou pro optický přijímač.
- Kompenzace ztrát, které vznikají u PON sítí vlivem rozdělení signálu v děliči (splitteru) mezi více vláken. Zapojuje se před dělič, tak aby úroveň jednotlivých vydělených signálů byla stejná jako signál do děliče vstupující. Uplatnění nachází nejvíce u analogových sítí CATV (Cable Analog Television).

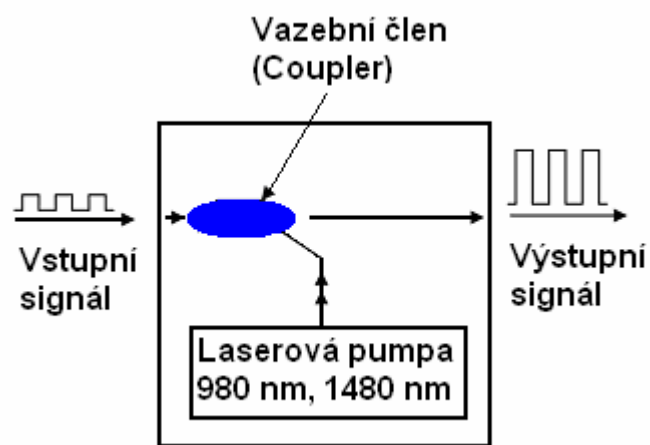
EDFA zesilovač obecně umožňuje zesilování světla jednoho optického kanálu. Aby však mohl být použitelný i v xWDM systémech, jsou nutná další vylepšení. Zisk vlnového zesilovače není stejný pro každou vlnovou délku, ale tvoří jistý spektrální pás. Aby mohl být EDFA nasazen na xWDM systém, je nezbytně nutné, aby zisk zesilovače byl přibližně konstantní na celém spektru xWDM signálu, dále dostatečný zisk při nízkém šumovém čísle, teplotní stabilita a spolehlivost. Pro srovnání zesílení spektra narovnoměrnou hodnotu se používají útlumové články - tzv. atenuátory.



Obr. 3.4: EDFA zesilovač.

3.3.2 Ramanovský zesilovač

U tohoto zesilovače nastává zesílení přímo ve vlastním vlákně, není tedy potřeba speciálního vlákna jako v případě EDFA. Jeho funkce je založena na principu Ramanovského rozptylu na částicích materiálu vlnovodu. Jedná se v podstatě pouze o laserový zdroj záření připojený k optické trase. U těchto typů zesilovačů se dosahuje maximálního zesílení 15 – 20 dB [13]. Umožňuje zesilování signálu o libovolné vlnové délce, podle zvolené laserové pumpy (např. 1450 nm pro pásmo 1550 nm). Umísťuje se na konec přenosového vlákna a záření z laserové pumpy se šíří proti signálu zesilovanému.



Obr. 3.5: Ramanovský zesilovač.

4. Pasivní prvky

4.1 Muldexy

Hlavní funkcí multiplexerů a demultiplexerů je sdružování světelných svazků z různých zdrojů do jediného vlákna a jejich zpětné vydělení. Rozdělení světelného svazku na dílčí svazky podle vlnové délky se provádí v demultiplexeru. Multiplexer musí obsahovat selektivní členy (filtry), pokud je rozestup mezi kanály malý (DWDM), demultiplexer obsahuje filtry vždy. Při duplexní komunikaci po jednom vlákně, je nutné zapojit vazební členy, aby nedocházelo k přeslechům mezi vysílačem a přijímačem [13].

Soustavy dielektrických filtrů:

Selektivní interferenční filtry

Tyto filtry v závislosti na vlnové délce způsobují buď odraz světelné vlny od filtru (kanál nenáleží danému přijímači), nebo jím světelná vlna prochází. To probíhá do doby, než poslední optický kanál z původního xWDM signálu dopadne na poslední přijímač. Konstrukce filtru je provedena 10 – 40 tenkými vrstvami dielektrického materiálu, se střídavě měnícím se indexem lomu. Vložný útlum muldexů tvořených těmito filtry roste přibližně úměrně s počtem přenášených vlnových délek, proto jsou vhodné pro systémy s menším počtem kanálů [13].

Disperzní filtry

K rozkladu světla u těchto filtrů dochází na optických mřížkách, nebo hranolem. Při rozkladu na hranolu dochází k nežádoucímu dvojnásobnému lomu na hraničních plochách, čímž se světlo o různé vlnové délce láme pod různým úhlem. Proto je výhodnější použití mřížek, které navíc umožňují zpracování více kanálů. Vložný útlum muldexů s optickou mřížkou se zvyšujícím se počtem kanálů mění jen málo [13].

Vláknová Braggova mřížka FBG (Fibre Bragg Grating)

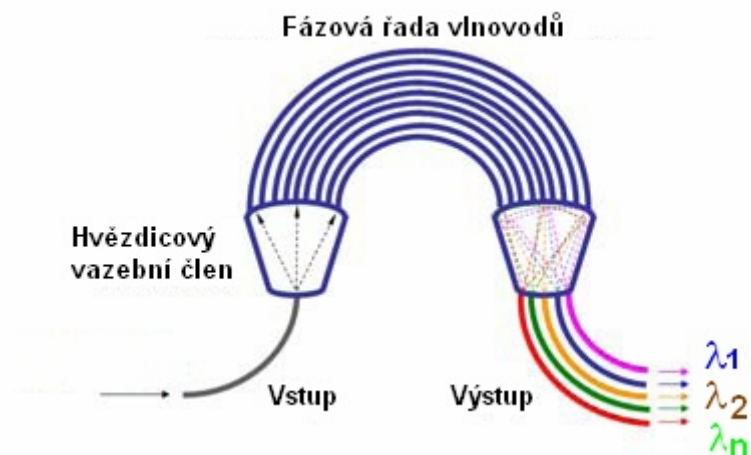
Tato mřížka bývá vytvořena např. molekulární epitaxí ve vlnové struktuře, která má být napojena na vlákno. Výkon WDM signálu se pak vyzařuje v několika diskrétních směrech, kde každý směr odpovídá určitému frekvenčnímu pásmu [13].

4.1.1 Vlnovody uspořádané do mřížky AWG

AWG (Arrayed Waveguide Grating) muplexery/demultiplexery jsou planární součástky založené na poli vlnovodů. Odrážejí pole na vstupu vlnovodu do polí vlnovodů na výstupu na základě vlnové délky. Vlnovody uspořádané do mřížky jsou často také označovány jako vlnové routery - Waveguide Grating Routers (WGRs) nebo také jako optické fázové pole – Phased Arrays (PHASARs). Spolu se selektivními filtry a vláknovými bragovými mřížkami tvoří nejdůležitější část WDM sítí [21].

Na vlákno je navařen vlnovod, který se hodně rozšiřuje a po krátké vzdálenosti pokračuje několika paralelními úzkými vlnovody. Tyto vlnovody jsou stáčené tak, že vytváří přibližně soustředěné oblouky, které ale nejsou stejně dlouhé. Po té se znovu spojují do širokého vlnovodu, který po krátké vzdálenosti ústí opět do úzkých vlnovodů. Těchto větví je stejný počet jako příspěvkových kanálů ve vstupním signálu [13].

Vstupní (jednovidový) kanálový vlnovod ústí do úseku planárního vlnovodu, kde se chová v podstatě jako bodový zdroj. Z něho se záření v planárním vlnovodu rozbíhá a vytváří kruhovou vlnoplochu. Na protější straně jsou rozmístěna ústí řady kanálových vlnovodů, která záření zachytávají. Do všech kanálků tak vstupuje záření se stejnou fází. Soustava je uspořádána tak, že na střední vlnové délce demultiplexeru se optické délky kanálků vzájemně liší o celočíselné násobky vlnové délky. Na této vlnové délce vystupuje tedy optické záření z kanálků ve výstupním úseku planárního vlnovodu se stejnou fází (fázový rozdíl odpovídající sudému násobku π se neprojeví). Výstupní ústí řady vlnovodů tvoří ekvifázovou plochu podobně jako na vstupu kanálků. Záření se proto ve výstupním planárním úseku soustředí do ústí prostředního výstupního vlnovodu. Při malé změně vlnové délky se fázové posuvy mezi jednotlivými kanálky na výstupu změní tak, že se výsledná výstupní ekvifázová plocha potočí o úhel úměrný změně vlnové délky, a záření se soustředí do jiného výstupního kanálku. Tak dochází k oddělení vlnových délek [10]. Zařízení je možno použít „v opačném směru“ rovněž ke slučování vlnových délek z různých zdrojů do jednoho výstupního vlákna. U AWG muldexů se využívá dohledového kanálu (Out of band), který je nezávislý na C/DWDM datovém přenosu. Pro tento účel bývá vyhrazena vlnová délka 1510 nm a datový kanál s přenosovými rychlostmi do 100 Mbit/s.



Obr. 4.1: AWG.

Nejdůležitější technologií používanou pro realizaci vlnovodů AWG je v dnešní době „silica-on-silicon (SOS)“ technologie a polovodičová technologie Indiumphosphide (InP) [21].

Silica-on-silicon (SOS) AWG

Tato technologie v současných optických sítích převažuje. Její výhodou je kombinace nízké hodnoty přenosového útlumu (<0.05 dB/cm) a vysoké účinnosti navázání vláken (útlum v řádu 0,1 dB) [21]. Nevýhodou je, že jsou relativně velké z důvodu polí vlnovodů, které využívají velkých oblouků.

Výroba se opírá o kombinaci technik vyvinutých nezávisle ve dvou různých oblastech:

- depozice křemíku,
- optická vlákna,

za využití strukturování a leptání používaných pro mikro výrobu VLSI (Very Large Scale Integration). AWG jsou speciální typy planárních světlovodů (PLC), které jsou vyráběny na planárních substrátech, většinou destiček krystalického křemíku. Díky jejich příznivým vlastnostem jako je vysoká míra planarity, vynikající odvod tepla, potenciál pro hybridizaci optických a elektronických komponentů na společném substrátu [21].

InP-based AWG

Charakteristické vlastnosti vlnovodů vyrobených touto technologií jsou poněkud odlišné v porovnání SOS technologií. Největší výhodou je, že mohou být monoliticky integrovány s prvky, jako jsou např. lasery, polovodičové optické zesilovače, RF modulátory, detektory aj. Další výhodou je jejich velikost, v porovnání s AWG vyrobené technologií SOS mohou být až dvojnásobně menší. Vložné ztráty jsou totožné

jako u předchozí varianty [21]. Hodnota přeslechu oproti SOS (>35 dB) zaostává o 5 - 10 dB. Největší nevýhodou této technologie je velký útlum při navazování jednovlňových vláken, který se pohybuje okolo 10 dB. Tento útlum může být redukován při použití speciálních čoček, což ale podstatě zvýší náklady [21].

Skutečná výhoda vlnovodů vytvořených touto technologií tedy spočívá v potenciálu pro integraci multifunkčních obvodů, jako jsou např. vysílače, přijímače, jako pro metro, tak i pro přístupové sítě, dále také pro add-drop multiplexery (OADMs).

Tab. 4.1: Parametry AWG [21].

Parametr	Experimentální výsledky				
Počet kanálů	8	16	32	64	128
Centrální vlnová délka λ_c	1.30 μm	1.55 μm	1.55 μm	1.55 μm	1.55 μm
Rastr $\Delta\lambda$	50 nm	2 nm	0.8 nm	0.4 nm	0.2 nm
Rastr Δf	6.25 THz	250 GHz	100 GHz	50 GHz	25 GHz
Řád mřížky m	3	47	59	59	59
Počet vlnovodů	28	60	100	160	388
Útlum pro λ_c	2.2 dB	2.3 dB	2.1 dB	3.1 dB	3.5 dB
Izolace mezi kanály	> 30 dB	> 35 dB	> 35 dB	> 30 dB	> 20 dB

Matematický popis AWG

Základní vlastnosti AWG popisuje rovnice 4.1:

$$\theta_{i,IN} = \frac{m}{n_s d} \left\{ \lambda_i - \lambda_c \left[1 + \frac{1}{n_{wg}} \frac{dn_{wg}}{d\lambda} (\lambda_i - \lambda) \right] \right\} - \theta_{i,OUT}, \quad (4.1)$$

kde θ_{IN} a θ_{OUT} představuje úhel mezi střední osou a vstupními/výstupními vlnovody, λ_i je vlnová délka signálu, m je řád vlnovodu pro λ_i , λ_c je centrální vlnová délka, d je stupeň optické mřížky, n_s a n_{wg} jsou efektivní indexy lomu. Tato rovnice také zohledňuje chromatickou disperzi materiálu [21].

Zaměřování rozšiřujících se polí je v AWG dosaženo pokud rozdíl délek ΔL mezi sousedními vlnovody je roven celému číslu m vlnových délek uvnitř AWG.

$$\Delta L = m \cdot \frac{\lambda_c}{n_{eff}}, \quad (4.2)$$

kde celé číslo m se nazývá řád pole, λ_c je centrální vlnová délka AWG, n_{eff} je efektivní fázový index a λ_c / n_{eff} odpovídá vlnové délce uvnitř pole vlnovodů [21]. Zvětšením délky pole o ΔL vzniká fázový rozdíl podle vztahu:

$$\Delta\phi = \beta\Delta L, \quad (4.3)$$

$$\text{kde} \quad \beta = 2\pi\nu n_{eff} / c \quad (4.4)$$

je konstanta šíření ve vlnovodu, $\nu = c / \lambda$ je frekvence šířící se vlny a c je rychlost světla ve vakuu. Příčné posunutí ds z ohniska podél obrazové roviny za jednotku frekvence (změny frekvence) $d\nu$ se nazývá prostorová disperze D_{sp} , která je dána vztahem 4.5.

$$D_{sp} = \frac{ds}{d\nu} = \frac{1}{\nu_c} \cdot \frac{n_g}{n_{FPR}} \cdot \frac{\Delta L}{\Delta \alpha}, \quad (4.5)$$

kde n_{FPR} je index lomu ve volně šířitelné oblasti, $\Delta \alpha$ je úhlová odchylka mezi vlnovody ve vstupních a výstupních částech AWG a n_g je skupinový index lomu vlnovodu [21]:

$$n_g = n_{eff} + \nu \frac{dn_{eff}}{d\nu}. \quad (4.6)$$

Odezva AWG je periodická. Perioda v kmitočtové doméně se nazývá FSR (Free Spectral Range) [21]:

$$FSR = \frac{\nu_c}{m} \left(\frac{n_{eff}}{n_g} \right). \quad (4.7)$$

Vložný útlum

Pole šířící optický signál přes AWG jsou utlumována kvůli různým útlumovým mechanismům. Největší část tohoto útlumu vzniká v uzlech mezi oblastmi vlnovodných polí a oblastmi volného šíření. Útlum těchto uzlů se pohybuje v rozmezí 1 – 2 dB (celkový útlum AWG je v rozmezí 2 – 4 dB) [21]. Útlum šíření optického signálu vlnovodem a útlum vazebních členů jsou obvykle podstatně menší. Pokud přenos pro centrální kanál AWG je T_c , potom je útlum centrálního kanálu dán vztahem:

$$A_0 = -10 \log T_c. \quad (4.8)$$

Krajní kanály mají podstatně větší útlum, než kanál centrální. To je způsobeno z důvodu, že vzdálená pole řady vlnovodů jsou vydělovány ve směru odlišném od hlavní optické osy. Tato nejednotnost útlumu je definována jako rozdíl v přenosu mezi centrálním kanálem (kanály) a postraními kanály (1 až N) [21]:

$$\Delta T_{AWG} = -10 \log \frac{T_{1,N}}{T_c}. \quad (4.9)$$

Nejednotnost útlumu může být snížena, pokud se zvýší parametr FSR, avšak na úkor větší velikosti zařízení.

Mezikanálový přeslech

Jednou z nejdůležitějších vlastností multiplexerů je mezikanálový přeslech. Jedná se o nežádoucí příspěvkové signály s frekvencí ν_{i+1} kanálu i [21]. Teoretický mezikanálový přeslech A_x vzniká při překrývání ohniska pole s nežádoucím videm.

$$A_x = \eta(d), \quad (4.10)$$

kde d je vzdálenost mezi vlnovody. Z rovnice je patrné, že snížení útlumu, který vznikne přeslechem, je možné docílit umístěním vlnovodů dostatečně daleko od sebe. Obvykle je vzdálenost $1x - 2x$ šířky vlnovodu dostačující pro izolaci mezi kanály 40 dB [21]. Mezikanálový přeslech vzniká při nerovnoměrné tloušťce vrstvy, šířce vlnovodu a indexu lomu.

Vlnový rozsah

Většina vlastností AWG může být chápána při uvážení vazby ohniskové vzdálenosti pole v obrazové rovině k vlnovodu. Tato vazba je popsána normalizovaným integrálem přijímacího módu vlnovodu $U_r(s)$ a ohniskovou vzdáleností pole $U_f(s)$ v obrazové rovině:

$$\eta(\Delta s) = \left| \int U_f(s - \Delta s) U_r(s) ds \right|^2, \quad (4.11)$$

kde Δs je posun ohniskové vzdálenosti pole vzhledem ke středu vlnovodu [21]. Pokud mají signály $U_r(s)$ a $U_f(s)$ stejný tvar, což nastane v případě, je-li použit stejný vlnovod v přijímací a vysílací části, pak je účinnost této vazby téměř 100% při správně provedeném AWG. Funkce pro přenos výkonu $T_i(\nu)$ pro i -tý přijímací vlnovod je dána dosazením

$$\Delta s = D_{sp} \cdot (\nu - \nu_i) \quad (4.12)$$

do rovnice:

$$T_i(\nu) = T_c \cdot \eta\{D_{sp} \cdot (\nu - \nu_i)\}, \quad (4.13)$$

kde ν_i je frekvence odpovídající i -tému kanálu. Přenos výkonu (virtuálního) centrálního kanálu T_c je běžně menší než 1 vzhledem k přenosovým ztrátám v AWG [21].

4.1.2 ROADM

ROADM (Rekonfigurovatelný Optický ADD/DROP Multiplexer). Jedná se o optické zařízení umožňující vyčlenit (DROP) ze spektra xWDM signálu danou

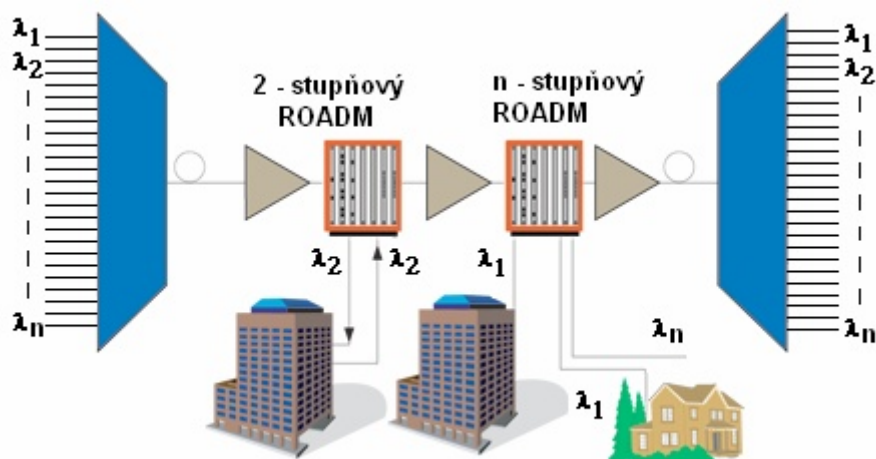
množinu kanálů, zároveň dokáže místo právě vydělených kanálů zařadit kanály z jiného směru (ADD), které mají stejné vlnové délky jako kanály vyloučené.

Řád ROADM prvků určuje, kolika rozhraními prvek disponuje. Klasické ROADM jsou 2. řádu, protože mají dvě rozhraní, označované jako W (west) a E (east) [22]. Pokud chceme ROADM nasadit v sítích s polygonální topologií, je nutné, aby byly vyššího řádu (měli více rozhraní). Plně konfigurovatelný ROADM nemá žádné omezení mezi všemi rozhraními, lze tudíž přepnout jakýkoliv kanál na jiný. Tato technologie již sice je vyvinuta, ale v současné době je poměrně cenově nedostupná. Jádrem muldexu je digitální rozvaděč, který je realizován časoprostorovým spojovacím polem. To umožňuje vydělovat vybrané časové polohy z linkový signálů a zakončuje demultiplexované signály na rozhraní. V kaskádovém zapojení Add/Drop multiplexerů je třeba počítat s tím, že se kumuluje optický šum v kanálech. S tímto faktem je nutné uvažovat při navrhování sítí [22].

Nejčastějším použitím vydělovacích muldexů jsou kruhové sítě, kde umožňují zálohování provozu. Dalším typickým použitím ROADM muldexů jsou přístupové sítě s liniovou strukturou s průběžnými muldexy umístěnými od obslužného uzlu postupně až ke koncovým muldexům [22].

Flexibilitu ROADM prvku udává tzv. vydělovací poměr, který udává poměr mezi celkovým počtem vydělitelných kanálů a celkovým počtem všech kanálů. Čím je číslo větší, tím je multiplexer flexibilnější. Nejmodernější ROADM dokáží konfigurovat rozhraní na základě softwarové konfigurace, na rozdíl od běžných statických multiplexerů, které vyžadují drahé manuální zásahy při změnách [22].

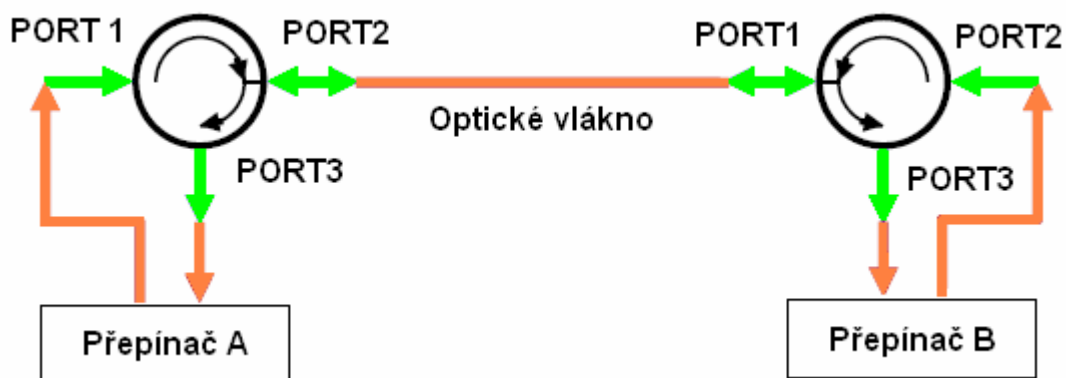
Pokud daný ROADM umožňuje přepnout libovolnou vlnovou délku, tak je označován jako „*bezbarevný (colourless)*“. Pokud toto neumožňuje, pak je označován jako „*barevný (colour)*“. Pokud je nutné provést rekonfiguraci zapojení na jiný kanál, a máme ROADM typu colour, znamená to, že musí být přepojen na jiný fyzický port, což v praxi vyžaduje manuální přepojení optických kabelů a mnohdy i dočasného odpojení jiných koncových zařízení. U ROADM typu colourless je možné provést rekonfiguraci libovolného kanálu na libovolný port. Taktéž umožňují zabránění kolizní situace, protože mohou být použity jiné vlnové délky než původní pro různé části přenosového řetězce. Další dělení ROADM multiplexerů je na „*směrový (directional)*“ a „*všesměrový (omnidirectional)*“. Výhodou všesměrového oproti směrovému je především možnost přepojení kanálu na port na libovolné straně (W, E) [22].



Obr. 4.2: Příklad ROADM.

4.2 Optické cirkulátory

Optický cirkulátor je pasivní zařízení, které slouží k sloučení/vydělení optického signálu na stejné vlnové délce. Je to v podstatě součástka, která dokáže rozlišit optický signál podle směru jeho šíření v optickém vlákně. Standardně jsou to tříportová zařízení, přičemž vstup z prvního portu je směřován na port druhý a vstup z druhého portu je směřován na port třetí. Výhodou je vysoká izolace mezi porty 45 – 50 dB, útlum pod 1 dB, polarizační nezávislost a nízké přeslechy. Z důvodu odrazů je nutné použití APC úhlových konektorů [28].

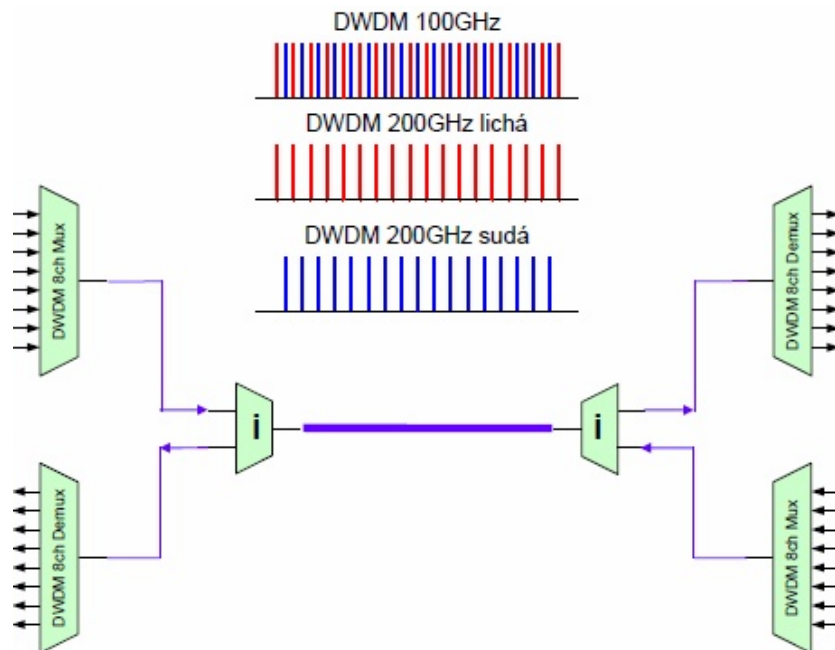


Obr. 4.3: Aplikace optického cirkulátoru.

4.3 Interleaver

Optický interleaver je pasivní, tříportové optické zařízení, které slouží ke sloučení dvou DWDM kanálů (lichý a sudý) do jednoho kompozitního prokládaného signálu. Například dva DWDM signály s rastrem 100 GHz jsou pomocí interleaveru sloučeny do jednoho DWDM signálu s rastrem 50 GHz [28]. Zařízení lze používat v obráceném

směru ve funkci optického deinterleaveru, který rozdělí DWDM signál do lichého a sudého kanálu. Optický interleaver je založen na několikanásobné paprskové interferenci.



Obr. 4.4: Interleaver [29].

4.4 Děliče

Jsou to zařízení s jedním vstupním portem a několika porty výstupními. Vstupní signál je dělen mezi výstupní porty a umožňuje tím uživatelům sdílet jedno optické vlákno (tím pádem i přenosové pásmo). V opačném směru – od uživatele jsou signály spojovány

z několika ONT do jednoho vlákna. Děliče jsou pasivní zařízení, protože nevyžadují žádné externí energetické zdroje [26].

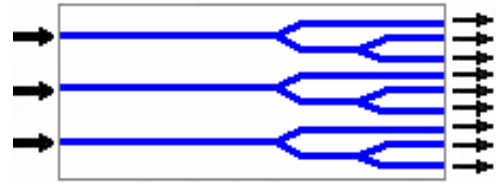
Z důvodu dělení vstupního signálu má každý dělič jistý útlum. Jeho velikost je dána počtem výstupních portů. V síti FTTx může být zapojen jeden dělič nebo několik děličů řazených do kaskády, což se odvíjí od topologie. Děliče se také používají ve WDM-TDM-PON sítích [26]. Bez ohledu na topologii ale musí vyhovovat určitému maximálnímu útlumu, který je definován dle ITU-T viz tabulka. 4.2.

Tab. 4.2: Závislost útlumu na počtu portů [26].

Počet portů	Útlum děliče [dB]
2	3
4	6
8	9
16	12
32	15
64	18

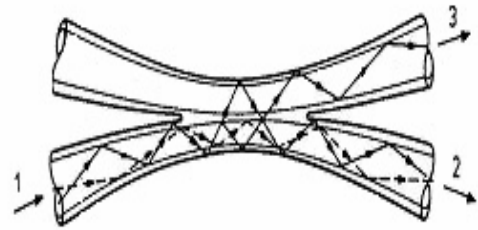
Podle technologie výroby se dělí na dvě skupiny [26]:

PLC (Planar Lightwave Circuit) - jsou vyráběny planární technologií. Používá se na děliče s větším počtem výstupních portů. Technologickým postupem je na křemíkovém substrátu možné vyrobit požadovanou strukturu a dosáhnout tak až 128 výstupních portů .



Obr. 4.5: Planární dělič.

FBT (Fused Bionic Taper) - fúzní metoda, děliče se vyrábí spojováním optických vláken při vysokých teplotách a tlaku, dojde k natavení pláště a jádra se dostanou velmi blízko sebe. Touto technologií lze vyrobit jen svazky 2 - 4 vláken, která je možné pro dosažení většího počtu výstupních portů řadit kaskádovitě za sebe.



Obr. 4.6: Fúzní dělič.

4.5 Ostatní aktivní a pasivní prvky

Optické transceivery

Tyto prvky se zapojují do „šasi“ přepínače a fungují jako vysílač/přijímač. Výhodou je, že není nutné hned zpočátku investovat do drahého prvku plně osazeného drahými optickými porty. Jednotlivé transceivery dle potřeby postupně doplňujeme. Při změně konfigurace není nutné měnit celý aktivní prvek, ale stačí pouze vyměnit jednotlivé transceivery. Zajišťují vysokou modularitu při návrhu, instalaci a během správy systému.

Kompenzátory chromatické disperze

U DWDM systému způsobuje disperze změnu tvaru modulačního signálu - překrývání sousedních pulsů a tím interferenci. Na přijímací straně tedy může dojít k chybnému vyhodnocení signálu. CD (Chromatická Disperze) má značný vliv na překlenovací vzdálenost, max. přenosovou rychlost a max. počet kanálů. Z tohoto důvodu je nutné CD kompenzovat již na optické přenosové trase. Používané metody [5]:

- DCM modul – vlákno se zápornou CD. Používá se pro kompenzaci kladné disperze.
- Použití vláken CD+ a CD- střídavě v kabelu.
- FBG (Fiber Bragg Grating) – čerpovaná braggova mřížka.

5. Měření C/DWDM systémů na úrovni přístupových sítí

Při nasazování systému C/DWDM a následném provozu na optické síti je třeba zajistit řadu měření. Měří se a kontrolují parametry optického signálu, zjišťuje se, jestli je signál v odpovídajících tolerancích. V případě poruchy se lokalizuje místo závady. Jedná se zejména o následující soubory měření [6]:

- Měření optických tras při výstavbě.
- Měření při uvádění do provozu. Tato měření bývají většinou předepsána výrobcem daného měřicího zařízení.
- Tzv. akceptační testy neboli přejímková měření, která bývají stanovena většinou mezi dodavatelem a investorem.
- Provozní měření, probíhající za chodu sítě, zahrnující poruchová měření, diagnostiku.

Měření optických tras při výstavbě je definováno standardem ITU G. 650.3 a předepisuje sérii měření, které je potřeba provádět ještě před tím, než je systém C/DWDM nasazen. Provádí se při výstavbě nové sítě, i při modifikaci starší přenosové trasy. Toto měření sestává z následujících souborů měření [2]:

Soubor testů 1:

- Inspekce čel konektorů.
- Obousměrné OTDR.
- Obousměrné OLTS.

Soubor testů 2:

- Všechny body dle souboru 1.
- Útlum odrazu – ORL.
- Chromatická disperze – CD.
- Polarizační vidová disperze – PMD.

5.1 Měření DWDM systémů

Hlavní parametry definované na spektru signálu DWDM [6]:

- Odstup signál/šum – OSNR.
- Celkový výkon optického spektra.
- Výkonová vyrovnanost spektra kanálů.
- Přeslech mezi kanály (zejména sousedními).

Hlavní parametry definované pro jednotlivé kanály DWDM [6]:

- Odstup signál/šum pro daný kanál.
- Výkon v kanálu.
- Vlnová délka výkonového maxima.
- Odchylka od nominální vlnové délky.
- Střední vlnová délka.
- Spektrální pološířka kanálu (většinou definovaná z 3 dB poklesu).
- Horní a dolní vlnová délka pro pokles o 3 dB.
- Časová stabilita výkonu a vlnové délky.

Tab. 5.1: Hlavní měřené parametry v systémech DWDM [4].

	Zdroj záření	MUX	DCD	EDFA	Vláknko	OADM	DEMUX
Střední vlnová délka	✓	✓				✓	✓
Celkový výkon signálu	✓	✓					
Časová stabilita výkonu	✓						
Spektrální šířka kanálů	✓	✓					✓
Max. op. výkon v kanálech		✓		✓			✓
Výkonová vyrovnanost spektra		✓		✓			✓
Odstup signál/šum - OSNR		✓		✓			✓
Izolace kanálů		✓				✓	
Útlum			✓		✓		
Chromatická disperze CD			✓		✓		
Polarizační vidová disperze PMD			✓		✓		
Nelineární efekty			✓		✓		
Střední vlnová délka všech kanálů				✓			
Zisk PDL/PDG				✓			
Vliv čtyř-vlnného směšování					✓		
Vložný útlum a jeho zvlnění						✓	
ORL						✓	
PDL						✓	

U systémů DWDM se požadavek na odstup signál/šum zvyšuje se zvyšující se přenosovou rychlostí. Pro správnou interpretaci odstup signál/šum je třeba uvádět, v jakém bodě je úroveň šumu změřena (např. v minimu mezi kanály, na frekvenci nosné, v pevném odladění od nosné apod.).

Tab. 5.2: Požadovaný odstup signál/šum (OSNR) [4].

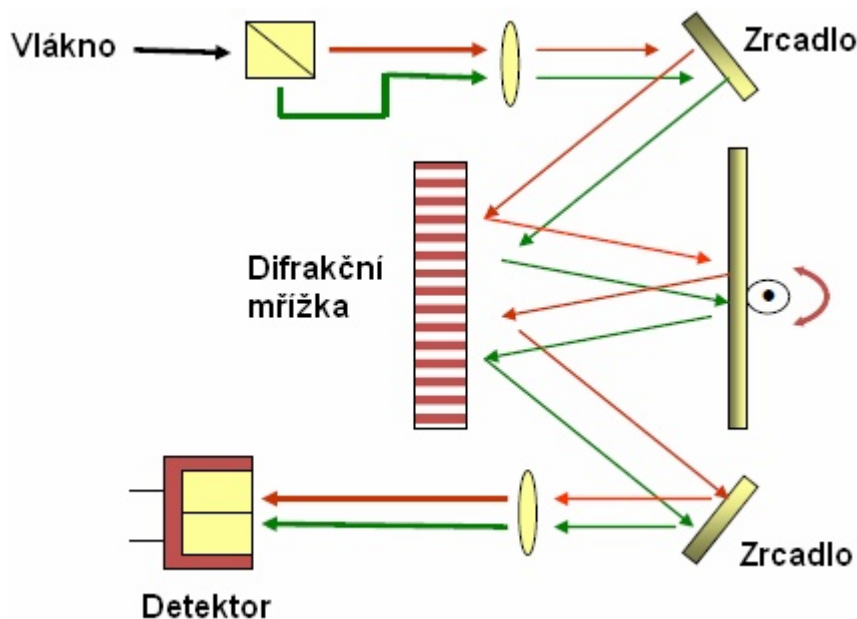
Kanál	Přenosová rychlost kanálu	Odstup signál/šum (OSNR)
STM - 16	2,5 Gbit/s	18 - 20 dB
STM - 64	10 Gbit/S	24 dB
STM - 256	40 Gbit/s	30 dB

Základním prvkem měřicí techniky je jako při měření optických sítí obecně měřič optického výkonu. Při měření optického signálu DWDM je třeba vědět, že přístroj měří integrálně celý optický výkon z rozsahu své spektrální citlivosti, tj. v rozsahu cca 850 – 1650 nm [6]. Neumožňuje proto z výsledků získaných měření odlišit části spektra náležitým jednotlivým kanálům, zjistit úroveň šumu atd. Optický měřič výkonu nám tedy dává informace pouze o celkovém optickém výkonu ve vlákne. Při měření na různých vlnových délkách dává optický měřič výkonu rozdílné výsledky. Např. pro 1310 nm a 1550 nm je naměřený rozdíl 2 – 3 dB [6]. Oproti klasickým měřičům výkonu se měřiče pro C/DWDM liší schopností měřit vysoké úrovně signálu, které bývají u C/DWDM signálů způsobeny vysokými výstupními úrovněmi DFB laserů, v případě delších tras i EDFA zesilovačů. Pro získávání podrobných informací o spektrálním rozložení optického výkonu v signálu DWDM se používá buď optický spektrální analyzátor OSA (Optical Spektrum Analyzer) nebo měřiče vlnových délek označované jako MWM (Multi Wavelength Analyzer).

5.1.1 Optický spektrální analyzátor (OSA)

OSA pracuje na principu rozkladu optického záření na difrakční mřížce a následným skenováním rozloženého spektra fotodetektorem. Možná uspořádání jsou následující [4]:

- Pevná mřížka, pohyblivý detektor:
 - méně náchylné na mechanické otřesy,
 - zpravidla užší spektrální rozsah.
- rotační mřížka, pevný detektor:
 - široký spektrální rozsah (až 600 - 1700 nm),
 - náchylnější na mechanické otřesy,
 - uspořádání většiny laboratorních přístrojů.
- pevná mřížka, pevný detektor:
 - detektor je tvořen polem fotodiody.



Obr. 5.1: OSA s dvoustupňovým monochromátorem [4].

Výhodou přístroje je jeho vysoká citlivost měření optického výkonu – měřící rozsah -80 až +20 dBm [4]. Nevýhodou je však omezená selektivita a snížená přesnost měření vlnové délky na cca +/- 50 pm (+/- 0,4 dB), což je způsobeno složitostí opto-mechanické soustavy [4]. OSA si lze představit jako laditelný optický filtr, který je předřazený před fotodetektor. Hlavní parametry OSA souvisí právě s kvalitou použitého filtru. Mezi tyto parametry patří zejména [6]:

Rozlišovací šířka pásma RBW (Resolution Bandwidth). Tento parametr udává v podstatě šířku pásma filtru – laditelné pásmové propusti a měří se z poklesu o 3 dB. Označuje se někdy také jako šířka štěrbin OSA. Při zmenšování štěrbin se dosahuje lepší spektrální rozlišovací schopnosti (RBW je menší), avšak za cenu horší schopnosti fotodetektoru měřit slabé signály (čím menší štěrbin, tím méně dopadá záření na fotodetektor). Tím dochází ke snižování dynamického rozsahu přístroje a může se stát, že dojde k překročení prahu detekce a tím není možné měřit úroveň optického šumu v signálu. V praxi to znamená, že by měl být parametr RBW menší než 0,1 nm a práh detekce přístroje minimálně -60 dBm [6]. U předních světových výrobců OSA pro DWDM bývá 20 - 70 pm.

Tab. 5.3: Parametry RBW u OSA [4].

Kanál	Přenosová rychlost kanálu	Spektrální pološířka kanálu
STM - 16	2,5 Gbit/s	0,02 nm
STM - 64	10 Gbit/s	0,08 nm
STM - 256	40 Gbit/s	0,32 nm

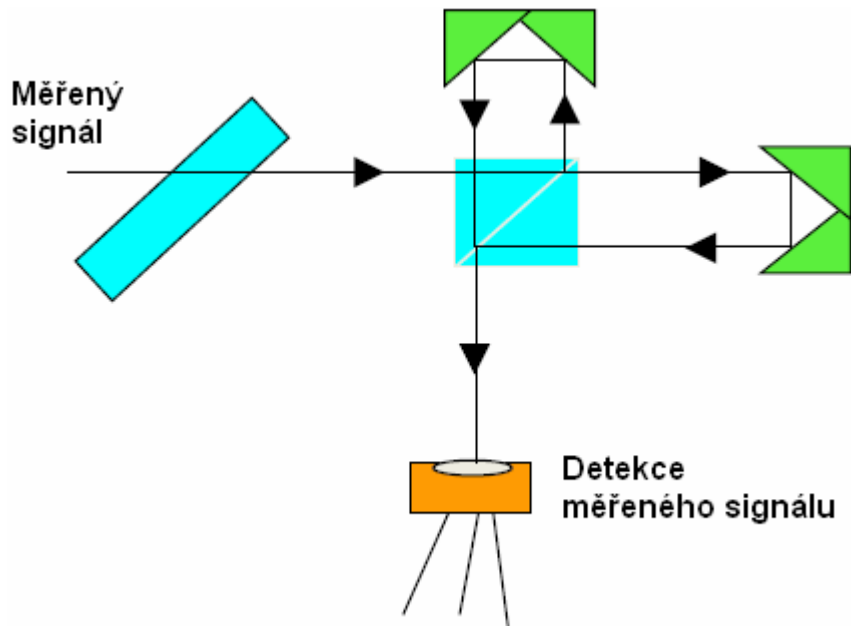
Poměr optického potlačení ORR (Optical Rejection Ratio). Tento parametr si můžeme představit jako strmost spektrální filtrace. Je zde jistá analogie s oblastí elektrických signálů, kde pro dosažení lepší filtrace používáme namísto jednoduchých filtrů raději filtry vyššího řádu. Stejně tak je tomu i u optické filtrace. Používají se dvoustupňové monochromátory. Strmost je definována jako pokles signálu na displeji přístroje v určitém odstupu od nosné (úzká spektrální čára). Protože filtry nejsou ideální, zobrazí se namísto jediné úzké spektrální čáry (jediná frekvence) spektrální čára roztažená i do stran. Do jaké míry je čára roztažena udává parametr ORR [6]. V praxi se hodnota ORR definuje jako pokles na odstupu 0,8 nm od nosné (pro 100 GHz rastr), 0,4 nm (pro 50 GHz rastr), 0,2 nm (pro 25 GHz rastr) a 0,1 nm (pro 12,5 GHz rastr) [6]. Z toho plyne, že čím hustší má rastr být, tím vyšší hodnotu musí ORR mít. Hodnota ORR musí být taková, aby bylo umožněno měření odstupu signál/šum při dané frekvenci.

Tab. 5.4: Parametry ORR u OSA [4].

Spektrální odstup kanálů	Požadavek na ORR
100 GHz	≥ 30 dB (@ 0,4 nm)
50 GHz	≥ 30 dB (@ 0,2 nm)

5.1.2 Měřič vlnových délek MWM

MWM je založen na principu interferometru. Mezi nejpoužívanější interferometry patří Michelsonův a Fabry-Perotův interferometr. Interferenční obrazec vytvořený měřeným signálem je nadzorkován a digitálně zpracován pomocí FFT. Výstupem transformace získáme rozložení optického spektra. Díky použití spektrálně čistého a stabilního He-Ne laseru dosahuje tento měřič výborné přesnosti měření vlnové délky a to cca +/- 3 pm [6]. Další výhodou je i schopnost vysoké selektivity. MWM dosahuje minimálně o řád lepší selektivity než špičkové spektrální analyzátory OSA. Z tohoto důvodu nejsou parametry obdobné OSA (RBW, ORR) užívány. Nevýhodou je naopak malá citlivost měření optického výkonu – měřicí rozsah -35 až +18 dBm, což je způsobeno numerickým zpracováním signálu pomocí FFT [6].



Obr. 5.2: Michelsonův interferometr [4].

Obecně vzato je nejpoužívanějším a nejpraktičtější měřicím přístrojem v sítích C/DWDM spektrální analyzátor OSA. A to jak při instalaci sítě, tak i při pozdějším servisu. Plyne to především z dostatečné selektivity, z informací které poskytuje a ze schopnosti měřit slabé signály, jako je optický šum.

Nejnovější analyzátoři OSA jsou schopné měřit i ROADM. V kaskádách Add/Drop multiplexerů se kumuluje šum a je nutné tento šum odlišit od užitečného signálu. Původní metoda IEC pro měření úrovně šumu na polovině kroku mezi kanály není vhodná, je nutné měřit šum přímo v kanálech. OSA je schopen měřit dokonce i signály 10 Gbit/s a 40 Gbit/s, je však potřeba mít na vědomí, že používané způsoby modulace a kódování (RZ, NRZ, Duob, DPSK apod.) mají vliv na náměr spektra [8].

5.2 Měření CWDM systémů

Co je nutné měřit [16]:

- Vlastní optickou trasu, optický kabel, optická vlákna.
- Před nasazením systému provést kontrolu spektrální charakteristiky.
- Po nasazení systému je třeba měřit trasu včetně ROADM:
 - měření útlumu pomocí přímé (transmisní) metody OLTS (Optical Loss Test Set),
 - měření rozložení útlumu optickým reflektometrem OTDR (Optical Time Domain Reflectometer).

- Optický výkon, pomocí měřiče optického výkonu PM (Power Meter) - širokospektrální detektor kalibrovaný do rastru CWDM.
- Měření pomocí OSA.

Při měření útlumu pomocí přímé metody je nutné zvolit vhodný zdroj záření a vhodný přijímač. Jako zdroj záření je možné použít sadu DFB laserů naladěných do rastru CWDM. To by bylo ale při měření v terénu značně nepohodlné, neboť tato zařízení nemohou být napájena z baterií. Další variantou zdroje záření je použití přeladitelného laseru, např. v rozsahu vlnových délek 1450 – 1650 nm [16]. Jako přijímač je nejvhodnější použít OSA, případně měřidlo kalibrované v rastru CWDM. Měření optickým reflektometrem OTDR lze realizovat pomocí sady DFB laserů naladěných do rastru CWDM. Zde nastává problém s mobilitou zařízení jako u předchozí metody. Stejně jako u DWDM systému i zde se hojně využívá výhodných vlastností OSA. U systémů CWDM se navíc využívá i optického kanálového analyzátoru. Je založen na principu skokově laditelného filtru dle rastru CWDM a je navržen pro měření vlnové délky a optického výkonu. Vyznačuje se také dobrou selektivitou, ale na rozdíl od OSA neumožňuje měření OSNR. Výhodou je naopak kompaktnost zařízení [16].

5.3 Měření BER (Bit Error Rate)

5.3.1 Q-faktor

Tento parametr vyjadřuje analogovou kvalitu digitálního signálu s ohledem na odstup signál/šum. Zahrnuje všechna fyzikální zhoršení, která degradují signál a způsobují bitovou chybovost, neboli BER. Mezi tato fyzikální zhoršení lze zahrnout šum, disperze a nelinearity. Čím je hodnota Q-faktoru vyšší, tím je bitová chybovost nižší (je vyšší odstup signál/šum). Výpočet Q-faktoru je uveden v rovnici 5.1 [32].

$$Q = \frac{I_1 - I_0}{\sigma_1 + \sigma_0} [-], \quad (5.1)$$

kde I_1 je logická úroveň „1“, I_0 je logická úroveň „0“, σ_1 je standardní odchylka logické úrovně „1“ a σ_0 je standardní odchylka logické úrovně „0“ [32].

5.3.2 Bitová chybovost

Bitová chybovost je definována poměrem chybně přijatých bitů bE ku celkovému počtu přijatých bitů p za určitou dobu.

$$BER = \frac{bE}{vp * t} [-], \quad (5.2)$$

kde v je přenosová rychlost a t je doba měření.

Bitová chybovost je hlavním ukazatelem kvality celkového optického systému. V reálných digitálních komunikačních systémech je nenulová pravděpodobnost chybného rozhodnutí zda vzorkovaná hodnota reprezentuje hodnotu logické „0“ nebo logické „1“ a v jakém časovém úseku vzorkovat. Výpočet bitové chybovosti ze znalosti hodnoty Q-faktoru vyjadřuje rovnice 5.3 [32]:

$$BER = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left(\frac{Q}{\sqrt{2}} \right) \approx \frac{\exp \left(\frac{-Q^2}{2} \right)}{Q\sqrt{2\pi}} [-]. \quad (5.3)$$

Hlavní faktory způsobující BER [18]:

- Nežádoucí nahromaděná spontánní emise v EDFA zesilovači.
- Nerovnoměrné zesílení jednotlivých vlnových délek.
- Rozladění kanálu.
- Nárůst šumu v kanálu.
- Kolísání vnitřního a časového zpoždění (jitter).
- Disperze CD a PMD.
- Přeslech mezi kanály.
- Nežádoucí Brillouinův a Ramanův rozptyl.

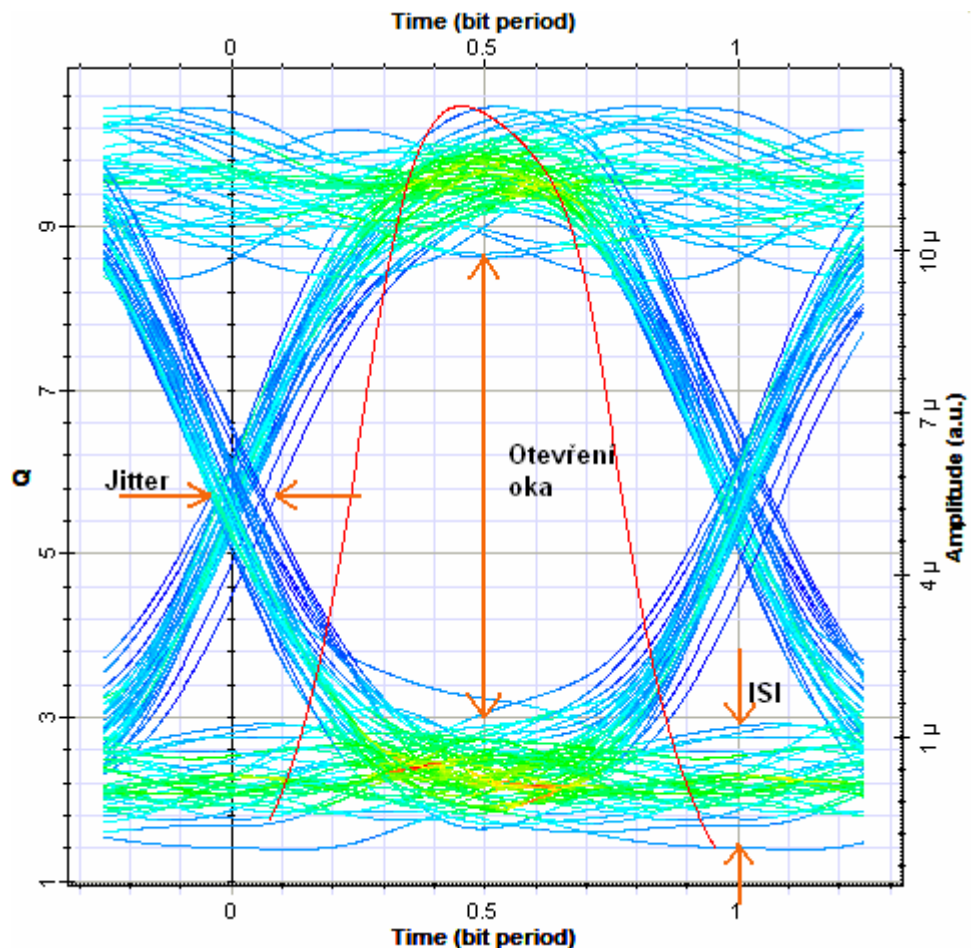
Pro měření BER, je nutné nasimulovat reálný provoz na síti. Test vyžaduje přenosové rychlosti alespoň 2,5 Gbit/s. Obvykle se měří „end-to-end“ chybovost všech příspěvkových kanálů celým systémem. Testy bývají většinou vzhledem k nízkým úrovním bitové chybovosti zdlouhavé. Měření je možné provádět několika způsoby [18]:

- Použitím jednoho op. přijímače/vysílače s optickým prepínačem, pro měření každého kanálu. Měření každého kanálu zvláště by trvalo dlouhou dobu, v praxi používané pouze pro malý počet kanálů.

- Použitím optického děliče (splitteru) na výstupu optického vysílače. Tím je možné měřit všechny kanály současně. Na výstupu je nutné použít opět optický přepínač.
- Použití modulární platformy umožňující paralelní měření všech příspěvkových kanálů současně. Dosahuje nejlepších výsledků testů měření v nejkratším čase.

5.3.3 Diagram oka

Diagram oka znázorňuje superpozici všech navzájem překrytých bitů v signálu [32]. Příklad diagramu oka pro NRZ signál je na obr. 5.3. Otevření oka značí kvalitu signálu. Čím větší je otevření oka, tím menší je útlum a rušení. Dále nám diagram oka znázorňuje dva nežádoucí efekty. Jitter (kolísání zpoždění) a mezisymbolovou interferenci ISI (Intersymbol Interference) [32].



Obr. 5.3: Diagram oka.

6. Základní uspořádání optických přístupových sítí

Řešení optického přenosu se dělí na dvě základní skupiny [27]:

1. Bod - bod (Point - To - Point, P2P).

2. Mnohabodová architektura (Point - To - Multipoint, P2MP).

Při přenosu založeném na architektuře P2P, jsou na větvení signálu používány aktivní prvky, proto se tato síť nazývá aktivní - **AON** (Active Optical Network). U architektury P2MP se na větvení signálu používají pasivní děliče - splitters, síť je pak označována jako **PON** (Passive Optical Network). V této práci bude věnována pozornost sítím PON, pro bližší přiblížení AON viz [26].

Soubor optických přístupových sítí FTTx sestává z mnoha druhů, přičemž jednotlivé sítě se liší podle toho kam až je optické vlákno instalované, neboli poměr mezi optickou a metalickou částí přístupové sítě. Na vrcholu této pyramidy stojí síť s označením FTTH (Fibre To The Home), u kterých je optické vlákno dotažené až ke koncovému uživateli. Druhým, zatím asi nejvíce používaným způsobem je varianta FTTB (Fibre To The Building), kde je optické vlákno dotažené do budovy a koncoví účastníci jsou pak připojeni do sítě pomocí vnitřního metalického rozvodu. Více o rozdělení sítí FTTx viz [26].

Rozdělení optických přístupových sítí [26]:

Podle poměru optické a metalické části přístupové sítě, jsou optické přístupové sítě FTTx rozděleny:

- FTTH (Fiber To The Home) - optická vlákna jsou zavedena až do objektů koncových účastníků.
- FTTB (Fiber To The Building) - optická vlákna jsou přivedena do budov koncových účastníků, kteří jsou pak připojeni pomocí vnitřní sítě.
- FTTC (Fiber To The Curb) - kdy jsou vlákna zavedena do účastnického rozvaděče a odtud jsou koncoví účastníci připojeni metalickým kabelem.
- FTTO (Fiber To The Office) - optická vlákna jsou zavedena do prostor koncových účastníků s velkými nároky na přenosovou kapacitu.
- FTTCab (Fiber To The Cabinet) - optická vlákna jsou zavedena až do přístroje (např. osobní počítač).

- FTTN (Fiber To The Node) - optické vlákno je přivedeno k distribučnímu kabinetu a odtud může být připojeno až několik set blízkých účastníků pomocí metalických kabelů.

Základní funkční celky tvořící přístupovou síť [26]:

oAN (Optical Access Network) = optická přístupová síť, což je soubor všech optických distribučních sítí připojených k jednomu optickému linkovému zakončení OLT.

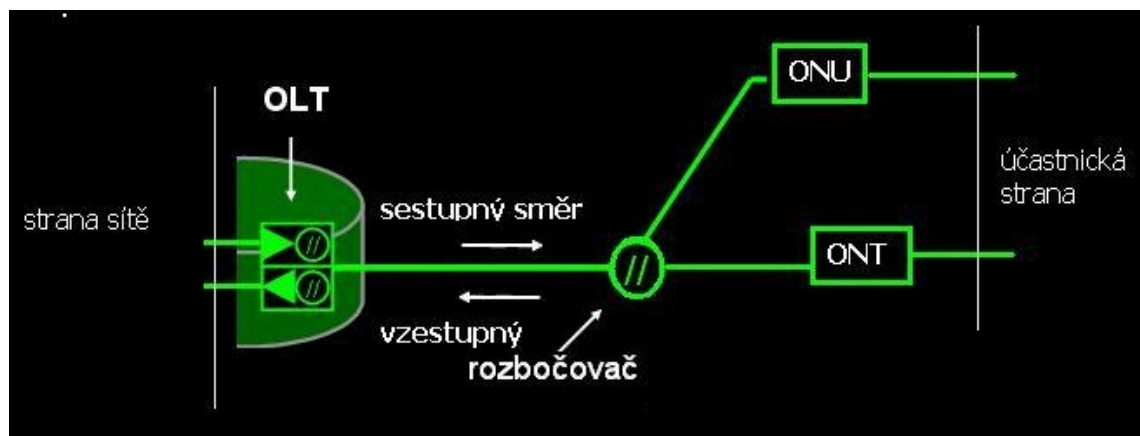
OLT (Optical Line Terminal) = optické linkové zakončení, zajišťuje funkce síťového rozhraní mezi sítí zajišťující telekomunikační služby a sítí přístupovou (síťové zařízení na straně operátora).

ONU (Optical Network Unit) = optické ukončovací jednotky, zajišťují funkce na rozhraní mezi optickou a metalickou částí sítě (zařízení na straně zákazníka).

ONT (Optical Network Terminal) = optické síťové zakončení, zajišťující funkci účastnického rozhraní mezi koncovými zařízeními účastníků a přístupovou sítí (zařízení na straně zákazníka).

OLT, ONU a ONT jsou aktivní prvky sítě.

ODN (Optical Distribution Network) = optická distribuční síť, neboli soubor prostředků pro přenos signálu mezi OLT a ONU (ONT).



Obr. 6.1: Základní funkční celky tvořící přístupovou síť.

6.1 Aktivní optická síť (AON):

U tohoto řešení je preferován vyhrazený kanál pro každého uživatele, který je plně duplexní a připojuje ho k přístupové platformě (směrovač, přepínač). Na optickou síť P2P lze nahlížet dvěma způsoby, z hlediska fyzické spojení bod – bod, nebo také z hlediska logické zapojení bod – bod. V případě fyzického spojení bod – bod má každý koncový uživatel vyhrazené svoje vlákno, kdežto u logického spojení bod – bod

má každý koncový uživatel vyhrazený svůj kanál. Příkladem jsou sítě WDM-PON, u kterých je fyzická topologie PON, ale logická topologie je P2P. Výhodou je bezproblémové řešení a garance dostupnosti služeb na úrovni přístupové linky, na které nevzniká žádná agregace a umožňuje standardní řešení na bázi optického Ethernetu. AON lze použít na větší vzdálenosti než PON, limit je přibližně 80 km v závislosti na počtu koncových uživatelů [26]. Maximální počet koncových uživatelů je dán počtem použitých aktivních prvků. Nevýhodou jsou naopak vysoké investiční náklady, které plynou z:

- nutnosti instalace bod-bod mezi každým zákazníkem a přístupovou platformou (velké množství vláken, svarů, optických konektorů, spojek, atd.),
- vysoké spotřeby elektrické energie (přibližně 8x více než P2MP),
- existence přístupové agregační platformy, která musí být dostatečně škálovatelná pro potenciál zákazníků v dané oblasti,
- potřeby velkého prostoru pro ukončení připojení všech zákazníků, s dostatečnou rezervou, pro možnost budoucího rozšíření (13x více prostoru oproti P2MP).

6.2 Pasivní optická síť (PON):

Tato síť umožňuje mnoha uživatelům sdílet jediné vlákno, bez žádných aktivních prvků mezi OLT a ONT. Zdrojový signál je přiveden z OLT do děliče (splitteru), který je umístěn v blízkosti koncových uživatelů. Pasivní dělič bývá použit k připojení obvykle 32 nebo 64 koncových uživatelů (to je dáno podle infrastruktury sítě). Každé účastnické zařízení je potom zakončené ONT. OLT zajišťuje hlasové a datové příchozí signálové přenosy na vlnové délce 1490 nm, respektive 1550 nm pro CATV, zatímco ONT zajišťuje přenos odchozích signálů na vlnové délce 1310 nm umožňující přenos právě po jednom vlákne, aniž by docházelo k interferenci [26]. Nevýhodou této sítě je složitější řešení garance kvality služeb pro koncové zákazníky, agregace a omezená maximální přenosová rychlost. Ve všech dalších parametrech je tato síť výhodnější než P2P a proto jsou často používány modifikace PON sítí.

PON síť se dělí na [27]:

APON (ATM Passive Optical Network)

BPON (Broadband PON)

GPON (Gigabit PON)

EPON (Ethernet PON)

10GEPON (10 Gigabit EPON)

V dnešní době jsou budovány optické sítě založené především na standardech GPON, EPON a nově též 10GEPON, které se vzájemně liší použitým protokolem na druhé (spojové) vrstvě modelu RM-OSI, sdílenými přenosovými rychlostmi, nároky na parametry optické distribuční sítě a dalšími parametry.

Standard GPON

Standard vychází přímo ze standardů APON/BPON. Je definován doporučením ITU-T G.984.1. Pro přenos dat je využíváno ATM buněk a protokolu GEM. ATM buňky i GEM rámce, případně jejich fragmenty, jsou přenášeny společně v rámci s pevnou délkou 125 μ s. [24] Tím je umožněn paketově orientovaný přenos služeb Ethernet a IP. Standard definuje přenosové rychlosti 1,244 Gbit/s nebo 2,488 Gbit/s symetricky, případně asymetricky 2,488 Gbit/s směrem k uživateli a 1,244 Gbit/s směrem od uživatele. GPON je kompatibilní se standardy APON/GPON, proto byla zachována podpora přenosových rychlostí 155,52 Mbit/s a 622,08 Mbit/s [24]. Stejně jako u APON/BPON se pro oddělení směru přenosu využívá dvou separátních vláken, nebo vlnového dělení. Směrem od uživatele jsou přiřazeny vlnové délky 1260 nm – 1360 nm, a ve směru k uživateli vlnové délky v rozmezí 1480 nm – 1500 nm. Standard umožňuje maximální rozbočovací poměr 1:64, a maximální dosah sítě 20 km [24].

Standard EPON

Tento standard je založen na přenosu Ethernetových rámců o pevné délce 2 ms. Tento standard se někdy také označuje jako GEPON, kde G označuje gigabitovou přenosovou rychlost. Standard byl navržen institutem IEEE pod označením IEEE 802.3ah. Podporuje přenosové rychlosti 1,25 Gbit/s symetricky [24]. Obousměrný provoz je možné řešit opět pomocí separátních vláken, nebo vlnovým dělením. Směrem k uživateli jsou přiřazeny vlnové délky 1480 nm – 1500 nm, a ve směru od uživatele vlnové délky v rozmezí 1260 nm – 1360 nm. Maximální rozbočovací poměr je 1:32 a fyzický dosah sítě 20 km [24].

Standard 10GEPON

Standard vznikl teprve v roce 2009 pod označením IEEE 801.3av. Je zpětně kompatibilní se standardem EPON, což umožňuje jeho zavedení do stávajících pasivních sítí bez větších investic. Podporuje přenosové rychlosti 10,3125 Gbit/s symetricky, nebo nesymetricky, kdy ve směru k uživateli je přenosová rychlost 10,3125 Gbit/s a v opačném směru 1,25 Gbit/s [24]. Vysílání v obou směrech je řešeno stejně

jako v předchozích případech pomocí vlnového dělení. Pro přenos dat směrem k uživateli je využíváno vlnových délek 1575 nm – 1580 nm. V opačném směru 1260 nm – 1280 nm pro symetrickou službu a 1260 nm – 1360 nm pro asymetrickou službu. Fyzický dosah sítě je 20 km a maximální rozbočovací poměr 1:32. Změnou fyzické vzdálenosti je možné měnit rozbočovací poměr a opačně [24].

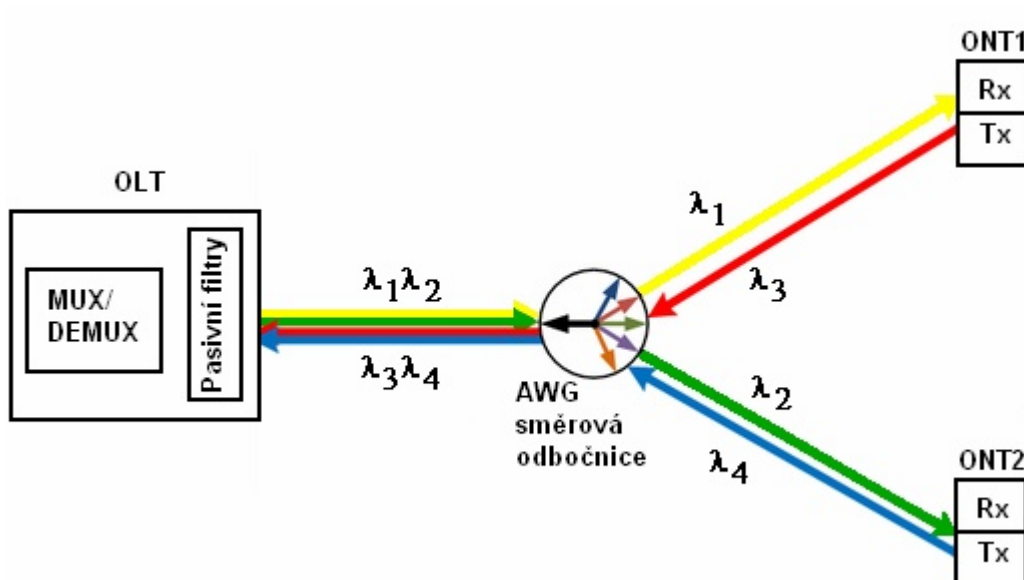
6.3 WDM-PON

Pasivní síť založená na klasickém časovém dělení se postupně blíží ke své maximální hranici. Proto bude další generace optických přístupových sítí zcela jistě založena na principu vlnových multiplexů kombinovaných s časovým dělením (s využitím pasivních děličů). Z počátku se budou zřejmě uplatňovat více systémy CWDM z důvodu nižší ceny. Pak bude jen otázkou času, než se tato technologie začne kombinovat s DWDM.

Typy možných realizací WDM-PON [20]:

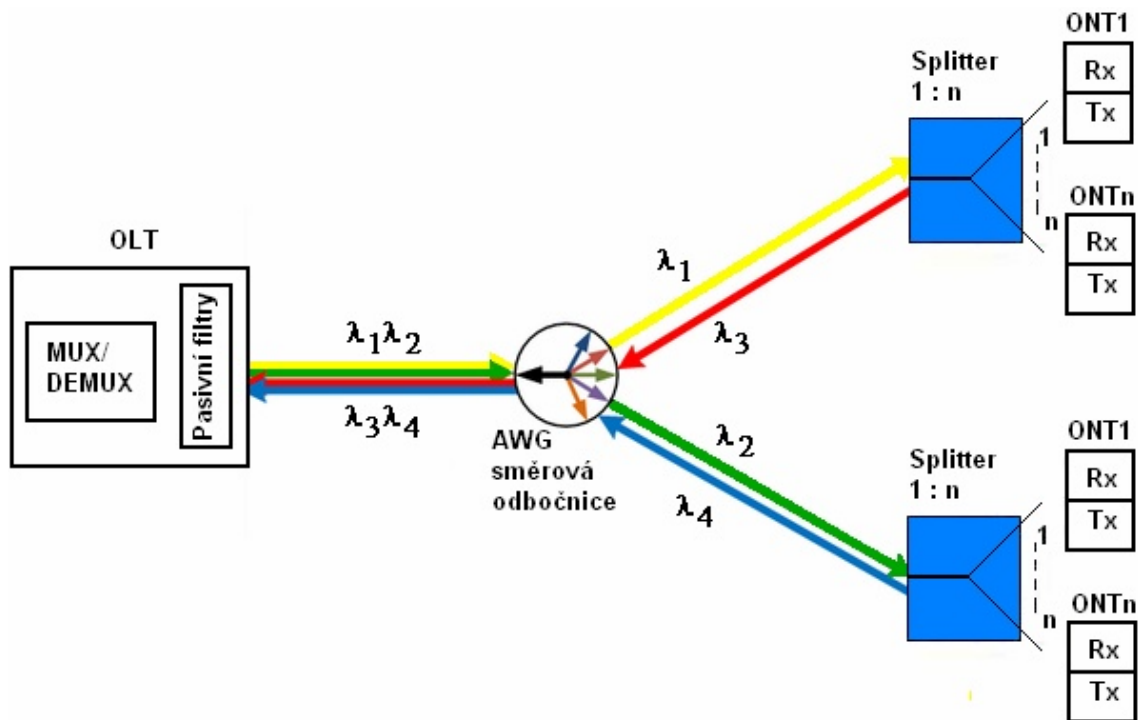
- První varianta uvažuje pouze pevně přidělené vlnové délky všem koncovým jednotkám. Tzn., že v síti bude použit klasický dělič a v sestupném směru se bude šířit signál i k ostatním koncovým uživatelům. ONT obsahuje pevně nastavený filtr, který vydělí svou určenou nosnou vlnovou délku. Ve vzestupném směru bude mít každá ONT jednotka svoji individuální vysílací vlnovou délku, na které bude vysílat odchozí datové toky. Z hlediska logické topologie se jedná o síť typu bod-bod. Jednotky ONT bývají naladěné ještě na jednu společnou vlnovou délku, která slouží pro vysílání broadcastu. Nevýhody této realizace jsou obdobné jako u klasické PON sítě, v sestupném směru je nutné zabránit odposlechu různými šifrovacími metodami. Pevné přiřazení vlnových délek dělá síť nepružnou ke změnám a s přenosovými kapacitami je nakládáno neekonomicky. Další nevýhodou je, že v síti nemůžou být dvě jednotky komunikující na stejné vlnové délce.
- Druhá varianta využívá namísto běžných děličů směrové odbočnice AWG (Arrayed Waveguide Grating). Rozdíl oproti předchozí variantě je zřejmý, v sestupném směru je přicházející signál pomocí AWG vydělen na jednotlivé vlnové délky, jejichž nosné se k určeným jednotkám ONT šíří v separátních kanálech. Ve vzestupném směru je princip stejný jako u první varianty. Každá jednotka ONT vysílá datové toky na jí vyhrazené vlnové délce. Výhodou této varianty je zejména menší vložný útlum AWG odbočnice oproti běžným

děličům, tato hodnota se pohybuje kolem 5 dB nezávisle na počtu vlnových délek. Další výhodou plyne z odstranění filtrů v jednotkách ONT, což znamená také snížení celkového útlumu. V případě této varianty jsou v jednotkách použity DFB lasery.



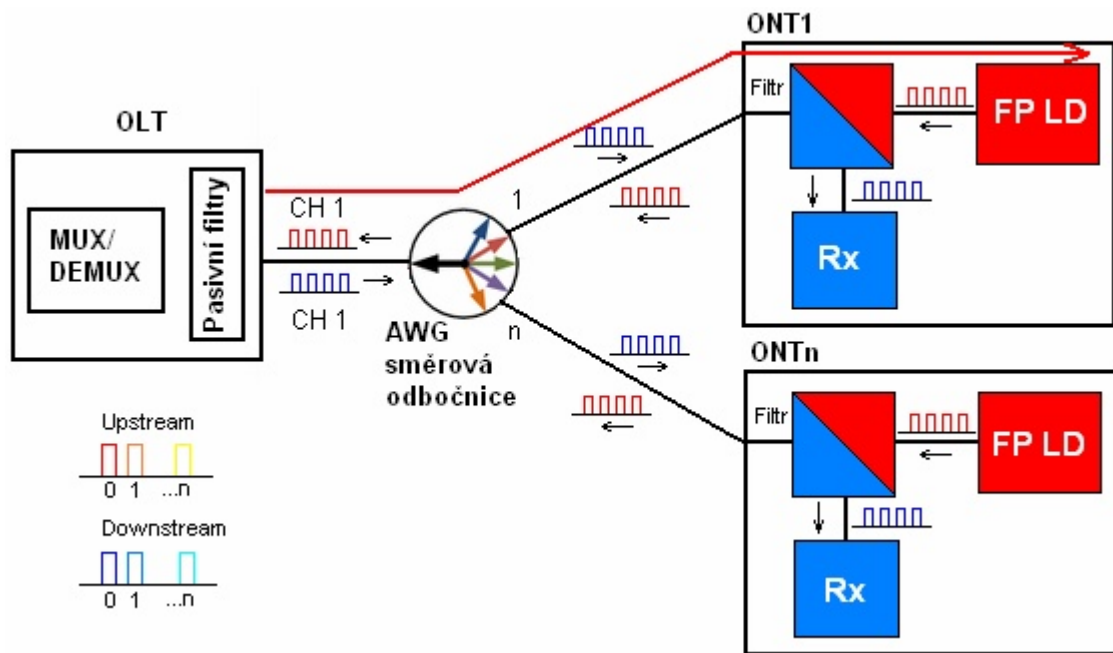
Obr. 6.2: WDM-PON s využitím směrové odbočnice AWG.

- Třetí možnost realizace WDM-PON je založena na principu kombinace AWG a klasických děličů, případně kaskádního řazení. Tato kombinace potom využívá vydělování optických signálů na základě vlnových délek (v AWG) v kombinaci časového dělení (time slotů v děličích) představuje tak maximální využití přenosového pásma. Celá tato topologie vede k univerzálnímu síťovému plánu optických kanálů. Použití univerzálních jednotek ONT a volitelných vlnových délek navíc také umožňuje přidělování kanálů k jednotkám na základě aktuální potřeby a požadavků. Tento mechanismus se označuje jako DWA (Dynamic Wavelength Assignment) [15].



Obr. 6.3: WDM-PON s využitím kombinace AWG a děličů.

- Čtvrtá možnost realizace WDM-PON je založena opět na principu AWG odbočnic, rozdíl je však v použitých jednotkách ONT. Využívá se v nich FP laseru opticky zavěšeného na stimulační vlnové délce přicházející od AWG [17]. Příchozí světelný paprsek prochází filtrem, kde se pro příchozí směr oddělí signál a pokračuje dále do přijímací části ONT. Jiná část světelného paprsku prochází přes filtr dále na FP laser. Zavěšením FP laseru na stimulační vlnovou délku dojde ke změně spektra FP laseru, které bylo původně tvořeno periodickými vlnami, na spektrum s úzkou spektrální čarou, díky čemuž je možné FP laser použít jako vysílač u WDM-PON systému.



Obr. 6.4: WDM-PON s využitím FP laserů v ONT jednotkách.

7. Simulace

Tato praktická část práce je zaměřena na simulace v prostředí OptiSystem 9.0 kanadské společnosti Optiwave. Tento propracovaný software umožňuje návrh a následné simulování optických sítí na úrovni fyzické vrstvy.

V práci jsou provedeny návrhy dvou optických přístupových sítí – GPON a WDM-PON. Cílem těchto simulací je analýza přenosových parametrů a kvality sítí. V následující kapitole je pak provedeno srovnání simulované WDM-PON sítě s reálným měřením.

7.1 GPON

V prostředí OptiSystem je možné simulovat pouze na úrovni fyzické vrstvy. Proto jediným parametrem, který udává, že se jedná o pasivní optickou síť typu GPON je přenosová rychlost 2,5 Gbit/s symetricky. Navrhovaný model je pro 4 koncové uživatele na vzdálenost 20 km s plně duplexním provozem.

7.1.1 Popis navrhované topologie GPON

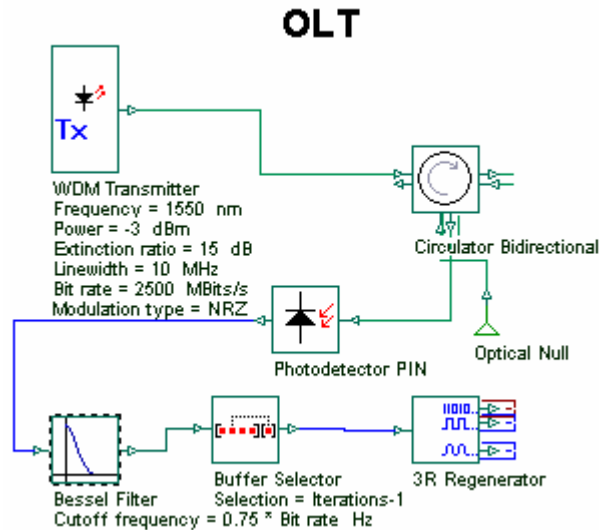
Tato topologie se skládá ze zařízení na straně poskytovatele (OLT), distribuční sítě (ODN) a ze zařízení na straně koncového uživatele (ONT). Nedílnou součástí je řada analyzátorů a měřících přístrojů. Celkové schéma zapojení je obsaženo v příloze A.

OLT

Jednotka OLT i ONT pro duplexní provoz obsahuje jak optický vysílač, tak i přijímač. V případě této topologie má optický vysílač následující parametry:

- vlnová délka 1550 nm,
- vysílací výkon -3 dBm,
- přenosová rychlost 2,5 Gbit/s,
- modulace NRZ.

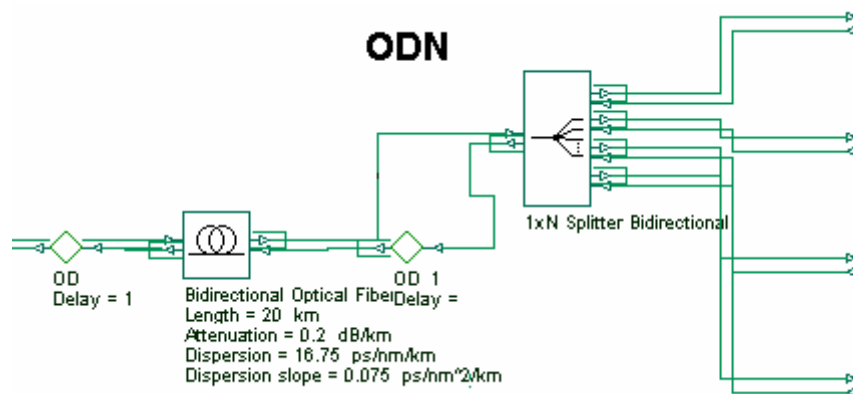
Výkon -3 dBm byl zvolen z důvodu délky optické trasy 20 km a malému počtu koncových uživatelů. Optický přijímač je tvořen fotodiodou PIN, dolní propustí (Besselův filtr), buffer selektorem a 3R regenerátorem (prvek zajišťující obnovu signálu na požadovanou úroveň). Dolní propust odfiltruje vysokofrekvenční šum, buffer selector slouží pro účely simulace (k výběru dané iterace, kterou má propustit). Pro obousměrný provoz je použit cirkulátor.



Obr. 7.1: Jednotka OLT u GPON.

ODN

Optická distribuční síť je tvořena 20 km optického vlákna s parametry odpovídajícími vláknu G.652.C/D, tj. vložný útlum 0,2 dB/km a chromatická disperze 16,75 ps/nm/km. Prvky označené jako OD (Optical Delay) slouží opět pro účely simulace a jsou nezbytné pro obousměrný datový provoz. Dalším nezbytným prvkem pasivní optické sítě je dělič s rozbočovacím poměrem 1:4. Jeho vložný útlum je přibližně 6 dB. Přesnou hodnotu si software dopočítává automaticky sám.

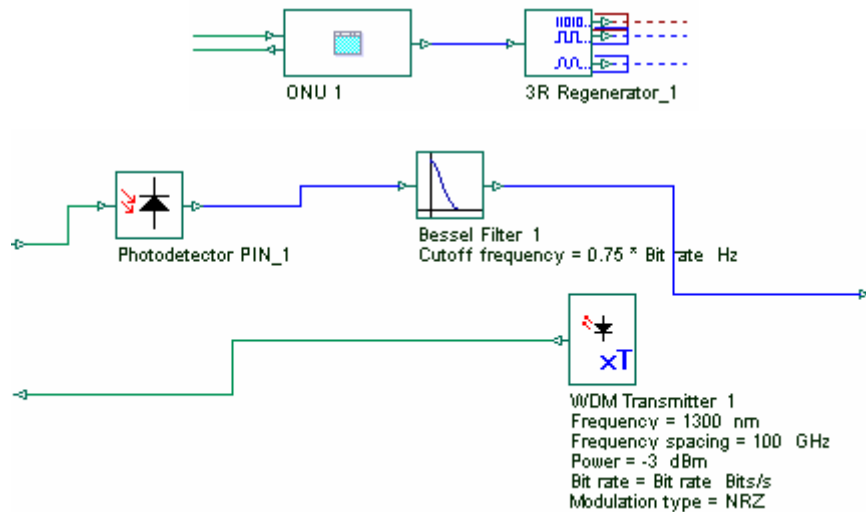


Obr. 7.2: Optická distribuční síť u GPON.

ONT

Optické zakončovací jednotky jsou tvořeny opět vysílací i přijímací částí. Přijímací část je tvořena PIN diodou a Besselovým filtrem. Vysílač má s rozdílem vlnové délky shodné parametry jako OLT. Vlnová délka je v tomto případě 1300 nm. Součástí ONT jednotek jsou také 3R Regenerátory, které jsou připojeny na Besselovy

filtry. V reálném zapojení by musel být použit i v ONT jednotce cirkulátor pro zajištění obousměrného přenosu po jednom vlákně.



Obr. 7.3: Vnitřní uspořádání ONT jednotky u GPON.

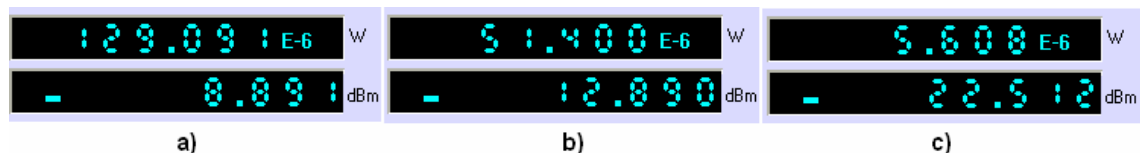
7.1.2 Analýza přenosových parametrů

Knihovna komponent nabízí celou řadu měřících přístrojů a analyzátorů. Pro simulovaný model GPON sítě byly zvoleny následující:

- měřič optického výkonu PM (Power Meter),
- BER analyzátor,
- optický spektrální analyzátor OSA,
- analyzátor OTDV (Optical Time Domain Visualizer).

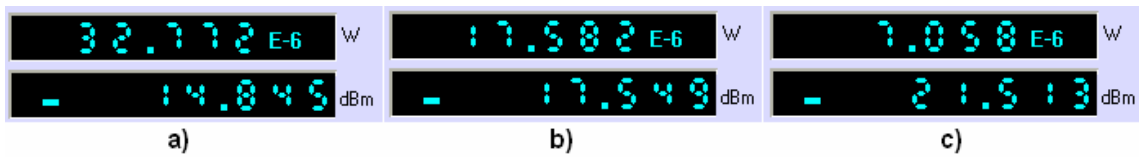
Útlum

Celkový útlum je tvořen vložným útlumem vlákna, vnitřním útlumem vysílače, přijímače, cirkulátoru a největší část útlumu je tvořena děličem. Útlum svarů, konektorů a spojek není brán v simulacích v potaz. Podle PM měřičů výkonu postupně zapojených před optickým vláknem, za optickým vláknem a za děličem je možné analyzovat vliv vložného útlumu jednotlivých komponent optické přenosové trasy na úroveň výkonu přenášeného signálu v sestupném směru.



Obr. 7.4: Výstupy měřičů optického výkonu ve směru OLT -> ONT: a) před optickým vláknem (PM1), b) za optickým vláknem (PM2), c) za děličem (PM3).

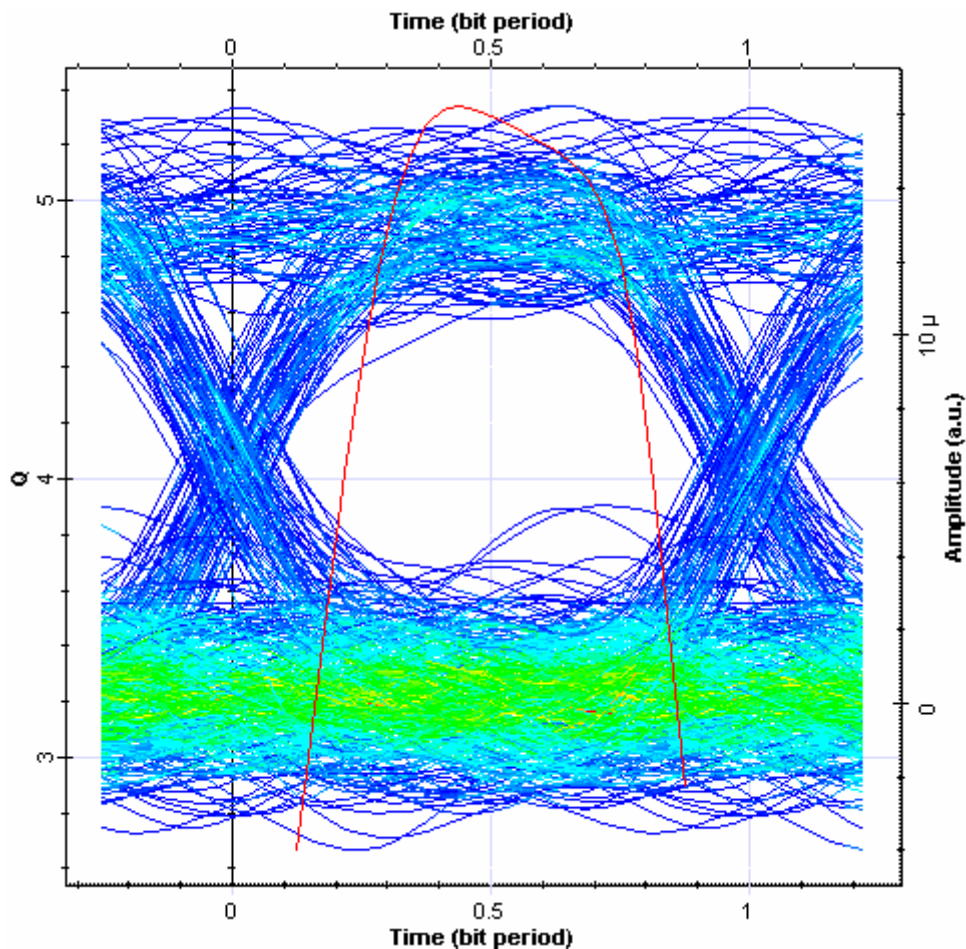
Stejně tak je možné analyzovat vliv vloženého útlumu jednotlivých komponent optické přenosové trasy na úroveň výkonu přenášeného signálu ve vzestupném směru.



Obr. 7.5: Výstupy měřičů optického výkonu ve směru ONT -> OLT: a) na výstupu ONT jednotky (PM4), b) za děličem (PM5), c) za vláknem (PM6).

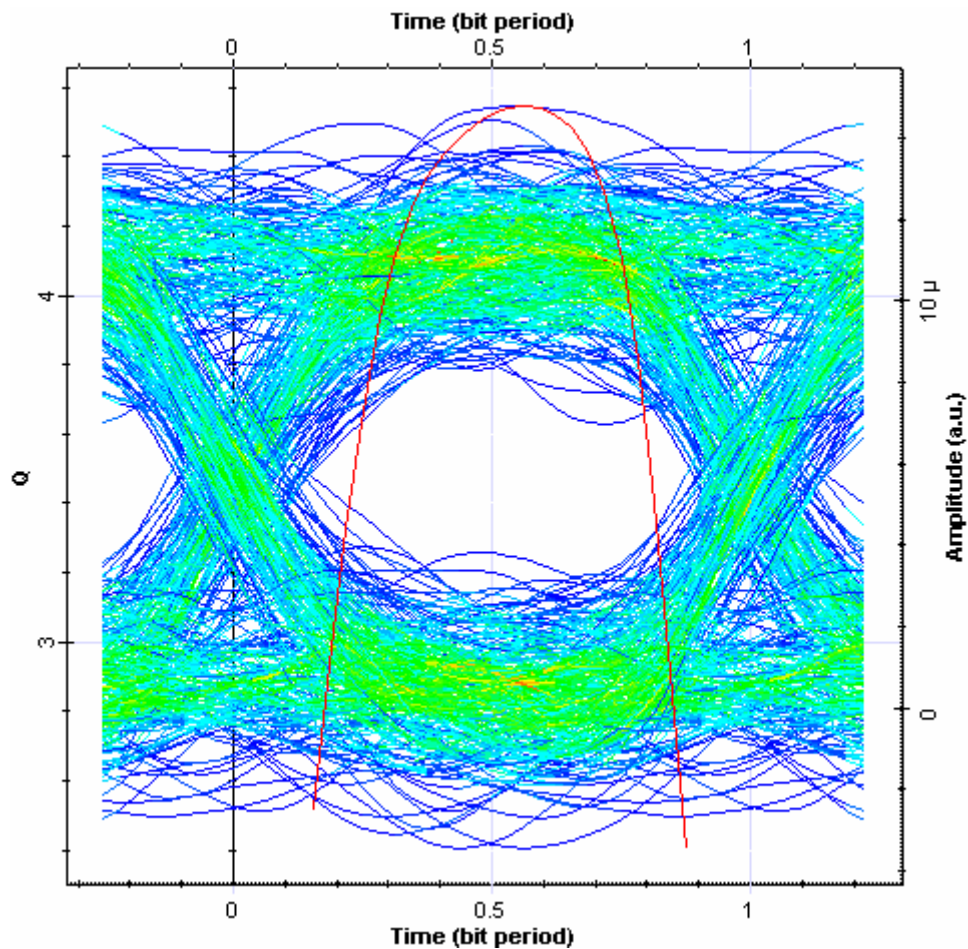
Chybovost BER a Q faktor

Bitová chybovost BER, Q faktor a diagram oka spolu souvisí navzájem, jak bylo popsáno v kapitole 5. V simulačním software OptiSystem probíhá jejich měření a následná vizualizace po převodu optického signálu na elektrický. V navrhované topologii bylo provedeno měření na straně OLT i ONT.



Obr. 7.6: Diagram oka na straně OLT.

Na přijímací straně jednotky OLT byla naměřena hodnota BER $4,18783 \cdot 10^{-8}$, hodnota Q faktoru 5,33885.

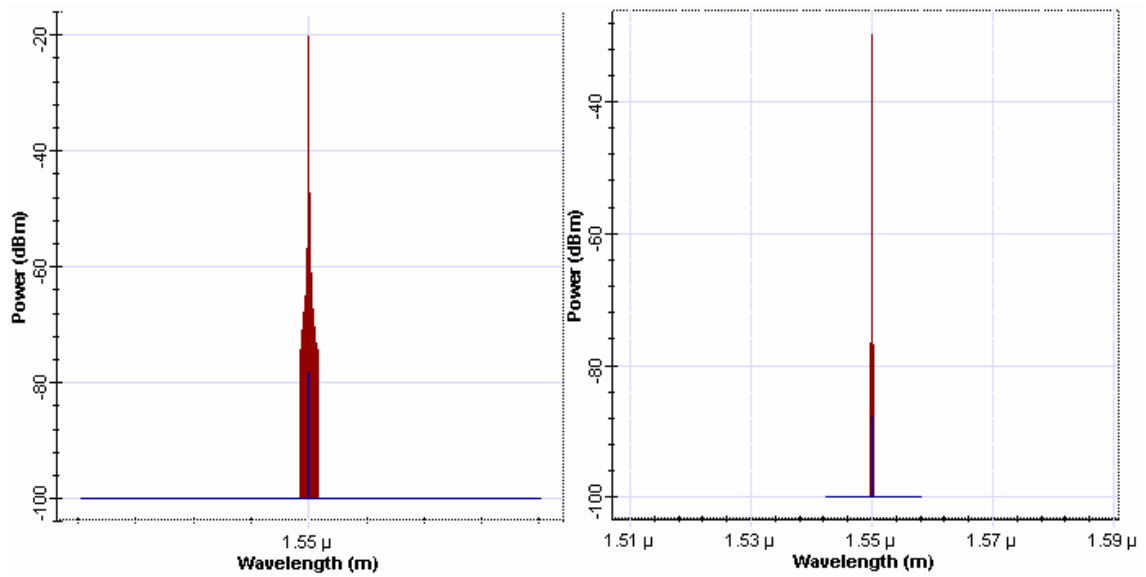


Obr. 7.7: Diagram oka na straně ONT.

Na přijímací straně jednotky ONT byla naměřena hodnota BER $2,7231 \cdot 10^{-6}$, hodnota Q faktoru 4,54681.

Náměr OSA

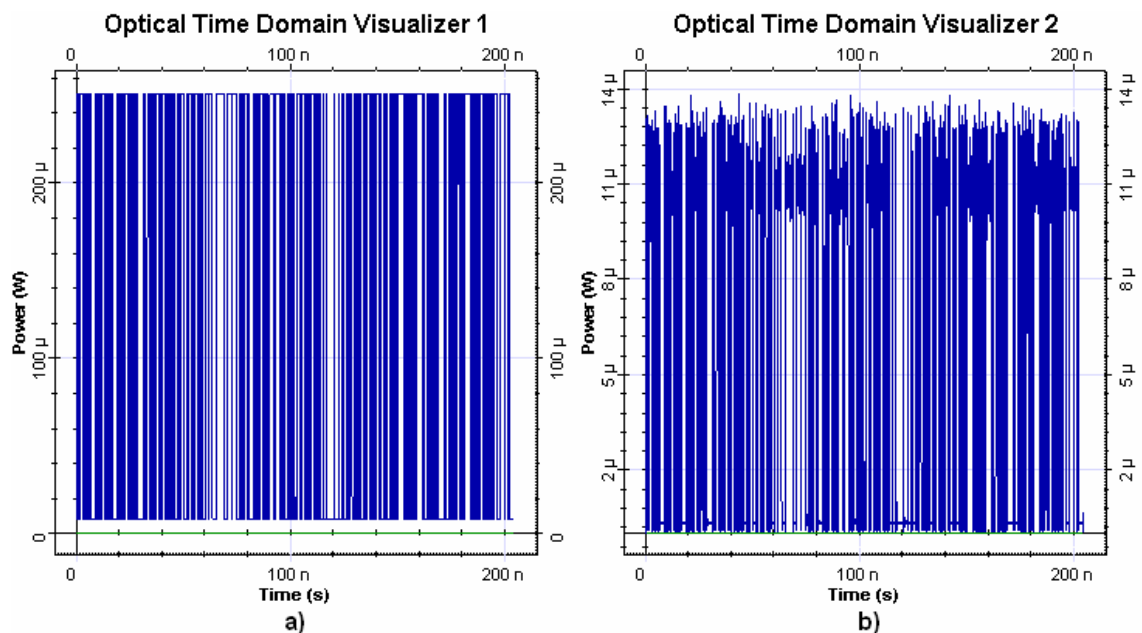
Optický spektrální analyzátor nachází své uplatnění především v sítích xWDM. V síti GPON má pouze informační charakter a byl použit z důvodu možnosti zobrazení spektra signálu, který vstupuje do děliče a který z něj vystupuje. Rozdíly je možné vidět na obr.: 7.8.



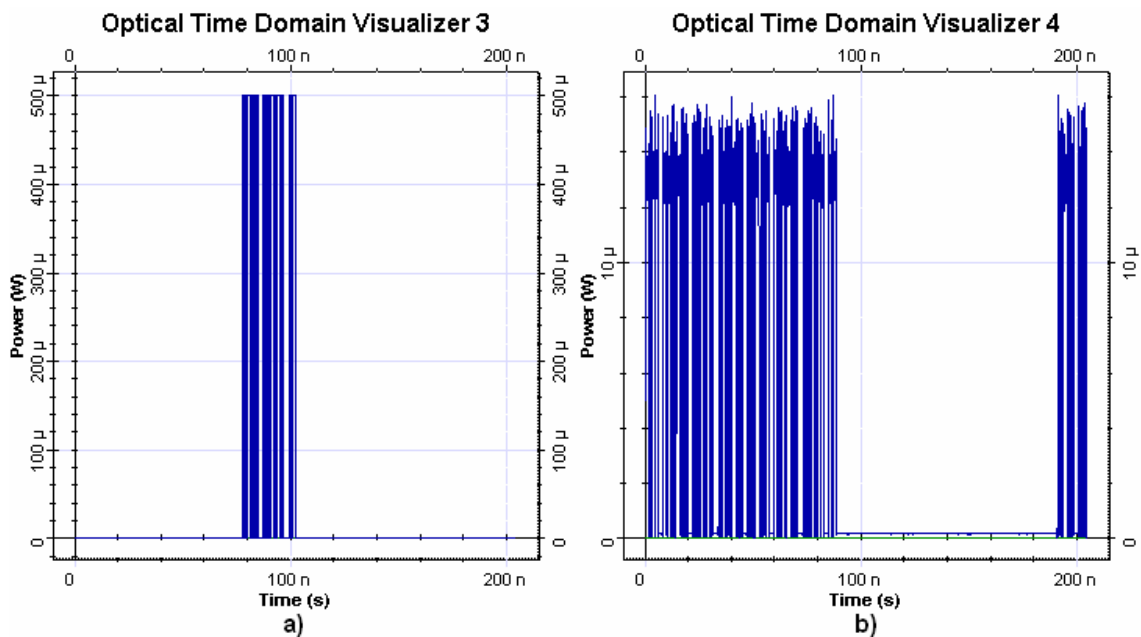
Obr. 7.8: Náměr OSA a) před děličem (OSA1), b) za děličem (OSA2).

Náměr OTDV (Optical Time Domain Visualizer)

Tento vizualizační nástroj slouží pro zobrazení rozložení rámců optického signálu s časovým dělením, kterého využívají PON sítě. Obr 7.9 nám ukazuje OTDV signálu v sestupném směru, obr 7.10 nám ukazuje OTDV náměr ve vzestupném směru.



Obr. 7.9: Náměr OTDV v sestupném směru: a) před děličem (OTDV1), b) za děličem (OTDV2).



Obr. 7.10: Náměr OTDV ve vzestupném směru: a) před děličem (OTDV3), b) za děličem (OTDV4).

7.2 WDM-PON

Při navrhování topologie WDM-PON byly zvoleny obdobné přenosové parametry jako v případě GPON, aby bylo možné provést následnou analýzu a porovnání obou topologií. Navrhovaný model je tedy pro 4 koncové uživatele na vzdálenost 20 km, přenosová rychlost 2,5 Gbit/s symetricky.

7.2.1 Popis navrhované topologie WDM-PON

Stejně jako v případě GPON se i tato topologie skládá z optického linkového zakončení (OLT), optické distribuční sítě (ODN) a z optických síťových zakončení na straně koncových uživatelů (ONT). V zapojení je také použita řada měřících přístrojů, zejména optických spektrálních analyzátorů. Celkové schéma zapojení je obsaženo v příloze B.

OLT

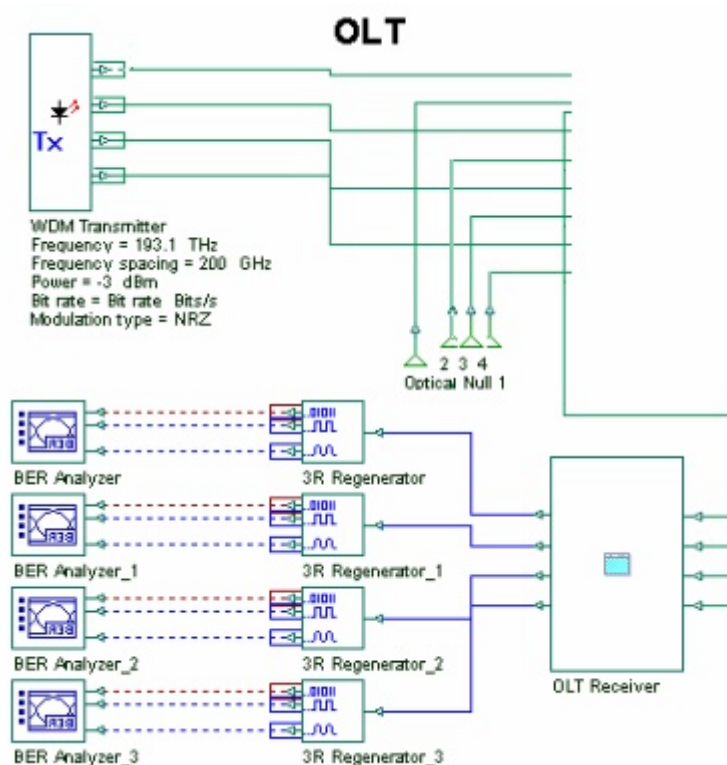
Jednotka OLT používá stejné prvky jako v předchozím zapojení. Optický vysílač má následující parametry:

- pilotní kmitočet 193,1 THz,
- kmitočtový rastr 200 GHz,
- vysílací výkon -3 dBm,
- přenosová rychlost 2,5 Gbit/s,

- modulace NRZ.

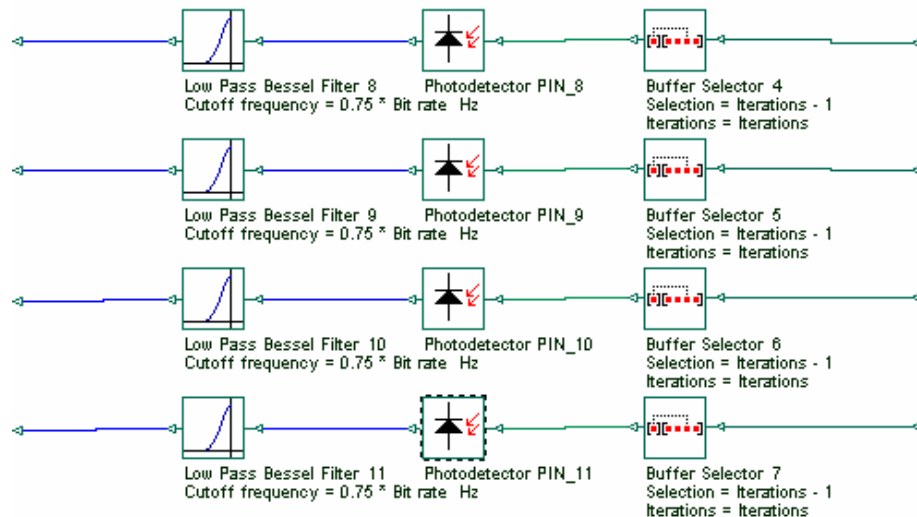
Obousměrný provoz WDM sítí je v prostředí OptiSystem poměrně složitý. V této topologii byl realizován kmitočtovým rastrem 200 GHz pro každý směr, kdy vysílač v OLT vysílá na pilotní frekvenci 193,1 THz a vysílač v ONT má pilotní frekvenci nastavenou na 193,2 THz. Tím je docíleno toho, že celkový kmitočtový rastr je 100 GHz (princip interleaveru), což je parametr, který je nutno nastavit na obou de/multiplexerech AWG, aby se zapojení chovalo správně.

Výkon byl zvolen opět -3 dBm, z důvodů komparace přenosových parametrů GPON sítě. Hodnota výkonu by v případě WDM-PON mohla být nižší, neboť de/multiplexery AWG představují podstatně nižší vložný útlum, než je tomu v případě použití děličů.



Obr. 7.11: Jednotka OLT u WDM-PON.

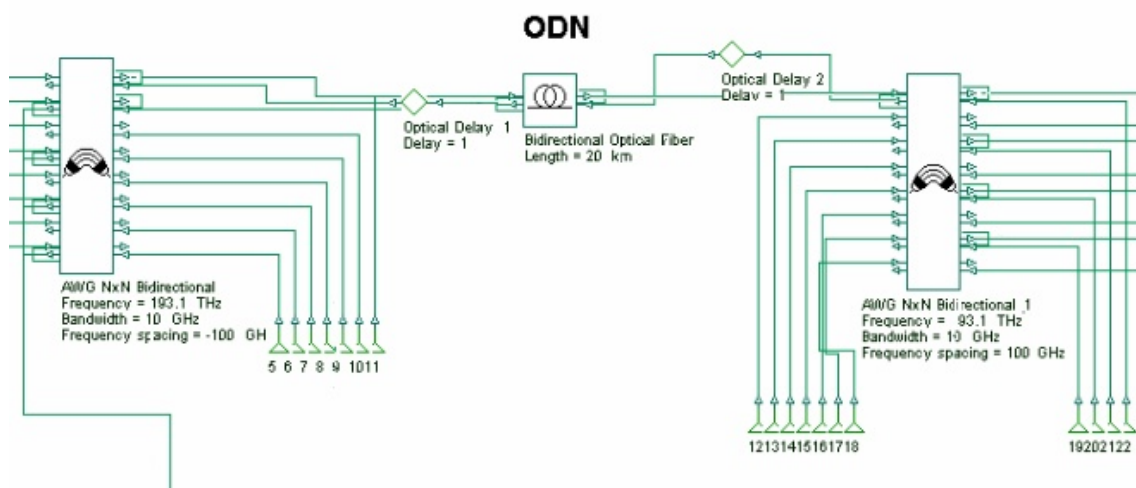
Optický přijímač je v OLT tvořen subsystémem, který obsahuje pro každou větev fotodiody PIN, dolní propusti (besselovy filtry) a buffer selectory. Buffer selector slouží opět pro účely simulace, jak bylo popsáno v 7.1.1. Na výstupy přijímače OLT jsou připojeny 3R regenerátory a následně analyzátoři BER.



Obr. 7.12: Vnitřní zapojení subsystému přijímače v OLT.

ODN

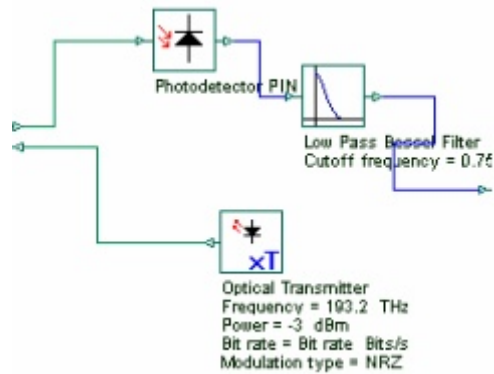
Základem optické distribuční sítě WDM-PON topologie jsou optické de/multiplexery AWG. Oba jsou zapojeny obousměrně, tj. ve funkci multiplexeru i demultiplexeru. Jejich pilotní frekvence je nastavena na hodnotu 193,1 THz a kmitočtový rastr 100 GHz. Jejich vložný útlum byl nastaven na hodnotu 4 dB. V prostřední OptiSystem se vytváří z AWG s N x N vstupy/výstupy AWG s konkrétním počtem vstupů/výstupů tak, že se nevyužité vstupy uzemní optickou nulou, jak je možné vidět na obr. 7.13. Další částí optické přístupové sítě je optické vlákno s délkou 20 km a parametry odpovídajícími vláknu G.652.C/D, tj. vložný útlum 0,2 dB/km a chromatickou disperzí 16,75 ps/nm/km.



Obr. 7.13: Optická distribuční síť WDM-PON.

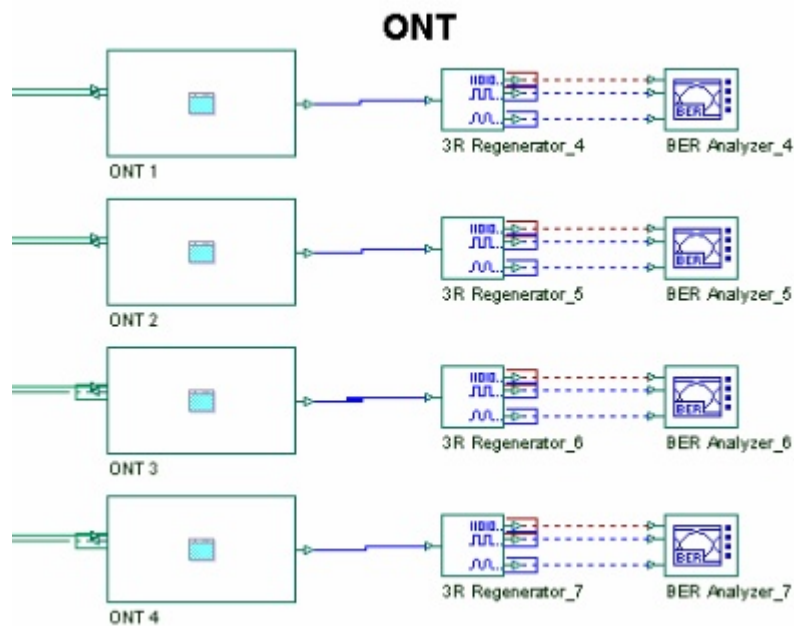
ONT

ONT jednotky jsou tvořeny subsystémy. Jejich vnitřní uspořádání je na obr. 7.14. Příjímá část je tvořena PIN diodou a besselovým filtrem. Vysílací část je tvořena optickým vysílačem, jehož pilotní kmitočet je 193,2 THz, vysílací výkon -3 dBm, typ modulace NRZ a přenosová rychlost 2,5 GHz.



Obr. 7.14: Vnitřní zapojení subsystému jednotky ONT.

ONT jednotky jsou propojeny se vstupy/výstupy AWG, dále je na jejich výstup připojen 3R regenerátor a BER analyzer.



Obr. 7.15: Zapojení ONT jednotek.

7.2.2 Analýza přenosových parametrů

Pro analýzu simulovaného modelu WDM-PON byly z knihovny komponent vybrány následující měřicí přístroje a analyzátoři:

- měřič optického výkonu PM (Power Meter),

- optický spektrální analyzátor OSA,
- WDM analyzátor,
- BER analyzátor.

Zapojení a rozložení měřících přístrojů je dobře patrné z celkového zapojení, které je v příloze B. Situování měřících přístrojů bylo zvoleno tak, aby bylo možné proměřit všechny potřebné parametry sítě. Klíčovým prvkem měřící techniky v sítích s vlnovým multiplexem je optický spektrální analyzátor OSA.

Útlum

Celkový útlum tvoří vložný útlum vlákna, vnitřní útlum vysílačích a přijímacích částí, dále pak útlum de/multiplexerů AWG. Útlum svarů, spojek a konektorů není v simulaci brán v potaz. Na obr. 7.16 jsou zobrazeny výstupy měřičů výkonu zapojených postupně od jednotky OLT až k ONT. Lze tak sledovat, jak se postupně mění výkonové úrovně v jednotlivých částech sítě v sestupném směru.



Obr. 7.16: Výkonové úrovně optického signálu ve směru OLT -> ONT: a) na vstupu AWG (PM2), b) na výstupu AWG (PM3), c) za vláknem (PM5), d) na vstupu ONT (PM7).

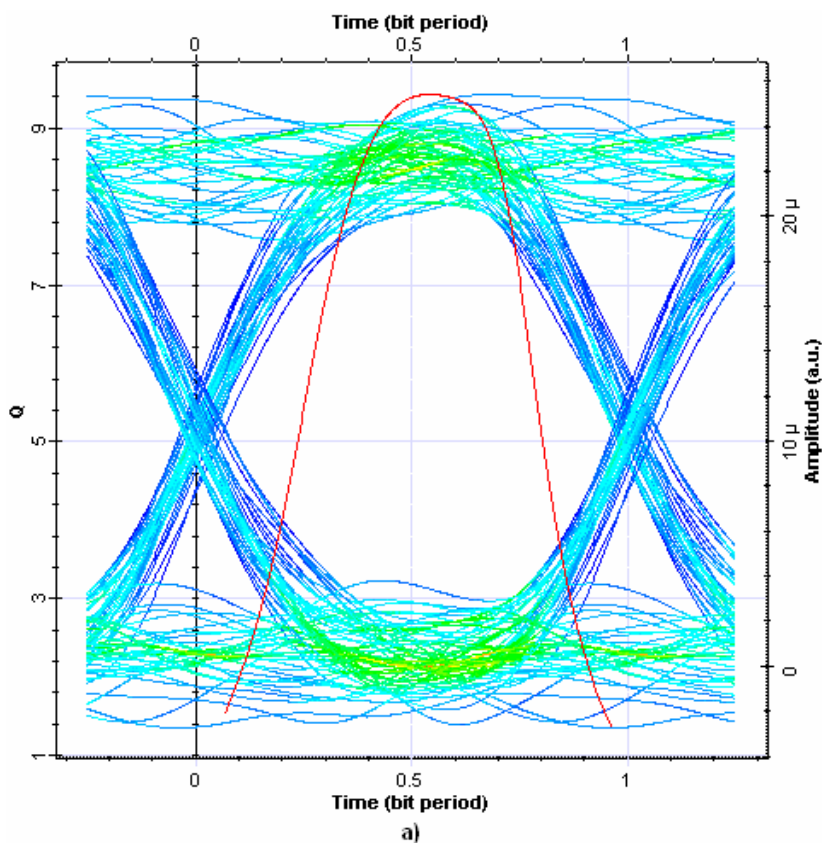
Stejně tak je možné sledovat, jak se mění výkonové úrovně v jednotlivých částech sítě i v opačném směru. Jak je při srovnání obr. 7.16 s obr. 7.17 vidět, výkonové úrovně jsou v obou směrech téměř stejné. To je dané tím, že byly použity na obou stranách vysílače se stejným výstupním výkonem, dále tím, že oba AWG fungují obousměrně, tj. jako multiplexery i demultiplexery.

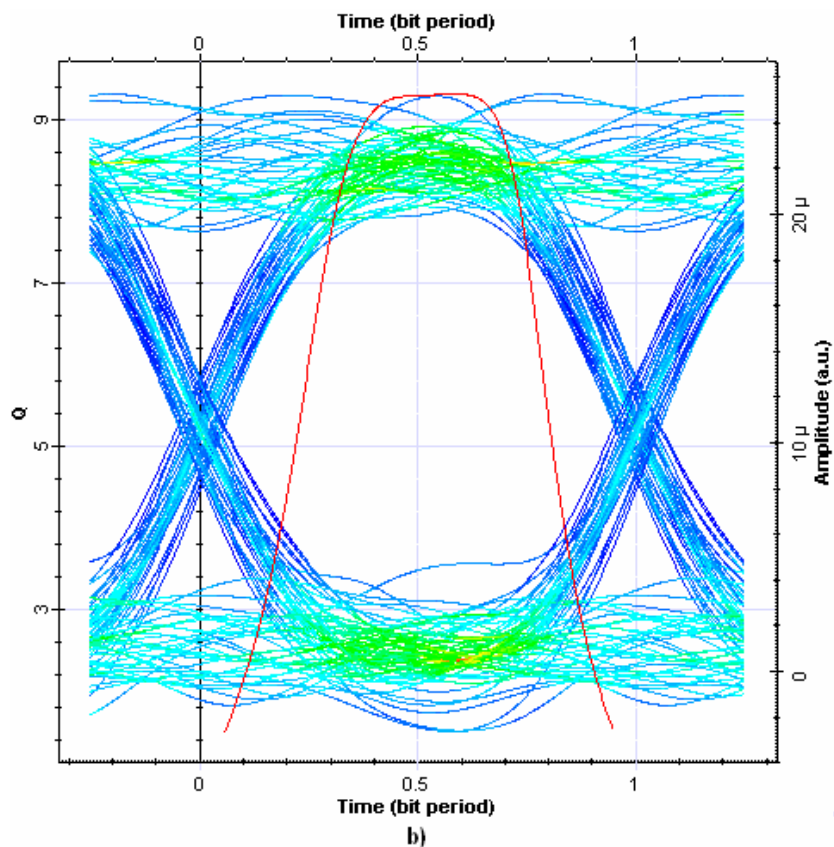


Obr. 7.17: Výkonové úrovně optického signálu ve směru ONT -> OLT: a) na výstupu ONT (PM8), b) na výstupu AWG (PM6), c) za vláknem (PM4), d) na vstupu OLT (PM1).

Chybovost BER a Q faktor

- Bitová chybovost BER v přijímací části OLT pro jeden kanál byla naměřena $2,13034 \cdot 10^{-21}$, hodnota Q faktoru 9,42599. Diagram oka je znázorněn na obr. 7.18 a).
- Na výstupu ONT byla naměřena pro jeden kanál bitová chybovost BER $6,29254 \cdot 10^{-21}$, hodnota Q faktoru 9,3114. Diagram oka je znázorněn na obr. 7.18 b).

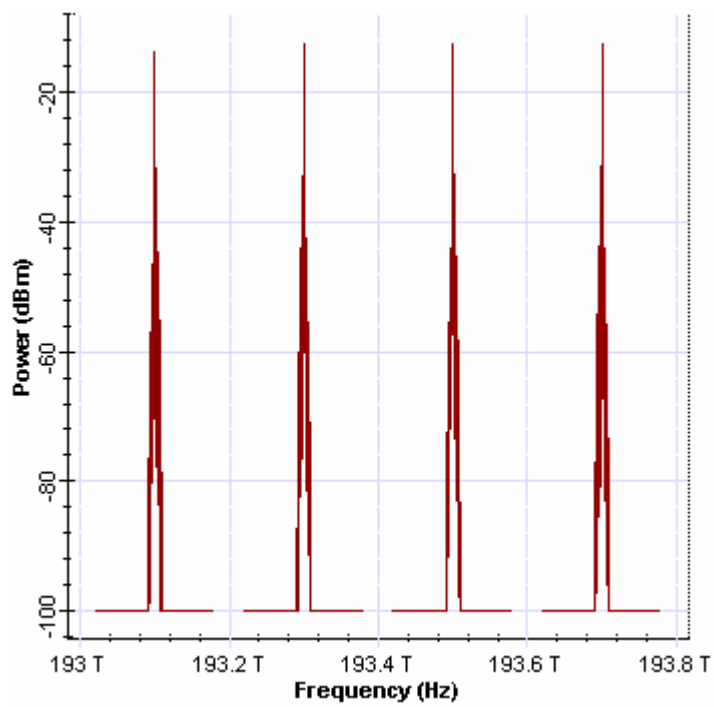




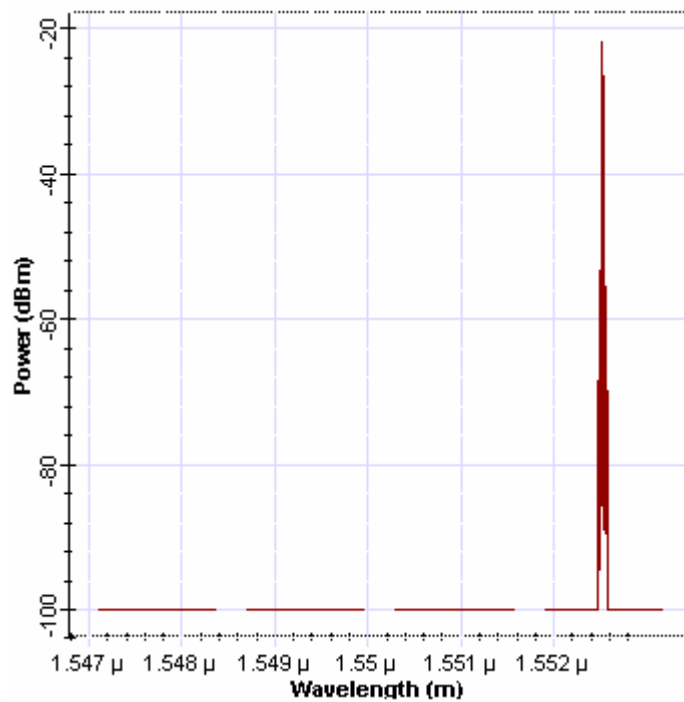
Obr. 7.18: Diagram oka: a) na straně OLT, b) na straně ONT.

Náměr OSA

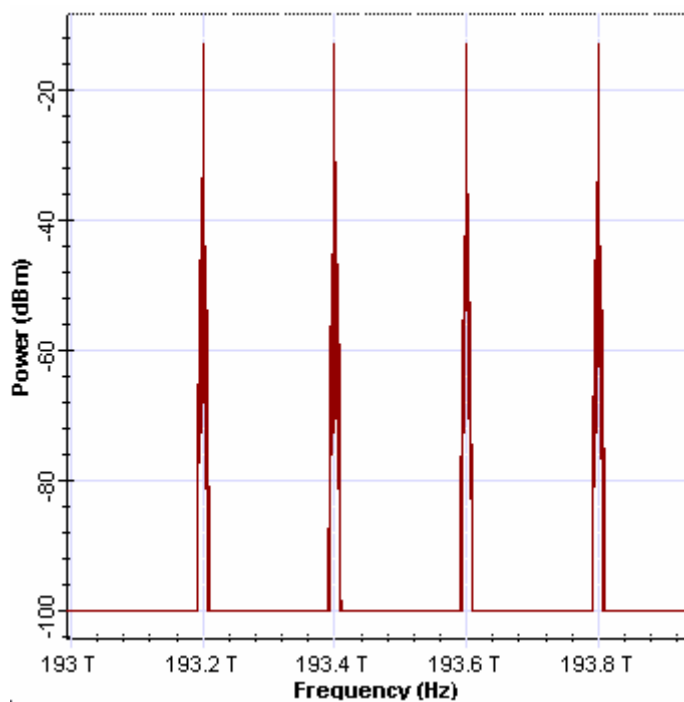
Optický spektrální analyzátor nám dává o síti s vlnovým dělením nejvíce informací, proto jich bylo použito hned několik. Rozmístění jednotlivých OSA viz příloha B. Prvním důležitým místem, kde se měří pomocí OSA je za multiplexerem v sestupném směru, tj. v místě, kde můžeme změřit všechny příspěvkové kanály. Spektrum multiplexovaného signálu je na obr. 7.19. Dalším místem, kde se často provádí měření OSA, jsou jednotlivé kanály vydělené multiplexerem. Náměr OSA pro jeden kanál je na obr. 7.20. Vzhledem k nastavené vysoké citlivosti měření je patrný i šum ostatních kanálů. Stejně měření se provádí i ve vzestupném směru. Na obr. 7.21 je zobrazeno spektrum multiplexovaného signálu ve vzestupném směru, čili od jednotek ONT zpět do OLT. Při porovnání multiplexovaných signálů v sestupném i ve vzestupném směru vidíme, že výkonová úroveň spekter signálů je vyrovnaná a přibližně shodná pro oba směry přenosu, dále také můžeme vidět umístění kanálů v kmitočtovém spektru s rastrem 200 GHz, jak bylo popsáno v 7.2.1. Na obr. 7.22 můžeme vidět náměr pro jeden kanál, vydělený demultiplexer ve vzestupném směru.



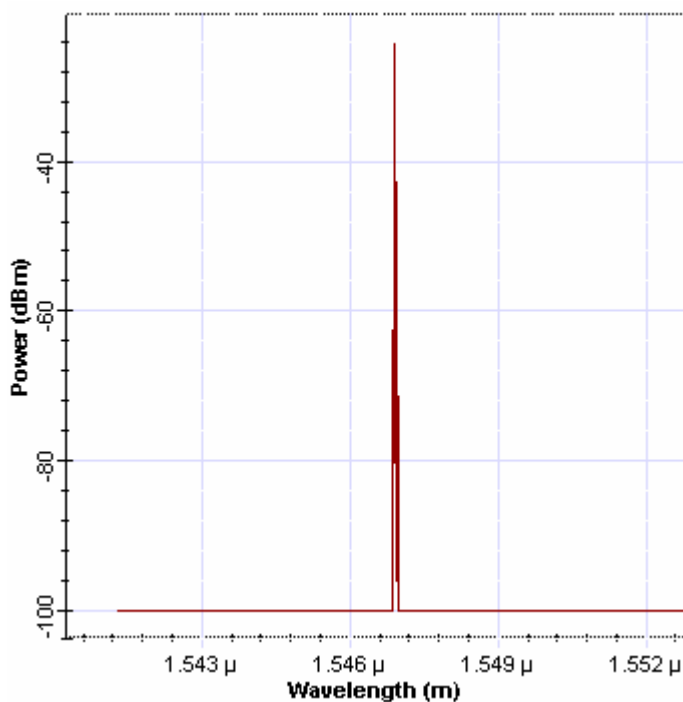
Obr. 7.19: Náměr OSA za multiplexerem v sestupném směru (OSA3).



Obr. 7.20: Náměr OSA za demultiplexerem pro jeden kanál v sestupném směru (OSA6).



Obr. 7.21: Náměr OSA za multiplexerem ve vzestupném směru (OSA8).



Obr. 7.22: Náměr OSA za demultiplexerem pro jeden kanál ve vzestupném směru (OSA2).

WDM Analyzátor

OptiSystem nabízí v knihovně měřících přístrojů WDM analyzátor, velice efektivní nástroj pro souhrnné zobrazení parametrů multiplexovaného signálu. Umísťuje

se tudíž za multiplexer, jak je patrné v příloze B. Výstup toho analyzátoru nám zobrazí parametry jednotlivých kanálů přehledně do tabulky. Mezi tyto parametry patří kmitočet kanálu (Frequency), výkon v kanálu (Signal Power), úroveň šumu (Noise Power) a odstup signál/šum (OSNR). Jak je z obr. 7.23 vidět, analyzátor nám zobrazuje i parametry kanálů, které jsou použity v opačném směru, tzn., že jsou tyto kanály uzemněny přes optickou nulu a nenesou žádný užitečný signál. Kmitočty 193,1; 193,3; 193,5 a 193,5 THz byly použity pro sestupný směr přenosu, kmitočty 193,2; 193,4; 193,6 a 193,8 THz pro směr vzestupný.

Frequency (THz)	Signal Power (dBm)	Noise Power (dBm)	OSNR (dB)
193.1	-9.9974211	-100	90.002579
193.2	-100	-100	0
193.3	-9.9958183	-100	90.004182
193.4	-100	-100	0
193.5	-9.9955673	-100	90.004433
193.6	-100	-100	0
193.7	-9.9327524	-100	90.067248
193.8	-100	-100	0
	Signal Power (dBm)	Noise Power (dBm)	OSNR (dB)
Min value	-100	-100	0
Max Value	-9.9327524	-100	90.067248
Total	-3.9597025	-143.32033	
Ratio max/min	90.067248	0	0
	(THz)	(THz)	(THz)
Frequency at min	193.2	193.1	193.2
Frequency at max	193.7	193.6	193.7

a)

Frequency (THz)	Signal Power (dBm)	Noise Power (dBm)	OSNR (dB)
193.1	-100	-100	0
193.2	-9.932564	-100	90.067436
193.3	-100	-100	0
193.4	-9.932564	-100	90.067436
193.5	-100	-100	0
193.6	-9.932564	-100	90.067436
193.7	-100	-100	0
193.8	-9.932564	-100	90.067436
	Signal Power (dBm)	Noise Power (dBm)	OSNR (dB)
Min value	-100	-100	0
Max Value	-9.932564	-100	90.067436
Total	-3.9119641	-143.25007	
Ratio max/min	90.067436	0	0
	(THz)	(THz)	(THz)
Frequency at min	193.1	193.6	193.1
Frequency at max	193.6	193.7	193.6

b)

Obr. 7.23: Výstupy WDM analyzátoru: a) v sestupném směru (WDM Analyzer 1), b) ve vzestupném směru (WDM Analyzer 3).

7.3 Srovnání GPON x WDM-PON

Cílem těchto simulací bylo zejména porovnání přenosových parametrů navrhovaných topologií. V obou případech byly nastaveny prvky společné oběma sítím na stejné hodnoty. Jedná se o parametry optického přenosového vlákna, vysílacích výkonů laserů, použitých modulací a přenosové rychlosti. Navrhované topologie jsou pouze pro 4 koncové uživatele, neboť simulovaná WDM-PON bude v následující kapitole porovnávána s výsledky měření na reálné síti. V případě GPON bylo provedeno měření:

- výkonových úrovní v různých částech sítě,
- chybovosti BER a Q faktoru,
- pomocí OTDV,
- optickým spektrálním analyzátozem OSA.

V případě WDM-PON bylo provedeno měření:

- výkonových úrovní v různých částech sítě,
- chybovosti BER a Q faktoru,
- optickým spektrálním analyzátozem OSA,
- WDM analyzátozem.

V praxi je také nedílnou součástí měření útlumu trasy pomocí reflektometrické metody OTDR, to bohužel není v OptiSystemu možné. U každé ze simulovaných topologií je jistý soubor měření klíčový. V rámci OptiSystemu je to u GPON měření výkonových úrovní, BER a OTDV. Z WDM-PON je to zejména měření pomocí OSA, dále pak měření výkonových úrovní a chybovosti BER. Porovnat tedy lze pouze ty parametry, které je možné měřit v obou simulovaných modelech.

Měření výkonových úrovní

Vzhledem k rozdílnosti optické distribuční sítě u obou variant je pro srovnání podstatný pouze výkon vstupující do přijímacích částí OLT/ONT.

GPON:

- naměřená výkonová úroveň v ONT: -22,512 dBm,
- naměřená výkonová úroveň v OLT: -21,513 dBm.

WDM-PON:

- naměřená výkonová úroveň v ONT: -18,012 dBm,
- naměřená výkonová úroveň v OLT: -17,946 dBm.

Výkonové úrovně jsou u GPON nižší, což je způsobeno vložitelným útlumem děliče, který představuje největší část útlumu optické distribuční sítě. Útlum děliče s rozbočovacím poměrem 1:4 je přibližně 6 - 7 dB, útlum AWG de/multiplexeru je přibližně 3 - 4 dB, přičemž nezáleží na počtu výstupních portů. Pro větší počet koncových uživatelů by tato diference byla podstatně výraznější.

Měření bitové chybovosti BER a Q faktoru

Bitová chybovost i Q faktor jsou parametry, které také ovlivňuje útlum trasy, tudíž i úroveň optického signálu. Dále pak šum, disperze a nelineární jevy. WDM systémy jsou obecně známé tím, že vykazují podstatně nižší chybovost a vyšší hodnotu Q faktoru v porovnání v PON sítích. Stejně tak je tomu i v případě těchto simulací.

Tab. 7.1: Porovnání hodnot BER a Q faktoru.

	BER - OLT	Q faktor - OLT	BER - ONT	Q faktor - ONT
GPON	$4,18783 \cdot 10^{-8}$	5,33885	$2,7231 \cdot 10^{-6}$	4,54681
WDM - PON	$2,13034 \cdot 10^{-21}$	9,42599	$6,29254 \cdot 10^{-21}$	9,3114

Z tab. 7.1 je patrné, že rozdíly v bitových chybovostech jsou mezi simulovanými modely odlišné o několik řádů a hodnota Q faktoru je přibližně dvojnásobná ve prospěch WDM-PON. Porovnáme – li obr. 7.6, obr. 7.7 a obr. 7.18, tak je zřejmé, že i otevření oka je v případě WDM-PON větší, což značí lepší kvalitu signálu. Z diagramů oka můžeme také vidět, že jitter (kolísání zpoždění) a mezisymbolová interference (ISI) jsou u WDM-PON podstatně menší.

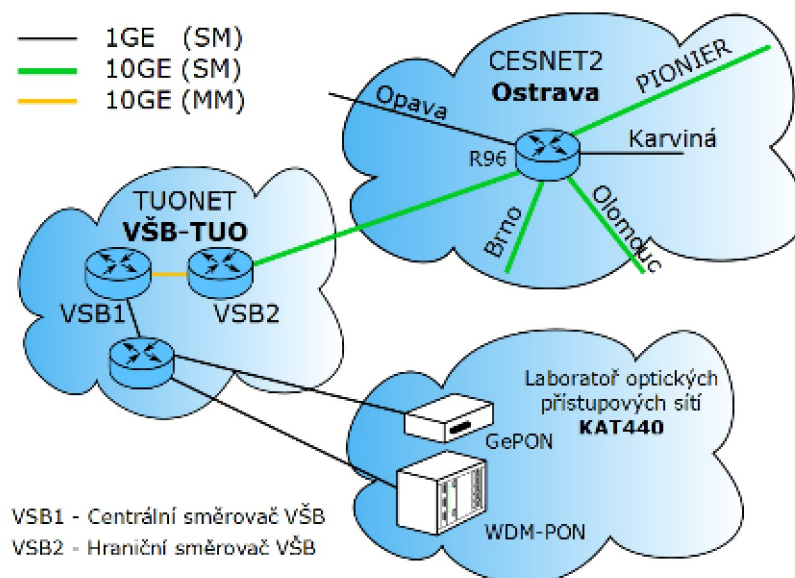
Zhodnotíme – li výsledky porovnání simulovaných modelů, dospějeme k závěru, že optické přístupové sítě WDM-PON mají podstatně lepší přenosové parametry v porovnání s GPON. V případě většího počtu koncových uživatelů by byly rozdíly mnohem výraznější. WDM-PON sítě mají velké předpoklady pro budoucí nasazení do provozu.

8. Praktické měření WDM-PON

Tato závěrečná část práce se věnuje praktickému měření na reálné síti WDM-PON. Toto měření vzniklo v úzké spolupráci s vysokou školou báňskou – Technickou univerzitou Ostrava, Fakultou elektrotechniky a informatiky, Katedrou telekomunikační techniky (VŠB - TUO), která poskytla zázemí pro potřebné měření. Dále pak se společností Profiber Networking s.r.o., která poskytla zápůjčku nezbytných měřících přístrojů. Technologie WDM-PON optických přístupových sítí je v současné době na experimentální úrovni a v České republice se nenachází žádné jiné experimentální pracoviště, než-li je na VŠB - TUO, proto je možnost toho měření velice ojedinělá.

8.1 Popis experimentálního pracoviště

Konektivita laboratoře optických přístupových sítí KAT440 se sítí TUONET je zajištěna dvěma optickými jednovidovými vlákny s Gbit/s přenosem, kde jedno vlákno datově propojuje WDM-PON a druhé GePON jednotky OLT umístěné v laboratoři optických přístupových sítí. Datové propojení mezi jednotlivými optickými sítěmi až k páteřní síti CESNET je znázorněno na obr. 8.1.

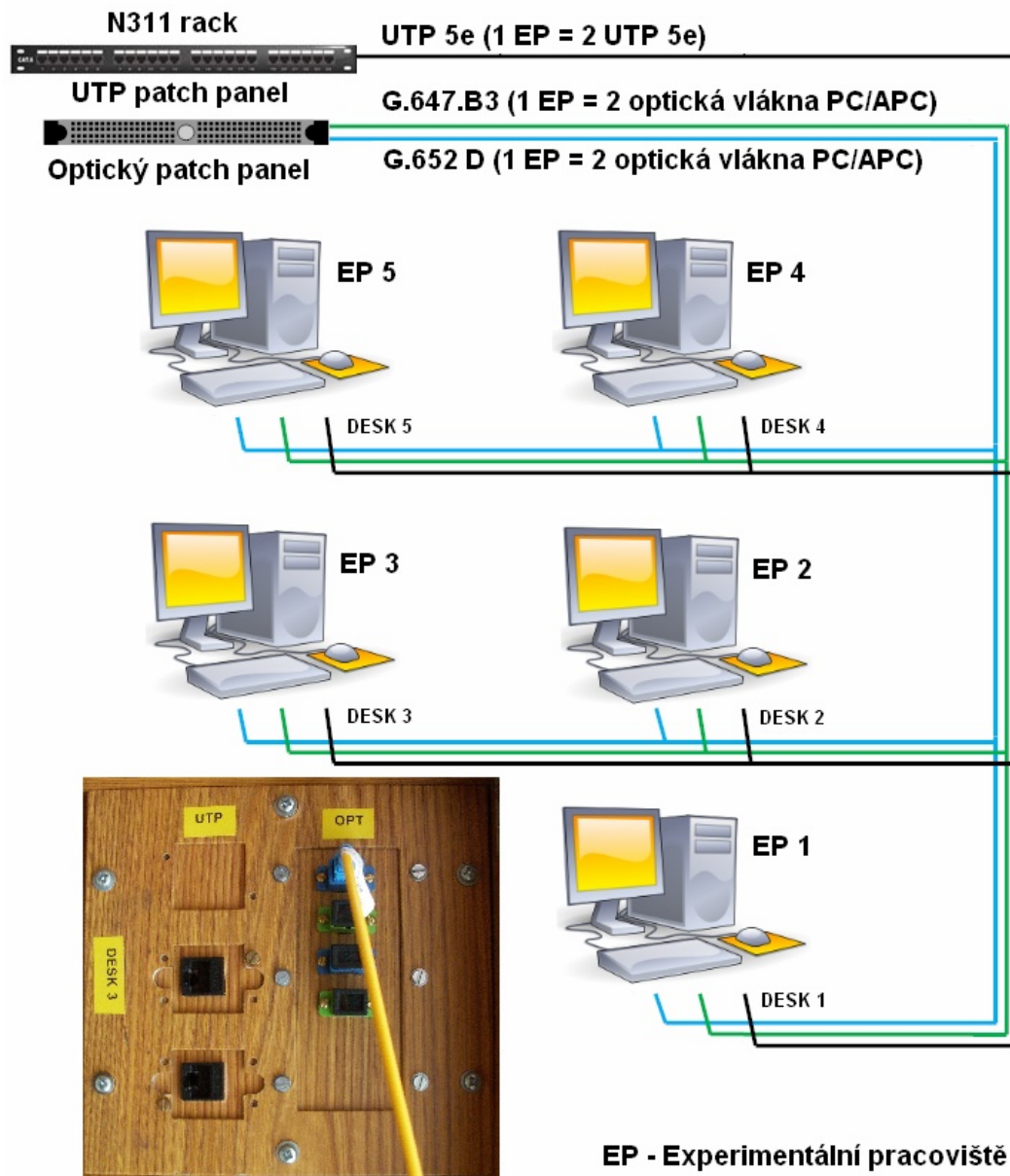


Obr. 8.1: Konektivita laboratoře optických přístupových sítí katedry telekomunikační techniky 440.

Struktura zapojení optických vláken laboratoře

Srdcem celé WDM-PON sítě je rack N311 obsahující všechny aktivní prvky plnící funkci OLT i pasivní prvky pro simulování optické distribuční sítě. Z toho racku jsou vedeny do jednotlivých EP (Experimentálních Pracovišť) 2 optická vlákna G.652 D

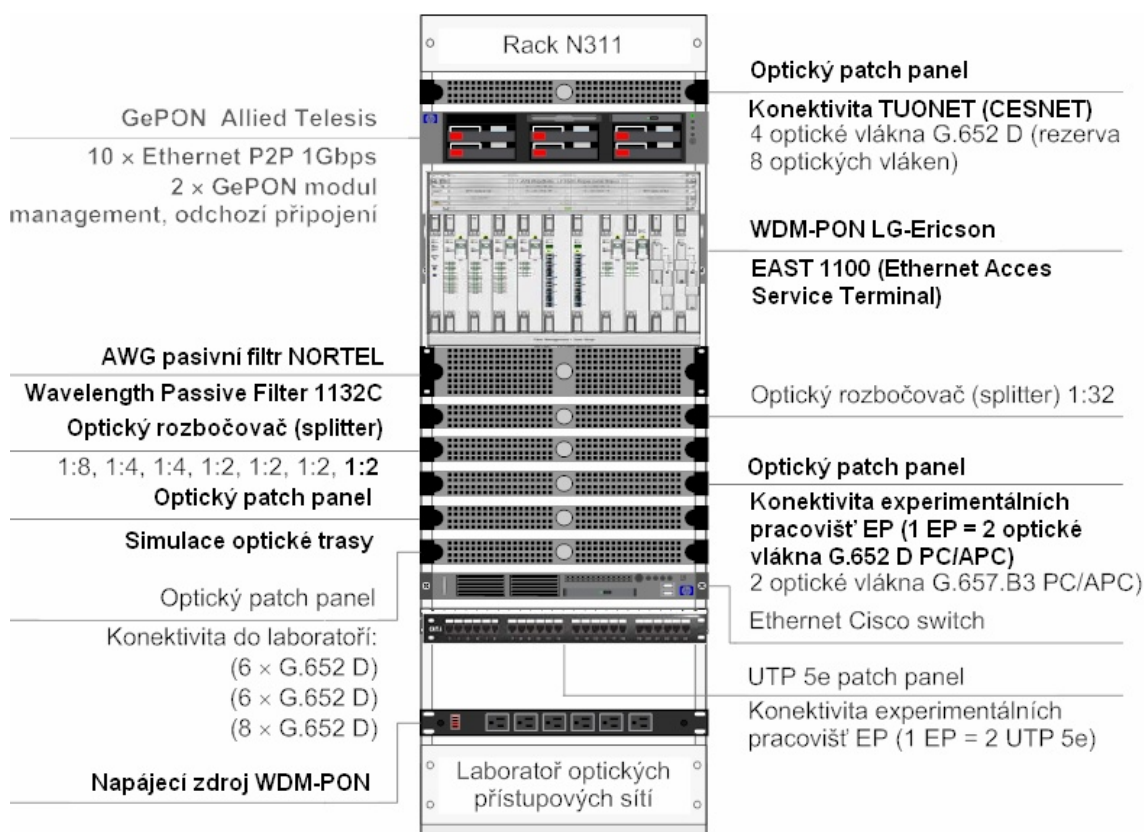
a 2 optická vlákna G.657.B3. Dvojice vláken jsou zakončeny v zásuvce pro šikmý (APC) a rovný (PC) konektor typu SC. Skutečnost, že je možné použít obou druhů konektorů, velice usnadňuje práci, protože měřicí přístroje mají různá rozhraní a ne vždy jsou po ruce přechodky, které navíc do trasy vnášejí další vložný útlum. Spolu s optickými vlákny jsou na experimentální pracoviště přivedeny také kroucené páry UTP cat 5e. Schéma rozvodu optických vláken je na obr. 8.2.



Obr. 8.2: Schéma rozvodu optických vláken v laboratoři.

Vybavení racku N311

Rack N311 obsahuje vybavení aktivních prvků tvořících OLT pro síť PON i WDM-PON. Dále obsahuje pasivní prvky pro vytváření distribuční sítě. Výpis jednotlivých prvků a jejich umístění je na obr. 8.3.



Obr.8.3: Vybavení racku N311.

Na obr. 8.3 jsou tučně znázorněny prvky, které byly v rámci měření využity. Jedná se zejména o platformu WDM-PON LG-Ericsson EAST 1100 Release 3, který realizuje funkci jednotky OLT, dále pak napájecí zdroje, de/multiplexer AWG Nortel, dělič 1:2, simulace optické trasy a konektivita experimentálních pracovišť.

WDM-PON LG-Ericsson EAST 1100

LG-Ericsson, nyní již pod obchodním označení LG-Nortel EAST (Ethernet Access Service Terminal) je hlavní stanice určená pro instalace do hlavních rozvodů. Tato platforma je provedena jako modulární a umožňuje snadné rozšíření kapacity. Je vhodná pro veškeré dnes provozované triple-play služby, jako je IPTV, VoD (Video On Deman) – video na vyžádání, VoIP a vysokorychlostní internet. Integrované prvky zahrnují diagnostickou kartu dohledového systému, dva L2/L3 switche a 8x porty pro karty obsluhy koncových zařízení. Jako další vlastnosti můžeme uvést podporu [23]:

- VLAN - IEEE 802.1q, podpora IEEE 802.3ad,
- Spanning Tree Protocol (STP) IEEE 802.1D,
- klasifikace priorit datového provozu IEEE 802.1p,

- mapování mezi Layer 2 Class of Service (CoS) a Layer 3,
- stupňování šíře pásma po 64 Kbps krocích,
- Internet Group Message Protocol (IGMP), PPPoE Agent,
- Až 4 DHCP (Dynamic Host Configuration Protocol) servery, DHCP Snooping,
- switch-network interface card, až 1000 IP adres, a mnohé další.

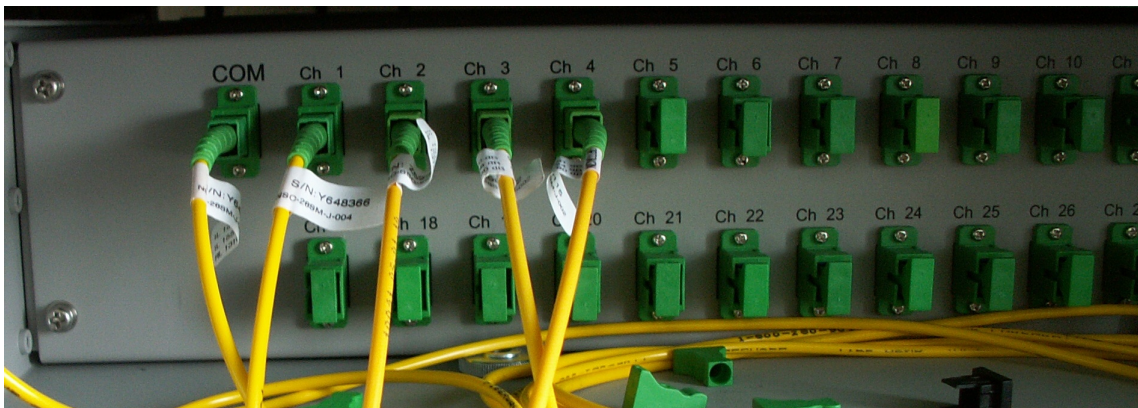


Obr. 8.4: WDM-PON LG-Ericsson EAST 1100.

Platforma LG-Ericsson EAST 1100 by samozřejmě nepracovala správně bez karty obsluhy koncových zařízení. V platformě EAST 1100 byla použita karta LG-Nortel 4_PI. Tato karta představuje de/multiplexační modul, který podporuje až 32 vlnových délek při přenosové rychlosti 100 Mbit/s nebo 16 vlnových délek při rychlostech 1 Gbit/s. Teoretická dosažitelná vzdálenost je při tom 40 km [23]. Další nepostradatelnou kartou je LG-Nortel SW_NI, což je modul síťového rozhraní. Slouží pro připojení na vnější síť. Fyzické rozhraní je formou SFP 8GE/10GE portů [23]. Na obr. 8.4 je možné vidět platformu LG-Ericsson EAST 1100 včetně přídatných karet. Pro konfiguraci byl použit software LG-Nortel EMS. Jedná se o grafický systém určený pro management zařízení EAST 1100, který je spravován přes grafické webové rozhraní [23].

LG-Nortel WPF 1132c

Tento pasivní AWG filtr slouží pro multiplexaci a demultiplexaci optického signálu na trase mezi OLT a koncovým zákazníkem. Filtr je schopen odfiltrovat jednotlivé vlnové délky na příslušné výstupy a vzájemně tyto linky od sebe izolovat. V případě měření bylo využito pouze 4 vlnových délek. Na obr 8.5 je možné vidět filtr AWG s patchordy propojující jej s OLT a ONT jednotkami.

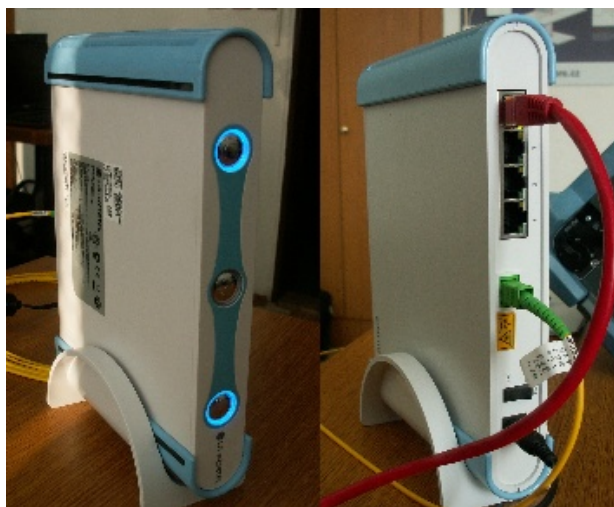


Obr. 8.5: AWG filtr.

LG-Nortel EARU 1112

Dalším prvkem nezbytným pro provoz WDM-PON systému je koncová jednotka ONT. Pro měření byl použit model LG-Nortel EARU 1112, který spadá do kategorie malých koncových zařízení instalovaných především v domácnostech. Mezi přednosti tohoto produktu patří [23]:

- plná kompatibilita v celém spektru vlnových délek,
- klasifikace služeb na úrovni L2/L3,
- podpora STP, RSTP,
- rozhraní 4 x RJ-45, 1 x SC/APC atd.



Obr. 8.6: LG-Nortel EARU 1112.

8.2 Měřicí přístroje

Pro měřicí účely byly zapůjčeny přístroje kanadské společnosti EXFO, jejichž produkty patří mezi světovou špičku v oblasti měření optických i metalických datových sítí. Seznam měřících přístrojů je v tab. 8.1.

Základem měřící aparatury je univerzální platforma EXFO FTB-500, která je v současné době považována za nejvyspělejší technologii na trhu multimodulárních testovacích platforem. Její výhodou je zejména intuitivní ovládání, možnost kombinovat více testovacích programů, snadný management dat a programů, vysoká výkonnost a rychlé zpracování výsledků měření pomocí FastReporter softwaru v platformě. Do této platformy byl zapojen 2-slotový měřicí modul optického spektrálního analyzátoru EXFO FTB-5240, který umožňuje rychlou a přesnou diagnostiku a kontrolu DWDM/CWDM sítí, automatické kanálové vyhledávání, jeho dynamický rozsah je až 90 dB. Dalším modulem, který byl zapojen do FTB-500 je Ethernet analyzátor FTB-8510B, díky němuž je možné testovat kvalitu sítí dle nového standardu ITU-T Y.156.sam (EtherSAM) spolu s komplexní analýzou triple play služeb.

Pro měření OTDR byla použita nová platforma FTB-1 spolu s modulem optického reflektometru FTB-730, jehož dynamický rozsah je do 39 dB. FTB-1 může být použit také ve funkci měřiče optického výkonu, dále umožňuje generovat reporty z výsledků měření, což značně usnadňuje práci.

Posledním použitým přístrojem byl analyzátor pro ethernet A E1 DS1/DS3 AXS 200-855, který byl použit ve funkci tzv. smyčky (Smart Loopback) při měření QoS.

Tab. 8.1: Seznam měřících přístrojů.

Označení výrobku	Výrobní číslo
FTB-500	485650
TFB-5240S	487097
FTB-8510B	519837
AXS-200	522519
AXS-855	517757
FTB-1	545455
FTB-730	540682
FTB-PSB-B	PRO000085

Další prvky nutné pro měření:

- mikroskop pro kontrolu čistoty čel konektorů,

- předřadné vlákno,
- patchcordy SC/APC, SC /PC,
- patchcord duplex LC/LC,
- přechodky APC/PC,
- atenuátory 3, 5, 10 a 15 dB,
- FSP transceiver Finisar 1310 nm.

8.3 Soubor měřících testů

Měření bylo provedeno v rámci technických možností a jeho cílem je demonstrovat průběh měření základních parametrů v optické přístupové síti WDM-PON menších rozměrů, dále pak také porovnání výsledků reálného měření se simulacemi. Na základě zapůjčených měřících přístrojů byly provedeny následující testy:

- měření optickým spektrálním analyzátozem OSA,
- měření výkonu širokopásmového optického signálu,
- měření útlumu trasy reflektometrickou metodou OTDR,
- měření kvality služeb.

Pro porovnání se simulovanou WDM-PON sítí lze využít sice jen náměr OSA a výsledky z měření výkonu, ale vzhledem k dalším možnostem měřících přístrojů, které byly k dispozici, bylo provedeno i měření kvality služeb a útlumu trasy.

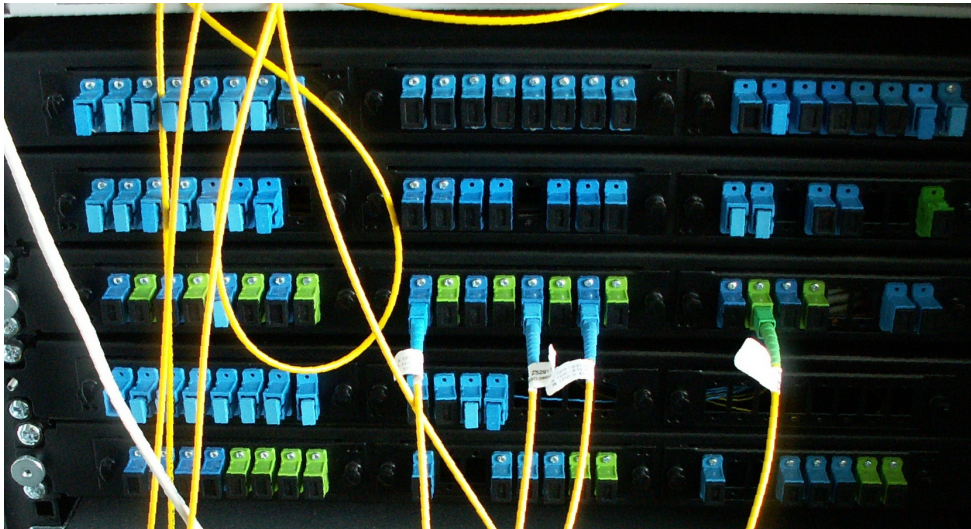
8.3.1 Měření optickým spektrálním analyzátozem OSA.

Síť WDM-PON na experimentálním pracovišti je založena na čtvrtém principu WDM-PON, který byl popsán v 6.3. V ONT jednotkách je využito FP laseru, který se naladí na základě stimulační vlnové délky přicházející od AWG. To ovlivňuje způsob měření, který je nutné aplikovat pro docílení správných výsledků. Tento způsob spočívá v použití děliče 1:2, který je nutno zapojit mezi jednotku OLT a AWG. Měření probíhalo v sestupném i ve vzestupném směru mezi OLT a AWG. Další měření, např. jednotlivých kanálů nebylo z důvodu poruchy děliče možné.

V OLT byl prostřednictvím konfiguračního software LG-Nortel EMS nastaven datový provoz na 4 vlnových délkách s kmitočtovým rastrem 100 GHz, přenosovou rychlostí 100 Mbit/s na kanál a výstupním výkonem 5,5 dBm. Pro sestupný směr bylo využito L pásmo, pro vzestupný směr C pásmo.

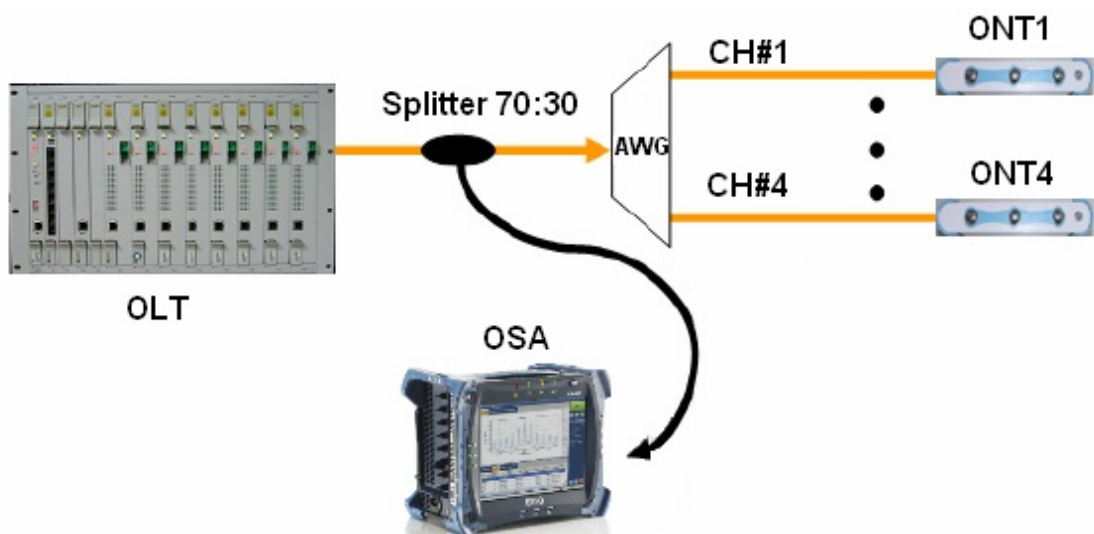
Měření v sestupném směru

Mezi optický výstup OLT a vstup AWG filtru je nutné zařadit dělič 1:2, který vydělil část optického signálu přes AWG do jednotky ONT a zbylá část signálu je vedena do optického spektrálního analyzátoru. V našem případě byl dělicí poměr 70:30, tzn., že 30% signálu šlo do optického spektrálního analyzátoru a 70% signálu bylo vedeno do AWG filtru. Tento dělicí poměr zajistí dostatečnou výkonovou úroveň pro naladění jednotek ONT i pro měření spektrálním analyzátozem. Výstupy AWG filtru byly pomocí patchordů propojeny na patch panelu s optickými vlákny, které vedou optický signál na jednotlivá experimentální pracoviště (DESK1 – DESK4), na kterých byly prostřednictvím patchordů připojeny ONT jednotky. Názorné schéma měření je znázorněno na obr. 8.8.



Obr. 8.7: Zapojení děliče na optickém patch panelu.

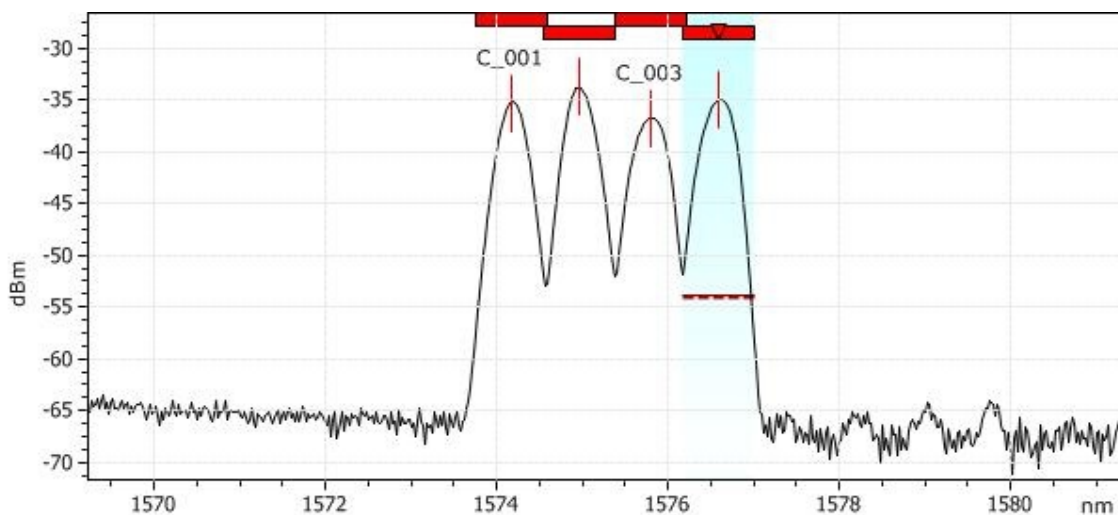
Měření optickým spektrálním analyzátozem není snadné, jak se může z počátku zdát. Je třeba nastavit správné parametry měření, což může při prvním kontaktu s tímto přístrojem trvat i celé hodiny. V případě našeho měření se jednalo o nastavení správného pásmového rozsahu (L + C pásmo), dále o nastavení prahových hodnot pro odstup signál/šum (OSNR), minimální měřitelná úroveň výkonu a zejména parametry OSRN flatness a Power flatness. Tyto parametry udávají rozdíl mezi peaky (špičkami) jednotlivých kanálů. Tento rozdíl je dán použitím FP laserů, jejichž vlastností je, že se v jednotlivých jednotkách nenaladí každý úplně stejně. Další důležitou částí je nastavení správné metody měření šumu, v našem případě IEC.



Obr. 8.8: Schéma měření OSA.

Po správném nastavení všech parametrů je možné spustit měřicí test, jehož výsledek je ihned po dokončení testu k dispozici formou grafického zobrazení spektra signálu a tabulky naměřených hodnot. Další užitečnou funkcí je report výsledků do souboru, který obsahuje všechny souhrnné informace o nastavení měřicího přístroje i výsledků měření. Ukázka kompletního reportu je v příloze C.

Graph



Obr. 8.9: Náměr OSA v sestupném směru.

Tab. 8.2: Parametry jednotlivých kanálů pro sestupný směr – report.

P/F	Ch. #	Wavelength (nm)	Signal Power (dBm)	OSNR (dB)	Noise (dBm)	BW 3.00 dB (nm)
PASS	1	1574.182	(i)-28.84	23.44	(IEC)-52.28	0.273
PASS	2	1574.972	(i)-27.37	23.14	(IEC)-50.51	0.273
PASS	3	1575.794	(i)-29.65	19.53	(IEC)-49.18	0.352
PASS	4	1576.590	(i)-27.79	24.26	(IEC)-52.06	0.339

Global Results

Average signal power :	-28.32 dBm
Signal power flatness :	2.28 dB
Average OSNR :	22.92 dB
OSNR flatness :	4.74 dB
Total power in scan range :	2.58 dBm
Channel count :	4
Empty channel count :	0

Global Test Result

Status :	PASS
----------	------

Channel Results

Obr. 8.10: Ukázka reportu pro sestupný směr.

Z obr. 8.10 můžeme vidět všechny potřebné parametry, jako je vlnová délka jednotlivých kanálů (Wavelength), výkon v kanálu (Signal Power), odstup signál od šumu (OSNR), šum (Noise), šířku pásma (BW) aj. Součástí je také grafický výstup spektra měřeného signálu. Výsledky měření jsou ovlivněny dělením 70:30, dále pak attenuátorem 3 dB, který byl z bezpečnostních důvodů připojen na vstupu OSA. Všechny kanály však splnili minimální nastavené požadavky a proto je výsledek testu kladný - PASS.

Měření ve vzestupném směru

Stejně jako v sestupném směru je třeba zařadit do trasy mezi AWG a OLT dělič 1:2. Vstup děliče byl připojen k AWG filtru, výstupy děliče k OLT a optickému spektrálnímu analyzátoru, opět s dělicím poměrem 70:30. Zapojení ostatních částí sítě zůstalo stejné jako pro sestupný směr přenosu.

Jak je patrné z obr. 8.11, výkonová úroveň 4. kanálu je velice nízká. Tato hodnota byla změřena pouze na základě nastavených hodnot prahů pro OSNR a minimální úroveň výkonu. Pokud by přístroj byl v továrním nastavení, výsledek testu by byl FAIL – neprošel, neboť tak malá úroveň výkonu (-38,67 dBm) není dostatečná

pro detekci v koncové stanici. Grafický výstup z repotru není prezentován, neboť je shodný s obr. 8.11, na kterém je možné vidět i grafické rozhraní optického spektrálního analyzátoru.



Obr. 8.11: Ukázka grafického rozhraní OSA.

Global Results

Average signal power :	-27.04 dBm
Signal power flatness :	13.49 dB
Average OSNR :	22.16 dB
OSNR flatness :	10.22 dB
Total power in scan range :	-20.79 dBm
Channel count :	4
Empty channel count :	0

Global Test Result

Status : PASS

Channel Results

Obr. 8.12: : Ukázka reportu pro vzestupný směr.

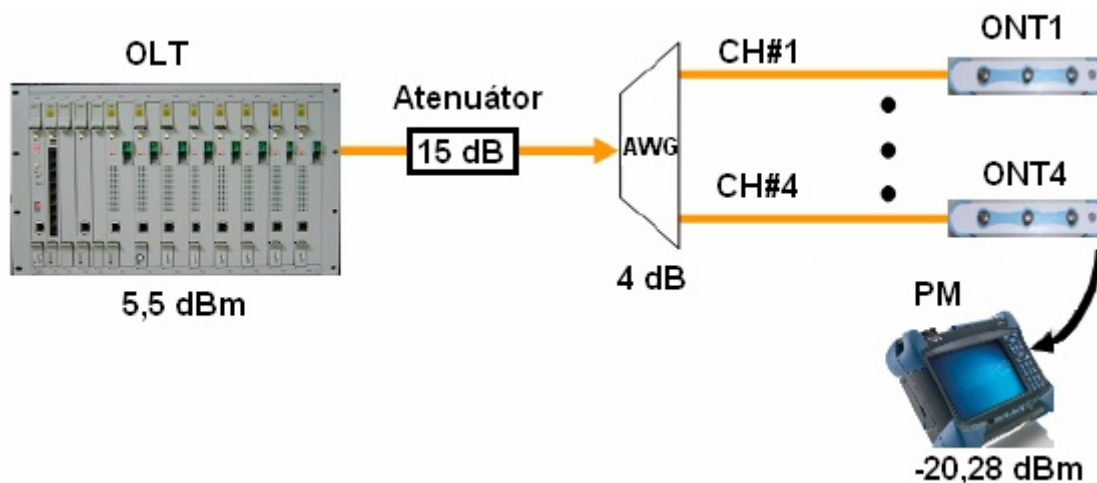
Tab. 8.3: Parametry jednotlivých kanálů vzestupný směr – report.

P/F	Ch. #	Wavelength (nm)	Signal Power (dBm)	OSNR (dB)	Noise (dBm)	BW 3.00 dB (nm)
PASS	1	1533.423	(i)-25.35	24.01	(IEC)-49.36	0.299
PASS	2	1534.225	(i)-25.18	22.91	(IEC)-48.09	0.289
PASS	3	1535.019	(i)-27.39	22.71	(IEC)-50.10	0.327
PASS	4	1535.783	(i)-38.67	13.79	(IEC)-52.46	0.388

Výměnou 4. koncové jednotky ONT na pracovišti DESK4 za jinou (stejného typu) byla vyloučena možnost vady původní ONT jednotky (FP laseru), neboť výkonová úroveň kanálu byla stále výrazně nižší než u ostatních kanálů. Tím bylo zjištěno, že závada se nachází na optické trase mezi patch panelem v racku N311 a experimentálním pracovištěm DESK4. To také potvrzuje fakt, že chování optických prvků je pro různé vlnové délky odlišné, protože pro sestupný směr byla tato optická trasa v pořádku.

8.3.2. Měření výkonu širokopásmového optického signálu

V rámci souboru měření bylo provedeno i měření výkonu širokopásmového optického signálu, který je do jednotek ONT vyslán za účelem naladění FP laserů. Pro měření byla použita platforma FTB-1, mezi jejichž integrované funkce patří i režim měřiče optického výkonu (PM). Změny v konfiguraci optické trasy nastaly mezi OLT a AWG, kde byl zapojen z bezpečnostních důvodů atenuátor s vložitelným útlumem 15 dB. Namísto ONT jednotky byla zapojena platforma FTB-1 ve funkci PM, jak je znázorněno na obr. 8.13.



Obr. 8.13: Schéma měření výkonu optického signálu.

Spočítáme – li teoretickou hodnotu útlumu této optické trasy, dostaneme se přibližně na úroveň 21,9 dB. Naměřená hodnota výkonové úrovně signálu byla -20,28 dB.

Tab. 8.4: Teoretický útlum trasy WDM –PON.

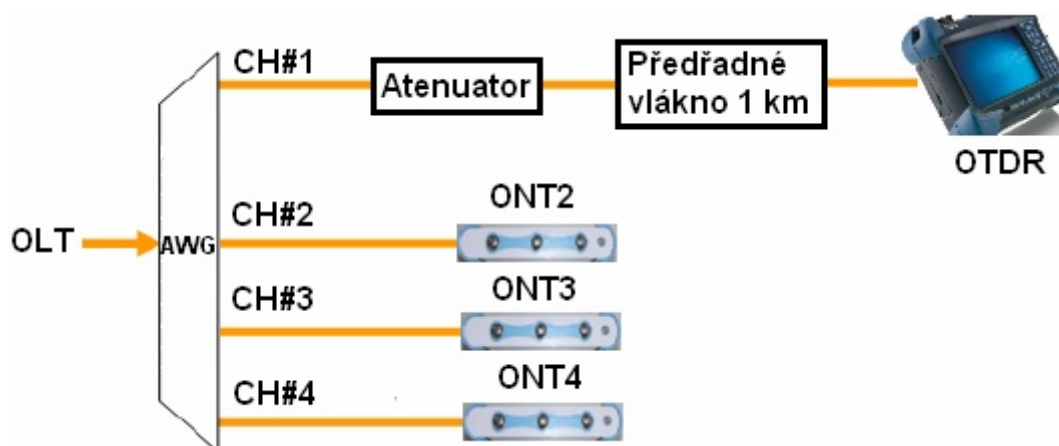
	Vlákna	Atenuátoru	6 x konektor	AWG	Disperze	Rezerva	Σ
Útlum [dB]	zanedbatelný	15	6 x 0,15	4	1	1	21,9 dB

8.3.3. Měření útlumu trasy reflektometrickou metodou OTDR

Vzhledem k možnosti zapůjčení optického reflektometru byl proveden náměr trasy metodou OTDR. Měření probíhalo pro 3 varianty:

- 1 - měření pouze s předřadným vláknem,
- 2 - měření s předřadným vláknem + 300 m vlákna,
- 3 - měření s předřadným vláknem + 300 m vlákna + atenuátor 15 dB.

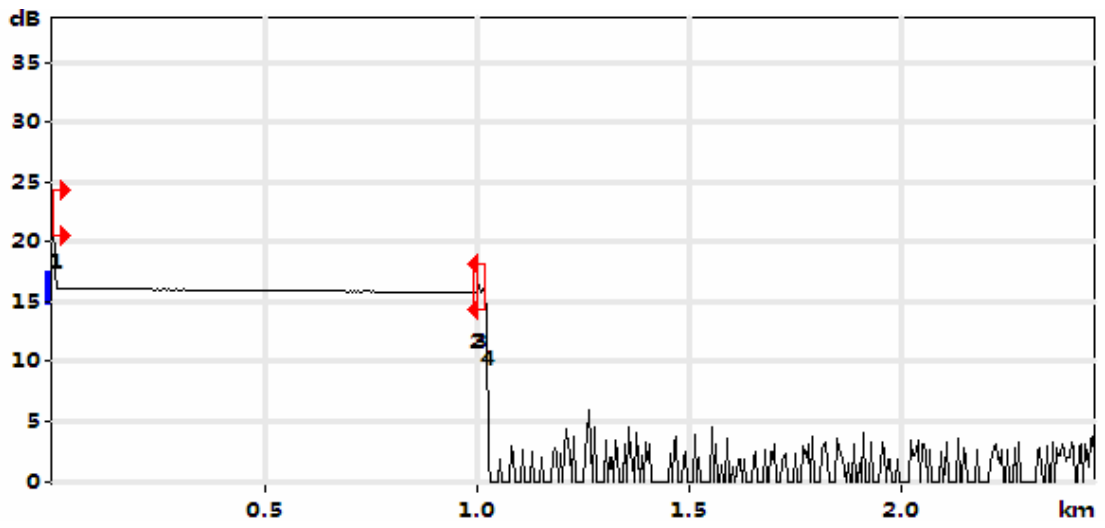
V každém měření bylo použito předřadné vlákno s délkou 1000 m. Vzhledem k použití AWG filtru, který nepropustí dále signál vysílaný OTDR, končí měřená trasa na jeho rozhraní, proto je měření OTDR na WDM-PON síti spíše informativního charakteru. Platforma EXFO FTB-1, respektive OTDR modul FTB-730 umožňuje stejně jako v případě OSA modulu výstup formou reportu, jehož části jsou v práci obsaženy.



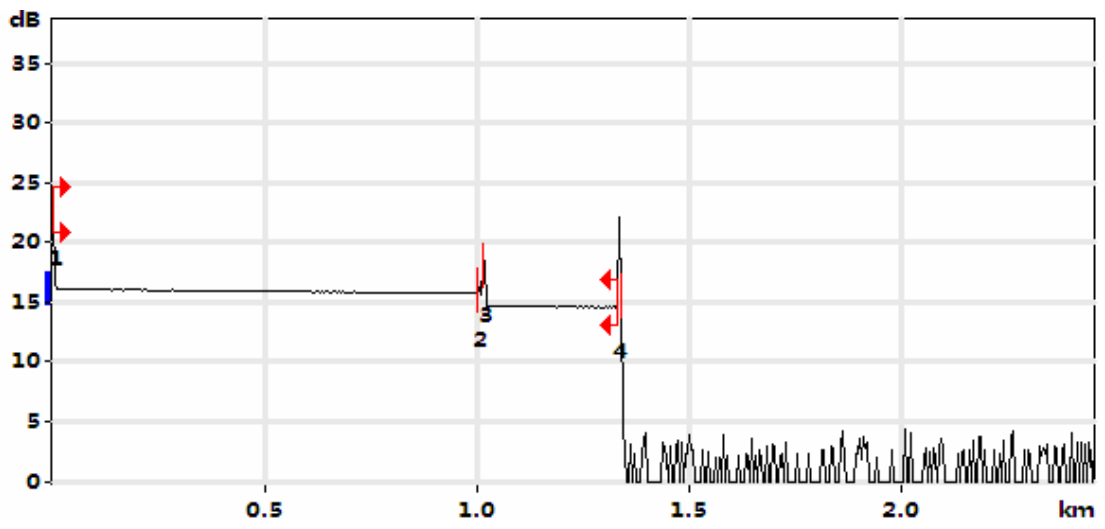
Obr. 8.14: Schéma měření optickým reflektometrem.

Následující obr. 8.15 zobrazuje grafy závislosti útlumu na délce vlákna pro jednotlivé varianty. Grafy tedy zobrazují průběh útlumu podél optické trasy. Můžeme na nich sledovat odrazy v místě konektorů, v grafích označen 1, odrazy v místě kde je předřadné vlákno napojeno na optický kabel experimentálního pracoviště (DESK3), v grafích označen 2, odrazy v místě připojení špulky se 300 m vlákna, v grafích označen 3 a konečně odrazy v grafích označené 4, které představují odraz na AWG filtru, v případě varianty 3 na atenuátoru 15 dB.

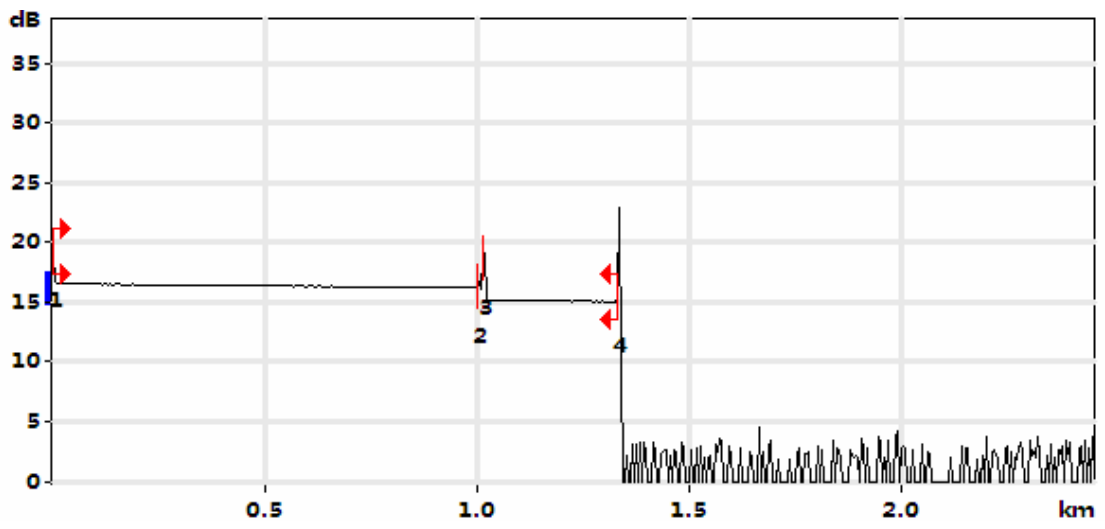
Díky tomu, že nám reflektometrická metoda měření útlumu umožňuje sledovat rozložení útlumu v jednotlivých částech přenosové trasy, bylo možné pozorovat, jaký vliv na odrazy mezi jednotlivými spoji má čistota optických konektorů.



a)



b)



c)

Obr. 8.15: Závislost útlumu na délce vlákna: a) varianta 1, b) varianta 2, c) varianta 3.

Vzhledem k informativnímu charakteru tohoto měření a podobnosti reportů všech 3 měřených variant, jsou na obr. 8.16 zobrazeny výsledky z reportu měření pouze pro 3. variantu - měření s předřadným vláknem + 300 m vlákna + atenuátor 15 dB.

Měření trasy

Ztráta trasy:	1.508 dB	Průmerný ztráta svaru:	---
Délka trasy:	1.3327 km	ORL trasy:	38.41 dB
Průmerný ztráta:	1.132 dB/km		

Tabulka poruch

Císlo	Umístění. (km)/Délka	Typ poruchy	Ztráta. (dB)	Odraz. (dB)	Útlum (dB/km)	Celkem. (dB)
1	0.0000 (1.0024 km)	Vstupní úroveň Úsek vlákna	0.337	-57.9	@16.7dB 0.337	0.000 0.337
2	1.0024 (0.0121 km)	Událost s odrazem Úsek vlákna	0.016	-66.9	1.700	0.354 0.374
3	1.0145 (0.3182 km)	Událost s odrazem Úsek vlákna	1.025	-50.6	0.342	1.399 1.508
4	1.3327	Událost s odrazem	--	-45.5		1.508

Tabulka makroohybu

Nebyl zjištěn žádný makroohyb

Limity makroohybu

Vlnové délky:	1310 nm / 1550 nm
Rozdíl zeslabení (ztráta):	0.50 dB

Vyhovující/nevyhovující limity

Ztráta spojení:	0.020 dB	Ztráta trasy:	45.000 dB
Ztráta konektorů:	1.000 dB	Délka trasy:	0.000 m
Odrazivost:	-40.0 dB	ORL trasy:	15.00 dB
Útlum vláknových úseku:	0.400 dB/km		

Testování a instalace kabelu

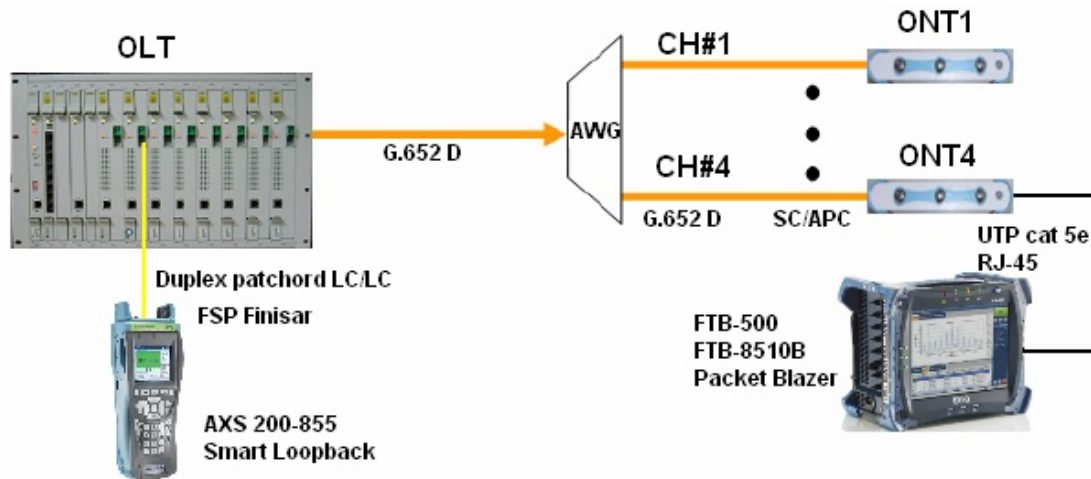
Vlnová délka:	1310 nm (9 μm)	Doba průměrování:	15 s
Název souboru:	Fiber015.trc	Index lomu:	1.467700
Typ souboru:	Hlavní	Zpetný rozptyl:	-79.44 dB
Model OTDR:	FTB-730-23B-EA	Kabelový faktor:	0.00 %
Sériové číslo:	540682	Detekce ztráta sváru:	0.010 dB
Verze softwaru:	OTDR 1.2	Detekce odrazu:	-72.0 dB
Rozsah:	2.5000 km	Detekce konce vlákna:	15.000 dB
Šířka pulsu:	30 ns		

Obr. 8.16: Výsledky reportu OTRD pro 3. variantu.

8.3.4 Měření kvality služeb

Posledním souborem testů, který byl na experimentálním pracovišti proveden je test kvality služeb dle nového standardu ITU-T Y.156.sam (EtherSAM). Tato metoda umožňuje ověření funkce všech definovaných služeb současně (tzv. Ramp test). Lze také nastavit, jestli testované služby vyžadují garantovanou přenosovou rychlost CIR (Committed Information Rate), nebo jestli jsou bez garantované přenosové kapacity

EIR (Excess Information Rate). V našem případě byly nastaveny hodnoty CIR. Podle definovaných služeb umožňuje sledování parametrů jako je maximální zpoždění (max latency), maximální kolísání zpoždění (max jitter), ztrátovost rámců (frame loss) a maximální propustnost (max throughput).



Obr. 8.17 Schéma zapojení měření kvality služeb EtherSAM.

Popis zapojení:

ONT jednotka byla datově propojena s ethernet testerem (Packet Blazerem) FTB-8510B prostřednictvím UTP kabelu. Ethernet tester vysílal datové streamy skrze ONT jednotku, distribuční síť až do OLT, se kterým byl prostřednictvím duplexního patchordu propojen analyzátor AXS 200-855 nakonfigurovaný jako tzv. otáčičko (Smart Loopback).

Nastavení testu EtherSAM:

Pro měření pomocí testu EtherSAM byly nastaveny 4 streamy: HDTV, SDTV, VoIP a DATA, přičemž pro HDTV 2 kanály, pro SDTV 5 kanálů a pro VoIP 100 hovorů. Nastavení parametrů je patrné z následující tabulky.

Tab. 8.5: Konfigurace služeb testu EtherSAM.

EtherSAM Configuration Overview

Service	Profile	Enable	Service Name	Frame Size	CIR (Mbps)	Max Jitter (ms)	Max Latency (ms)	Frame Loss (%)
1	Video	Enabled	Stream 1	1374	21.185	30	50	0
2	Video	Enabled	Stream 2	1374	19.86	30	50	0
3	Voice	Enabled	Stream 3	138	12.64	10	150	0
4	Data	Enabled	Stream 4	1374	20.0	100	400	0.2

Výsledky testu EtherSAM jsou opět reprezentovány formou reportu. Při jeho vytváření je možné zadat požadované výstupy, které mohou mít až několik desítek stran, proto je v práci prezentovaná jen část s nejdůležitějšími výsledky.

Tab. 8.6: Výsledky testu EtherSAM.

Global Progress

Item	Value
Test Status	Completed
Verdict	FAIL

Stream 1

Item	Value	Verdict
Frame Loss (%)	0.000	PASS
Max Jitter (ms)	< 0.015	PASS
Max Latency (ms)	0.414	PASS
Max Throughput (Mbps)	21.203	PASS

Stream 2

Item	Value	Verdict
Frame Loss (%)	0.000	PASS
Max Jitter (ms)	< 0.015	PASS
Max Latency (ms)	0.416	PASS
Max Throughput (Mbps)	19.901	FAIL

Stream 3

Item	Value	Verdict
Frame Loss (%)	0.000	PASS
Max Jitter (ms)	< 0.015	PASS
Max Latency (ms)	0.095	PASS
Max Throughput (Mbps)	12.64	PASS

Stream 4

Item	Value	Verdict
Frame Loss (%)	0.000	PASS
Max Jitter (ms)	< 0.015	PASS
Max Latency (ms)	0.414	PASS
Max Throughput (Mbps)	25.001	PASS

Jak je z tab. 8.6 patrné, celkový výsledek testu je FAIL, tudíž neprošel. Chyba nastala ve 2. streamu v jeho maximální propustnosti (Max Throughput), která dosáhla hodnoty 19,901 Mbit/s. Srovnáme-li tuto hodnotu s hodnotou CIR v tab. 8.5 u 2. streamu 19,86 Mbit/s, tak vidíme, že hodnota maximální povolené propustnosti byla překročena. Parametr CIR byl pro každý stream volen s ohledem na typ služby a také aby součet hodnot CIR všech streamů nepřevyšoval maximální přenosovou rychlost 100 Mbit/s.

8.4 Porovnání výsledků měření se simulacemi

Jedním z hlavních cílů této práce bylo porovnání simulování a reálného měření optických přístupových sítí WDM-PON, a to nejen z hlediska konkrétních hodnot, ale také po stránce všeobecného náhledu na problematiku. Simulace byla od začátku tvořena pouze pro 4 koncové jednotky v duplexním provozu, neboť měla být porovnávána s reálnou optickou sítí, která byť je zcela unikátní v České republice, tak má jistá technická omezení, která vyplývají zejména z finanční náročnosti těchto technologií. Dalším argumentem pro tak malý počet koncových stanic je přehlednost a názornost při demonstrování výsledků měření a simulací. V rámci měření i simulací byly zvoleny vlnové délky kanálů tak, aby odpovídaly DWDM systému, s kmitočtovým rozsetupem 100 GHz.

Simulace

Úspěšné vytvoření simulace v OptiSystem 9.0 si vyžaduje několik měsíců intenzivní práce. Tento software je velice obsáhlý a nabízí široké možnosti využití, je však velice náročné pochopit, jak pracuje. Pro docílení výsledku, který by se alespoň z části podobal reálnému náměru, je nutné prostudovat souvislosti mezi jednotlivými prvky a možnosti jejich nastavení. Často je nutné použít prvky, které se v praxi nepoužívají, ale pro správnou simulaci jsou nezbytné. Jako příklad můžeme uvést nutnost zapojení optického zpoždovacího členu OD (optical delay) ve vzestupném směru. Simulované měření bude vždy do jisté míry idealizované, neboť nelze nikdy zahrnout všechny vlastnosti reálných sítí (parazitní jevy apod.). To je skutečnost, se kterou je třeba počítat, je – li simulace použita pro vytváření plánů před výstavbou reálné optické sítě.

Praktické měření

Měření na reálné optické přístupové síti s sebou nese také různá úskalí. Na trhu jsou nabízeny různé měřicí přístroje s různými vlastnostmi, a ne každý je vhodný pro měření námi požadovaných parametrů. Je proto dobré se před vlastním měřením nechat zaškolit profesionálním lektorem, často tak lze předejít zbytečným investicím, které mohou vzniknout např. nesprávnou manipulací se zapůjčenou měřicí technikou. Dalším faktem je, že použití měřících přístrojů nemusí být tak snadné, jak se na první pohled může zdát, a původně jednoduché nastavení se může stát několika hodinou záležitostí. Jako příklad můžeme uvést nastavování optického spektrálního analyzátoru EXFO FTB-5240S. V průběhu měření se také může stát, že na optické trase jsou použity různé druhy konektorů, které nejsou kompatibilní s porty na měřících přístrojích. Proto je vždy dobré zajistit si předem přechodky a redukce. Nezbytnou součástí při měření je také kontrola čistoty čel konektorů mikroskopem a jejich řádné očištění, lze tím ušetřit spousta času při následných řešeních problému.

Porovnání konkrétních výsledků měření lze provést pouze u těch měřících přístrojů, které byly použity v simulaci i ve skutečném měření. Jedná se tedy pouze o optický spektrální analyzátor a měřič výkonu.

Porovnání výsledků měření výkonu

V rámci simulací byl měřič výkonu použit na několika místech distribuční sítě, v případě praktického měření byl změřen pouze výkon signálu vedený do jednotky ONT.

Výsledek simulací: -18,012 dBm.

Výsledek měření: -20,28 dBm.

V simulacích byl vysílací výkon vysílače -3 dBm, délka optického vlákna 20 km a vložný útlum AWG filtru 4 dB, kdežto výkon vysílače v experimentální síti byl cca 5,5 dBm, namísto optického vlákna byl použit atenuátor s vložným útlumem 15 dB. Další prvky, které do trasy vnášely vložný útlum, jsou uvedeny v tab. 8.4.

Porovnání výsledků měření optickým spektrálním analyzátozem

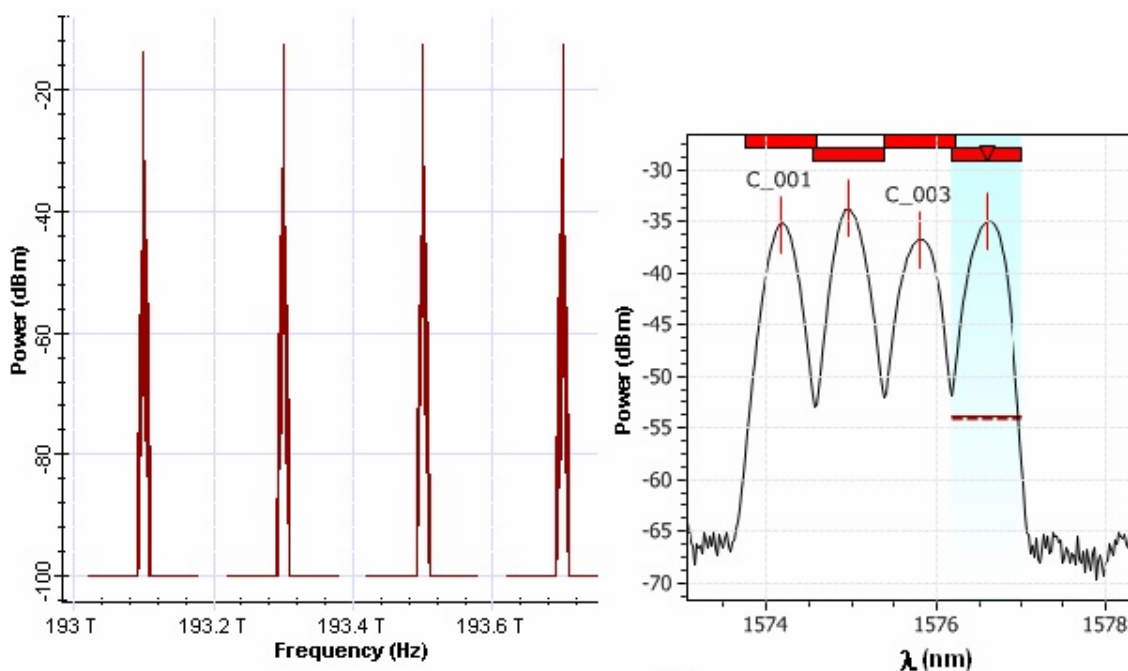
V simulacích bylo využito hned několik spektrálních analyzátorů, v praktickém měření byl OSA nasazen pouze mezi OLT a AWG, pro oba směry přenosu, proto budou porovnány pouze tyto výstupy měření.

Sestupný směr

Z obr. 8.18 je na první pohled viditelný rozdíl spekter mezi náměrem OSA v simulacích a v praxi. Rozdíl je daný použitím rozdílných laserů ve vysílacích částech. V simulacích bylo použito laseru s úzkou spektrální čarou, který svými vlastnosti odpovídá přibližně DFB laseru. Kdežto měření bylo prováděno na síti, kde byly použity FP lasery, jejichž spektrální čára je v porovnání s DFB širší.

Dalším patrným rozdílem je výkonová nevyrovnanost kanálů u praktického náměru. To je opět způsobeno vlastnostmi FP laserů. Každý FP laser se na základě stimulačního signálu naladí sice na požadovanou vlnovou délku odpovídajícího kanálu, ale s různými výkonovými úrovněmi.

Z grafů si také můžeme všimnout, že výkonová úroveň kanálů v simulacích je podstatě větší než u praktického náměru, přitom v simulacích bylo použito vysílače s výkonem -3 dBm a při praktickém měření 5,5 dBm. Tento jev je způsoben dělením 30:70, kterého bylo nutné v měřicí metodě využít. Porovnáme – li obr. 7.23 a), který zobrazuje výsledky WDM analyzátoru simulací s obr. 8.10, vidíme, že rozdíly mezi simulacemi a měřením jsou dosti markantní.



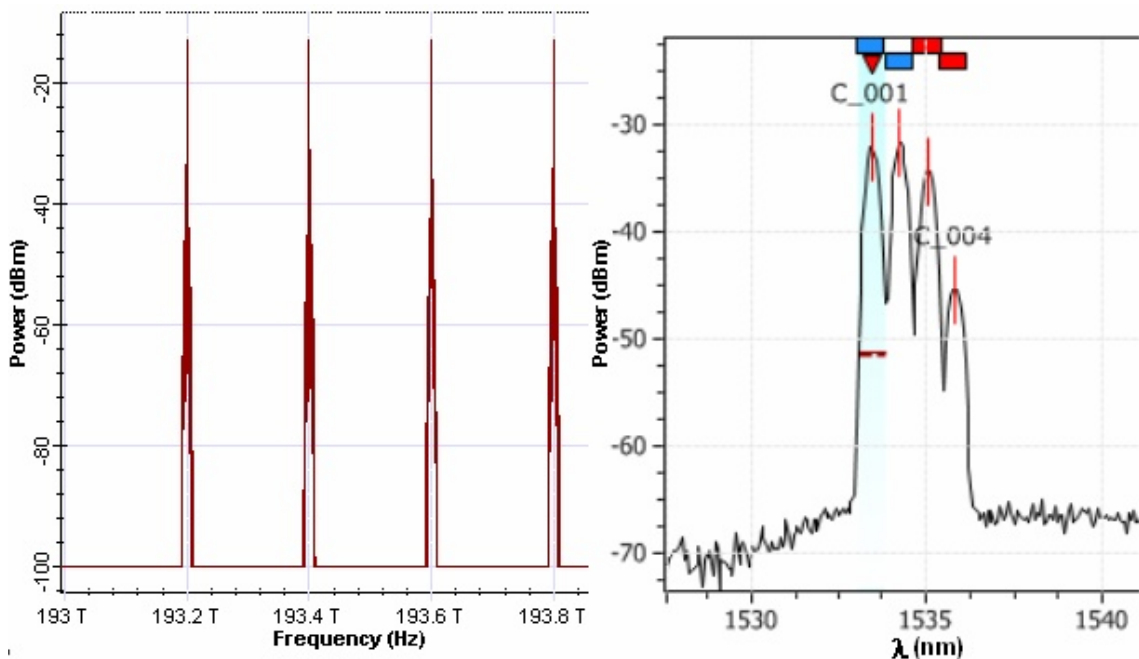
Obr. 8.18: Porovnání spekter OSA simulace/měření v sestupném směru.

Vzestupný směr

V případě vzestupného směru jsou rozdíly mezi spektry stejné jako v předchozím případě. Důvod nízké výkonové úrovně u 4. kanálu praktického měření byl popsán v 8.3.1.

Z grafů si můžeme všimnout, že pro obousměrný přenos byly použity rozdílné postupy. U simulací byl pro každý směr přenosu použit kmitočtový rastr 200 GHz, takže celkový kmitočtový rastr pro oba směry byl 100 GHz, jak je popsáno v 7.2.1, kdežto WDM-PON síť na experimentálním pracovišti využívá pro sestupný směr L pásmo, pro směr vzestupný C pásmo. Rozdíly jsou patrné z obr. 8.18 a 8.19.

Dalším rozdílem je úroveň šumu, která je v simulovaném modelu téměř nulová, v případě reálného měření dosahuje běžných hodnot. Zde se projevuje skutečnost, že simulace jsou jistým způsobem idealizované. Úroveň šumu se dá sice nastavit i v simulacích, stejně by však jeho průběh byl idealizovaný a rovnoměrný.



Obr. 8.19 Porovnání spekter OSA simulace/měření ve vzestupném směru.

9. Závěr

V současné době jsou v České republice budovány optické přístupové sítě menších rozloh, z ekonomických důvodů jsou to především sítě FTTB. Je pouze otázkou času, než začnou být nedostačující z hlediska šířky přenosového pásma a začnou být nasazovány sítě FTTH. Jednoznačným cílem telekomunikačních operátorů je využití stávajících optických tras na maximum, teprve konkurenční boj je donutí k investování do nových technologií. Jako východisko může být nasazení vlnových multiplexů i do tzv. poslední míle - optických přístupových sítích formou WDM-PON systémů, které umožňují využití stávajících tras nejefektivněji. Tyto sítě jsou z hlediska logické topologie bod-bod, tzn., že každý uživatel má svůj vlastní přenosový kanál, čímž je mu umožněno využívání nejmodernějších širokopásmových služeb (triple play).

Dle zadání byl vytvořen v prostředí OptiSystem 9.0 simulační model xWDM sítě, konkrétně WDM-PON sítě. Dále byl vytvořen simulační model GPON sítě, aby mohly být porovnány přenosové parametry obou návrhů. Zhodnotíme – li výsledky simulovaných modelů zjistíme, že model WDM-PON má podstatně lepší přenosové parametry v porovnání s GPON. Pokud by návrhy byly pro větší počet koncových stanic, rozdíl by byl ve prospěch WDM-PON ještě výraznější.

Hlavní náplní této diplomové práce však bylo praktické měření na skutečné síti WDM-PON a následné srovnání s výsledky simulací. Pro porovnání je významné především měření optickým spektrálním analyzátozem, jehož výstupy byly porovnány s naměřenými grafy simulací. Po celkovém zhodnocení a rozboru přenosových parametrů dospějeme k závěru, že simulace jsou vždy do jisté míry idealizované a jsou spíše informativního charakteru, rozhodně je nelze brát jako konečné podklady pro vytvoření plánu budoucí výstavby optické přístupové sítě. Možnosti skutečného měření se odvíjí od znalosti konkrétní měřené topologie a měřících přístrojů samotných.

Tato práce dává čtenáři objektivní představu, co obnáší vytvoření simulačního modelu v prostředí Optisystem a následné odlaďování, než se výsledek přiblíží alespoň částečně reálnému náměru. Podrobně je také popsán postup měření přenosových parametrů a kvality služeb optické přístupové sítě s vlnovým multiplexem prostřednictvím měřící techniky EXFO.

Seznam použitých zdrojů

- [1] Bartůšková L., Dušek M., Fiurášek J., Hradil Z., Ježek M., Mičuda M., Slodička L. Vláknová optika na telekomunikačních vlnových délkách. Skripta. Přírodovědecká fakulta univerzity palackého v Olomouci. Olomouc 2008.
- [2] BLAŽEK, Vratislav; BROUČEK, Jan . Audit tras pro DWDM, CWDM. *Profiber* [online]. 2010, 1., [cit. 2010-12-05]. Dostupný z WWW: <<http://www.profiber.cz>>.
- [3] BOHÁČ, Leoš . *Optické přenosové systémy X32OPS- : Základní stavební bloky optického přenosového systému* [online]. Praha : ČVUT, 2010. 23 s. Referát. ČVUT. Dostupné z WWW: <<http://access.feld.cvut.cz>>.
- [4] BROUČEK, Jan. ANALYZÁTOR OPTICKÉHO SPEKTRA. *Profiber* [online]. 2010, 1, [cit. 2011-04-19]. Dostupný z WWW: <<http://www.profiber.cz/>>.
- [5] BROUČEK, Jan . VLNOVÉ MULTIPLEXY CWDM/DWDM. *Profiber* [online]. 2010, 1, [cit. 2011-04-19]. Dostupný z WWW: <<http://www.profiber.cz/>>.
- [6] BROUČEK, Jan; GÖLNER, Jiří. MĚŘENÍ A DIAGNOSTIKA SIGNÁLU WDM. *Profiber* [online]. 25. 5. 2010, n. 1, [cit. 2010-11-17]. Dostupný z WWW: <<http://www.profiber.cz/Aplikace/>>.
- [7] BROUČEK, Jan; HÁJEK, Martin PRAKTICKÉ ZKUŠENOSTI Z MĚŘENÍ DWDM. In *PRAKTICKÉ ZKUŠENOSTI Z MĚŘENÍ DWDM* [online]. Praha : Mikrom, 2005 [cit. 2010-11-17]. Dostupné z WWW: <www.mikrom.cz>.
- [8] BROUČEK, Jan; KOTAS, Rostislav. ROADM optické WDM multiplexory a jejich měření pomocí OSA. *Profiber* [online]. 2010, n. 1, [cit. 2010-11-17]. Dostupný z WWW: <<http://www.profiber.cz/Aplikace/>>.
- [9] BROUČEK, Jan; KOTAS, Rostislav; SUKOP, Juraj. OSA –optické spektrální analyzátoři - krok před tím, co je třeba.. *Profiber* [online]. 2010, n. 1, [cit. 2010-11-17]. Dostupný z WWW: <<http://www.profiber.cz/Aplikace/>>.
- [10] ČTYROKÝ, Jiří. Integrovaná fotonika. *UFE*. 2004, 1, s. 1-14.
- [11] Distributed feedback laser. In *Wikipedia : the free encyclopedia* [online]. St. Petersburg (Florida) : Wikipedia Foundation, 15 January 2007, last modified on

- 18 February 2011 [cit. 2011-04-19]. Dostupné z WWW: <http://en.wikipedia.org/wiki/Distributed_feedback_laser>.
- [12] FILKA, M. *Optické sítě*. Skripta. VUT FEKT, Brno 2007.
- [13] FILKA, Miloslav. *Optoelektronika : Pro telekomunikace a informatiku*. Vyd. 1. Brno : Centa, 2009. 369 s. ISBN 978-80-86785-14-1.
- [14] FILKA, M. *Přenosová média*. Skripta. VUT FEKT, Brno 2007.
- [15] GIRARD. A. FTTx PON Technology and Testing. EXFO, Quebec 2005.
- [16] GÖLNER, Jiří; TKÁČ, Martin. Když Vám hraje síť všemi barvami –Co potřebujete pro CWDM znát a měřit. *Profiber* [online]. 2010, n. 1, [cit. 2010-11-17]. Dostupný z WWW: <<http://www.profiber.cz/Aplikace/>>.
- [17] HLADKÝ, Miroslav. VŠB Ostrava Experimentální pracoviště WDM PON. *Profiber* [online]. 2010, 1, [cit. 2011-04-19]. Dostupný z WWW: <<http://www.profiber.cz/>>.
- [18] Introduction to BER testing of WDM systems. *Agilent Technologies* [online]. 2008, 1, [cit. 2010-12-05]. Dostupný z WWW: <<http://www.agilent.com>>.
- [19] KOTEN, Tomáš. Využití Q-faktoru v systémech s DWDM. *Vegacom* [online]. 2010, 1., [cit. 2010-12-05]. Dostupný z WWW: <www.vegacom.cz>.
- [20] LAFATA, Pavel; VODRÁŽKA, Jiří. Současné a budoucí varianty pasivních optických přístupových sítí. *Elektrorevue* [online]. 26.7.2009, 2009/39, [cit. 2010-12-08]. Dostupný z WWW: <<http://www.elektrorevue.cz>>. ISSN 1213-1539.
- [21] LEIJTENS, Xaveer J. M.; KUHLOW, Berndt; SMIT, Meint K. *Wavelength Filters in Fibre Optics*. Berlin : Springer, 2006. Springer Series in Optical Sciences, s. 125-187. ISBN 3-540-31769-4.
- [22] PILAŘ, Jaromír . Vývojové trendy rekonfigurovatelných optických add/drop multiplexerů. *WDM Systems SUMMIT 2010* [online]. 2010, 1. vyd, [cit. 2010-11-17]. Dostupný z WWW: <<http://www.wdmsummit.cz/>>.
- [23] PROFiber Networking s.r.o., Praha, *Interní literatura*, [online]. Dostupné z www: <<http://www.profiber.cz>>
- [24] ŠEVELA, M. *Komunikační protokoly v pasivních optických sítích*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2011. 34 s. Vedoucí semestrální práce Ing. Vladimír Tejkal.

- [25] ŠIFTA, R. *DWDM v přístupových sítích*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2011. 44 s. Vedoucí semestrální práce doc. Ing. Miloslav Filka, CSc.
- [26] ŠIFTA, R. *Návrh sítě FTTH*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2009. 59 s. Vedoucí bakalářské práce doc. Ing. Miloslav Filka, CSc.
- [27] ŠIFTA, R. *Návrh sítě FTTH*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2009. 44 s. Vedoucí semestrální práce doc. Ing. Miloslav Filka, CSc.
- [28] ŠÍMA, Jaromír. *rlc.cz* [online]. 2010 [cit. 2010-11-17]. DWDM pro metropolitní síť. Dostupné z WWW: <http://www.rlc.cz/publikujeme/dwdm_metro/>.
- [29] ŠÍMA, Jaromír . Stačí jediné vlákno : Aplikace WDM na jednom optickém vlákně. *Rlc* [online]. 2009, 1., [cit. 2010-12-05]. Dostupný z WWW: <<http://www.profiber.cz>>.
- [30] ŠÍMA, Jaromír Technologie CWDM v optických sítích. In *RLC* [online]. Praha : RLC, 2008 [cit. 2010-11-17]. Dostupné z WWW: <www.rlc.cz>.
- [31] ŠÍMA, Jaromír . Základy technologií WDM. *WDM Systems SUMMIT 2010* [online]. 2010, 1. vyd, [cit. 2010-11-17]. Dostupný z WWW: <<http://www.wdmsummit.cz/>>.
- [32] TEJKAL, V.; FILKA, M.; REICHERT, P.; ŠPORIK, J. Dvoustavové modulační formáty v optických přístupových sítích. *Advances in Electrical and Electronic Engineering - internetový časopis* (<http://advances.utc.sk>), 2010, roč. 2010 (8), č. 4, s. 96-101. ISSN: 1804- 3119.

Seznam použitých zkratek

AON	(Active Optical Network)	aktivní optická síť
APD	(Avalanche - Photodiode)	lavinové fotodiody
APC	(Angle Polish Connector)	úhlový optický konektor
APON	(ATM Passive Optical Network)	standard PON
ATM	(Asynchronous Transfer Mode)	asynchronní přenosový mód
AWG	(Arrayed Waveguide Grating)	vlnovody uspořádané do mřížky
BER	(Bit Error Rate)	bitová chybovost
BPON	(Broadband PON)	standard PON
BW	(Band Width)	šířka pásma
CATV	(Cable Analog Television)	kabelová TV
CD	(Chromatic Dispersion)	chromatická disperze
CIR	(Committed Information Rate)	garantovaná přenosová rychlost
CO	(Central Office)	distribuční místnost
CWDM	(Coarse Wavelength Division Multiplex)	hrubý vlnový multiplex
DFB	(Disturbed FeedBack)	DFB laser
DHCP	(Dynamic Host Configuration Protocol)	protokol aplikační vrstvy
DWA	(Dynamic Wavelength Assignment)	mechanismus přidělování kanálů
DWDM	(Dense Wavelength Division Multiplex)	hustý vlnový multiplex
EDFA	(Erbium Doped Fiber Amplifier)	erbiem dopovaný optický zesilovač
EIR	(Excess Information Rate)	negarantovaná přenosová kapacita
EPON	(Ethernet PON)	standard PON
FBG	(Fibre Bragg Grating)	vláknová Braggova mřížka
FSR	(Free Spectral Range)	perioda v kmitočtové doméně u AWG
FBT	(Fused Bionic Taper)	fúzní metoda výroby děličů

FTTB	(Fibre To The Building)	optické vlákno k budově
FTTC	(Fiber To The Crub)	optické vlákno k chodníku
FTTCab	(Fiber To The Cabinet)	optické vlákno do přístroje
FTTH	(Fiber To The Home)	optické vlákno do domu
FTTN	(Fiber To The Node)	optické vlákno do rozvaděče
FTTO	(Fiber To The Office)	optické vlákno do kanceláře
GEM	(GPON Encapsulation Method)	metoda přenosu ATM buněk a Ethernet rámců v GPON
GEPON	(Gigabit Ethernet Capable PON)	standard PON
GPON	(Gigabit Capable PON)	standard PON
HDTV	(High - definition television)	TV s vysokým rozlišením
IEC	(International Electrotechnical Commission)	mezinárodní elektrotechnická komise
IEEE	(Institute of Electrical and Electronics Engineers)	Institut pro elektrotechnické a elektronické inženýrství
IGMP	(Internet Group Message Protocol)	protokol podpory multicastu
IPTV	(TV over Internet Protocol)	přepínané video
ISI	(Intersymbol interference)	mezisymbolová interference
ITU	(International Telecommunication Union)	mezinárodní telekomunikační unie
LD	(Laser Diode)	laserová dioda
MLM	(Multi Longitudinal Mode)	spektrum tvořené periodickými vlnami
MWM	(Multi Wavelength Analyzer)	měřič vlnových délek
OAN	(Optical Access Network)	optická přístupová síť
OD	(Optical Delay)	optické zpoždění
ODN	(Optical Distribution Network)	optická distribuční síť
OLT	(Optical Line Terminal)	optické linkové zakončení
OLTS	(Optical Loss Test Set)	měření útlumu přímou metodou
ONU	(Optical Network Unit)	optické ukončovací jednotky
ONT	(Optical Network Terminal)	optické síťové zakončení
ORL	(Optical Return Loss)	útlum odrazu
ORR	(Optical Rejection Ratio)	poměr optického potlačení

OSA	(Optical Spektrum Analyzer)	optický spektrální analyzátor
OSNR	(Optical Signal to Noise Ratio)	odstup signál k šumu
OTDR	(Optical Time Domain Reflectometer)	optický reflektometr
OTDV	(Optical Time Domain Visualizer)	vizualizér rozložení op. signálu v čase
P2MP	(Poin - To - MultiPoint)	spojení bod – více bodů
P2P	(Point – To - Point)	spojení bod - bod
PDG	(Polarisation Dependent Gain)	polarizační závislost zisku
PDL	(Polarisation Dependent Loss)	polarizační závislosti útlumu
PHASARs	(Phased Arrays)	optické fázové pole
PLC	(Planar Lightwave Circuit)	planární optický integrovaný obvod
PM	(Power Meter)	měřič výkonu
PMD	(Polarization Mode Dispersion)	polarizační vidová disperze
PON	(Passive Optical Network)	pasivní optická síť
QoS	(Quality of Service)	kvalita služeb
RBW	(Resolution Bandwith)	rozlišovací šířka pásma
ROADM	(Reconfigurable Optical Add-Drop Multiplexer)	rekonfigurovatelný add/drop multiplexer
SDTV	(Standard Definition TV)	TV se standard rozlišením
SFP	(Small Form-factor Pluggable)	optické rozhraní
SML	(Single Longitudinal Mode)	spektrum s úzkou spektrální čarou
SNMP	(Simple Network Management Protocol)	protokol pro správu sítě
SOS	(Silica On Silicon)	technologie výroby AWG
STP	(Spanning Tree Protocol)	protokol spojové vrstvy
VLAN	(Virtual LAN)	Virtuální LAN
VLSI	(Very Large Scale Integration)	výrobní metoda polovodičových čipů
VoD	(Video on Demand)	video na vyžádání
VoIP	(Voice over Internet Protocol)	telefonování přes internet
WDM	(Wavelength Division Multiplex)	vlnový multiplex
WGRs	(Waveguide Grating Routers)	vlnové routery
WWDM	(Wide Wavelength Division Multiplex)	široký vlnový multiplex

Seznam příloh

- A Celkové schéma zapojení simulovaného modelu GPON**
- B Celkové schéma zapojení simulovaného modelu WDM-PON**
- C OSA WDM Report**
- D DVD obsahující:**
 - D.1 Elektronická verze práce.
 - D.2 Přílohy A,B a C v elektronické podobě.
 - D.3 Zdrojové soubory simulací (spustitelné v OptiSystem 9.0).
 - D.4 Ostatní ukázkové reporty měření.
 - D.5 Fotografie z průběhu měření.