

**VŠB – Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra telekomunikační techniky**

**Měření a testování integrované vláknově optické sítě
Measuring and Testing of Integrated Fiber Optic Network**

2014

Zdeněk Wilček

Zadání bakalářské práce

Student:

Zdeněk Wilček

Studijní program:

B2647 Informační a komunikační technologie

Studijní obor:

2601R013 Telekomunikační technika

Téma:

Měření a testování integrované vláknově optické sítě
Measuring and Testing of Integrated Fiber Optic Network

Zásady pro vypracování:

Tato práce se zabývá měřením a testováním integrované vláknově optické sítě, která je tvořená optickými sítěmi EPON a WDM-PON. Společnou integrací těchto dvou sítí EPON a WDM-PON vzniká speciální typ optické sítě, kterou lze aplikovat do praxe či pro výzkum.

1. Popište technologie WDM-PON a Ge-PON.
2. Realizujte v softwarové aplikaci Optiwave OptiSystem model integrované vláknově optické sítě.
3. Porovnejte reálné zapojení integrované vláknově optické sítě se simulovanými výsledky.

Seznam doporučené odborné literatury:

- [1] KAZOVSKY, Leonid G., et al.; *Broadband Optical Access Networks*. Canada: Wiley, 2011. 283 p.. ISBN 978-0-470-18235-2.
- [2] MA, Maode. *Current Research Progress of Optical Networks*. 1st Edition. [s.l.]: Springer, 2009. 282 p. ISBN 978-1402098888
- [3] LAM, Cedric. *Passive Optical Networks: Principles and practice*. Oxford: Elsevier Onc., 2007. 324 p. ISBN 978-0-12-373853-0
- [4] DHAINI, Ahmad R. *Next-Generation Passive Optical Networks*. Saarbrücken: VDM Verlag, 2008. 132 p. ISBN 978-3836435062

Další literatura dle pokynů vedoucího bakalářské práce.

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Jan Látal**

Datum zadání: 16.11.2012

Datum odevzdání: 07.05.2014

doc. Ing. Miroslav Vozňák, Ph.D.
vedoucí katedry




prof. RNDr. Václav Snášel, CSc.
děkan fakulty

Prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně. Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.

Dne: 6.5.2014


.....
podpis studenta

Poděkování

Rád bych poděkoval Ing. Janu Látalovi za odbornou pomoc a konzultaci při vytváření této bakalářské práce. Také děkuji své rodině a přítelkyni za podporu.

Abstrakt

Bakalářská práce se zabývá problematikou pasivních optických sítí. V teoretické části se zaměřuje na popis technologií Ethernet PON verze 2 a WDM-PON release 3, dále pak přehledem sítí nové generace s uvedeným popisem konkrétních zástupců. Praktická část se zabývá vytvořením speciální optické sítě, kdy komunikace bude probíhat jedním optickým vláknem. Následně ověřením funkčnosti těchto dvou různých technologií nasazených na jedno optické vlákno pomocí spektrální analýzy a zjištěním vzájemného vlivu využitých technologií pomocí testů RFC 2544 a ITU-T Y.1564. V druhé části se zabývá vytvořením integrované optické sítě v simulačním programu Optiwave Optisystem 12 a porovnáním reálných a simulovaných dat. V závěru bakalářská práce shrnuje vzájemný vliv technologií EPON2 a DWDM-PON integrovaných na jednom optickém vlákně.

Klíčová slova

Pasivní optické sítě, EPON2, WDM-PON, AWG směrová odbočnice, sítě nové generace, integrovaná optická síť, RFC 2544, ITU-T Y.1564, Optiwave Optisystem 12.

Abstract

This thesis deals with the passive optical network problematic. The theoretical part focusses on the description of the Ethernet PON version 2 and WDM-PON release 3 technologies and furthermore, it presents a general view of the new generation networks with a description of their concrete agents. The practical part deals with the creation of a special optical network, when communication will be on a single fiber optic. Furthermore, it continues with verifying the functionality of both of those different technologies implemented on a single fiber optic by the mean of a spectral analysis and then, with detecting the mutual influence of the used technologies by the mean of RFC 2544 and ITU-T Y. 1564 tests. In its second part, the thesis deals with the creation of an integrated optical network in the Optiwave Optisystem 12 simulation program and with the comparison of real and simulated data. In its conclusion, this thesis summarizes the mutual influence of EPON2 and DWDM-PON technologies as integrated on a single fiber optic.

Key words

Passive Optical Networks, EPON2, WDM-PON, AWG, Next Generation Getwork, Integrated Optical Network, RFC 2544, ITU-T Y.1564, Optiwave Optisystem 12.

Seznam použitých zkratek

Zkratka	Anglický význam	Český význam
APD	Avalanche photodiode	Lavinová fotodioda
AWG	Arrayed Waveguide Grating	Směrová odbočnice
BER	Bit Error Ratio	Bitová chybovost
BERT	Bit Error Ratio Test	Test bitové chybovosti
BLS	Broadband Laser Source	Širokospektrální zdroj záření
CIR	Committed Information Rate	Maximální garantována přenosová rychlost
CRC	Cyclic Redundancy Check	Cyklický redundatní součet
CWDM	Coarse Wavelength Division Multiplex	Hrubý vlnové multiplex
DBA	Dynamic Bandwidth Allocation	Dynamické přidělení přenosového pásma
DWDM	Dense Wavelength Division Multiplex	Hustý vlnový multiplex
EARU	Ethernet Access Residential Unit	Ethernetová rezidentční přístupová jednotka
EAST	Ethernet Access Service Terminal	Ethernetový přístupový servisní
EIR	Excess Information Rate	Maximální negarantována přenosová rychlost
EPON	Ethernet Passive Optical Network	Ethernetová optická síť
GEAPON	Gigabit Ethernet Passive Optical Network	Gigabitová ethernetová optická síť
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers	Institut pro elektronické a elektrotechnické inženýrství
iMAP	integrated Multiservice Access Platform	Integrovaná Multifunkční platforma
ITU	International Telecommunication Union	Mezinárodní telekomunikační unie
L2	Data Link Layer	Spojová vrstva modelu ISO/OSI
L3	Network Layer	Síťová vrstva modelu ISO/OSI
LLID	Logical Link ID	Logický linkový identifikátor
MAC	Media Access Control	Identifikátor síťového zařízení
MPCP	Multi-Point Control Protocol	Multibodový kontrolní protokol
ODN	Optical Distribution Network	Optická distribuční síť
OLT	Optical Line Termination	Optické linkové ukončení

ONT	Optical Network Termination	Optické síťové zakončení
ONU	Optical Network Unit	Optická síťová jednotka
P2MP	Point-To-Multipoint	Spojení bod-více bodů
P2P	Point-To-Point	Spojení bod-bod
PIN	PIN Photodiode	Fotodioda PON
PON	Passive Optical Network	Optická pasivní síť
QOS	Quality of Services	Kvalita služby
TDM	Time Division Multiplex	Časový multiplex
WDM	Wavelength Division Multiplex	Vlnový multiplex
WPF	Wavelength Passive Filter	Vlnovodný pasivní filtr

Obsah

Úvod.....	1
1 Ethernet PON	2
1.1 Princip činnosti	2
1.2 Ethernetový rámec	3
1.3 Architektura Ethernetové vrstvy v EPON.....	4
1.3.1 PMD vrstva přenosového protokolu.....	5
1.3.2 PCS podvrstva a zpětná bitová korekce FEC	5
1.4 MPCP podvrstva.....	6
1.4.1 MPCP protokolové datové jednotky.....	6
1.4.2 Protokolové datové jednotky Gate a Report.....	6
1.4.3 Proces automatického zjišťování ONU jednotek.....	7
1.4.4 Synchronizační proces mezi OLT a ONU	7
2 WDM-PON	9
2.1 Rozdělení WDM – PON sítí.....	9
2.1.1 DWDM.....	9
2.1.2 CWDM	10
2.2 Architektury WDM-PON sítí.....	11
2.2.1 Kompozitní PON.....	11
2.2.2 LARNET - Local Access Remote Network	11
2.2.3 RITENET – Remote Integrated Terminal Network	12
2.2.4 Vícestupňová WDM-PON architektura.....	12
2.3 CWDM/TDM PON síť.....	13
2.4 Rozšiřitelnost WDM-PON.....	14
2.5 AWG směrovač.....	14
2.5.1 Princip činnost AWG směrovače	15
3 Sítě nové generace.....	16
3.1 10G Ethernet PON – IEEE 802.3av.....	16
3.1.1 Zpětná kompatibilita.....	16
3.1.2 Rozdíl mezi 10G a 1G-EPON	17
3.1.3 Přidělení vlnových délek	17
3.2 Hybridní síť SUCCESS	18

3.2.1	Architektura SUCCESS.....	18
3.3	SARDANA	20
4	Infrastruktura laboratoře.....	22
4.1	Síť DWDM-PON	22
4.1.1	OLT jednotka EAST 1100.....	22
4.1.2	AWG směrová odbočnice.....	23
4.1.3	EARU 1112	23
4.2	Síť EPON 2.....	24
4.2.1	OLT jednotka iMAP 9102.....	24
	Nastavení OLT jednotky iMAP 9102.....	24
4.2.2	AT ON-1000.....	25
4.3	Měřicí přístroje	26
4.3.1	EXFO AXS - 200/350	26
4.3.2	EXFO AXS - 200/850	26
4.3.3	EXFO FTB-860	27
4.3.4	EXFO FTB-500	27
4.3.5	Digitální atenuátor FVA 60 B	28
5	Měření a testování integrované sítě.....	29
5.1	Topologie sítě	29
5.2	Měření útlumu integrované optické sítě	30
5.2.1	Měření pasivních optických rozbočovačů	30
5.2.2	Útlum celkové optické trasy	31
5.3	Měření optické trasy reflektrometrem	31
5.4	Spektrální analýza.....	32
5.4.1	Spektrální analýzy v sestupném směru.....	32
5.4.2	Vzestupný směr přenosu dat.....	35
5.5	Zvyšování vloženého útlumu do trasy	38
5.6	Testování integrované sítě testy RFC 2544 a ITU-Y.1564.....	41
5.6.1	Doporučení RFC 2544.....	42
5.6.2	Testování integrované sítě pomocí doporučení RFC 2544.....	44
5.7	Doporučení ITU-T Y.1564	45
5.7.1	Kontrola nastavení síťové konfigurace služeb.....	47
5.7.2	Kontrola nastavení parametrů kvality služeb QoS	48
6	Simulační program Optiwave OptiSystem 12.....	50

6.1 Topologie sítě	50
6.1.1 OLT jednotky	51
6.1.2 Optická distribuční síť ODN	53
6.1.3 Optické síťové jednotky ONU	54
6.2 Spektrální analýza.....	55
6.2.1 Spektrální analýza v sestupném směru	56
6.3 Diagramy oka.....	57
6.4 Diagramy oka při zvyšování útlumu trasy	58
Závěr.....	61
Použitá literatura	63
Seznam příloh.....	LXVI
Seznam obrázků	LXVII
Seznam tabulek	LXIX

Úvod

Neustále se zvyšující poptávka po větších přenosových rychlostech koncovými uživateli žene technologický vývoj v oblasti optických sítí kupředu. Trendem vývoje nových technologií je využití stávajících infrastruktur optických sítí, kde jsou nasazeny technologie na bázi časově děleného multiplexu typu GPON a EPON, pro nasazení sítí nové generace na bázi vlnově děleného multiplexu. Přechod mezi těmito různými generacemi PON sítí musí být plynulý, tak aby se v co nejmenší míře projevil u koncových zákazníků. Z tohoto důvodu jsou vytvářeny migrační scénáře.

Bakalářská práce byla inspirována prací pana Ing. Ladislava Peřka ze společnosti Slovak Telekom a.s. zabývající se migrací GPON sítě na TWDM/PON síť, která byla upravena podle možností laboratoře přístupových sítí N311. Cílem práce je vytvoření prostřední fáze migračního scénáře přechodu z TDM sítí na WDM síť sloučením dvou technologií na jedno optické vlákno. Jedná se o technologie Ethernet PON a DWDM-PON, kterými Katedra telekomunikační techniky disponuje.

Práce je rozdělena do tří základních částí. V první části se bakalářská práce věnuje pasivní optické síti na bázi časově děleného multiplexu EPON2 standardu IEEE 802.3 ah a uvádí popis činnosti v sestupném a vzestupném směru přenosu dat. Dále se zabývá technologií spadající do kategorie sítí nové generace NG-PON. Jedná se o WDM-PON technologii založenou na vlnově děleném multiplexu. Rozdělení na CWDM a DWDM síť, popis architektur a typu sítí. V kapitole je také uveden klíčový prvek WDM sítí, a to AWG směrová odbočnice. Poslední kapitola teoretické části se zabývá přehledem sítí nové generace a jejich konkrétními zástupci. A to standardem IEEE 802.3 a dvěma specifickými sítěmi SARDANA a SUCCESS.

V druhé části je uveden popis laboratoře přístupových sítí N311 včetně systémů LG - Nortel EAST 1100 pro síť DWDM-PON, Allied Telesyn iMAP 91002 pro síť EPON2 a návrh integrované optické sítě. Jsou zde popsány spektrální analýzy optické sítě a testy podle doporučení RFC 2544 a ITU-T Y.1564 s následným vyhodnocením změřených dat.

V poslední části bakalářské práce je uveden popis simulačního prostředí Optiwave Optisystem 12 a rozbor sestavených topologií. První topologie simulace je vytvořena s ohledem na možnosti reálné sítě v laboratoři a další dvě sítě jsou upraveny pro 16 a 32 příspěvkových kanálů DWDM-PON systému. V první simulaci je provedeno měření maximálního dosahu ONU jednotek a ve všech vytvořených simulacích jsou zobrazeny spektrální analýzy integrované sítě.

1 Ethernet PON

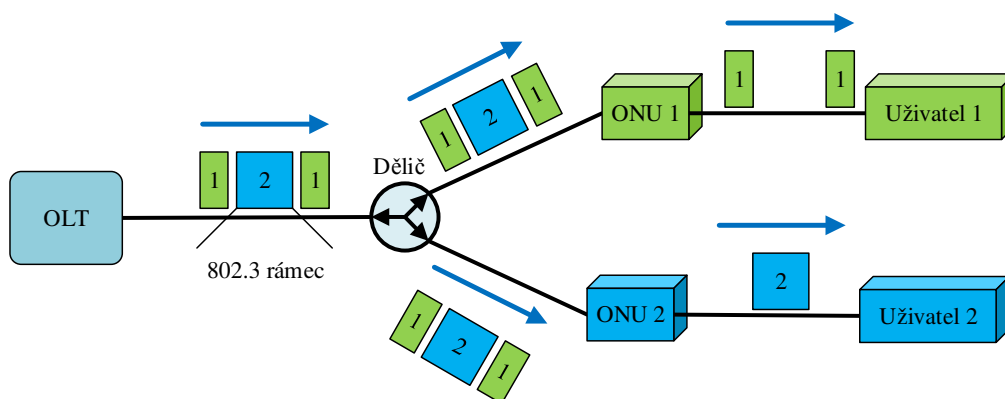
Standard FTTH založený na EPON byl přijat standardizační organizací IEEE v září 2004 jako standard IEEE 802.3 ah. Přijetí ethernetové technologie do přístupových sítí by mělo sjednotit protokol u koncových účastníků a zjednodušit správu sítě. Jednotný protokol v místních sítích LAN, přístupových sítích a páteřních sítích umožňuje snadné zavedení FTTH.

Standard IEEE 802.3 ah pracuje na vlnové délce 1 310 nm pro přenos ve vzestupném a 1 490 nm v sestupném směru pro spojení typu bod více bodů. Vlnová délka 1 550 nm se v PON sítích charakteru OLT-ONU nepoužívá a může být nezávisle využívána pro další aplikace, např. pro RFoG. Nominální přenosová rychlost je 1 Gbit/s, která je převedena linkovým kódováním 8B/10B na linkovou rychlost 1,25 Gbit/s. Standard EPON je symetrický a tudíž využívá tuto přenosovou rychlost pro oba přenosové směry[1][2][3].

1.1 Princip činnosti

Standard IEEE 802.3 definuje dvě základní konfigurace pro ethernetové sítě. První konfigurace může být nasazena na sdílené médium použitím CSMA/CD protokolu. V druhé konfiguraci jsou stanice připojeny skrz přepínač použitím plného duplex na lince typu bod-bod. EPON je kombinace sdíleného média se sítí typu bod-bod.

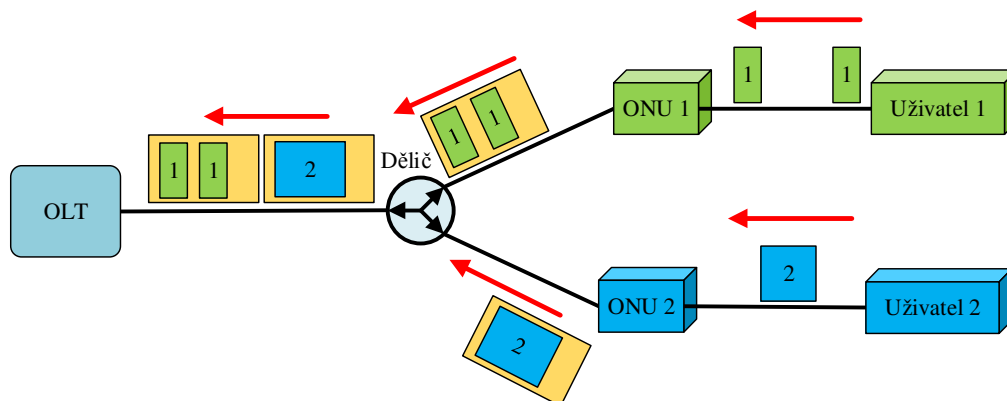
V sestupném směru jsou z OLT vysílané ethernetové rámce posílány skrz 1:N pasivní rozbočovač, přičemž tyto rámce dorazí ke každé připojené ONU jednotce. Obvyklý rozbočovací poměr je mezi 1:4 až po 1:64. Tato vlastnost je podobná sítím se sdíleným médiem. Jelikož je ethernet všesměrový protokol, v sestupném směru je ideální k použití v ethernetové PON architektuře. Pakety jsou z OLT všesměrově vysílány a jsou extrahovány jejich cílovou ONU na základě MAC adresy, jak lze vidět na obrázku Obr. 1.1.



Obr. 1.1 Sestupný směr přenosu dat v EPON sítích [4].

Ve vzestupném směru kvůli směrovým vlastnostem pasivních optických slučovačů se datové rámce z ONU jednotek dorazí pouze k OLT, nikoliv k jiným ONU jednotkám. V tomto smyslu ve vzestupném směru je funkce EPON podobná k architektuře typu bod-bod, viz obrázek Obr. 1.2. Nicméně na rozdíl od pravé sítě typu bod-bod v EPON sítích jsou datové rámce z různých ONU jednotek přenášeny současně a může docházet ke kolizím. Proto ve vzestupném směru ONU jednotky

potřebují rozhodovací mechanismus k předcházení datovým kolizím a ke sdílení kapacity optického vlákna.



Obr. 1.2 Vzestupný směr přenosu dat v EPON sítích [4].

Rozhodování na bázi mechanismu přístupu k médiu, podobného jako CSMA/CD je obtížné implementovat, protože ONU jednotky kvůli směrovým vlastnostem optických slučovačů a rozbočovačů nemohou detekovat kolizi na OLT. OLT může zjistit kolizi a informovat ONU jednotky vysláním signálu indikující o vzniklé kolizi (jam signál), nicméně zpoždění způsobené šířením signálu v PON síti, která dosahuje až 20 km, může velmi snížit účinnost takového systému. Neexistuje garance, že uzel dostane přístup na medium v každém časovém intervalu. Tento problém se netýká podnikových sítí založených na CSMA/CD, kde spojení jsou krátké, nadměrně dotovány a provoz je složen převážně z dat. Přístupové účastnické sítě kromě přenosu dat musí podporovat hlasové a video služby a také musí poskytovat garanci včasného přenosu těchto služeb.

Všechny ONU jednotky jsou synchronizovány se společnou časovou referencí a každé ONU jednotce je přidělený časový interval, ve kterém může vysílat, aniž by došlo ke kolizi. ONU jednotka ukládá do vyrovnávací paměti rámce přijímané od uživatele do té doby než nastane časový interval, ve kterém může vysílat. Když časový interval nastane, tak ONU začne vysílat uložené rámce v plné rychlosti kanálu, které musí odpovídat jedné ze standardních ethernetových přenosových rychlostí (10/100/1000/10000 Mbit/s). V případě, že ve vyrovnávací paměti není dostatečný počet rámců, aby vyplnily celý časový interval, tak je doplněn 10 bitovým vzorkem [4].

1.2 Ethernetový rámec

V EPON sítích se data přenášejí jako nativní ethernetové rámce s různou velikostí. Na obrázku Obr. 1.3 je zobrazen standardní formát ethernetového rámce. Prvních 7 oktetů v rámci označuje preamble následovanou polem SFD o velikosti jednoho oktetu, které slouží k ohraničení začátku rámce. Ve standardu EPON je preamble upravena a využívá se pro přenos logického linkového identifikátoru LLID, který slouží pro identifikaci ONU jednotek, přičemž preamble a SFD pole se do celkové délky ethernetového rámce nezapočítávají.

Preamble	SFD	Cílová adresa	Zdrojová adresa	Délky/Typ	Data	FCS
7 B	1 B	6 B	6 B	2 B	46-1500 B	4 B

Obr. 1.3 Standardní formát ethernetového rámce [5].

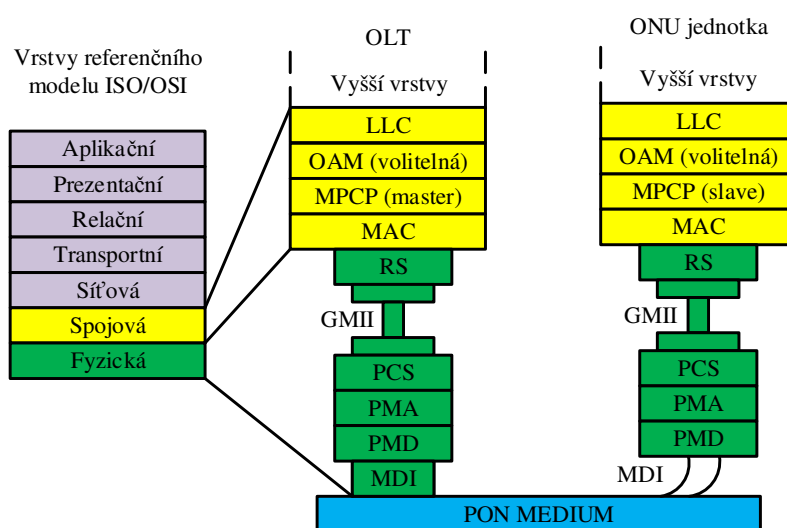
Po poli SFD následuje 12 oktetů obsahující MAC adresy, prvních 6 oktetů je vyhrazeno pro cílovou a druhých 6 oktetů pro zdrojovou adresu. Následující 2 oktety jsou rezervované pro pole Délka/Typ. Toto pole obsahuje buď velikost rámce, nebo označení typu ethernetového rámce. Hodnota v rozmezí od 0 do 1 500 reprezentuje délku rámce a hodnota mezi 1536 až 65 535 reprezentuje typ ethernetového rámce. Pole Délka/Typ je navzájem vylučné a může zastávat pouze jednu z možností. Rámce ethernetu mají různou délku přenášených dat a to v rozmezí od 46 do 1500 oktetů. Poslední pole v rámci je 4 oktetový kontrolní součet FCS, který používá cyklický redundantní součet CRC.

Ethernetové rámce přenášejí minimální režii pro řízení. Řídící a OAM informace jsou přenášeny pomocí protokolových datových jednotek PDU a OAM rámců, které jsou identifikované speciálními hodnotami v poli Délka/Typ. Protokoly a OAM informace jsou přenášeny v užitečném zatížení protokolových datových jednotek a OAM rámcích. Tyto rámce jsou multiplexovány do přenosového pásma společně s ethernetovými rámci přenášejícími aktuální uživatelská data.

1.3 Architektura Ethernetové vrstvy v EPON

Standard 802.3 ah se v rámci referenčního modelu ISO/OSI zabývá pouze fyzickou a spojovou vrstvou. Na obrázku Obr. 1.4 je zobrazena architektura vrstev P2P ethernetu a P2MP ethernetové pasivní optické sítě. Z obrázku je zřejmé, že struktura vrstev je u EPON velmi podobná tradičnímu P2P ethernetu. Ethernetový standard rozděluje fyzickou a linkovou vrstvu do mnoha dalších podvrstev. Tyto vrstvy jsou vzájemně spojeny prostřednictvím rozhraní nezávislého na médiu MII nebo gigabitovým rozhraním GMII.

Volitelná MAC podvrstva ve standardním P2P ethernetu je v EPON sítích nahrazena podvrstvou vrstvé architektury ethernetu MPCP, tato vrstva slouží k řízení přístupu ke sdílenému médiu v pasivních optických sítích mezi jednotlivými optickými síťovými jednotkami ONU. V optickém linkovém zakončení OLT se MPCP podvrstva chová jako řídicí člen a v ONU jednotce jako člen řízený.



Obr. 1.4 P2MP ethernetové vrstvy v EPON [5].

1.3.1 PMD vrstva přenosového protokolu

Fyzická podvrstva PMD specifikuje fyzické vlastnosti optických přijímačů a vysílačů. Standard 802.3ah specifikuje minimální dělicí poměr 1:16 a podporuje až 32 768 různých logických optických síťových jednotek ONU, to je docíleno 15 bitovým logickým spojovým identifikátorem LLID. EPON standard definuje dva různé dosahy mezi OLT a ONU, jeden 10km a druhý 20 km. Vlastnosti vysílačů resp. přijímačů ONU a OLT definující dosah 10 km jsou uvedeny ve standardech 1000BASE-PX10-D a 1000BASE-PX10-U. Pro 20 km dosah ve standardu 1000BASE-PX20-D a 1000BASE-PX20-U. Rozdělení vlnových délek EPON vychází ze standardu ITU-T G983.3 [6].

Tab. 1.1 Vlastnosti IEEE 802.3 ah EPON přijímačů

1000BASE	PX10-D (OLT)	PX10-U (ONU)	PX20-D (OLT)	PX20-U (ONU)
Rozsah vlnových délek [nm]	1 260 - 1 360	1 480 - 1 500	1 260 - 1 360	1 480 - 1 500
Maximální výkon [dBm]	- 1	- 3	- 6	- 3
Citlivost [dBm]	- 24	- 24	- 27	- 24

Tab. 1.2 Vlastnosti IEEE 802.3 ah EPON vysílačů

1000BASE	PX10-D (OLT)	PX10-U (ONU)	PX20-D (OLT)	PX20-U (ONU)
Rozsah vlnových délek [nm]	1 480 - 1 500	1 260 - 1 360	1 480 - 1 500	1 260 - 1 360
Maximální výkon [dBm]	+ 2	+ 4	+ 7	+ 4
Minimální výkon [dBm]	- 3	- 1	+ 2	- 1

V tabulkách Tab. 1.1 a Tab. 1.2 jsou uvedeny charakteristiky fyzických vlastností PMD podvrstvy. Z tabulek je patrné, že vlastnosti ONU jednotek, jak u 10 km, tak i u 20 km přenosové vzdálenosti jsou velmi podobné. Zatímco většina změn je provedena v OLT. Toto řešení umožňuje zvýšení přenosové vzdálenosti bez nutnosti modifikace stávajících ONU jednotek [5].

1.3.2 PCS podvrstva a zpětná bitová korekce FEC

PCS podvrstva provádí linkové kódování na fyzické vrstvě ethernetových zařízení. EPON definuje propustnost 1 Gbit/s ve vzestupném i sestupném směru přenosu a používá stejné linkové kódování 8B/10B jako standard 802.3z. Linkové kódování 8B/10B přidává režii v hodnotě 25%, čímž zvyšuje přenosovou rychlost na 1 250 Mbaud/s.

Na podvrstvě PCS pracuje kromě linkového kódování i zpětná bitová korekce FEC. IEEE 802.3ah standard definuje blokové kódování RS (255,239). Stejně blokové kódování používá i standard G-PON. Paritní bity jsou přidány na konec každého rámce. Zatímco se rychlost hodinové frekvence přidáním paritních bitů FEC nemění, tak datová propustnost se použitím FEC snižuje. Reed Solomonův (255,239) blokový kód informační bity nemění, díky tomu umožňuje optickým síťovým jednotkám, které zpětnou bitovou korekci FEC nepodporují pracovat společně s jednotkami, které FEC podporují. Optické síťové jednotky bez podpory FEC jednoduše paritní bity ignorují, a tím pádem pracují na vyšší bitové chybovosti BER (Bit Error Ratio)[7].

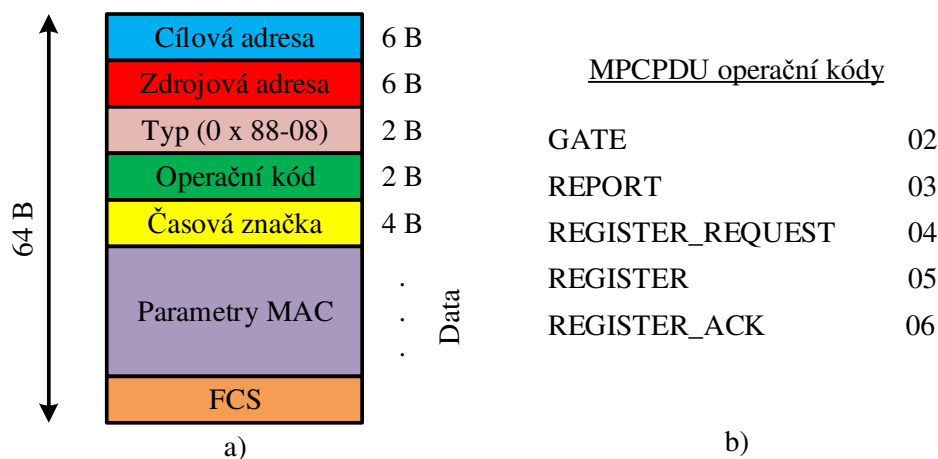
1.4 MPCP podvrstva

MPCP podvrstva se nachází ve spojové vrstvě referenčního modelu ISO/OSI, používá protokolové datové jednotku MPCPDU, které slouží k přiřazení nových ONU jednotek. Dále také provádí ve vzestupném směru přidělení přenosové kapacity v multirámcích jednotlivým ONU jednotkám.

1.4.1 MPCP protokolové datové jednotky

MPCPDU jsou 64 bytů dlouhé MAC rámce bez VLAN značek. Formát MPCPDU je zobrazen na obrázku Obr. 1.5 a). Datové jednotky MPCPDU jsou určeny podle hodnoty 0x88-08 v poli Délka/Typ ethernetového rámce. Po poli Délka/Typ následuje pole určující operační kódy, které má velikost 2B. Hodnoty operačních kódů a jejich význam jsou zobrazeny na obrázku Obr. 1.5 b).

Každá MPCPDU zpráva obsahuje pole s časovou značkou o velikosti 4 oktětů, díky tomuto poli se mohou ONU jednotky a OLT navzájem nepřetržitě aktualizovat, aby nedocházelo k časovým posunům v komunikaci, které jsou způsobené teplotními vlivy na optickém vlákne. Část Data/Pad obsahuje parametry MAC používané v MPCP a nezbytnou výplň rámce do velikosti 64 bytů.



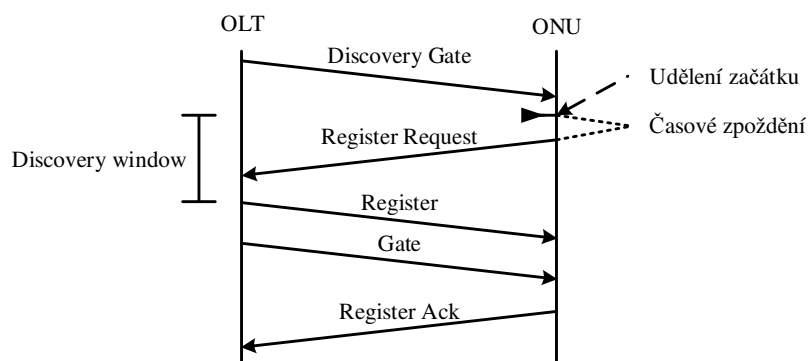
Obr. 1.5 a) Protokolová jednotka MPCPDU, b) Operační kódy MPCPDU [5].

1.4.2 Protokolové datové jednotky Gate a Report

Činnost zprávy Gate poskytuje optickému linkovému zakončení OLT mechanismus k určení přesného časového intervalu, ve kterém může ONU jednotka vysílat. Na rozdíl od GPON, kde OLT určuje začátek a konec času vysílání zvyšování po 1 bytu. Činnost datové jednotky Gate specifikuje začátek a délku časového slotu zvyšování po 16 ns. MPCP protokolová jednotka Gate obsahuje časovou značku, počáteční čas a délku přenosu ve vzestupném směru. Po přijetí zprávy Gate, ONU jednotka aktualizuje časový registr, registr obsahující začátkem intervalu a registr s délkou časového slotu. Zprávou Report, kterou vysílá ONU jednotka po přijetí zprávy Gate, informuje optické linkové zakončení OLT o délce fronty a poskytne časové informace k vypočtení obousměrného zpoždění RTT. Po přijetí zprávy Report OLT aktualizuje registr obsahující velikost fronty a RTT registr.

1.4.3 Proces automatického zjišťování ONU jednotek

Proces automatického zjišťování umožňuje ONU jednotkám registraci a přiřazení do EPON sítě ihned po jejich připojení. OLT určí virtuální MAC a přiřadí logický linkový identifikátor LLID k ONU jednotce pro emulaci typu bod-bod. Během procesu automatického zjišťování si ONU jednotka a optické linkové zakončení OLT navzájem vymění synchronizační čas přijímače burst režimu v OLT. Synchronizační čas je čas vyžadovaný optickým linkovým zakončením OLT.

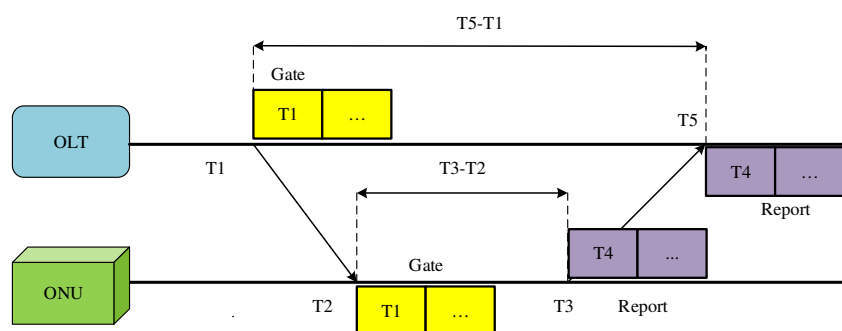


Obr. 1.6 Proces automatického zjišťování ONU jednotek [5].

Pro zajištění procesu automatického zjišťování ONU jednotek OLT periodicky vysílá protokolové datové jednotky Gate. Rezervované discovery okno je určeno zprávou Gate. OLT také odesílá v Gate zprávách vlastní synchronizační čas přijímače burst režimu, aby ONU jednotky znaly formát signálu ve vstupu směru při nečinnosti během počátečního synchronizačního času v burst režimu. ONU zaregistruje na svém přijímači zprávu Discovery Gate a po náhodné časové prodlevě posílá jako odpověď k OLT zprávou Register Request. OLT přijme Register Request a přidělí ONU jednotce vlastní logický linkový identifikátor LLID. OLT poté posílá další zprávu Gate s udělením časového intervalu ve vstupu směru s nově přiřazeným LLID. Po přijetí zpráv Gate a Register optická síťová jednotka odpovídá OLT vysláním rámce Register Acknowledgment, kterým označuje dokončení registračního procesu. Proces je znázorněn na obrázku Obr. 1.6

1.4.4 Synchronizační proces mezi OLT a ONU

Synchronizační proces měří čas obousměrného zpoždění RTT mezi OLT a jednotlivými ONU jednotkami, aby mohlo OLT vhodně kompenzovat časové sloty ve vstupu směru a předešlo tím vzniku kolizí, které mohou v tomto směru vznikat. Tohoto se dosáhne pomocí MPCP protokolových jednotek Gate a Report. Jak OLT, tak i ONU mají vlastní lokální 32 bitové čítače.

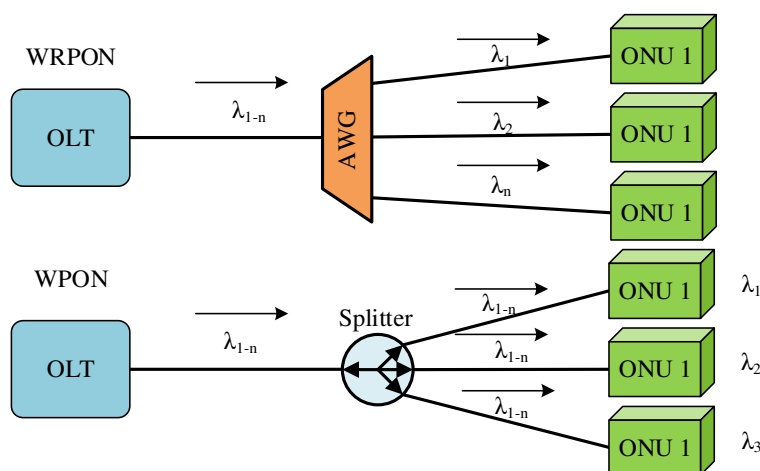


Obr. 1.7 Synchronizační proces pomocí zpráv Gate a Report [5].

V synchronizačním procesu OLT vyšle protokolovou datovou jednotku Gate s vlastní časovou značkou T1, která reprezentuje aktuální hodnotu na lokálním čítači. Jednotka ONU přijme časovou značku v čase T2 a nastaví svůj lokální čítač na hodnotu vyslanou OLT v časové značce T1. Po zpracování vyšle ONU jednotka zprávu Report v čase T3 s časovou značkou T4, která je součet časové značky T1 s rozdílem značek T3 a T2. OLT přijme zprávu Report s časovou značkou T4 v čase T5. Proces je zobrazen na obrázku Obr. 1.7 [5].

2 WDM-PON

WDM-PON je zkratka k popisu pasivních optických sítí, které využívají multiplexního rozdělení vlnových délek. WDM metody jsou nejběžněji používané v sestupném směru a můžou se rozdělit na všesměrové pasivní optické sítě WPON a na směrované podle vlnových délek WRPON. Ve všesměrových WPON sítích jsou všechny vlnové délky vysílány ke všem ONU jednotkám skrz optický rozbočovač a výběr mezi vlnovými délkami probíhá v ONU jednotce. V sítích se směrovanými vlnovými délkami jsou jednotlivé kanály směrovány k optickým síťovým jednotkám za pomoci AWG směrovače. Základní návrh WRPON a WPON je zobrazen na obrázku Obr. 2.1.



Obr. 2.1 WRPON a WPON [8].

V sítích WDM-PON způsob používaný ve vzestupném směru může být určen nezávisle na způsobu přenosu v sestupném směru. Nejčastějším řešením je nasazení jedné vlnové délky společně s metodou vícenásobného přístupu TDMA. Nicméně, tato kombinace není schopná podporovat symetrickou přenosovou rychlost v obou směrech. V případě, že je vyžadován symetrický přenos dat je nutné využít i ve vzestupném směru metodu se směrovanými vlnovými délkami WRPON [8].

2.1 Rozdělení WDM – PON sítí

2.1.1 DWDM

K zajištění zvyšující se kapacity přenosu a přenosových vzdáleností byla vyvinuta technologie DWDM, aby poskytovala co nejužší rozestupy vlnových délek a kanálů. Dense WDM systémy pracují v pásmech C a L, kde frekvenční rozdělení definované v doporučení ITU-T G.694.1 podporuje různé pevné kanálové rozestupy v rozsahu od 12,5 GHz do 100 GHz. Při takto úzkém rozestupu vlnových délek je velmi důležité realizovat přesné řízení a ovládání teploty a klidového proudu laserových diod LD a filtrů. DWDM systémy vyžadují přesné optické filtry a vysoce stabilní zdroje vlnových délek, aby se zabránilo posunutí vlnových délek, a tím překrytí jednotlivých kanálů. Cena těchto zařízení je vysoká a jejich aplikace v přístupovém prostředí je z ekonomického hlediska obtížně zdůvodnitelná.

Jako zdroje DWDM záření jsou používány laserové diody s distribuovanou zpětnou vazbou DFB-LD a elektroabsorbční modulátory EAM. Dielektrické tenkovrstvé filtry upořádaných vlnovodů

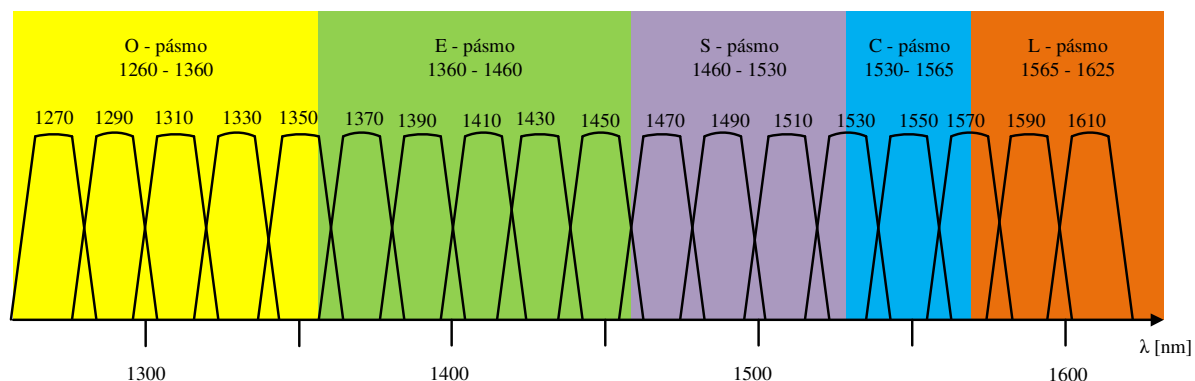
do mřížky AWG jsou používány jako multiplexory a demultiplexory. Ke stabilizování charakteristik vlnových délek těchto vlnových filtrů se používají teplotní stabilizátory. Tyto přídavné řídicí obvody potřebné pro nastavení přesných vlnových délek zvyšují cenu nasazení DWDM systémů, i když za pomoci této technologie lze multiplexovat po jednom optickém vlákne více než 100 vlnových délek. DWDM systémy jsou zejména používány v trunkových spojích v pozemních a podmořských přenosech [9] [10] [11].

2.1.2 CWDM

CWDM technologie se vyznačuje širšími kanálovými rozestupy než DWDM, kde frekvenční rozdělení je definované v doporučení ITU-T G.694.1. CWDM systémy mohou realizovat rentabilní aplikace díky kombinaci nechlazených laserů, menších požadavků na přesnost vlnových délek, než jak je u DWDM a širokopropustných pásmových filtrů. CWDM systémy se mohou používat v metropolitních oblastech transportních sítích pro různorodé klienty, služby a protokoly.

Podle standardu ITU-T G.694.2 CWDM kanály pokrývají celé pásmo vlnových délek od 1 260 nm do 1 625 nm včetně oblasti, kde je zvýšený počet OH iontů a mohlo by docházet k rozptylu, proto dle doporučení ITU-T G.652.C a G.652.D se používají optická vlákna s potlačenou hladinou OH iontů. Nevyužití kritické oblasti snižuje počet použitelných kanálů na 8, tj. 1 310 nm a od 1 490 do 1 610 nm. Nicméně, umožňuje to použití CWDM se staršími vlákny podle ITU-T G.652, které lze nasadit v této oblasti. Širokopásmové optické zesilovače, které jsou velmi používané u DWDM systémů k rozšíření optického rozsahu, až na stovky kilometrů nejsou v CWDM dostupné a proto je omezení optických spojů v CWDM systémech jen několik desítek kilometrů. CWDM poskytuje důležité řešení k vytvoření přístupových sítí s vysokou hustou a s velkým přenosovým pásmem[12].

V systémech CWDM jsou jmenovité centrální vlnové délky používány k vymezení horní a dolní meze vlnových délek ve všech používaných kanálech. Tyto meze stanovují limity pro vysílače vlnových délek za všech podmínek a zároveň vlnová délka omezuje specifikaci optického multiplexoru a demultiplexoru, která musí být splněna. Efektivní CWDM realizace s nechlazenými lasery a širokopásmovými filtry vyžaduje minimální 20 nm velké rozestupy jmenovitých středových vlnových délek. Maximální odchylka vlnových délek je $\pm 6-7$ nm, tj. jedna třetina z minimálního odstupu kanálů. S těmito rozestupy může CWDM vysílat až 16 kanálů na jednom optickém vlákne [11][13].



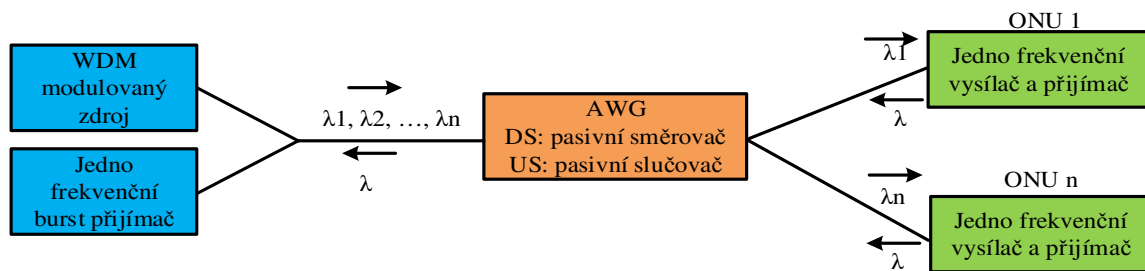
Obr. 2.2 CWDM [9].

Rozestupy vlnových délek v systémech CWDM jsou v rozmezí od 20 nm do 40 nm. Tento přístup používá přímo modulované laserové diody s distribuovanou zpětnou vazbou DFB LD a Fabry Perotovy laserové diody FP LD, dielektrické tenkovrstvé filtry, optické slučovače a polymerní vlnovody. Rentabilnost zařízení je pro CWDM velmi důležitá. Složitě a nákladně řízení vlnových délek je nahrazeno chladiči a ventilátory. CWDM systémy se používají v místních sítích LAN a v metropolitních sítích WAN [9].

2.2 Architektury WDM-PON sítí

2.2.1 Kompozitní PON

Jedna z prvních WDM-PON architektur používala v sestupném směru pásmo 1 550 nm a ve vzestupném pásmu 1 300 nm, které byly sdíleny pomocí časově děleného mnohonásobného přístupu TDMA. Vzestupný a sestupný směr přenosu mohl být podporován na jednom vlákne pomocí hrubého WDM. Tato architektura byla v literatuře označována jako kompozitní PON (Composite PON). V OLT se používal přijímač s burst režimem, který přijímal signál ve vzestupném směru na jediné vlnové délce. Kvůli synchronizaci ONU jednotek s přijímačem v režimu burst bylo potřeba vysílat hodinové signály. Na obrázku Obr. 2.3 je zobrazena architektura CPON.

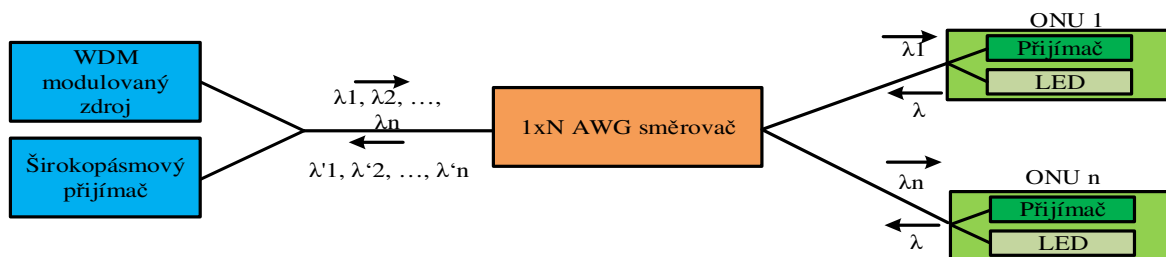


Obr. 2.3 Kompozitní PON síť [14].

Omezení v architektuře CPON je, že jedno frekvenční laser DFB, který je použitý v ONU jednotkách, může být z ekonomického hlediska efektivní. Kromě toho, změny vlnových délek, které mohou nastat v důsledku kolísání teploty na vzdáleném konci ONU jednotek je obtížné korigovat.

2.2.2 LARNET - Local Access Remote Network

Architektura LARNET se snaží obejít omezující faktory v CPON použití v ONU jednotkách širokospektrálních zdrojů, jako je hranově buzené LED, jejíž spektrum je ve vzestupném směru rozloženo AWG směrovačem. Když je širokospektrální zdroj směřován do jednoho vstupního portu AWG, tak jednotlivé základní vlnové délky jsou přivedeny na různé výstupní porty.



Obr. 2.4 Architektura LARNET [14].

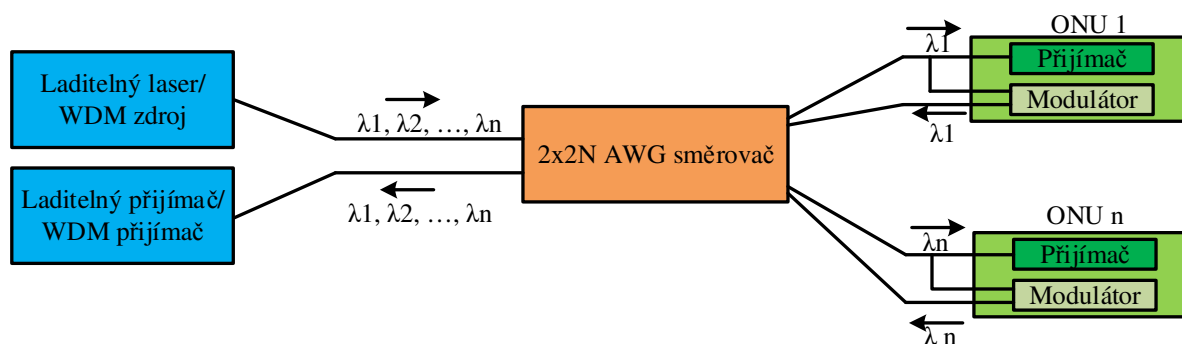
Hranově buzená LED vyzařuje široké spektrum vlnových délek soustředěných okolo jedné vlnové délky, na rozdíl od DFB laserů, které vyzařují pouze jednu vlnovou délku. OLT využívá širokopásmové burst přijímače, na rozdíl od CPON, kde se používá jednofrekvenční, které mohou přijímat každou spektrální složku LED. Pro sdílení vzestupného kanálu je využit TDMA přístup. Na obrázku Obr. 2.4 je zobrazena architektura LARNET sítě.

Hranově buzené LED jsou mnohem levnější v porovnání s DFB lasery, a proto jsou z ekonomického hlediska mnohem přístupnější v ONU jednotkách. Omezení je takové, že spektrální rozdělení širokospektrálního záření pomocí AWG vede k velmi vysokým výkonovým ztrátám. Proto je vzdálenost mezi OLT a ONU v LARNET sítích značně snížena.

2.2.3 RITENET – Remote Integrated Terminal Network

Architektura RITENET využívá časového sdílení jak pro vzestupný, tak i pro sestupný směr přenosu dat. Rámec je rozdělen do dvou částí, první je použita pro sestupný přenos a druhá pro vzestupný přenos. AWG 2xN směrovač se používá pro směrování vlnových délek. Vzhledem k tomu, že stejný optický kanál je použit, jak pro vzestupný, tak i pro sestupný směr, musí být odděleny do dvou optických vláken. Nicméně, na rozdíl od LARNET a CPON sítí, RITENET nevyžaduje kanálové sdílení mezi ONU jednotky ve vzestupném směru a tudíž neexistují žádné omezení napřenosovourychlost. Obrázek Obr. 2.5 zobrazuje architekturu RITENET.

Zatímco RITENET pomáhá při snižování nákladů na koncové jednotky ONU, vzdálenost od OLT k ONU je mnohem menší, protože signál k OLT musí překlenout dvojnásobnou vzdálenost. Také, protože signál je nyní sdílen mezi dvěma konci, přenosová rychlost PON se musí zdvojnásobit. Navíc počet používaných optických vláken je také dvojnásobný, které zdvojnásobuje náklady na nasazení a údržbu. WDM přijímač musí být nasazen v OLT, na rozdíl od LARNET nebo CPON, což zvyšuje náklady na koncové zařízení OLT.



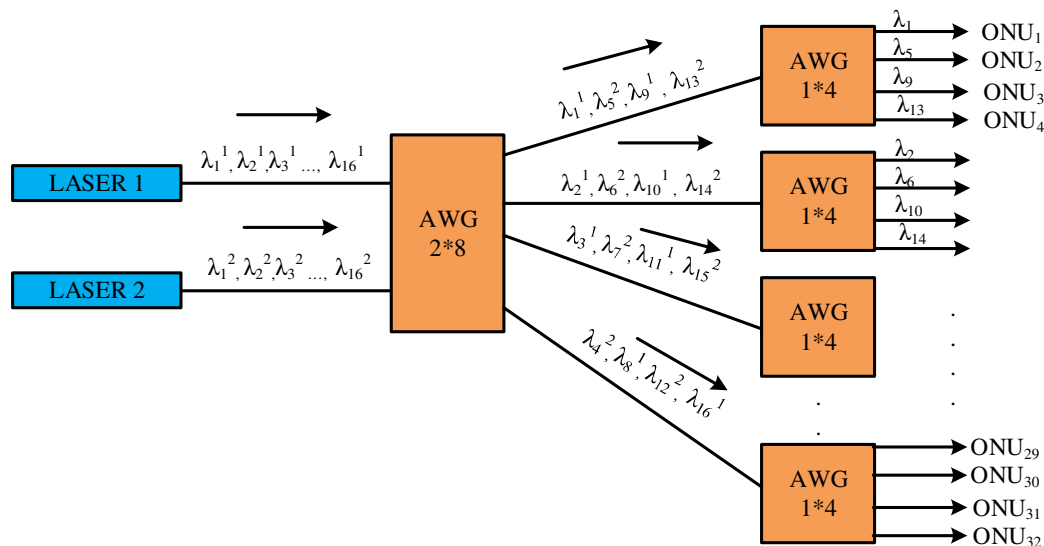
Obr. 2.5 Architektura RITENET [14].

2.2.4 Vícetupňová WDM-PON architektura

Předchozí architektury mají dvě omezení, obtížné rozšíření počtu jednotek ONU a omezení počtu uživatelů, kvůli omezení velikosti AWG způsobené výrobní technologií. K překonání těchto omezení byla navržena vícetupňová architektura. Tato architektura, která se nazývá jako vícetupňová WDM-PON, využívá periodickou směrovací vlastnost AWG. Díky které je možné opětovně využívat dané vlnové délky pro více než jednoho uživatele. Tato architektura poskytuje

rozšiřitelnost šířky pásma stejně dobře jako počet uživatelů. A to buď nasazením dalších vlnových délek v ústředně nebo kaskádního uspořádání AWG.

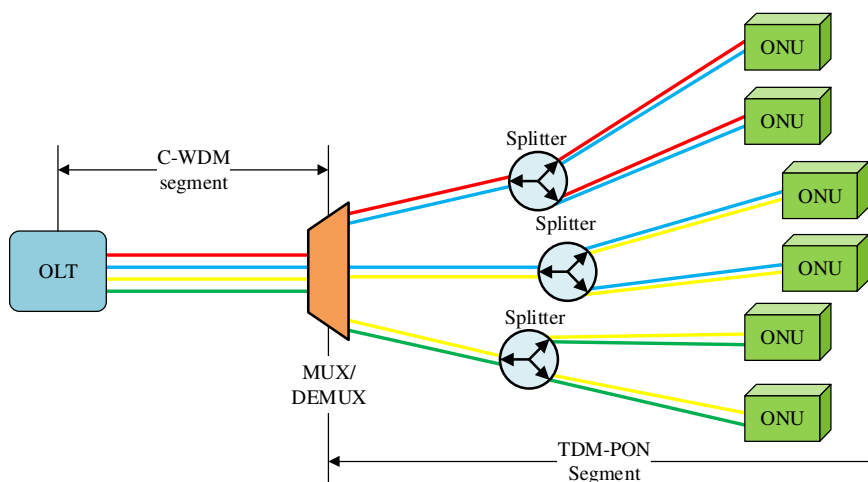
Tato architektura je zobrazena na obrázku Obr. 2.6. Dolní index u vlnové délky značí číslo vlnové délky a horní index zdroj vysílání. Tento způsob má několik předností. Starší 2x8 kanálový AWG je zachován a 8 nových 1x4 kanálových AWG je použito pro rozšíření sítě [14].



Obr. 2.6 Vícestupňová WDM-PON architektura [14].

2.3 CWDM/TDM PON síť

Princip tohoto přístupu je multiplexovat několik stejných PON sítí na jedno optické vlákno a použít dva překrývající se směrovací přístupy k dosažení ke koncovým uživatelům. V první fázi je CWDM směrování a v druhé fázi je klasická pasivní optická síť s rozbočovačem. Tento přístup je zobrazen na obrázku Obr. 2.7.



Obr. 2.7 Spojení CWDM a TDM-PON sítí [11].

Toto řešení rozšiřuje počet uživatelů obsluhovaných po jedné optické vlákně. Násobící faktor je počet vlnových délek, takže teoreticky můžeme zvyšovat kapacitu počtu uživatelů 16krát.

Ale prakticky existuje několik omezení. Když používáme starší vlákno, tak vlnové délky 1 400 nm a 1 380 nm nemůžeme použít kvůli útlumovým iontům vody. V případě použití jednoho optického vlákna musíme zohlednit, že potřebujeme vlnové délky jak pro vzestupný, tak i pro sestupný směr přenosu.

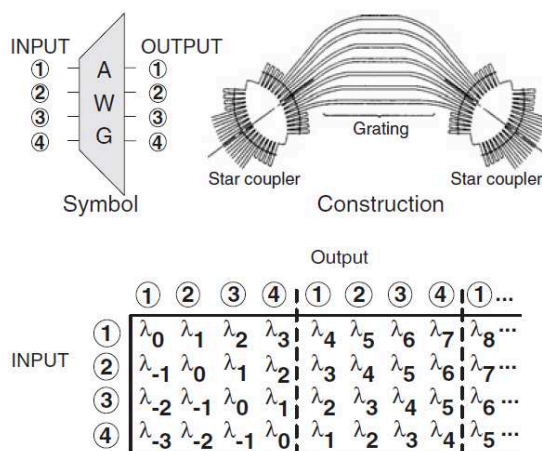
Realizace je velmi jednoduchá, N CWDM rozhraní, kde N je počet podsítí a počet CWDM vlnových délek (příspěvkových kanálů) jsou spojeny a přenášeny na jednom trunkovém vlákne k prvnímu vzdálenému uzlu, kde každý CWDM kanál je směřován do sekundární podsítě. Poté sekundární síť pomocí rozbočovače rozdělí signál a distribuuje ho mezi všechny ONU jednotky. Vzestupný směr je stejný jako klasická TDM-PON síť. Každá podsíť má určenou vlnovou délku ve vzestupném směru a proto ONU jednotky ze stejné podsítě používají stejnou vlnovou délku pro přenos ve vzestupném směru [11].

2.4 Rozšiřitelnost WDM-PON

Každá síťová architektura musí být jednoduše rozšiřitelná. V přístupových sítích je rozšiřitelnost potřebná, v jak šířce pásma, tak i v počtu uživatelských koncových bodů. Vzhledem k tomu, že náklady na vybudování optických sítí jsou vysoké, hlavně díky manuálním pracím, je důležité zajistit, aby šlo dosáhnout rozšíření sítě bez dalšího nasazení režie. Cena některých optických zařízení jako je AWG je také docela vysoká, a právě proto musí být zajištěno, že zařízení mohou být znovu použity a není je kvůli rozšíření potřeba měnit. Podobně je to i u optických síťových jednotek, které jsou umístěny u koncových uživatelů, zásahy do těchto zařízení by měly být minimální. Vzhledem k tomu, že všichni koncoví uživatelé nemusí chtít zvýšení přenosového pásma současně, mělo by být zajištěno, že starší uživatelé mohou být stále podporováni během procesu rozšiřování sítě [14].

2.5 AWG směrovač

AWG směrovač je klíčový prvek ve WDM-PON architekturách. Na obrázku Obr. 2.8 je zobrazen obecný AWG směrovač, který obsahuje dva hvězdicovité vazební členy spojené s rameny vlnodůů. Velmi důležitá a užitečná charakteristika AWG je jeho vlastnost cyklického směřování vlnových délek.



Obr. 2.8 Konstrukce AWG směrovače a směrovací tabulka vlnových délek [5].

AWG může být navrženo, tak že jeho vlastnost demultiplexování vlnových délek se opakuje v rozsahu optického spektra nazývaný volný spektrální rozsah FSR. Kromě toho, jeli více vstupních vlnových délek přepnuto na další vstupní port, pak demultiplexované výstupní vlnové délky jsou současně přepnuty na další výstupní port. Cyklické AWG bývají také označovány jako bezbarvé AWG. Vlastnost cyklických vlnových délek může být využita například k použití dvou sousedních portů pro připojení vzestupného a sestupného směru a stejné vlnové délky se mohou použít znova pro přenos a příjem na ONU jednotce [5].

2.5.1 Činnost AWG směrovače

Princip činnosti je následující: paprsek šířený skrz vysílací vlnovody dorazí na první volný spektrální rozsah FPR, přestává být příčně omezen a stává se rozbíhající. Při dosažení vstupního otvoru je paprsek připojen do pole vlnodů a šířen skrz jednotlivé vlnovody směrem na výstupní otvor. Délka pole vlnodů je zvolena tak, aby rozdíl délky optické trasy mezi přilehlými vlnovody se rovnal celočíselnému násobku střední vlnové délky λ_c demultiplexoru. Pro λ_c pole v jednotlivých vlnovodech dorazí na výstupní otvor se stejnou fází (mod. 2π) a tedy rozložení pole na vstupním otvoru je reprodukován na výstupní otvor. Divergentní paprsek na vstupním otvoru je poté přeměněn na jeden konvergentní se stejnou amplitudou a fází a na vstupním poli objektu vzniká odpovídající obraz ve středu obrazové roviny. Prostorové oddělení různých vlnových délek je dosaženo lineárním zvýšením délek pole vlnodů, které představují vlnové délky v závislosti na sklonu odchozího paprsku spojeného s posunem kontaktního bodu podél obrazové roviny. Pokud jsou vlnovody přijímače umístěny na vhodných pozicích podél obrazové roviny, pak různé vlnové délky jsou vedeny k různým výstupním portům [15].

3 Síť nové generace

3.1 10G Ethernet PON – IEEE 802.3av

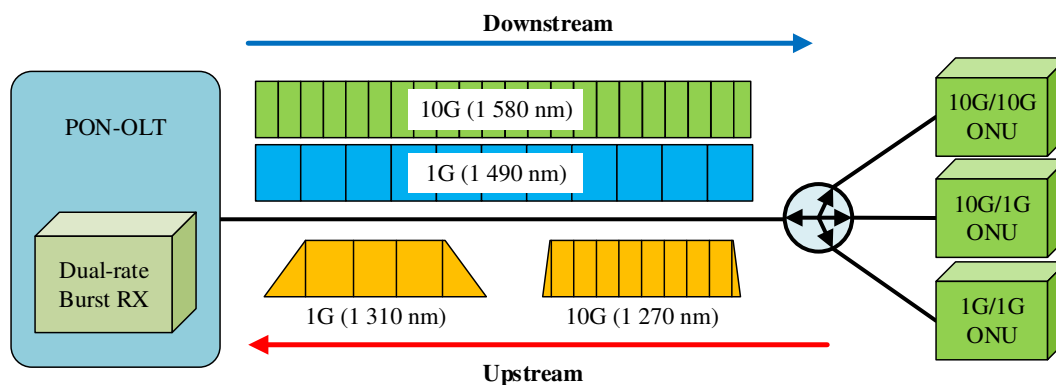
K zajištění stále větší potřeby vyšších přenosových rychlostí vydala pracovní skupina 802.3 v březnu 2006 CFI, jehož cílem bylo přeskóčit zvýšení přenosové rychlosti o hodnotě 2,5 Gbit/s a zaměřit se rovnou na možnosti s přenosovou rychlostí 10 Gbit/s. V říjnu 2009 byl oficiálně schválen standard IEEE 802.3av [16].

Tento standard je postaven na zpětné kompatibilitě se stávajícím EPON standardem a zároveň je jeho nástupce a rozšiřuje jej o desetinásobek přenosové rychlosti na 10 Gbit/s. Poskytuje jak symetrickou, tak i asymetrickou přenosovou rychlost. Asymetrická přenosová rychlost je pro vzestupný směr 1 Gbit/s a pro sestupný směr 10 Gbit/s, zatímco symetrická má hodnotu 10Gbit/s. IEEE 802.3 se zabývá pouze dvěma nejnižšími vrstvami referenčního modelu ISO/OSI a to fyzickou a linkovou vrstvou. Obě vrstvy jsou dále rozděleny na dílčí podvrstvy a rozhraní definované pro ethernetové zařízení ve standardu IEEE 802.3 Layering Model.

IEEE 802.3av Task Force se zaměřila pouze na fyzickou vrstvu. Specifikovala RS podvrstvu, symetrické a asymetrické podvrstvy fyzického kódování PCS, PMA a podvrstvu závislou na médiu PMD pro symetrickou a asymetrickou přenosovou rychlost, kvůli zachování zpětné kompatibility s 1Gbit/s EPON vybavením. PMD podvrstva je odpovědná za připojení na přenosové médium prostřednictvím rozhraní nezávislého na médiu, které určuje fyzické signály, mechanické a elektrické rozhraní. PMA podvrstva zahrnuje funkce přenosu, příjmu, obnovení časového signálu a fázového zarovnání. PCS podvrstva kóduje datové bity do kódovacích skupin, které mohou být přenášeny přes fyzické médium. 10 Gigabitové rozhraní, které je nezávislé na médiu XGMII nebo 1 Gbit rozhraní GMII specifikují rozhraní mezi řízením přístupu k médiu MAC a fyzickou vrstvou.

3.1.1 Zpětná kompatibilita

Je velmi důležité, aby 10G-EPON specifikace zachovala zpětnou kompatibilitu s optickými distribučními sítěmi ODN a stávajícími systémy. V roce 2006, kdy se 10G-EPON projekt rozběhl, 1G EPON byl nasazován v obrovském měřítku v Japonsku a na dalších místech Asie. Nahrazení nebo modifikace optické přístupové sítě může provozovatelům zabránit od zavedení systémů nové generace.



Obr. 3.1 Koexistence 1G a 10G EPON [17].

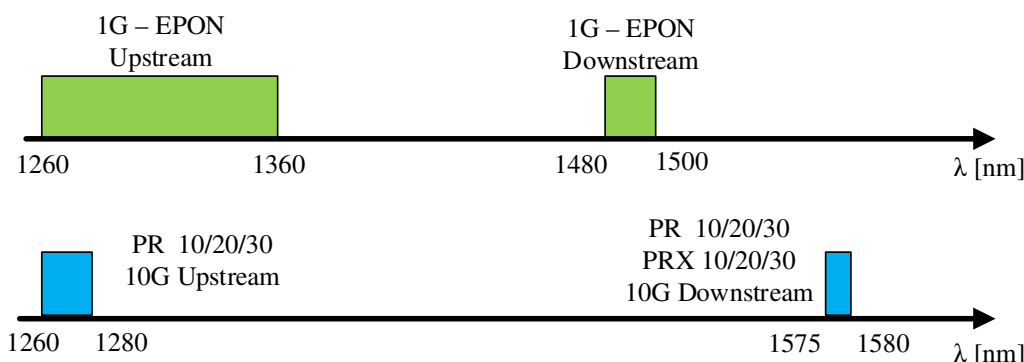
Požadavek zpětné kompatibility ukládá několik technických problémů a překážek na specifikaci práce: vysoký výkon přesahující 30dB pro symetrické 10 Gbit/s vysílání, konflikt v přidělení vlnových délek a dual-rate burst režim v OLT přijímači. Na obrázku Obr. 3.1 je zobrazena koexistence 1G-EPON a 10G-EPON, WDM v sestupném směru a dual-rate burst přijímač ve vzestupném směru pro podporu různých rychlostí TDM přístupu (TDMA) [17].

3.1.2 Rozdíl mezi 10G a 1G-EPON

Hlavní rozdíly mezi 10G a 1G EPON jsou shrnuty v tabulce Tab. 3.1 10G-EPON podporuje, jak symetrický 10 Gbit/s downstream a upstream, tak i asymetrický 10 Gbit/s DS a 1 Gbit/s US přenosovou rychlost, zatímco 1G-EPON poskytuje pouze 1 Gbit/s symetrickou rychlost. Linkové kódování pro 10G EPON je 64B/66B a pro 1G-EPON je 8B/10B, tím je snížena přídavná režie z 20 % na 3 %. 10G EPON nově specifikuje další výkonovou třídu PR/PRX30 pro podporu až 32 rozdělení při vzdálenosti 20 km a povinnou implementaci zpětné chybové korekce FEC. 10G-EPON využívá Reed-Solomonův kód (255,223), zatímco u 1G-EPON je použit (255,239). Vlnová délka v sestupném směru je přidělena v okně mezi 1 575 nm a 1 580 nm a ve vzestupném směru přenosu je v oknech mezi 1 260 nm a 1 280 nm, které zcela překrývá část 1G EPON vzestupného pásma.

3.1.3 Přidělení vlnových délek

V sestupném směru je použit WDM přímý způsob ke koexistenci se stávajícími systémy. Rozsah vlnových délek v sestupném směru byl specifikován v rozsahu 1 575 nm - 1 580 nm pro všechny výkonové třídy.



Obr. 3.2 Využití vlnových délek v 1G EPON a 10G EPON [17].

Rozsah vlnových délek ve vzestupném směru je definován jako 1 260 nm - 1 280 nm pro všechny PR typy výkonových tříd. Tento rozsah vlnových délek se překrývá se stávajícím rozsahem 1G EPON sítí a proto je pro zachování koexistence v tomto směru přenosu využíván dual rate burst režim. Dual rate burst režim využívá odlišné TDMA přístupy u těchto systémů. Pásmo široké 20 nm je pro síť 10G EPON dostatečné, díky použití Fabry-Perotových laserových diod. Na obrázku Obr. 3.2 je grafické znázornění využitých oken vlnových délek v 1G a 10G EPON systémech [17].

Tab. 3.1 Porovnání vlastností 10G EPON a 1G EPON

Vlastnost		10G-EPON	1G-EPON
Přenosová rychlost	Downstream	10G/10G symetrická	1G/1G symetrická
	Upstream	10G/1G asymetrická	
Linková rychlost [baud/s]		10,312 5	1,25
Linkové kódování (režie)		64B/66B (3 %)	8B/10B (20 %)
Počet výkonových tříd		3 PRX10/20/30 PR 10/20/30	2 PX10/20
Rozdělovací poměr		1:16/1:32	1:16
FEC		Povinný RS (255,223)	Volitelný RS (255,239)
Vlnová délka [nm]	Downstream	1 575-1 580	1 480-1 500
	Upstream	1 260-1 280	1 260-1 360

3.2 Hybridní síť SUCCESS

Architektura SUCCESS patří do kategorie hybridních sítí nové generace založených na bázi WDM/TDM. Tato architektura vznikla na Standfordské univerzitě, podle které vznikl název SUCCESS, jenž je zkratkou Stanford University aACCESS. Tato architektura je navržena s důrazem na pragmatický scénář migrace z aktuálních TDM-PON sítí na budoucí DWDM-PON síť. Navrhovaná SUCCESS architektura je založena na topologii kolektorového kruhu propojující hvězdicové síť, které podporují jak existující TDM-PON, tak i nové DWDM-PON síť.

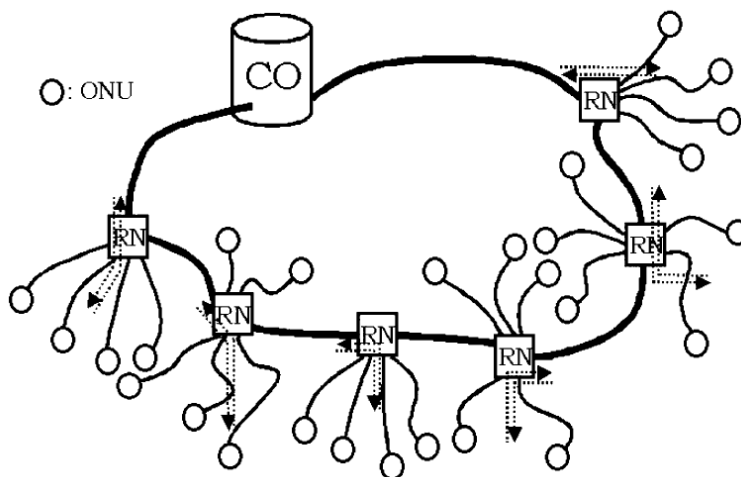
Zpětná kompatibilita uživatelů stávající TDM-PON síť je zaručena s pouze minimální modifikací a zároveň poskytuje větší šířku pásma uživatelům na nových DWDM-PON sítích. Architektura SUCCESS díky topologii kolektorového kruhu a částečně pasivní konfiguraci vzdálených uzlů RN poskytuje uživatelům lepší bezpečnost a schopnost obnovy vytvořením sítě odolné vůči výpadku napájení než klasické PON topologie. To znamená, že se SUCCESS architekturou obchodní a domácí uživatelé mohou koexistovat v rámci stejné sítě.

Aby architektury SUCCESS byly ekonomicky výhodnější, jsou v tomto systému používány ONU jednotky bez prvků vyžadujících chlazení, dále se využívají NxN AWG směrovače pro zdvojnásobení počtu podporovaných ONU jednotek v síti a OLT používá laditelné lasery a přijímače.

3.2.1 Architektura SUCCESS

V době, kdy síť nové generace optických přístupových sítí se stávají všudypřítomné, je velmi pravděpodobné, že konvenční PON síť založené na bázi TDM se stromovou topologií budou na tomto poli dominovat. Vzhledem k tomu, že je žádoucí, aby síť podporovala existující uživatele na PON bez modernizace jejich CPE, nová přístupová architektura zajistí hladký způsob přechodu a zároveň poskytuje modernizaci přenosové kapacity a zpětnou kompatibilitu. SUCCESS architektura poskytuje efektivní a ekonomické řešení pro novou generaci přístupových sítí, hladký přechodový způsob a pružnost.

Architektura SUCCESS je zobrazena na obrázku Obr. 3.3. Základní topologie obsahuje jedno vláknový kolektorový kruh s připojenými hvězdami. Kolektorový kruh spojuje vzdálené uzly, které jsou středy hvězd. ONU připojené k RN ze západní strany kruhu vysílají a přijímají komunikaci se západní stranou OLT a podobně pro ONU připojené k RN na východní straně kruhu. Na logické úrovni existuje spojení bod-bod mezi každým RN a OLT a v kolektorovém kruhu není žádná vlnová délka opětovně použita. V případě, že je vlákno přerušeno, tak všechny zasažené vzdálené uzly RN zaznamenají ztrátu signálu a změní směrovou orientaci.



Obr. 3.3 Architektura SUCCESS [18].

Vzdálené uzly obsahují buď pasivní rozbočovače (slučovače) nebo AWG. V případě, že obsahují pasivní rozbočovače, tak ONU jednotky připojené k RN používají pro vysílání v sestupném směru jednu určenou vlnovou délku z DWDM rozsahu. Obdobně ONU jednotky mají vysílače, které obsahují Fabry Perotovy lasery a vysílají data ve vzestupném směru v CWDM rozsahu. Když RN obsahuje AWG směrovač, tak každá ONU jednotka využívá pro komunikaci s OLT vlastní určenou vlnovou délku z DWDM rastru. Vzhledem k tomu, že vložený útlum AWG směrovač je přibližně 6 dB bez ohledu na počtu portů, tak AWG s více než 8 porty je potřeba nasadit, aby se dosáhlo lepšího výkonu v porovnání s pasivními rozbočovači.

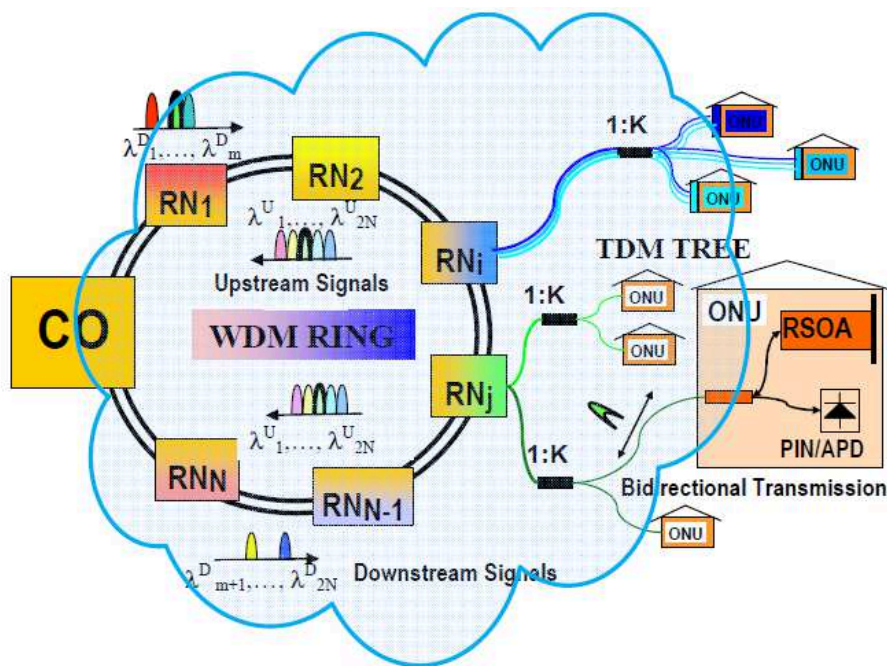
Každý RN obvykle spojuje 16 až 64 ONU jednotek. Vzestupný a sestupný provoz patřící stejné ONU jednotce se může přenášet na stejné vlnové délce, ale různém směru na stejném vlákne. Jedna z výhod, kterou mají jak hvězdicové topologie CWDM na bázi TDM a DWDM na bázi WDM, je rozložení datového provozu. WDM hvězdicové topologie slouží společně a TDM poskytují konektivitu obytným oblastem.

Laditelné součásti jsou nasazené pro snížení počtu vysílačů v OLT. Laditelné lasery generují, jak sestupný provoz, tak i nepřetržité vlny (CW) pro modulování ONU. Žádné další laserové zdroje nejsou potřeba. Tato konfigurace má za následek poloviční duplexní komunikaci mezi každou ONU a OLT. V porovnání s jinými architekturami, které mají dvou vláknový kruh, dvě sady zdrojů a dvě sady de/multiplexorů pro plně duplexní komunikaci, tento návrh výrazně snižuje náklady na nasazení [18].

3.3 SARDANA

Pod zkratkou názvu SARDANA se skrývá „The scalable advance ring-based passive dense access network architecture“. Cílem současného výzkumu informačních a komunikačních technologií je vývoj nových síťových architektur a technologií, které umožní zvýšení počtu připojených uživatelů, zvýšení přenosové kapacity a dosahu, stejně jako zvýšení bezpečnosti a rozšiřitelnost, integraci služeb a dalších klíčových funkcí. Toto jsou cíle Evropského projektu SARDANA, které vedou směrem k vytvoření budoucí access-metro konvergované sítě s těmito charakteristikami v souladu se snížením prvotních a údržbových nákladů, stejně tak i maximalizování kompatibility a integrace se stávajícími standardy.

Základní směr je dán kombinováním sítě nové generace 10G GPON s metropolitní sítí WDM, přičemž v OLT a ONU jednotkách je využíváno zařízení pro 10G GPON a přenos a zabezpečení je realizováno pomocí WDM. Sardana si klade za cíl poskytnout konektivitu více než 1 000 ONU jednotkám až do vzdálenosti 100 km při 10 Gbit/s přenosové rychlosti. Gigabitové pasivní optické sítě jako jsou G-PON a GE-PON byly standardizovány a jsou nyní nasazovány. Nejjobecnější požadavek na síť nové generace NG-PON je ten, že musí poskytovat vyšší přenosovou kapacitu než GPON a GE-PON.



Obr. 3.4 Architektura SARDANA[19].

Sardana je řešení pro síť a infrastrukturu nasazenou převážně na Gigabit PON a v budoucnu i 10G PON systémy. Cílem Sardany je navrhnout řešení založeném na těchto stávajících sítích. Musí se vzít v potaz, že Sardana ONU jednotky mohou přijímat xDSL datový provoz. A to je důvod, proč Sardana umožňuje řešení metropolitní architektury, založeném na WDM kruhu a přístupové architektury založené na TDM stromové nebo bod-bod topologii. Definice architektury vyžaduje přesnou analýzu všech vrstev v této síti (Fyzickou, MAC a propojení s vyššími vrstvami). První schéma je založené pouze na FTTH uživatelích s různou hustotou obyvatel a druhé je založeno na kombinaci FTTH uživatelů a xDSL kolektoru s různou hustotou obyvatel.

Obrázek Obr. 3.4 reprezentuje koncové rozdělení architektury. Optické připojení uživatelů pomocí ONU jednotek v přístupové síti je zajištěno архитектурou bod-bod nebo PON topologií. Na hranici metro-access se nachází ústředna s OLT PON sítí. Rozhraní tohoto OLT připojené do metropolitní sítě jsou založené na Ethernetovém standardu. Na výstupu případného kruhu metro-access a metro-core sítí jsou shromažďovány datové toky a dále jsou směrovány směrem k novým přístupovým bodům. Navrhovaná síť může být aplikována na různé geografické a funkční scénáře, vzdálenosti, hustotu obyvatel, rozdělení obyvatel a také jako integrační kolektor dalších různorodých přístupů jako xDSL[19].

4 Infrastruktura laboratoře

Realizace praktické části bakalářské práce probíhala v laboratoři přístupových sítích N311. Laboratoř je vybavena dvěma stojanovými rozvaděči R-A N311 a R-B N311. V rozvaděči R-A N311 jsou umístěny optická linková zakončení OLT iMAP 9102 a EAST 1100, které tvoří základní prvky bakalářské práce. Rozvaděč R-A N311 je vybavena řadou optických pasivních rozbočovačů, optických patch panelů, směrovou odbočnicí AWG WPF 1132c a zakončením optických tras propojujících rozvaděč s pěti experimentálními pracovišti. Detailní popis prvků umístěných ve stojanových rozvaděčích je uveden v příloze A. Každé experimentální pracoviště je připojeno k rozvaděči čtyřmi optickými kabely, dvěma typu G.652.D a dvěma typu G.657.B3 zakončenými dvojicemi konektorů typu SC/PC a SC/APC.

V bakalářské práci byly využity prvky, včetně výše zmíněných OLT jednotek, také dva pasivní rozbočovače 1:2 s rozbočovacím poměrem 50/50, jeden s poměrem 90/10 a propojovací optické panely připojené k experimentálním pracovištím EP1 až EP5 vyvedené v infrastruktuře laboratoře. Trasa topologie byla vytvořena propojením čtyř optických vláken typu G.652.D umístěných v rozvaděči R-B N311.

4.1 Síť DWDM-PON

DWDM-PON síť tvoří OLT jednotka EAST 1100, atermální vlnovodná odbočnice AWG WPF 1132c a pět koncových jednotek EARU 1112. Všechny prvky jsou od firmy LG Nortel.

4.1.1 OLT jednotka EAST 1100

Hlavní prvek DWDM-PON sítě tvoří OLT jednotka od firmy LG Nortel EAST 1100 release 3. EAST 1100 je řešení sítí nové generace na bázi DWDM-PON technologie, poskytuje vysoce výkonnou podporu služeb pro podnikové, rezidenční a páteřní sítě bez omezení vyskytujících se na tradičních řešeních založených na časovém dělení TDM. EAST 1100 poskytuje vyhrazený symetrický přenos dat a podporuje 32 vlnových délek o přenosové rychlosti 100 Mbit/s na jednom optickém vlákně s dosahem až 20 km. OLT jednotka EAST 1100 může být konfigurována pomocí grafického prostředí EMS (Elements Management System) nebo rozhraní příkazového řádku.

OLT jednotka EAST 1100 je provedena ve formě platformy velikosti 10 U a umožňuje umístění do rozvaděčů. Obsahuje dvě karty s L2/L3 SW/NI (Switch and Network Interface), řídicí kartu MC (Management Card) a až osm služebních karet SI (Service Interface), které tvoří rozhraní s koncovými jednotkami EARU.

Služební rozhraní SI mohou být vybaveny PON kartami PI (PON Interface) poskytujících 100 Mbit/s až pro 32 vlnových délek, tzn. plně obsazená platforma EAST 1100 s osmi PI kartami je schopna vysílat 256 kanálů se symetrickou přenosovou rychlostí 100 Mbit/s pro každý příspěvkový kanál. Do klasického stojanového rozvaděče o velikost 42 U lze umístit 4 jednotky EAST 1100, což ve výsledku znamená, že jeden rozvaděč je schopen vysílat až 1 024 kanálů se symetrickou přenosovou rychlostí 100 Mbit/s pro každý kanál.

OLT jednotka EAST 1100 vysílá datový přenos v sestupném směru příspěvkových kanálů v pásmu L a ve vzestupném směru komunikuje v pásmu C. Jednotka také vysílá v C pásmu

širokospektrální zdroj záření BLS, který slouží pro naladění bezbarvých koncových jednotek EARU 1112 na požadované vlnové délky.

Nastavení OLT jednotky EAST 1100

Konfigurace OLT jednotky EAST 1100 probíhala pomocí grafického prostředí EMS v softwaru EA Manager 1100 Stand Alone. Po připojení UTP kabelu do portu EMS na čelním panelu jednotky EAST 1100 a do portu síťové karty na PC, byl spuštěn software EA Manager 1100 Stand Alone. Pro přihlášení bylo nutné zadat následující přihlašovací údaje:

- Server IP: 192.168.142.105.
- Uživatelské jméno: admin.
- Heslo: admin.

Po přihlášení do programu bylo potřeba provést synchronizaci databáze EMS s jednotkou EAST 1100. Synchronizace byly provedena v záložce *System/DB Synchronization*, kde bylo zvoleno Subnet v nastavení DB Sync Target. Po úspěšné synchronizaci databáze byl zvolením záložky *Node/Equipment View* zobrazen přední panel OLT jednotky EAST 1100 korespondující s reálným panelem OLT jednotky. Zde lze vidět aktivní řídicí kartu MC, kartu síťového rozhraní NI A, kartu přepínacího rozhraní SW-A a kartu s PON rozhraním PI 1. Pravým kliknutím na kartu PI 1, vybráním možnosti *Facility/ONT* lze zobrazit okno ONT View s 32 koncovými jednotkami. Zde byly aktivovány koncové jednotky EARU 1112 číslo 1, 2, 3, 6 a 7. Vynechání jednotek číslo 4 a 5 bylo způsobeno vadnými porty 4 a 5 na AWG směrové odbočnici.

Po aktivaci koncových jednotek bylo nutné nastavit statické přiřazení MAC adresy k IP adrese měřicího přístroje AXS 200/850, který v práci sloužil jako loopback jednotka připojená optickým kabelem do SFP portu kary NI A. Toto nastavení bylo nutné pro udržení spojení mezi měřicími přístroji. Nastavení bylo provedeno v záložce *Access Management*, kde byla staticky nastavena IP adresa z rozsahu 192.168.142.0/24 k MAC adrese loopback jednotky. V práci byla nastavena IP adresa 192.168.142.200.

4.1.2 AWG směrová odbočnice

Vlnově délkový pasivní filtr WPF 1132 c provádí multiplexování a demultiplexování optických vlnových délek mezi OLT jednotkou EAST 1100 a koncovými uživateli. WPF přijímá příspěvkové kanály vysílané jednotkou EAST 1100 a rozděluje je podle vlnové délky na koncové jednotky EARU. V opačném směru přijímá vysílané kanály od EARU jednotek a agreguje je pro šíření zpět do OLT jednotky.

WPF filtr obsahuje atermální AWG směrovou odbočnici, která je pasivní a nevyžaduje zdroj napájení a řízení. Existuje několik různých verzí WPF, např. Manhole, Pole a Cabinet. Laboratoř N311 je vybavena typem Cabinet, který je možné umístit do rozvaděče.

4.1.3 EARU 1112

EARU (Ethernet Access Residential Unit) je koncová síťová jednotka ONT, která zajišťuje optické síťové zakončení u koncových uživatelů. Jedná se o bezbarvou koncovou jednotku, která může být umístěna ve firemních či rezidenčních lokalitách a je schopna poskytovat mnoho typů služeb prostřednictvím Ethernet portu 100Base-TX. Bezbarvá vlastnost EARU poskytuje jednoduché plug

and play řešení, které ulehčuje nasazení těchto jednotek ke koncovým uživatelům. Na obrázku Obr. 4.1 je koncová jednotka zobrazena [20].

4.2 Síť EPON 2

Síť EPON 2 je tvořena OLT jednotkou iMAP 9102 od firmy Allied Telesyn, koncovými jednotkami AT ON-1000 a optickým rozbočovačem v poměru 1:7.

4.2.1 OLT jednotka iMAP 9102

Allied Telesis 9000 je multiservisní platforma, která poskytuje bohatou sadu funkcí, která využívá široce rozšířenou technologii Ethernet a umožňuje poskytovateli služeb nabídnout koncovým uživatelům služby jako je FTTH, Metro Ethernet, ADSL, PON, CES a další. Je to platforma, která umožňuje poskytovat pokročilé Triple Play služby, jako jsou vysoce kvalitní hlasové služby, IP/Ethernet datové služby a vysílání IP videa ve vysokém rozlišení[21].

OLT jednotka iMAP 9102 obsahuje čtyři sloty, jeden slouží pro správu jednotky a pro připojení konektivity. Ostatní slouží pro umístění modulů podporující různé typy služeb. V laboratoři je jednotka iMAP vybavena moduly FX20BX-20 x Ethernet P2P 100 Mbit/s, ADSL24B-ADSL Annex B a modulem EPON2 typu TN-118B. V modulu EPON2 portu 2.0 OLT jednotky iMAP 9102 je umístěn SFP modul typu FTM-9712S-SL20 s parametry viz tabulka Tab. 4.1.

Tab. 4.1 Parametry modulu FTM-9712S-SL20 [22]

Přijímač		Vysílač	
Rozsah vlnových délek [nm]	1 260 - 1 360	Rozsah vlnových délek [nm]	1 480 - 1 500
Citlivost fotodetektoru	Minimální: - 10 dBm Maximální: - 30 dBm	Optický výkon	Minimální: + 2 dBm Maximální: - 30 dBm

Nastavení OLT jednotky iMAP 9102

OLT jednotka iMAP 9102 podporuje na rozdíl od EAST 1100 pouze rozhraní příkazového řádku. Sestavení spojení mezi OLT jednotkou a PC bylo provedeno pomocí USB emulátoru. V nastavení Správa zařízení v operačním systému Windows 7 bylo zjištěno číslo COM portu připojeného USB kabelu. Tato hodnota byla následně použita v klientovi pro telnet a ssh spojení.

V práci byl využit klient PuTTY 0.63, ve kterém byly nastaveny následující parametry:

- Bitová rychlost: 9600.
- Datové bity: 8.
- Stop bit: 1.
- Parita: Žádná
- Řízení: Žádné.

Po připojení k jednotce iMAP 9102 byly zadány následující přihlašovací údaje:

- User name: officer.
- Password: officer.

Po přihlášení bylo potřeba zaregistrovat koncové jednotky AT ON-1000 do sítě. Toto nastavení bylo provedeno příkazem:

create onu=ONUx onuid=x interface=2.0 MAC=<MAC adresa ONU jednotky>.

Zjištění správného zaregistrování koncových jednotek AT ON-1000 bylo provedeno příkazem:

show interface onu.

Všechny zaregistrované koncové jednotky měly ve sloupci *state* hodnoty *up-up*.

Dále bylo potřeba zkontrolovat a případně smazat nastavené QOS profily, které omezovaly maximální přenosovou rychlost ONU jednotek. Zobrazení QOS profilu bylo provedeno příkazem:

show onu onuid <číslo onu>.

QOS profil lze smazat pomocí příkazu:

destroy qos profile <název profilu>[23].

4.2.2 AT ON-1000

Koncová jednotka AT ON-1000 je navržena pro podporu datových služeb až do přenosové rychlosti 1 Gbit/s na sítích EPON2. Je ideální pro podniky vyžadující vysokou šířku pásma pro datové a video služby. Obsahuje port 1 Gbit/s WAN s konektorem SC/UPC a port RJ 45 ve standardu 10/100/1000bT LAN. Parametry optického portu jsou uvedeny v tabulce Tab. 4.2. Zobrazení koncové jednotky je uvedeno na obrázku Obr. 4.1.

Tab. 4.2 Parametry optického portu v ONU jednotce [24].

Přijímač		Vysílač	
Vlnová délka	1 490 nm	Vlnová délka	1 310 nm
Citlivost přijímače	Maximální: - 26,5 dBm	Optický výkon	Minimální: + 1 dBm Maximální: + 4 dBm



Obr. 4.1 Koncové jednotky AT ON-1000 (nahore) a EARU 1112 (dole).

4.3 Měřicí přístroje

4.3.1 EXFO AXS - 200/350

Certifikační měřidlo útlumu EXFO OLTS AXS-200/350 bylo použito v práci pro měření hodnoty útlumu pomocí metody 1c, která využívá tří referenčních optických vláken. Byly použity dva přístroje, vysílací přístroj se zdrojem jednovidového záření a druhý s přijímacím modulem, viz obrázek Obr. 4.2. Měření bylo provedeno na dvou vlnových délkách, 1 310 a 1 550 nm.

4.3.2 EXFO AXS - 200/850

Měřicí přístroj EXFO AXS - 200/850 slouží pro testování metalických vedení. Hlavní funkcí přístroje je měření a testování parametrů na vrstvě L3 referenčního modelu ISO/OSI. Podporuje test chybovosti BERT, RFC 2544 a testy kvality QoS. Zahrnuje funkce loopback jednotky, Ping a Trace route. Obsahuje dva konektory, elektrický s ethernet portem RJ 45 ve standardech 10/100/1000 Mbit/s a optický SFP s duálním nebo simplexním LC konektorem podporující přenosovou rychlost až 1 Gbit/s [25].

V práci tento přístroj byl využit pouze jako loopback jednotka připojená k OLT jednotce iMAP 9102 nebo EAST 1100. K OLT iMAP 9102 byla jednotka připojena pomocí metalického kabelu do portu číslo 4.0 řídicí karty. Pro připojení do OLT jednotky EAST 1100 musely být použity dva SFP moduly. První byl umístěn do přístroje AXS 200/850 a druhý do karty NI-A portu P1. V tabulce Tab. 4.3 je uvedeno nastavení loopback jednotky pro síť DWDM-PON a EPON2.

Tab. 4.3 Nastavení loopback jednotky AXS 200/850

Nastavení loopback jednotky pro síť DWDM-PON	Nastavení loopback jednotky pro síť EPON 2
Setup/Interface/Port:	Setup/Interface/Port:
<ul style="list-style-type: none"> • Transceiver Mode: Optical • Auto-Negotiation: Enable • Speed: 100 Mbit/s • Duplex: Full • Flow Control: None 	<ul style="list-style-type: none"> • Transceiver Mode: Electrical • Auto-Negotiation: Enable • Speed: 100 Mbit/s • Duplex: Full • Flow Control: None
Setup/Interface/Network:	Setup/Interface/Network:
<ul style="list-style-type: none"> • DHCP: Disabled • IP Address: 192.168.142.200 • Subnet Mask: 255.255.255.0 • Default Gateway: 192.168.142.1 	<ul style="list-style-type: none"> • DHCP: Disabled • IP Address: 192.168.2.8 • Subnet Mask: 255.255.255.0 • Default Gateway: Disabled
Smart Loopback:	Smart Loopback:
<ul style="list-style-type: none"> • START/STOP 	<ul style="list-style-type: none"> • START/STOP

Po připojení loopback jednotky k OLT jednotce EAST 1100 bylo nutné pro zajištění komunikace s měřicím přístrojem EXFO FTB - 860 nastavit v grafickém prostředí EMS v záložce

Access Management statické přiřazení MAC adresy přístroje AXS 200/850 k IP adrese z platného rozsahu DWDM-PON sítě. Bez tohoto nastavení neustále docházelo k rozpadu spojení mezi měřicími přístroji. Po té bylo nutné na přístroji AXS 200/850 provést test ping na přidělenou adresu měřicího přístroje FTB-860 a otestovat komunikaci. Měřicí přístroje je uveden na obrázku Obr. 4.2.



Obr. 4.2 Měřicí přístroj AXS 200/850 (vlevo) a dva měřicí přístroje AXS 200/350 (vpravo).

4.3.3 EXFO FTB-860

EXFO FTB-1/FTB-860 NetBlazer je měřicí přístroj s širokým spektrem testů a aplikací. Obsahuje dva Ethernet porty standardu 10/100/1000 Base-TX a dva SFP porty 100/1000 Base-Fx. Je určen pro kompletní testování až 10 Gbit/s Ethernet sítí. Umožňuje komplexní testování Triple Play služeb pomocí nového standardu ITU-T Y.1564 (EtherSAM), testování chybovosti testem BERT a test RFC 2544. Obsahuje aplikace Wireshark, JPerf, Network Stumbler a mnoho dalších. V bakalářské práci byly použity testy RFC 2544 a ITU-T Y.1564 [26].

Tab. 4.4 Nastavení měřicího přístroje FTB-860 NetBlazer

Nastavení měřicího přístroje FTB-860 pro síť DWDM-PON	Nastavení měřicího přístroje FTB-860 pro síť EPON 2
Interface/Port:	Interface/Port:
<ul style="list-style-type: none"> • Electrical 	<ul style="list-style-type: none"> • Electrical
Network:	Network
<ul style="list-style-type: none"> • DHCP: Enable • IP Address: • Subnet Mask: • Default Gateway: 	<ul style="list-style-type: none"> • DHCP: Disabled • IP Address: 192.168.2.9 • Subnet Mask: 255.255.255.0 • Default Gateway: Disable

4.3.4 EXFO FTB-500

FTB - 500 je univerzální měřicí platforma podporující testovací moduly nové generace 10G, 40G a 100G. V platformě byly umístěny dva optické moduly, FTB 5240B a FTB 7200D. Platforma je uvedena na obrázku Obr. 4.3.

Optický modul FTB 5240B

Modul FTB 5240B je optický spektrální analyzátor, který je kompatibilní s platformou FTB 500. Umožňuje spektrální analýzu CWDM a DWDM sítí a obsahuje polarizační kontrolér automatického měření In Band odstup signálu od šumu OSNR.

Optický modul FTB 7200D

Druhý optický modul umístěný v platformě FTB 500 je reflektometr FTB 7200D. Obsahuje dva porty pro SM a MM optická vlákna. Měření provádí na vlnových délkách 850 nm a 1 300 nm pro mnohavidová vlákna a pro jednovidová na vlnových délkách 1 310 nm a 1 550 nm.



Obr. 4.3 Modulární platforma FTB-500 (vlevo) a měřicí přístroj FTB-860 (vpravo).

4.3.5 Digitální atenuátor FVA 60 B

Poslední použitý prvek v bakalářské práci je digitální atenuátor FVA 60 B, který slouží pro účely zvyšování hodnoty útlumu. Atenuátor FVA 60 B má vnitřní vložný útlum 1,55 dB.



Obr. 4.4 Digitální atenuátor FVA 60B.

5 Měření a testování integrované sítě

Návrh topologie integrované optické sítě byl inspirován druhou fází migračního scénáře, který byl použit panem Ing. Ladislavem Peřkem v projektu OASE (Optical Access Seamless Evolution). Standard je popsán v doporučení ITU-T G.989.1. V projektu byly využity technologie GPON a TWDM/PON, jelikož laboratoř N311 na katedře telekomunikační techniky nedisponuje těmito technologiemi, tak byly využity technologie EPON2 a DWDM-PON, které jsou umístěny v laboratoři N311 [27].

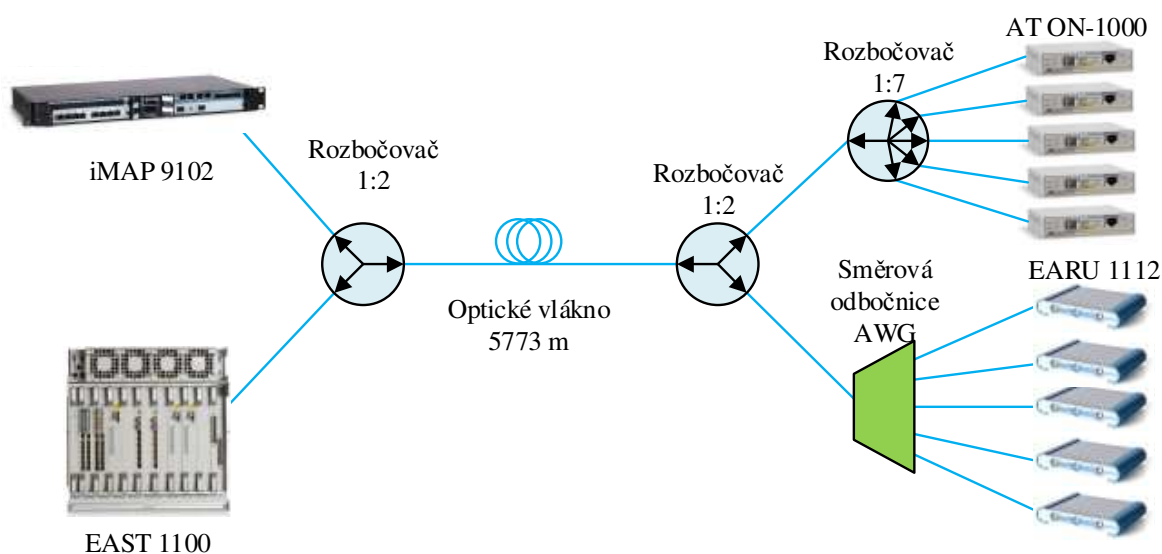
5.1 Topologie sítě

Na obrázku

Obr. 5.1 je zobrazena integrovaná síť sestavené topologie v laboratoři N311. Topologie obsahuje OLT jednotky iMAP 9102 a EAST 1100, které jsou spojeny propojovacím optickým kabelem s rozbočovačem 1:2 v poměru 50/50. K tomuto rozbočovači je připojena optická trasa jednovláknovým vláknem G. 652.D, která je tvořena čtyřmi optickými špulkami o celkové délce 5 773 m . Pro zjednodušení návrhu byly v obrázku Obr. 5.1 zobrazeny optické špulkky pouze schématickou značkou optického vlákna.

Optická trasa je přivedena na pasivní optický rozbočovač 1:2, který vstupní výkon rozděluje v poměru 50/50 a dále jej přivádí na rozbočovač v poměru 1:7 a AWG filtr s 32 porty. Z rozbočovače 1:7 je použito pět portů, ke kterým jsou připojeny ONU jednotky AT ON-1000 sítě EPON2. K portům číslo 1, 2, 3, 6 a 7 AWG směrové odbočnice jsou připojeny koncové jednotky EARU 1112, které tvoří ukončující část DWDM-PON sítě. Porty 4 a 5 nebyly použity z důvodu vadných konektorů.

V integrované síti je použito optické vlákno typu G.652.D. Na OLT jednotce EAST 1100, AWG směrové odbočnici a koncových jednotkách EARU 1112 byly použity konektory typu SC/APC a na všech ostatních prvcích sítě konektory typu SC/PC. Detailní schéma sestavené topologie je uvedeno v příloze B.



Obr. 5.1 Topologie integrované optické sítě.

5.2 Měření útlumu integrované optické sítě

Nejprve bylo provedeno měření hodnot útlumů topologie a použitých prvků. Jako metoda měření útlumu byla použita norma ISO/IEC 14763-3, která využívá tří referenčních optických vláken. Pro toto měření byly využity dva měřicí přístroje AXS 200/350. Jako přijímač byl použit přístroj s přijímacím modulem a jako vysílač byl použit druhý přístroj s jednovidovým zdrojem.

5.2.1 Měření pasivních optických rozbočovačů

Jako první byly změřeny hodnoty útlumů všech použitých pasivních rozbočovačů. V tabulce Tab. 5.1 jsou uvedeny hodnoty změřeného útlumu dvou rozbočovačů 1:2 v poměru 50/50 a jednoho rozbočovače 1:2 v poměru 90/10, který slouží pouze pro účely měření spektrální analýzy. Jako poslední byl změřen rozbočovač 1:7, ke kterému jsou připojeny koncové jednotky AT ON-1000, hodnoty jsou uvedeny v tabulce Tab. 5.2. Měření bylo provedeno na vlnových délkách 1 310 nm a 1 550 nm. Čísla 10-18 v tabulce Tab. 5.1 a 9-14 v tabulce Tab. 5.2 reprezentují pořadové číslo portu v optickém propojovacím panelu OPP3 umístěném v rozvodné skříni R-A N311. Z trojice, resp. pětičky čísel první označuje vstupní port a následující výstupní porty daných rozbočovačů.

Tab. 5.1 Hodnoty útlumů na rozbočovačích typu 1:2 v OPP3.

Útlum [dB]	90/10 (10; 11-12)		50/50 (13; 14-15)		50/50 (16; 17-18)	
	10-11	10-12	13-14	13-15	16-17	16-18
1 310 nm	0,54	10,1	3,19	3,26	3,69	3,75
1 550 nm	0,56	10	3,2	3,25	4,44	4,26

Tab. 5.2 Hodnoty útlumu na rozbočovači 1:7 v OPP2.

Útlum [dB]	9-10	9-11	9-12	9-13	9-14
1 310 nm	7,58	7,77	8,12	7,45	7,57
1 550 nm	7,58	7,61	8,58	7,45	8,1

V tabulce Tab. 5.3 jsou uvedeny hodnoty útlumů jednotlivých optických vláken použitých v topologii integrované sítě. Měření bylo provedeno na vstupních portech optického patch panelu OPP7 umístěného v rozvaděči R-B N311. Čísla 2-23 reprezentují pořadová čísla portů OPP7. V tabulce je také uveden součet změřených hodnot útlumů optických vláken.

Tab. 5.3 Hodnoty útlumů optických vláken a optické trasy.

Útlum [dB]	OPP 7 port 2-3	OPP 7 port 7-8	OPP 7 port 12-13	OPP 7 port 22-23	Celkem	Optická trasa OPP6: 19-20
Délka [m]	775	1 555	1 643	1 800	5 773	5 773
1 310 nm	0,49	1,27	1,11	1,16	4,03	4,13
1 550 nm	0,22	0,80	0,98	1,03	3,03	3,12

V posledním sloupci tabulky Tab. 5.3 je uvedena hodnota útlumu optické trasy obsahující výše zmíněná čtyři optická vlákna a propojující patch panel OPP6 v rozvaděči R-A N311 s optickým patch panelem OPP7 v R-B N311, která tvoří spojení mezi rozbočovači 1:2 (50/50) propojující OLT a ONU jednotky.

5.2.2 Útlum celkové optické trasy

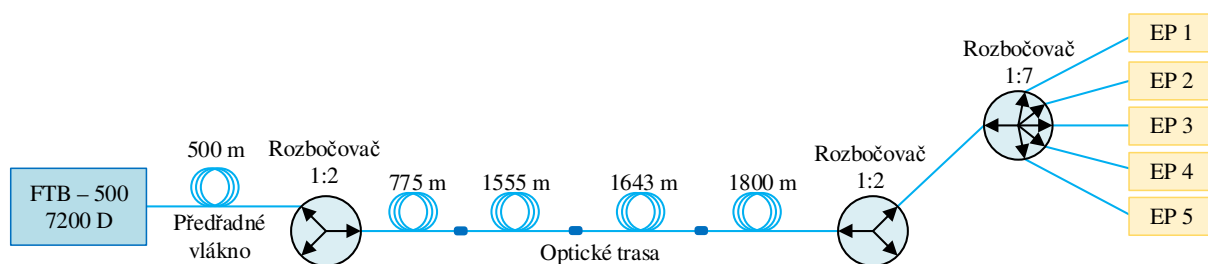
V tabulce Tab. 5.4 jsou uvedeny hodnoty útlumů měření celkové trasy mezi portem 17 optického rozbočovače 1:2 (50/50) umístěném v optickém patch panelu OPP2 a konektory SC/PC umístěnými na experimentálních pracovištích EP 1 až EP 5. Měřená optická trasa obsahuje dva rozbočovače 1:2 (50/50) a optický rozbočovač 1:7.

Tab. 5.4 Finální topologie.

Útlum [dB]	OPP2 port 17 - EP 1 SC/PC	OPP2 port 17 - EP 2 SC/PC	OPP2 port 17 - EP 3 SC/PC	OPP2 port 17 - EP 4 SC/PC	OPP2 port 17 - EP 5 SC/PC
1 310 nm	20,13	20,21	19,98	20,55	20,33
1 550 nm	19,64	19,41	19,13	19,94	19,44

5.3 Měření optické trasy reflektometrem

Další měření integrované sítě probíhalo pomocí reflektometru OTDR od firmy EXFO modulem FTB 7200 D, který byl umístěn v univerzální platformě FTB 500. Měření bylo provedeno na topologii sítě zobrazené na obrázku Obr. 5.2. Měřicí přístroj OTDR byl připojen pomocí předřadného vlákna dlouhého 500 m do portu číslo 16 rozbočovače 1:2 v optickém patch panelu OPP2. K tomuto rozbočovači byla připojena optická trasa tvořená čtyřmi optickými vlákny v délkách 775, 1 555, 1 643 a 1 800 m. Konec optické trasy byl připojen do portu 13 rozbočovače 1:2 v OPP2, který byl následně připojen k rozbočovači 1:7. Tento rozbočovač byl propojen pomocí optického kabelu zabudovaného v infrastruktuře laboratoře k experimentálním pracovištím EP 1 až EP 5. Při měření byly všechny koncové jednotky ON AT-1000 odpojeny a z měřené optické trasy byla také z rozbočovače 1:2 odpojena AWG směrová odbočnice.

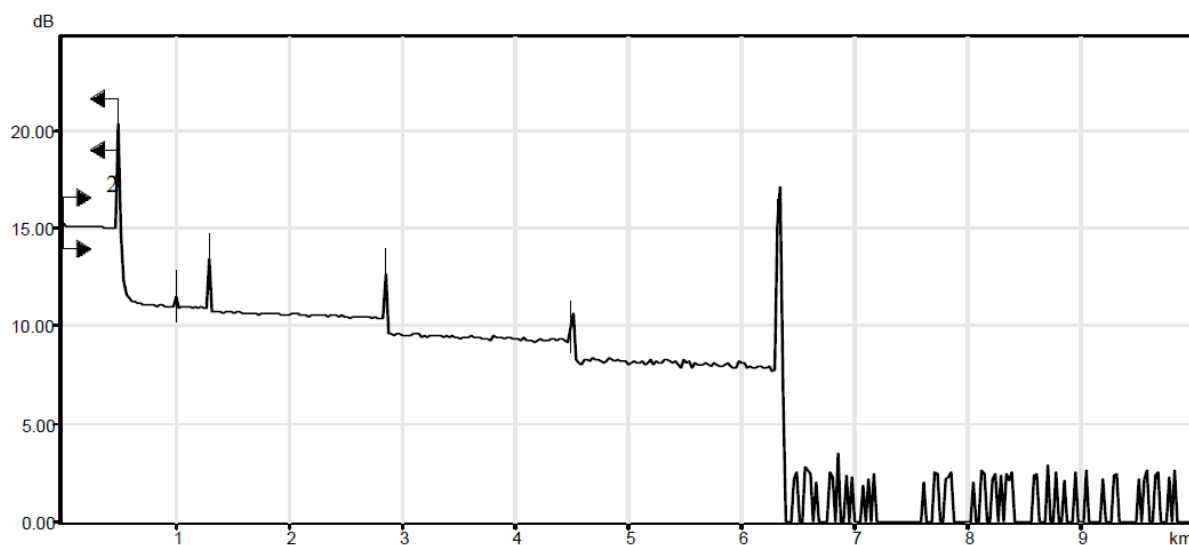


Obr. 5.2 Schéma připojení reflektometru EXFO FTB 7200D.

Reflektorgram odpovídající měřené trase na vlnové délce 1 550 nm je zobrazen na obrázku Obr. 5.3. Na reflektorgramu lze vidět přibližně 500 m dlouhé předřadné vlákno, které je ukončeno zvýšením a poklesem hodnoty útlumu, která indikuje optický rozbočovač 1:2 s rozbočovacím poměrem 50/50. Po rozbočovači následuje optická trasa, na které jsou zřetelně vidět spoje mezi optickými vlákny po 775, 1 555 a 1 643 metry. Poslední zvýšení a pokles hodnoty útlumu indikuje vstupní port rozbočovače 1:2. Rozbočovač 1:7, který je propojen s rozbočovačem 1:2 pouze patch

kabelem dlouhým 1 m není měřicí přístroj schopen zaznamenat. Optická trasa propojující experimentální pracoviště s rozvaděčem R-A N311, nebyla měřicím přístrojem taktéž zaznamenána, protože je v délce několika jednotek metrů a měřicí přístroj není takto malou vzdálenost schopen zaznamenat.

Aby byl měřicí přístroj schopen zaznamenat optickou trasu spojující rozvaděč s experimentálním pracovištěm, tak by bylo nutné použít přídatné vlákno na výstupní port EP, které při práci nebylo k dispozici. Přídatné vlákno by mohlo být použito i mezi rozbočovači 1:2 a 1:7, aby bylo možné zaznamenat tyto dva rozbočovače na reflektogramu odděleně. Tímto přidaným vláknem by byl ovšem ovlivněn útlum trasy. Reflektogram pro vlnovou délku 1 550 nm je uveden v příloze C.



Obr. 5.3 Reflektogram ve směru od OLT k rozbočovači 1:7 na vlnové délce 1 550 nm.

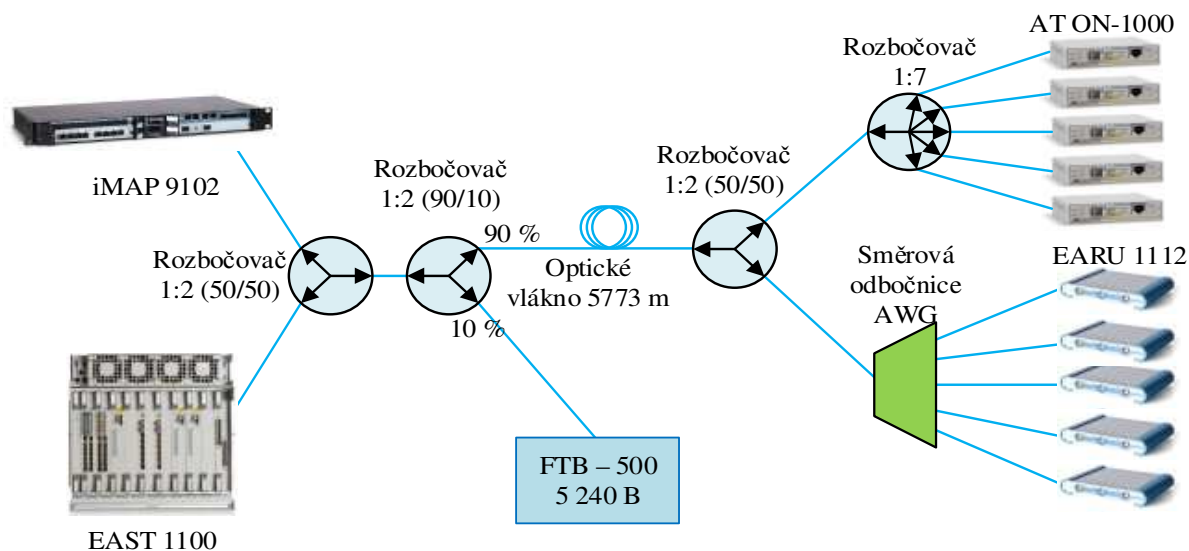
5.4 Spektrální analýza

Spektrální analýza byla provedena měřicím přístrojem FTB 500 of firmy EXFO, který obsahoval modul FTB - 5240B Optical Spectral Analyzer. Do topologie musel být přidán další rozbočovač, který rozdělval výkon v poměru 90/10. Tento rozbočovač sloužil pouze pro účely měření, je to dáno tím, že OSA FTB 5240B je velmi citlivý měřicí přístroj a v případě připojení přímo na výstup rozbočovače by došlo k jeho poškození. Proto je na přístroj přivedeno pouze 10 % vyzářovaného výkonu integrované optické sítě. Měření optického spektra bylo provedeno jak v sestupném, tak i ve vzestupném směru přenosu dat. Vždy bezprostředně za rozbočovačem, resp. slučovačem integrující dvě měřené technologie na jedno optické vlákno.

5.4.1 Spektrální analýzy v sestupném směru

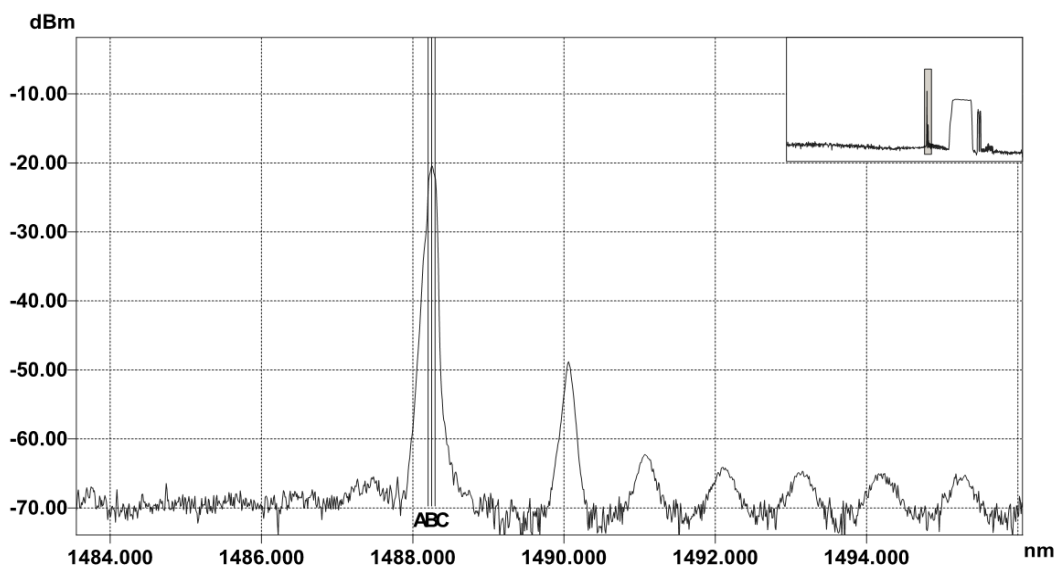
První měření optického spektra bylo provedeno v sestupném směru přenosu dat. Přídatný rozbočovač byl připojen na výstupní port rozbočovače integrující signály z OLT jednotek iMAP 9102 a EAST 1100. Na výstupní port přídatného rozbočovače, kterým prochází 10 % vstupního výkonu byl připojen spektrální analyzátor EXFO FTB - 5240B. Druhý výstupní port, kterým prochází 90 % vstupního výkonu byl připojen do trasy sestavené topologie. Schéma zapojení měřicího přístroje a přídatného rozbočovače je zobrazeno na obrázku Obr. 5.4. Na obrázcích Obr. 5.5 až Obr. 5.7 je

zobrazeno jedno měření spektrální analýzy, které je postupně podle potřeby přiblíženo na požadovaný rozsah vlnových délek.



Obr. 5.4 Topologie se zapojeným spektrometrem v sestupném směru.

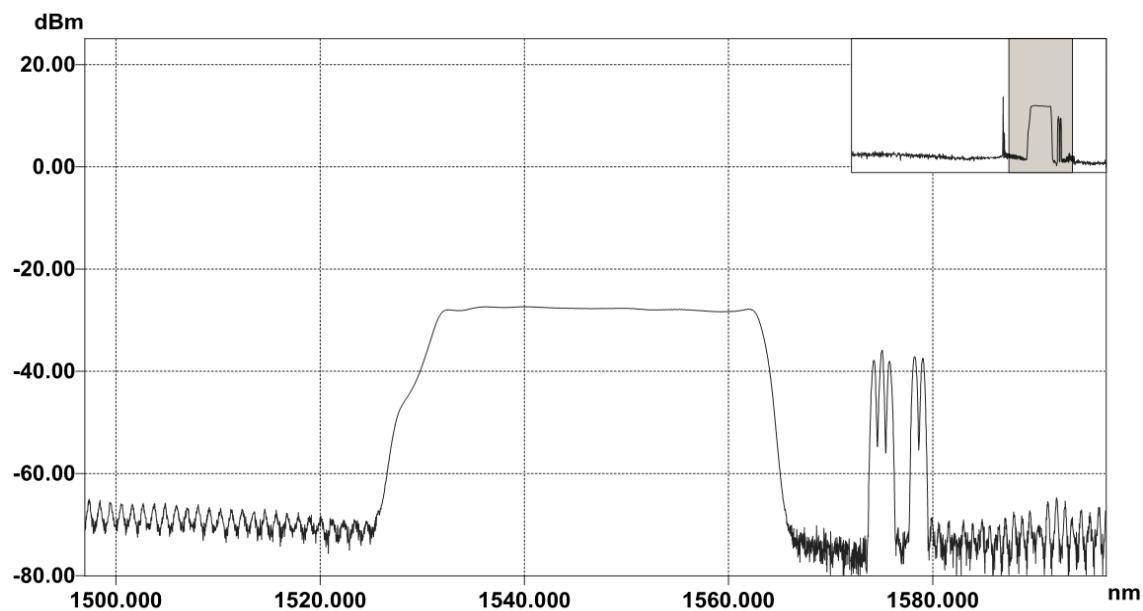
Na obrázku Obr. 5.5 je zobrazeno spektrum vlnových délek v rozsahu od 1483 nm do 1498 nm zaznamenané spektrálním analyzárem v sestupném směru přenosu dat. Na zobrazeném spektru vlnových délek lze vidět dva výrazné peaky na vlnových délkách 1 488,5 nm a 1 490 nm. Ve specifikaci použitého SFP modulu v OLT jednotce iMAP 9102 je uveden rozsah vysílaných vlnových délek 1 480 nm - 1 500 nm. Což znamená, že dva zaznamenané špičky reprezentují vysílání jednoho kanálu v sestupném směru sítě EPON2.



Obr. 5.5 Spektrum vlnových délek v rozsahu od 1 483 do 1 498 nm v sestupném směru.

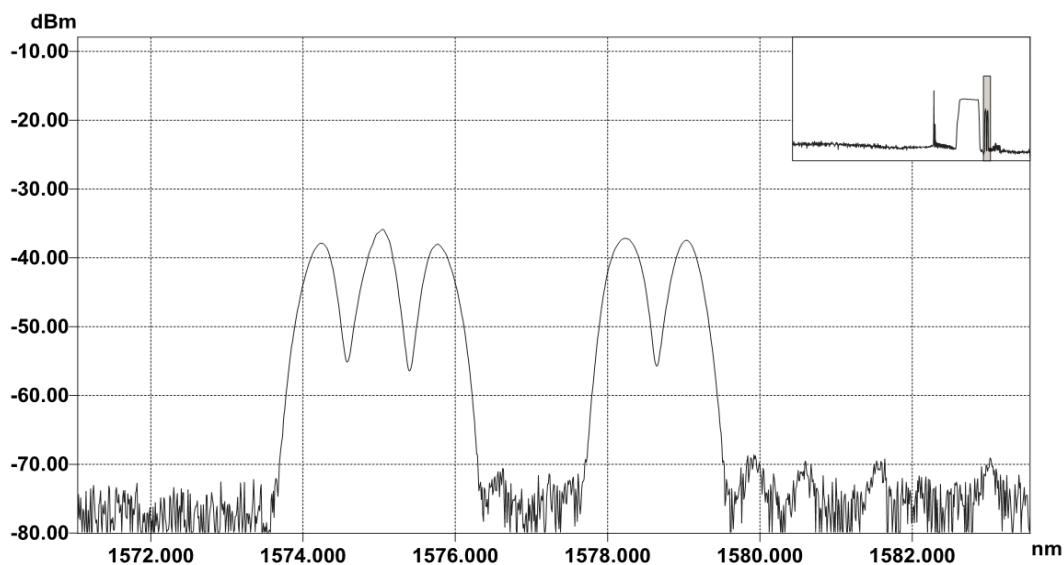
Obrázek Obr. 5.6 zobrazuje spektrum vlnových délek v rozsahu od 1 498 nm do 1 598 nm. Na obrázku lze vidět široko spektrální záření BLS vysílané OLT jednotkou EAST 1100, které slouží pro

naladění koncových jednotek EARU 1112 na dané vlnové délky. Široko spektrální záření OLT jednotka vysílá vždy v plném spektru vlnových délek bez ohledu na počet připojených koncových jednotek. V pásmu L OLT jednotka vysílá na pěti vlnových délkách, reprezentující 5 kanálů. Těchto pět kanálů bylo manuálně aktivováno v grafickém prostředí EMS.



Obr. 5.6 Spektrum vlnových délek v rozsahu od 1 498 do 1 598 nm v sestupném směru.

Obrázek Obr. 5.7 zobrazuje pět aktivovaných kanálů vysílajících OLT jednotkou EAST 1100. Zobrazené spektrum je v rozsahu od 1 571 nm do 1 581 nm. Šířka jednotlivých kanálů odpovídá standardu specifikovaného technickými parametry pro systém EAST 1100, tj. 0,8 nm resp. 100 GHz. Mezera mezi třetím a čtvrtým peakem je dána tím, že v OLT jednotce EAST 1100 byly aktivovány kanály číslo 1, 2, 3, 6 a 7. Neaktivování kanálů číslo 4 a 5 bylo způsobeno vadnými porty číslo 4 a 5 na AWG směrové odbočnici, které vykazovaly vysoký útlum, což se dá přičíst problému s konektory s druhé strany AWG odbočnice.



Obr. 5.7 Spektrum vlnových délek v rozsahu od 1 571 do 1 581 nm v sestupném směru.

V tabulce Tab. 5.5 jsou uvedeny hodnoty zaznamenané měřicím přístrojem FTB 5240B. Jedná se o vlnové délky a power peak Pp jednotlivých peaků. Vlnové délky, které vysílá OLT jednotka 9102 jsou 1 488,257 a 1 490,061 nm, tyto hodnoty reprezentují jeden vysílací kanál. Dalších pět peaků reprezentuje pět kanálů DWDM-PON sítě v L pásmu odpovídající komunikaci v sestupném směru. Hodnoty power peak Pp [dBm] odpovídají 10 % reálného vysílaného výkonu OLT jednotek.

Tab. 5.5 Peaky v sestupném směru přenosu dat integrované optické sítě.

Peak	1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.
Kanál	ge1490	ge1490	1	2	3	6	7
λ [nm]	1488,257	1 490,061	1 574,223	1 575,019	1 575,78	1 578,23	1 579,033
Pp [dBm]	- 20,42	- 48,83	- 37,96	- 35,90	- 38,08	- 37,22	- 37,47

Porovnání mezi vlnovými délkami změřenými spektrálním analyzárem s hodnotami specifikovanými v popisu pro systémy EAST 1100 je uvedeno v tabulce číslo Tab. 5.6. Rozdíl mezi vlnovými délkami je řádově v setinách až tisícinách nm. Vzhledem k tomu, že DWDM-PON systém používá rozestupy kanálů 0,8 nm jsou tyto malé rozdíly zanedbatelné .

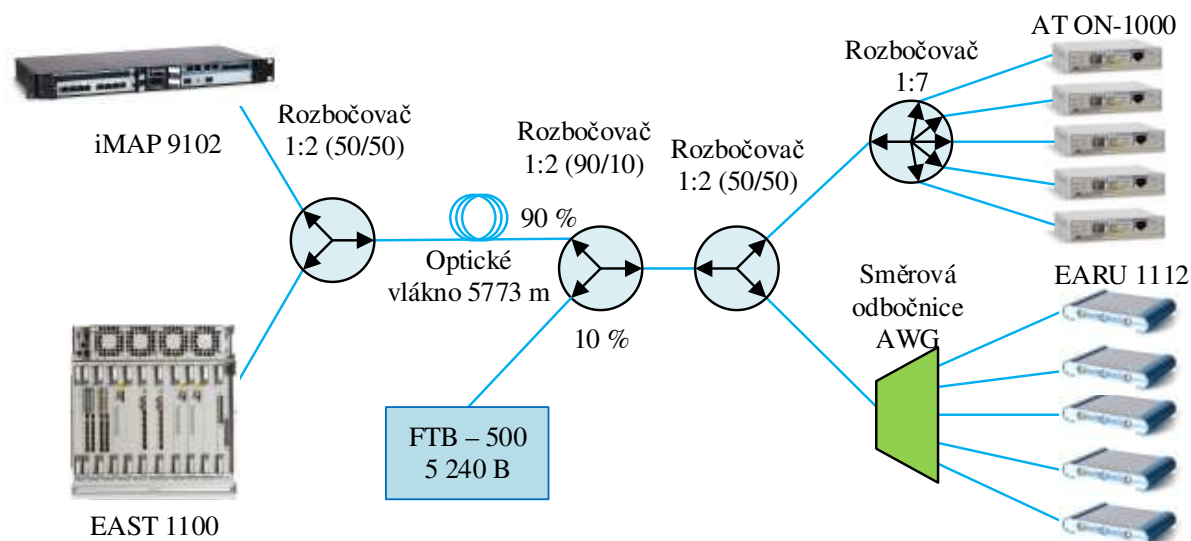
Tab. 5.6 Porovnání reálných a teoretických hodnot vlnových délek v sestupném směru

Peak	Kanál	Reálná vlnová délka [nm]	Číslo kanálu	Teoretická vlnová délka [nm] [20]	Rozdíl mezi reálnou a teoretickou hodnotou [nm]
3	1	1 574,223	1	1 574,199	0,024
4	2	1 575,019	2	1 575,004	0,015
5	3	1 575,780	3	1 575,810	- 0,03
6	6	1 578,230	6	1 578,233	- 0,003
7	7	1 579,033	7	1 579,042	- 0,009

5.4.2 Vzestupný směr přenosu dat

Topologie s optickým spektrální analyzátozem zapojeným do sítě pro měření komunikace mezi koncovými jednotkami a linkovým zakončením ve vzestupném směru je zobrazena na obrázku Obr. 5.8. Na výstup rozbočovače 1:2, který slučuje komunikaci z rozbočovače 1:7 a AWG směrové odbočnice byl připojen výstupní port rozbočovače 1:2 s poměrem rozbočení 90/10. Na výstupní port obsahující 10 % výkonu byl připojen spektrální analyzátoz a na port s 90 % vstupního výkonu byla připojena optická trasa.

V tabulkách Tab. 5.7 až Tab. 5.9 jsou zobrazeny hodnoty změřené měřicím přístrojem FTB 5240B. Jedná se o pořadí špiček v zaznamenaném rozsahu, název, resp. číslo zachyceného kanálu, vlnové délky jednotlivých kanálů a výkon špiček Pp v dBm.



Obr. 5.8 Topologie se zapojeným spektrometrem ve vzestupném směru.

První tabulka Tab. 5.7 zobrazuje pět zaznamenaných peaků v rozsahu od 1 307 nm do 1 315 nm. Jedná se o pět koncových jednotek AT ON-1000 pasivní optické sítě EPON2. Z teoretického hlediska koncové jednotky sítě EPON vysílají na jedné vlnové délce 1 310 nm a využívají časově dělenou metodu přístupu TDMA. Ale jelikož je v koncových jednotkách použit DFB laser, který je velmi ovlivnitelný vnějšími vlivy, tak je spektrum vysílání koncových jednotek rozprostřeno do rozsahu od 1307 nm do 1315 nm. SFP modul v OLT jednotce EPON2 sítě má ve své specifikaci toleranci ve vzestupném směru od 1260 nm do 1360 nm, a proto přijímá vlnové délky koncových jednotek jako jeden celek.

Tab. 5.7 Peaky 1 až 5 ve vzestupném směru přenosu dat pro síť EPON2.

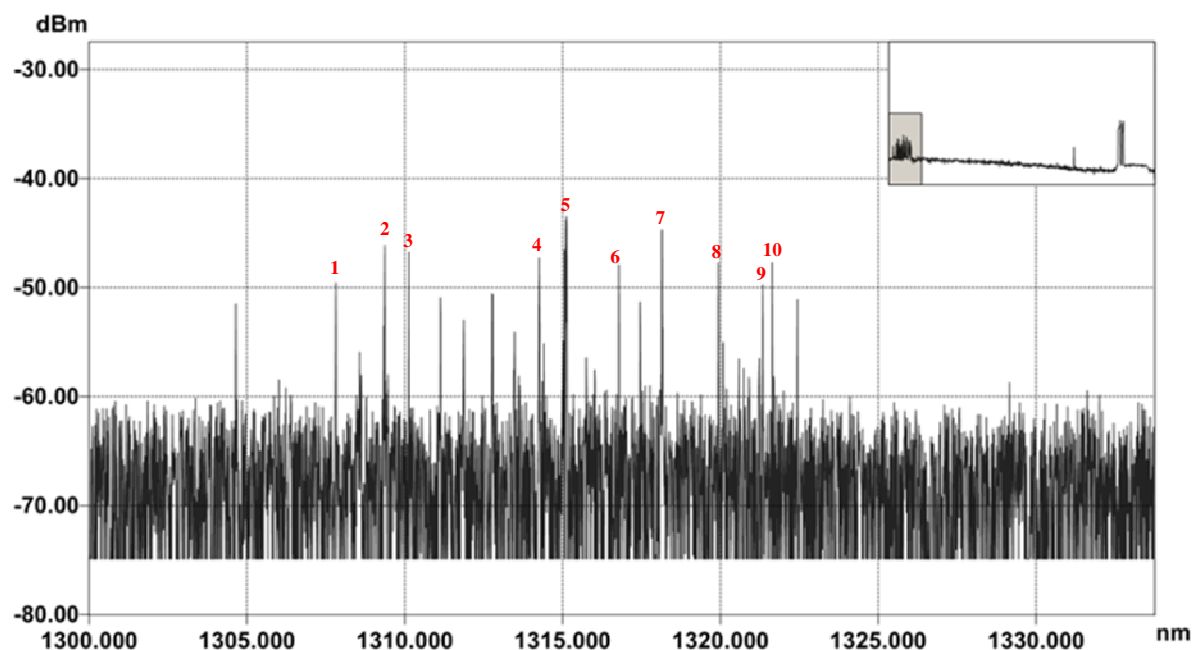
Peak	1.	2.	3.	4.	5.
Kanál	ge1310	ge1310	ge1310	ge1310	ge1310
λ [nm]	1 307,808	1 309,359	1 310,130	1 314,259	1 315,061
Pp [dBm]	- 49,63	- 46,22	- 46,79	- 47,35	- 46,56

V tabulce Tab. 5.8 jsou hodnoty dalších pěti peaků, k těmto peakům již názvy kanálu přiřazeny nebyly, ale měřicí přístroj je zaznamenal, protože nastavení prahu detekce je - 50 dBm a všechny tyto peaky tuto hodnotu překročily.

Tab. 5.8 Peaky 6 až 10 ve vzestupném směru přenosu dat pro síť EPON2.

Peak	6.	7.	8.	9.	10.
Kanál	-	-	-	-	-
λ [nm]	1 316,781	1 318,145	1 319,930	1 321,338	1 321,641
Pp [dBm]	- 47,95	- 44,24	- 47,83	- 49,85	- 47,80

Na obrázku Obr. 5.9 lze vidět rozsah vlnových délek od 1 300 nm do 1 333 nm. Čísla od 1 do 10 zobrazují pořadí jednotlivých peaků zaznamenaných v tabulkách Tab. 5.7 a Tab. 5.8. Analýza probíhala v plném rozsahu, který měřicí přístroj umožňuje, a to od 1300 nm do 1 570 nm. Pro názornost byl rozsah zobrazující vysílání koncových jednotek AT ON-1000 přiblížen.



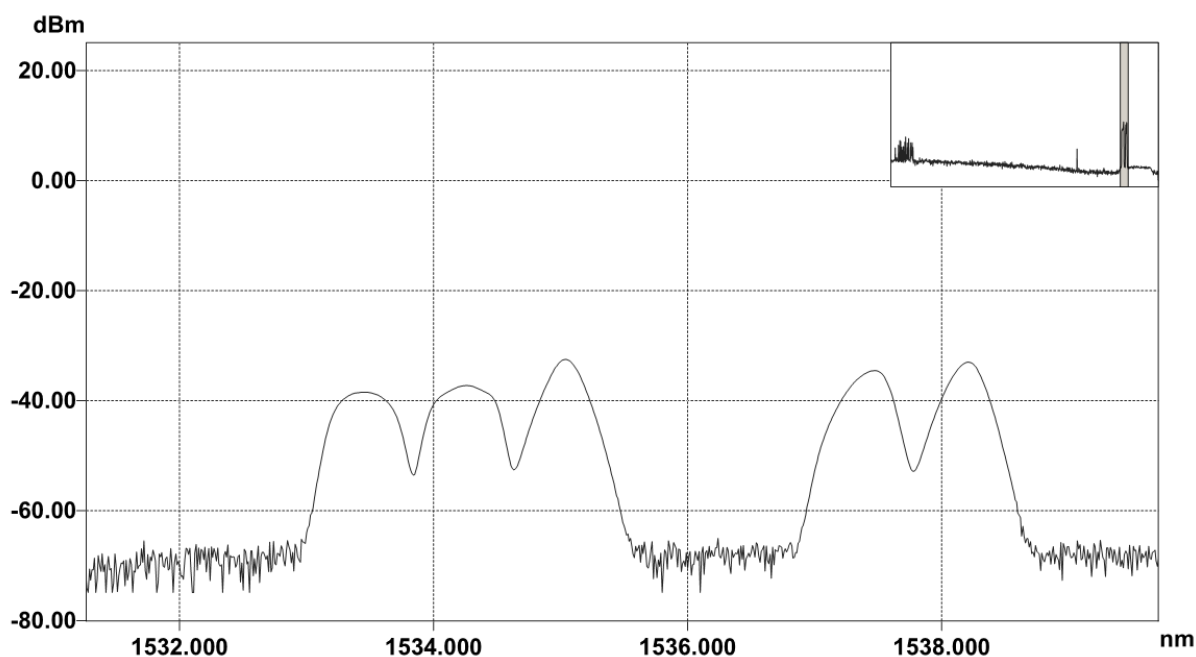
Obr. 5.9 Spektrum vlnových délek v rozsahu od 1 300 nm do 1 333 nm ve vzestupném směru.

V tabulce Tab. 5.9 je uvedeno posledních pět peaků, které indikují pět kanálů DWDM-PON koncových jednotek EARU 1112, kde každá vysílá ve svém vlastním kanálu. Jsou zaznamenány kanály 1 až 7, s tím že kanály 4 a 5 chybí. Je to dáno zapojením topologie v AWG filtru, kde byly využity porty 1, 2, 3, 6 a 7.

Tab. 5.9 Příspěvkové kanály 1, 2, 3, 6 a 7 DWDM-PON sítě ve vzestupném směru.

Peak	11.	12.	13.	14.	15.
Kanál	1	2	3	6	7
λ [nm]	1 533,453	1 534,248	1 535,037	1 537,430	1 538,196
Pp [dBm]	- 38,55	- 37,39	- 32,52	- 34,60	- 33,03

Na obrázku Obr. 5.10 je zobrazeno spektrum vlnových délek v rozsahu od 1 531 nm do 1 540 nm, ze kterého lze zřetelně určit pět kanálů, resp. vysílání pěti koncových jednotek. Mezera mezi 13 a 14 špičkou, je způsobena vynecháním portů číslo 4 a 5 v AWG směrové odbočnici, jak již bylo vysvětleno výše. Jednotlivé kanály mají šířku 0,8 nm, která koresponduje s technickou specifikací kanálových intervalů.



Obr. 5.10 Spektrum vlnových délek v rozsahu od 1 531 do 1 540 nm ve vzestupném směru.

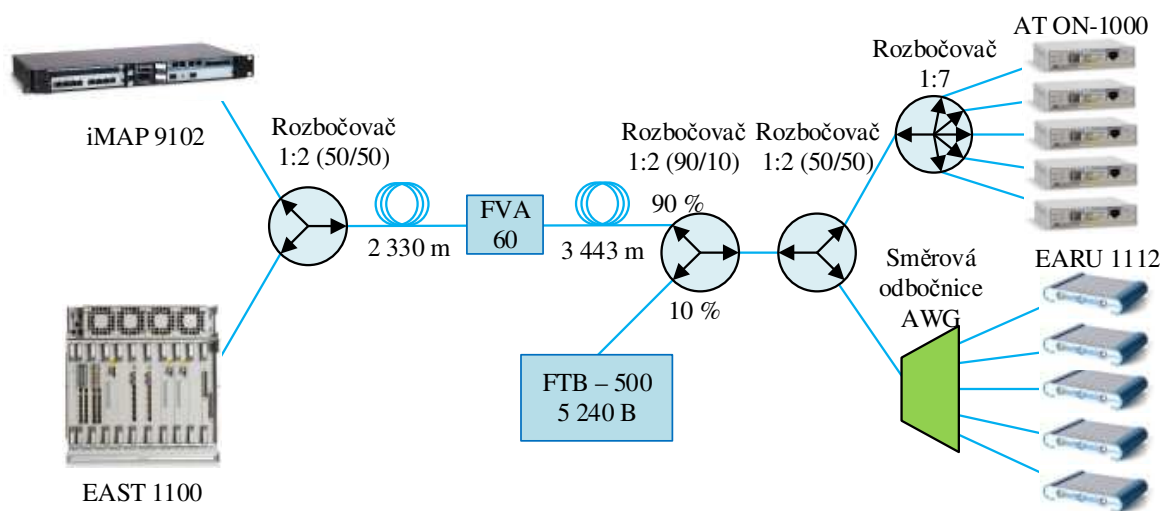
Tabulka Tab. 5.10 obsahuje vlnové délky jednotlivých kanálů DWDM-PON sítě ve vzestupném směru zaznamenané optickým spektrometrem a technickou specifikací. Hodnoty jsou téměř totožné, rozdíly mezi reálnými a specifikovanými vlnovými délkami jsou řádově od jednotek setin do jednotek tisícín. Největší odchylka je u kanálu číslo 6, a to 0,033 .

Tab. 5.10 Porovnání reálných a specifikovaných hodnot vlnových délek.

Peak	Číslo kanálu	Reálná vlnová délka [nm]	Číslo kanálu	Teoretická vlnová délka [nm] [20]	Rozdíl mezi reálnou a teoretickou hodnotou [nm]
11	1	1 533,453	1	1 533,465	- 0,012
12	2	1 534,248	2	1 534,250	- 0,002
13	3	1 535,037	3	1 535,036	0,001
14	6	1 537,430	6	1 537,397	0,033
15	7	1 538,196	7	1 538,186	0,01

5.5 Zvyšování vloženého útlumu do trasy

Další testování integrované sítě probíhalo pomocí digitálního attenuátoru a spektrálního analyzáru FTB 5240B. Cílem byla zaznamenat změnu optického spektra při zvyšování útlumu trasy. K tomu sloužil útlumový článek FVA 60B, který byl připojen do topologie, viz obrázek Obr. 5.11. Měření optického spektra probíhalo připojeným analyzárem ve vzestupném směru přenosu dat.



Obr. 5.11 Topologie se zapojeným spektrometrem ve vzestupném směru a digitálním atenuátorem.

V tabulce Tab. 5.11 je zobrazeno chování koncových jednotek AT ON-1000 a EARU 1112 při zvyšování hodnot útlumu. K odpojení první koncové jednotky došlo při hodnotě + 7 dB, komunikace se rozpadla v systému DWDM-PON na jednotkách EARU 1112 komunikujících na kanálech číslo 3 a 6. Další zvýšení útlumu na hodnotu + 8,2 dB způsobilo rozpad spojení mezi všemi koncovými jednotkami EARU 1112 a OLT jednotkou EAST 1100. Při hodnotě útlumu + 10,4 dB došlo k rozpadu první jednotky AT ON-1000, která byla zaregistrována pod číslem 4. Další zvýšení hodnoty útlumu na + 11,2 dB způsobilo odpojení ONU jednotek EPON2 sítě pod čísly 1, 2 a 5. Poslední komunikující jednotka ONU číslo 3 se odpojila při hodnotě útlumu + 11,3 dB.

Tab. 5.11 Připojené a odpojené ONU jednotky na základě zvýšeného útlumu trasy.

Vložený útlum [dB]	Koncové jednotky AT ON-1000		Koncové jednotky EARU 1112	
	Připojené	Odpojené	Připojené	Odpojené
+ 2	Všechny	Žádné	Všechny	Žádné
+ 4	Všechny	Žádné	Všechny	Žádné
+ 6	Všechny	Žádné	Všechny	Žádné
+ 7	Všechny	Žádné	Kanál 3 a 6	Kanál 1, 2 a 7
+ 8,2	Všechny	Žádné	Žádné	Všechny
+ 10,4	ONU 1, 2, 3 a 5	ONU 4	Žádné	Všechny
+ 11,2	ONU 3	ONU 1, 2, 4 a 5	Žádné	Všechny
+ 11,3	Všechny	ONU 1, 2, 4, 3 a 5	Žádné	Všechny

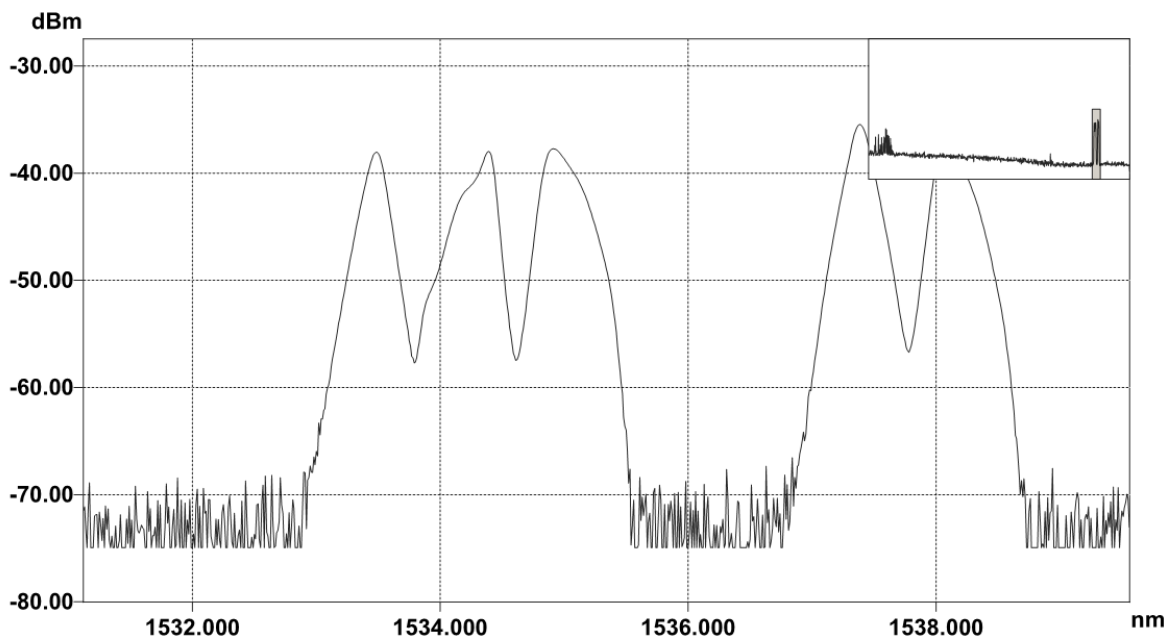
Tabulka Tab. 5.12 zobrazuje hodnoty P_p při zvýšeném útlumu + 7 dB. V tabulce jsou označeny kanály DWDM-PON sítě, na kterých došlo k rozpadu spojení mezi OLT jednotkou EAST 1100 a ONU jednotkami EARU 1112. Odpojení koncových jednotek bylo detekováno zhasnutím LED

diod na čelním panelu OLT jednotky, reprezentující kanály 1, 2 a 7 a rozsvícením červených LED diod na ONU jednotkách.

Tab. 5.12 Hodnota vloženého útlumu do trasy: + 7dB.

Peak	1	2	12	13	14	15	16
Kanál	ge1310	ge1310	1	2	3	6	7
λ [nm]	1 307,330	1 310,469	1 533,476	1 534,321	1 534,974	1 537,389	1 538,122
Pp[dBm]	- 48,45	- 46,56	- 38,08	- 38,03	- 37,77	- 35,48	- 37,07

Spektrum v rozsahu 1 531 až 1 540 nm zobrazující pět příspěvkových kanálů DWDM-PON sítě je na obrázku Obr. 5.12. Optické spektrum zobrazuje příspěvkové kanály ovlivněné vložením + 7 dB do optické trasy digitálním atenuátorem a optickým rozbočovačem 1:2 v poměru rozbočení 90/10, kdy je 10 % vstupního výkonu přivedeno na spektrální analyzátor.



Obr. 5.12 Optické spektrum v rozsahu od 1 531 do 1 540 nm s vloženým útlumem v hodnotě + 7 dB.

Tabulka Tab. 5.13 zobrazuje hodnoty Pp při vloženém útlumu v hodnotě + 8,2 dB. Při této hodnotě útlumu došlo k odpojení všech koncových jednotek EARU 1112 sítě DWDM-PON. Označení peaků číslo 10 až 14 v tabulce indikuje rozpad spojení. Při této hodnotě vloženého útlumu koncové jednotky AT ON-1000 stále byly ve spojení s OLT jednotkou iMAP 9102.

Tab. 5.13 Hodnota vloženého útlumu do trasy: + 8,2 dB.

Peak	1	2	10	11	12	13	14
Kanál	ge1310	ge1310	1	2	3	6	7
λ [nm]	1 308,954	1 309,697	1 533,483	1 534,325	1 534,963	1 537,398	1 538,119
Pp[dBm]	- 48,78	- 49,48	- 43,20	- 43,91	- 41,83	- 39,72	- 40,90

Při hodnotě vloženého útlumu + 10,4 dB došlo k odpojení první koncové jednotky AT ON-1000 číslo 4 EPON2 sítě. Z tabulky Tab. 5.14, kde jsou uvedeny hodnoty Pp a vlnových délek při hodnotě vloženého útlumu + 10,4 dB není i peaku 1, reprezentující vysílání AT ON-1000 možné určit rozpad spojení. To je dáno způsobem komunikace v jednom kanálu rozdělným časovým multiplexem mezi více jednotek. U koncové jednotky číslo 4 došlo k rozpadu jako první, protože jak bylo změřeno v kapitole 5.2.2 metodou 1c, trasa k EP 4, kde jednotka AT ON-1000 číslo 4 umístěna vykazuje nejvyšší útlum.

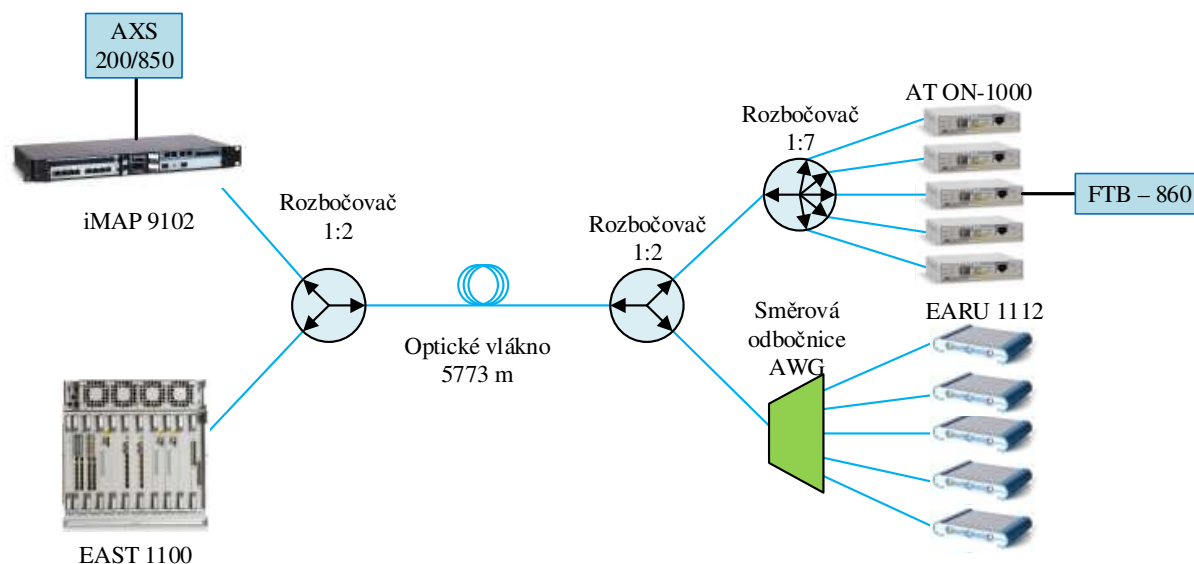
Tab. 5.14 Hodnota vloženého útlumu do trasy : + 10,4 dB.

Peak	1	8	9	10	11	12
Kanál	Ge 1 310	1	-	3	6	7
λ [nm]	1 315,426	1 533,533	1 534,458	1 535,046	1 537,449	1 538,178
Pp[dBm]	- 47,86	- 49,41	- 48,33	- 41,47	- 42,79	- 41,30

Optické spektra zaznamenané spektrálním analyzárem, zobrazující změnu peaků EPON2 sítě a kanálů DWDM-PON jsou uvedeny v příloze D a tabulky s hodnotami vlnových délek a Pp při zvyšování hodnoty útlumu na digitálním attenuátoru jsou uvedeny v příloze E.

5.6 Testování integrované sítě testy RFC 2544 a ITU-Y.1564

Na integrované optické síti byly provedeny testy RFC 2544 a ITU-Y.1564. Cílem těchto testů bylo určit, zdali nasazení dvou technologií, komunikujících na různých vlnových délkách, na jedno optické vlákno má za následek vzájemné ovlivnění těchto různých systémů.

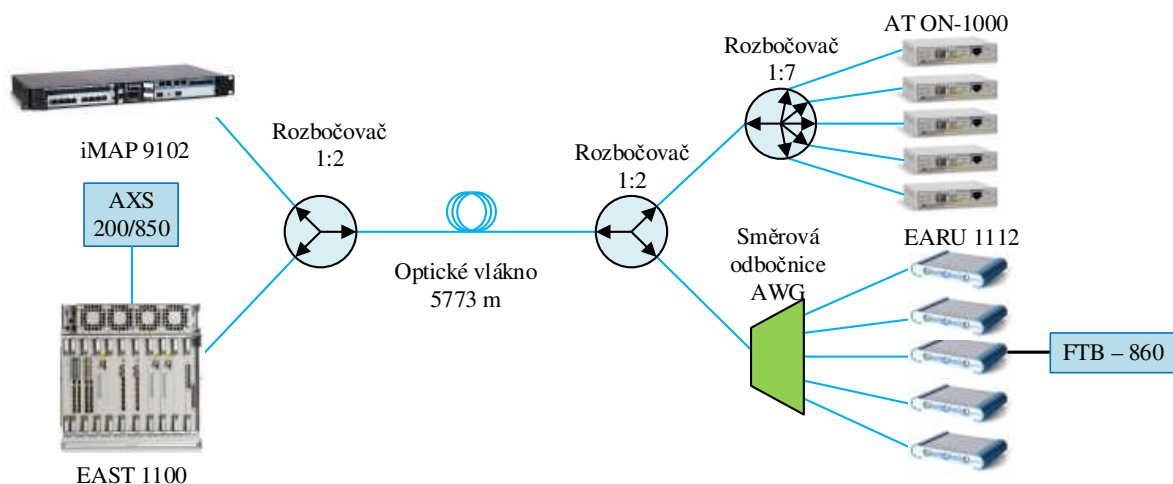


Obr. 5.13 Testování sítě EPON2.

Testování bylo provedeno pomocí měřicího přístroje FTB 860, který tyto testovací metody obsahuje a přístroje AXS 200/850, který sloužil jako loopback jednotka. Přístroj FTB 860 byl připojen

u systému DWDM-PON na koncovou jednotku EARU 1112 číslo 3, komunikující na kanále číslo tři. Tato jednotka byly zvolena, protože při testu zvyšování útlumu trasy, popsaným v kapitole 5.5, zůstala ve spojení s OLT jednotkou nejdéle. U systému EPON2 bylo zvolení testované koncové jednotky analogické jako u systému DWDM-PON. Zde byla vybrána také jednotka číslo 3. Obě koncové jednotky AT ON-1000 a EARU 1112 byly umístěny na experimentálním pracovišti 3. Všechny testy probíhaly na síti bez jakékoliv vnější zátěže, veškerá zátěž sítě byla generována měřicím přístrojem FTB 860, který tento provoz generoval, následně díky loopback jednotce přijímal a vyhodnocoval podle aktivní testovací metody.

Testy byly provedeny ve čtyřech variantách. Při první variantě testování byl měřicí přístroj FTB 860 připojen ke koncové jednotce AT ON-1000, měřicí přístroj s funkcí loopback pomocí metalického kabelu připojen do portu číslo 4.0 OLT jednotky iMAP 9102 a OLT EAST 1100 byla v aktivním stavu se sestaveným spojením mezi všema jednotkami EARU 1112. Druhá varianta spočívala v ponechání měřicích přístrojů ve stávajícím stavu a vypnutí OLT jednotky EAST 1100. Schéma zapojení měřicích přístrojů je zobrazeno na obrázku Obr. 5.13..



Obr. 5.14 Testování sítě DWDM-PON.

Ve třetí variantě byl měřicí přístroj FTB 860 připojen na koncovou jednotku EARU 1112 a loopback jednotka za pomoci SFP modulu a optického kabelu připojena do portu NI 1 OLT jednotky EAST 1100. V poslední čtvrté variantě testování integrované sítě byla vypnuta OLT jednotka iMAP 9102 a měřicí přístroje byly ponechány na místech jako ve variantě číslo tři, viz obrázek Obr. 5.14..

5.6.1 Doporučení RFC 2544

Doporučení RFC 2544 bylo vytvořeno v roce 1999 organizací IETF, aby sjednotilo, do té doby nejednotnost metodiky a hodnocení výsledků. Hlavní nevýhodnou testů podle RFC 2544 je, že byly vytvořeny pro laboratorní prostředí a z toho vyplývá, že je obtížné provádět testy na sítích poskytující konektivitu koncovým uživatelům. Délka testů je poměrně dlouhá, řádově desítky minut až hodin.

Existují tři základní schémata zapojení měřicího přístroje a testovaného prvku DUT (Device Under Test). V první variantě je potřeba tester s přijímacím a vysílacím portem a testovaný prvek musí

být ve stejné lokalitě. Druhá varianta je vhodná pro testování rozlehlější sítě pomocí jednoho analyzátoru, který je připojen na jeden konec datového okruhu a na druhý je připojena loopback jednotka, která plní funkci smyčky. Nevýhodou tohoto měření je, že měření probíhá v obou směrech a tudíž může docházet ke zkreslení dat. Poslední varianta slouží pro měření asymetrického datového okruhu pomocí dvou měřicích přístrojů, kde vysílač je připojen a jeden konec a přijímač na druhý konec okruhu. Tento typ měření je nej přesnější, ale vyžaduje obsluhu a měřicí přístroje na obou koncích datového okruhu. V bakalářské práci byla využita varianta číslo tři s ohledem na vybavenost laboratoře.

Testy specifikované v doporučení RFC 2544 jsou následující:

Throughput (propustnost) - Cílem testu je zjištění maximální přenosové rychlosti, při které nedochází ke ztrátě přenášených rámců. Měření probíhá pro velikosti rámců 64, 128, 256, 512, 1 024, 1 280 a 1 518 B.

Latency (zpoždění) - Test zpoždění navazuje na předchozí test propustnosti, kdy se po 60 s vysílání s maximální propustností vloží speciální rámec s časovou značkou. Po přijetí měřicím přístrojem je tato časová značka vyhodnocena. Testování při maximální propustnosti má za úkol simulovat nejhorší podmínky, ke kterým dochází při zaplnění vyrovnávací paměti. Test se musí opakovat 20krát při všech velikostech rámců. V bakalářské práci vzhledem k zapojení testeru na jednom konci datového okruhu a loopback jednotky na druhém bylo změřeno zpoždění RTT (Round Trip Time), ve kterém je obsaženo zpoždění zpětného vysílání a doba zpracování DTU jednotkou.

Frame Loss Rate (ztrátovost rámců) - Test zpoždění měří počet datových rámců, které se ztratí přenosem a zpracováním DTU jednotkou. Velkou roli ztrátovost rámců má u přenosů nespojově orientovaných přenosů, kde již nedochází k opětovnému vysílání ztracených rámců. Ztrátovost je definována vzorcem 5.1, kde N_{tx} je počet vyslaných a N_{rx} počet přijatých rámců.

Výpočet ztrátovosti datových rámců:

$$FLR = \frac{(N_{tx} - N_{rx})}{N_{tx}} \times 100\% \quad (5.1)$$

Back-to-Back frames (zatížitelnost) - Test zatížitelnosti má za úkol zjistit pomocí vysílání datových rámců s minimálními mezirámcovými mezerami možnosti vyrovnávací paměti DTU. Rovná-li se počet vyslaných a přijatých rámců, zvýší se ve vysílací sekvenci počet datových rámců. A když se nerovná, tak se počet rámců sníží a provede se opakování měření. Výsledná hodnota je, kdy při nejvyšším počtu datových rámců nedošlo ke ztrátě rámce. Opakování měření by mělo být provedeno minimálně 50krát.

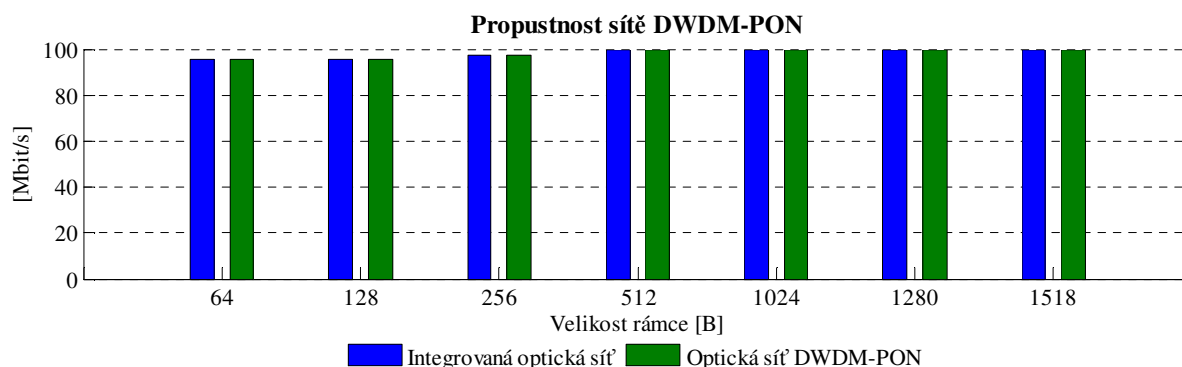
System Recovery (zotavení po přetížení) - Test zotavení po přetížení, jak již z názvu vyplývá, je měření doby odkdy dojde k přetížení DTU k době jeho normální činnosti. Při maximální propustnosti se zvýší generovaný datový tok o 10 %, kdy dojde k přetížení, a poté v konkrétní čas se sníží rychlost datového toku na 50 %. Měření musí být provedeno opakovaně a výsledná hodnota je průměr ze všech změřených dat.

Reset (zotavení po restartu) - Poslední test definovaný doporučením je RFC 2544 je zotavení po restartu, kdy se měří čas mezi posledním rámcem a prvním přijatým při provedeném hardwarovém

či softwarovém restartu DTU jednotky. Poslední dva testy zotavení po restartu a zotavení po přetížení v bakalářské práci provedeny nebyly [28].

5.6.2 Testování integrované sítě pomocí doporučení RFC 2544

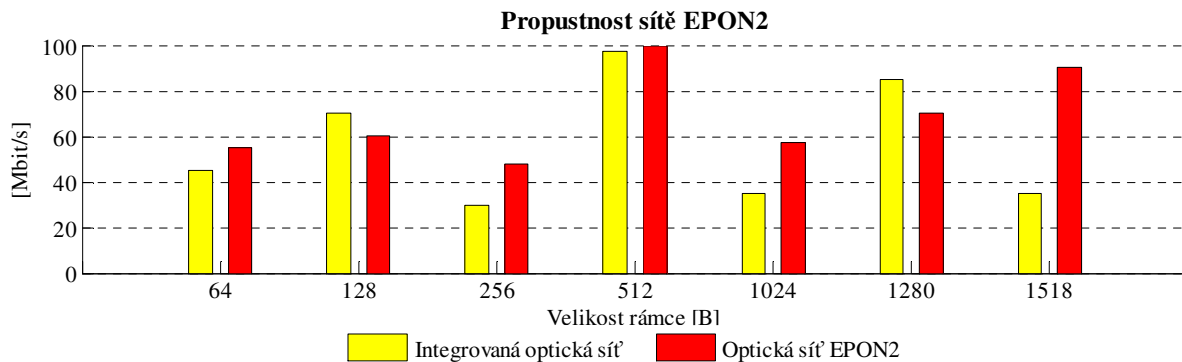
Na obrázku Obr. 5.15 je zobrazen graf propustnosti sítě měřeném na variantách číslo 3 a 4, tzn. měřicí přístroje byly připojeny na prvky systému DWDM-PON. První, modrý sloupec reprezentuje variantu číslo 3 a druhý, zelený variantu číslo 4. Z grafu lze jednoznačně říct, že aktivovaná, či deaktivovaná jednotka iMAP 9102 systému EPON2 nemá žádný vliv na propustnost sítě DWDM-PON.



Obr. 5.15 RFC 2544 propustnost DWDM-PON sítě.

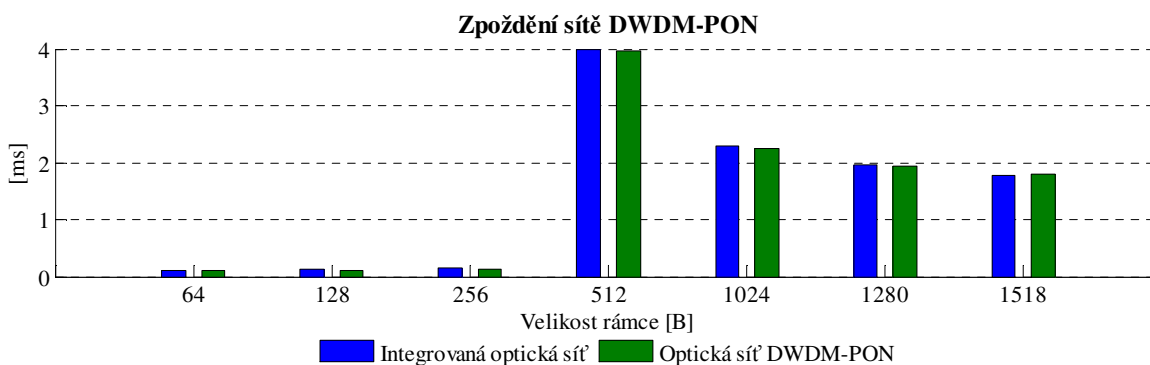
Na obrázku Obr. 5.16 je zobrazen graf propustnosti systému EPON2 měřeném na variantách číslo 1 a 2, kdy měřicí přístroj FTB 860 a loopback jednotka jsou připojeny na prvky sítě EPON2. Žlutý sloupec reprezentuje integrovanou vláknově optickou síť a červený pouze síť EPON2.

V tomto grafu se hodnoty jednotlivých sloupců reprezentující propustnost sítě oproti předchozímu grafu výrazně liší, dokonce až o 50 % u rámce velikosti 1 518 B. Tento markantní rozdíl v hodnotách propustnosti pravděpodobně nebyl způsoben vlivem technologie DWDM-PON, ale dlouhým trváním běhu testu a velmi citlivými součástkami na vnější vlivy koncové jednotky. ONU jednotky AT ON-1000 používají jako fotodetektory PIN fotodiody, které jsou velmi ovlivnitelné vnějšími vlivy. Na rozdíl od lavinových fotodiód APD, které jsou použity v koncových jednotkách EARU 1112 DWDM-PON systému.



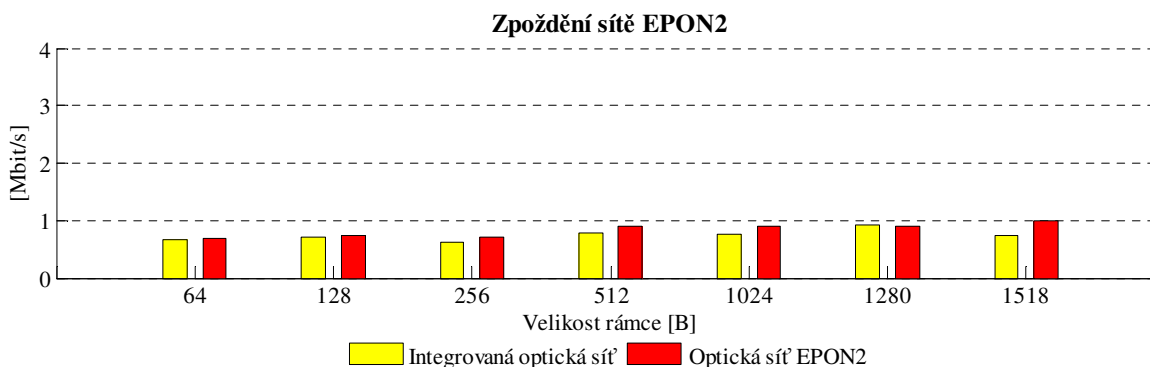
Obr. 5.16 RFC 2544 propustnost sítě EPON 2.

Další test spadající do metody RFC 2544 je test zpoždění sítě. Na obrázcích Obr. 5.17 a Obr. 5.18 jsou zobrazeny grafy porovnávající vzájemný vliv technologií DWDM-PON a EPON2 integrovaných na jedno optické vlákno. První obrázek reprezentuje vliv EPON2 sítě na systém DWDM-PON a druhý obrázek vliv DWDM-PON na EPON2.



Obr. 5.17 RFC 2544 zpoždění sítě DWDM-PON.

Na obou grafech lze vidět, že hodnoty zpoždění na jednotlivých velikostech rámců jsou u všech dvojic sloupců vyrovnané. Z čehož vyplývá, že sítě z pohledu parametru zpoždění nemají na sebe zásadní vzájemný vliv. V příloze F jsou uvedeny tabulky kompletních hodnot změřených testem RFC 2544 a v příloze G jsou zobrazeny grafy zatížitelnosti a ztrátovosti rámců EPON2 a DWDM-PON sítí.



Obr. 5.18 RFC 2544 zpoždění sítě EPON 2.

5.7 Doporučení ITU-T Y.1564

S příchodem nových služeb se projeví nedostatky měření standardem RFC 2544, proto bylo nutné přejít na novou metodiku měření, která je schopna změřit datové přenosy pro požadované parametry. V roce 2011 byl přijat standard ITU-T Y.1564 Ethernet service activation test methodology, který umožňuje testovat paralelní datové toky či okruhy. S vytvořením standardu ITU-T Y.1564 byl vytvořen i nový typ smlouvy SLA (Service Level Agreement), který určuje za jakých podmínek se uskuteční přenosy dat. Doporučení ITU-T Y.1564 je obecně zaměřené na parametry datových přenosů, na rozdíl od doporučení RFC 2544, které se zaměřuje na parametry síťových prvků.

Měření parametrů datového toku probíhá ve dvou fázích:

Kontrola nastavení síťové konfigurace služeb (Service Configuration Test) - Při tomto testu probíhá měření každé služby zvlášť a kontroluje parametry dané SLA. Propustnost je nastavována pomocí Ramp testu, kde se postupně zvyšuje přenosová rychlost a při každém zvýšení jsou všechny parametry SLA ověřeny.

Jsou definovány dvě hodnoty přenosové rychlosti:

CIR (Committed Information Rate) - Jedná se o maximální přenosovou rychlost, u které jsou garantovány parametry zpoždění, kolísání zpoždění, atd. podle smlouvy SLA.

EIR (Excess Information Rate) - Jedná se o maximální přenosovou rychlost datového toku. Nachází se nad hodnotou CIR a určuje maximální přenosovou rychlost datového toku, kde již nejsou parametry zpoždění, kolísání zpoždění, atd. garantovány.

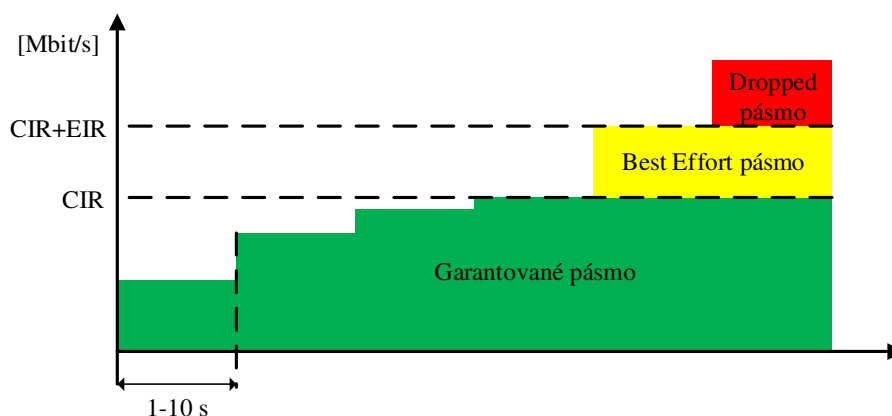
Prostřednictvím hraničních hodnot CIR a EIR jsou definovány tři oblasti:

Garantované pásmo - V garantovaném pásmu musí být všechny parametry v hodnotách domluvených ve smlouvě SLA.

Best Effort pásmo - V pásmu Best Effort jsou data přenášeny pouze tehdy, je-li přenosová kapacita datového kanálu volná. Ale parametry dohodnuté v SLA nemusí být splněny.

Dropped pásmo - V pásmu Dropped nejsou žádná data přenášena. Testování probíhá do hodnoty CIR + EIR + 25 %.

Na obrázku Obr. 5.19 jsou zobrazeny tři oblasti standardu ITU-T Y.1564. V každém kroku měření, který může trvat od 1 do 10 sekund je provedeno měření všech parametrů SLA (propustnost, zpoždění, ztráta rámců a kolísání zpoždění).



Obr. 5.19 Garantované, Best Effort a Dropped pásma standardu ITU-T Y.1564

Kontrola nastavení parametrů kvality služeb QoS (Service Performance Test)

V druhé části testu nejsou již jednotlivé služby testovány samostatně jak v první části testu. Všechny služby jsou generovány současně až do maximální hodnoty CIR a poté testovány jako jeden celek. Cílem tohoto testu je zjištění omezování jednotlivých služeb v aktivních prvcích sítě při současném provozu všech služeb. Opět i zde jsou měřeny parametry propustnosti, maximálního kolísání zpoždění, obousměrného zpoždění a ztrátovosti rámců.

Testování probíhalo na čtyřech variantách připojení měřicích přístrojů popsaných na začátku kapitoly 5.6. V měřicím přístroji FTB 860 byly pro účely testování standardem ITU-T Y.1564 nastaveny tři varianty triple play služeb, které byly následně otestovány, viz tabulka Tab. 5.15.

Tab. 5.15 Varianty Triple play služeb.

	Video	VoIP	Data
Triple play 1	SDTV (MPEG-2)	HDTV (MPEG-2)	HDTV (MPEG-4)
Triple play 2	VoIP G.711	VoIP G.732.1	VoIP G.729
Triple play 3	CIR 10 Mbit/s	CIR 20 Mbit/s	CIR 30 Mbit/s

5.7.1 Kontrola nastavení síťové konfigurace služeb

Konfigurační test se skládá ze čtyř podtestů: maximální propustnosti, ztrátovosti rámců, maximálního kolísání zpoždění a obousměrného zpoždění, kde testy jsou prováděny sekvenčně. V tabulce Tab. 5.16 jsou uvedeny změřená data zobrazující hodnoty maximální propustnosti a ztrátovosti rámců. Zbývající testy maximálního kolísání zpoždění a obousměrného zpoždění jsou uvedeny v příloze H. Maximální propustnost změřená na prvcích sítě EPON2 ve variantě 1 je ve všech typech služeb téměř totožná s hodnotami změřenými ve variantě 2. Maximální rozdíl hodnot je řádově v jednotkách tisícín, což je zanedbatelný rozdíl. Druhá část tabulky zobrazuje hodnoty ztrátovosti rámců sítě jednotlivých testovaných služeb. Test byl opět proveden na variantách číslo 1 a 2. Ztrátovost služeb v obou variantách dosahovala ve všech bodech měření nulových hodnot.

Tab. 5.16 Maximální propustnost a ztrátovost rámců v síti EPON2.

Služby	Maximální propustnost [Mbit/s]		Ztrátovost rámců [%]		
	Integrovaná optická síť	Optická síť EPON2	Integrovaná optická síť	Optická síť EPON2	
Video	SDTV (MPEG-2)	45,002	45,002	0	0
	HDTV (MPEG-2)	44,999	45,001	0	0
	HDTV (MPEG-4)	45,002	44,999	0	0
VoIP	VoIP G.711	1,997	2,001	0	0
	VoIP G.732.1	2,003	1,999	0	0
	VoIP G.729	2	1,999	0	0
Data	CIR 10 Mbit/s	99,995	99,992	0	0
	CIR 20 Mbit/s	99,991	99,991	0	0
	CIR 30 Mbit/s	99,991	99,988	0	0

V tabulce Tab. 5.17 jsou zobrazeny data maximální propustnosti a ztrátovosti rámců sítě DWDM-PON. Rozdíly mezi hodnotami maximální propustnosti měřené na prvcích DWDM-PON sítě

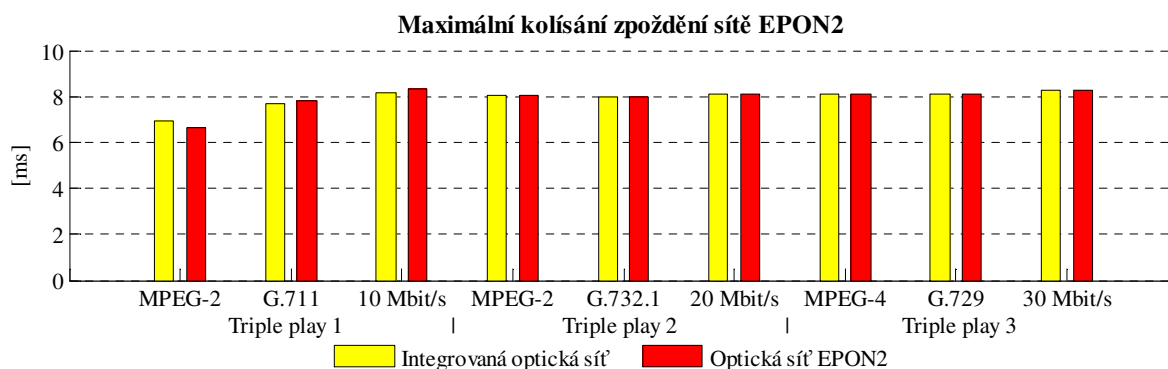
jsou opět zanedbatelné, řádově jednotky tisícín. A ztrátovost je u všech služeb nulová. Na data změřené konfiguračním testem standardu ITU-T Y.1564 nemá žádný vliv aktivita druhé technologie nasazené na společném optickém vlákně.

Tab. 5.17 Maximální propustnost a ztrátovost rámců v síti DWDM-PON.

Služby	Maximální propustnost [Mbit/s]		Ztrátovost rámců [%]		
	Integrovaná optická síť	Optická síť DWDM-PON	Integrovaná optická síť	Optická síť DWDM-PON	
Video	SDTV (MPEG-2)	45,001	45,001	0	0
	HDTV (MPEG-2)	45,001	45,001	0	0
	HDTV (MPEG-4)	45,001	45,001	0	0
VoIP	VoIP G.711	2	2	0	0
	VoIP G.732.1	2	2	0	0
	VoIP G.729	2	2	0	0
Data	CIR 10 Mbit/s	99,509	99,51	0	0
	CIR 20 Mbit/s	99,508	99,507	0	0
	CIR 30 Mbit/s	99,505	99,506	0	0

5.7.2 Kontrola nastavení parametrů kvality služeb QoS

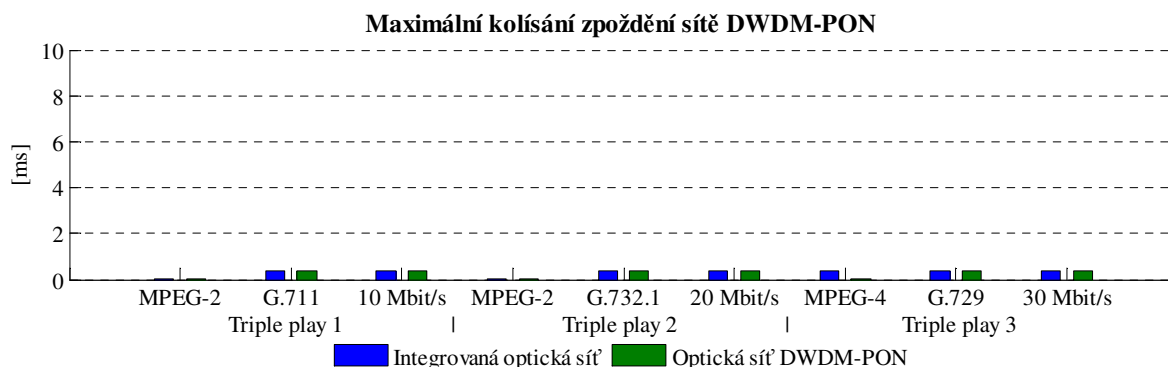
Druhý test standardu ITU-T Y.1564 je test výkonnosti služeb a obsahuje testy průměrné propustnosti, ztrátovosti rámců, maximálního kolísání zpoždění a obousměrného zpoždění. Kombinace Triple play služeb uvedených v tabulce Tab. 5.15 jsou testovány ve stejném okamžiku, na rozdíl od konfiguračního testu, kde jsou služby testovány samostatně.



Obr. 5.20 Maximální velikost kolísání zpoždění sítě EPON2.

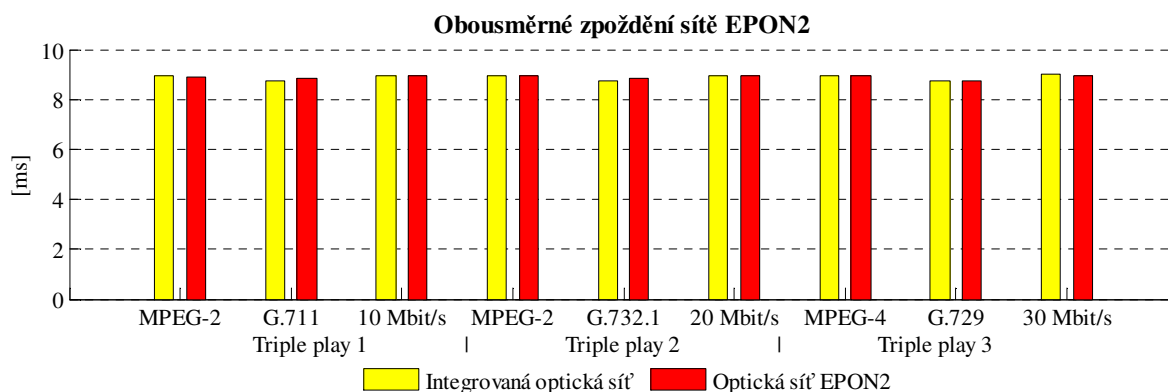
Na obrázcích Obr. 5.20 a Obr. 5.21 jsou zobrazeny grafy výkonnostního testu služeb testů maximálního kolísání zpoždění pro síť EPON2 a DWDM-PON. Vždy první z dvojice sloupců indikuje integrovanou síť, kde jsou aktivní obě zkoumané technologie a druhý aktivitu pouze aktuálně

měřené technologie. V obou grafech jsou u všech hodnot dvojice sloupců vyrovnané, z čehož lze určit, že nasazením dvou technologií na jedno optické vlákno nemá zásadní vzájemný vliv těchto systémů.

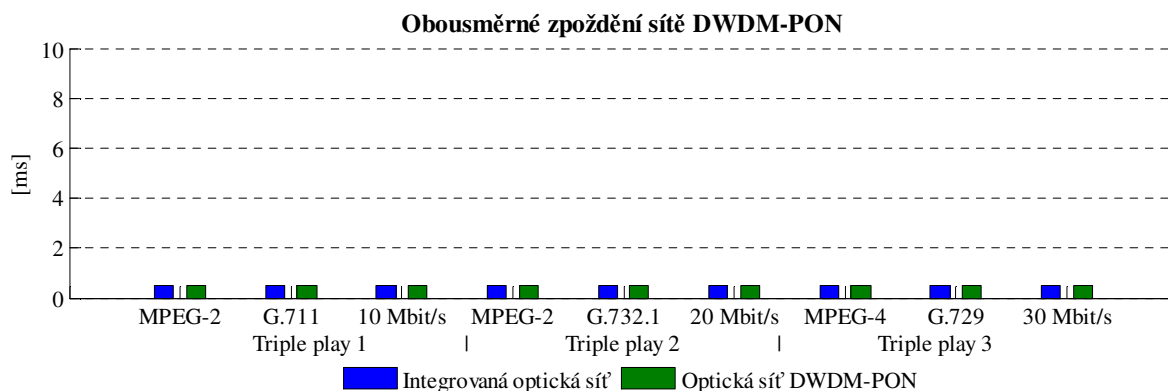


Obr. 5.21 Maximální velikost kolísání zpoždění sítě DWDM-PON.

Grafy na obrázcích Obr. 5.22 a Obr. 5.23 zobrazují hodnoty obousměrného zpoždění měřených na prvcích sítí EPON2 a DWDM-PON. Hodnoty testovaných služeb v rámci jedné sítě jsou ve všech kombinacích velice podobné. A z měřených hodnot lze říci, že dvě odlišné technologie nasazené na jedno optické vlákno nemají na sebe žádný vzájemný vliv.



Obr. 5.22 Obousměrné zpoždění sítě EPON2.



Obr. 5.23 Obousměrné zpoždění sítě DWDM-PON.

V příloze J jsou uvedeny grafy zobrazující hodnoty průměrné propustnosti a ztrátovosti rámců sítě změřené výkonnostním testem služeb standardu ITU- T Y.1564.

6 Simulační program Optiwave OptiSystem 12

OptiSystem je inovativní optický komunikační simulační systém, který umožňuje navrhovat, testovat a optimalizovat jakýkoliv typ optických spojení na fyzické vrstvě širokého spektra optických sítí, od analogových systémů vysílající video po mezikontinentální páteřní síť.

OptiSystem je samostatný produkt, který není závislý na dalších simulačních systémech. Je to simulátor založený na realistickém modelování vláknově optických komunikačních systémů. Disponuje novým výkonným simulačním prostředím a hierarchickým rozdělením komponent a systémů [29].

6.1 Topologie sítě

V simulačním prostředí Optiwave OptiSystem 12 byly vytvořeny tři topologie integrované optické sítě. Všechny vytvořené topologie obsahují stejné prvky, liší se pouze počtem příspěvkových kanálů vysílaných OLT jednotkou EAST 1100 a počtem odpovídajících koncových jednotek EARU 1112. Širokospektrální zdroj záření sloužící pro naladění koncových jednotek na požadované vlnové délky byl u všech topologií totožný. Použité prvky a nastavení systému EPON2 byly ve všech topologiích ponechány ve stejném stavu.

Topologie vytvořené v simulačním programu Optiwave Optisystem:

Topologie A

Jedná se o topologii sítě analogické s reálnou sítí v laboratoři. OLT jednotka EAST 1100 vysílá na pěti příspěvkových kanálech. Aby se simulace přiblížila co nejvíce reálným hodnotám, byly v simulaci vynechány porty číslo 4 a 5, stejně jako v reálné síti.

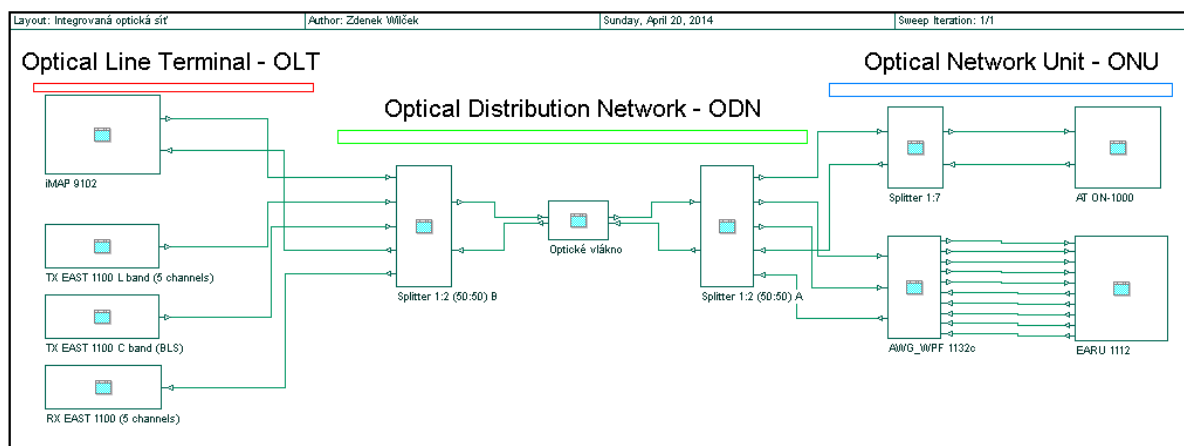
Topologie B

OLT jednotka EAST 1100 vysílá 16 příspěvkových kanálů. Bylo použito prvních 16 kanálů L pásma v sestupném směru a prvních 16 kanálů C pásma ve vzestupném směru.

Topologie C

Poslední topologie obsahuje maximální počet příspěvkových kanálů, které je OLT jednotka EAST 1100 schopna vysílat. Těchto 32 příspěvkových kanálů je vysíláno v rozsahu vlnových délek od 1 574 nm do 1 599 nm v L pásmu pro sestupný směr a ve vzestupném směru v rozsahu 1 533 nm až 1 558 nm v C pásmu.

Topologie sítě je rozdělena do tří bloků, OLT jednotky iMAP 9102 a EAST 1100, distribuční část obsahující rozbočovače, optické vlákno a AWG směrovou odbočnici a poslední část tvoří ONU jednotky AT ON-1000 a EARU 1112. Schéma zobrazující topologii A pro 5 příspěvkových kanálů DWDM-PON síť je zobrazena na obrázku Obr. 6.1. V příloze K jsou uvedena blokové schémata zobrazující topologie B a C.



Obr. 6.1 Integrovaná síť v simulačním prostředí Optiwave OptiSystem.

6.1.1 OLT jednotky

EAST 1100

OLT jednotku EAST 1100 tvoří tři nezávislé bloky. Blokem TX EAST 1100 L band vysílající příspěvkové kanály v sestupném směru, kde počet kanálů je 5, 16 nebo 32, podle vytvořené topologie. Druhý blok slouží jako přijímací části OLT jednotky s počtem přijímačů podle topologie. Posledním blokem je vysílač širokospektrálního zařízení BLS, který je pro všechny vytvořené topologie stejný.

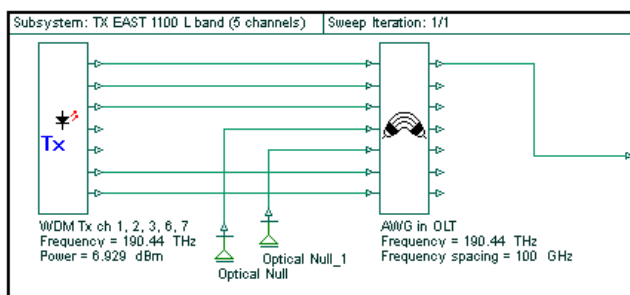
První blok TX EAST 1100 L band je tvořen vysílačem typu WDM Transmitter a jednosměrnou AWG odbočnicí, která slučuje všechny vysílané kanály na jedno optické vlákno. Nastavení WDM vysílačů pro všechny topologie je uvedeno v tabulce Tab. 6.1.

Tab. 6.1 Nastavení WDM vysílačů v topologiích A, B a C.

Parametr	TX EAST 1100 L band (5 kanálů)	TX EAST 1100 L band (16 kanálů)	TX EAST 1100 L band (32 kanálů)	TX EAST 1100 C band (BLS)
Počet kanálů	7	16	32	32
Frekvence [THz]	190,44	190,44	190,44	195,5
Rozteč vlnových délek [GHz]	100	100	100	100
Výkon [dBm/kanál]	6,929	1,887	- 1,131	3,011
Výstupní výkon [dBm]	11,3	11,3	11,3	18
Přenosová rychlost [Mbit/s]	100	100	100	100

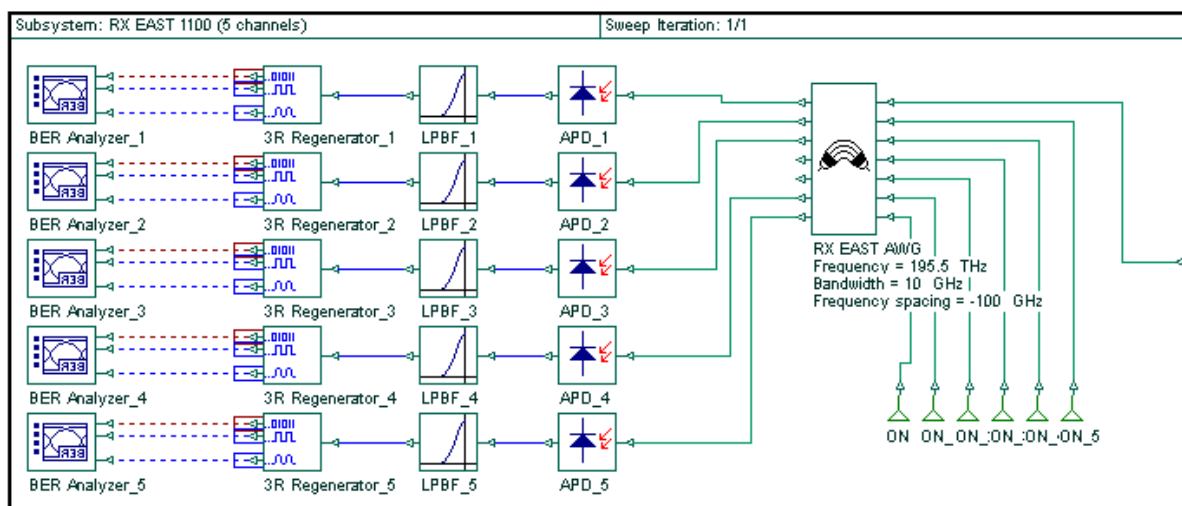
Na obrázku Obr.6.2 je zobrazen WDM vysílač a AWG směrová odbočnice pro topologii A. Výstupní porty 4 a 5 WDM vysílače jsou vynechány, aby byly simulovány co nejdřívejší reálné

podmínky, tzn. že na nevyužité vstupní porty AWG bylo nutné připojit prvky Optical Null, které slouží pouze pro účely simulace a bez nich by nebylo možné korektně spustit simulaci.



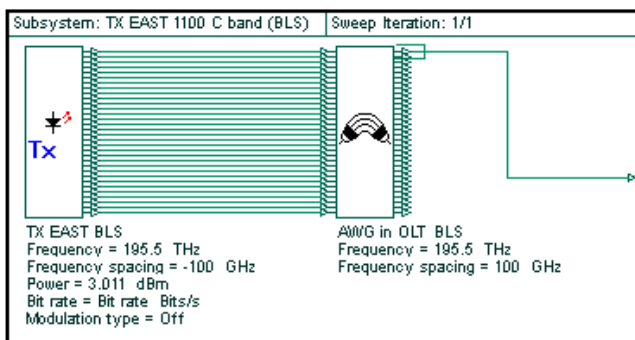
Obr. 6.2 WDM vysílač pro 5 kanálů.

Druhý blok RX EAST 1100 pracuje jako přijímací část OLT jednotky. Obsahuje AWG směrovou odbočnici ve formě demultiplexoru, kde na vstupní port je přivedeno optické vlákno s vysílanými kanály a AWG je rozdělí na jednotlivé výstupní porty. Přijímač je tvořen APD fotodiodou, dolnoproputným Besselovým filtrem, 3R regenerátorem a BER analyzérem.



Obr. 6.3 WDM přijímač pro 5 kanálů.

Na obrázku Obr. 6.3 je zobrazena přijímací část OLT jednotky EAST 1100 pro pět příspěvkových kanálů DWDM-PON systému. Přijímací část pro 16 a 32 kanálů je tvořena stejnými prvky s podobným nastavením, změna je provedena v počtu portů AWG směrovače.

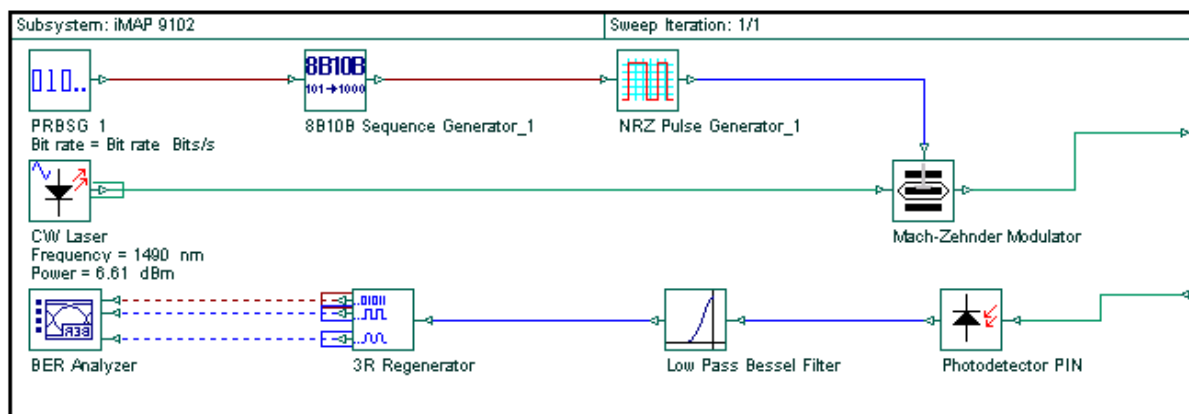


Obr. 6.4 WDM vysílač širokospektrálního záření BLS.

Poslední blok OLT jednotky EAST 1100 je TX EAST 1100 C band (BLS), který reprezentuje širokospektrální vysílání sloužící pro naladění koncových jednotek na požadované vlnové délky. Optiwave OptiSystem neposkytuje prvek vysílající širokospektrální záření, proto BLS zařízení bylo simulováno 32 vlnovými délkami vysílanými WDM vysílačem v C pásmu. Těchto 32 vlnových délek je přivedeno na AWG směrovou odbočnici, která všechny kanály sloučí na jedno optické vlákno. V simulaci tento blok má pouze informativní charakter a nemá žádný vliv na přijímače v koncových jednotkách EARU 1112. Blok širokospektrálního záření je zobrazen na obrázku Obr. 6.4.

iMAP 9102

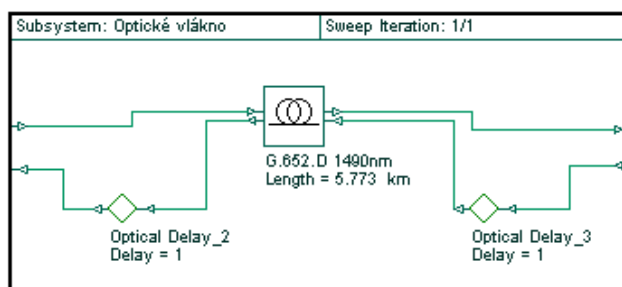
Vysílací část OLT jednotky iMAP 9102 je tvořena prvek CW Laser na vlnové délce 1 490 nm s výstupním výkonem 6,61 dBm. Mach-Zenderovým modulátorem, ke kterému je připojen pulsní generátor bez návratu k nule NRZ. Vysílané data jsou generovány pseudonáhodným bitových generátorem a posledním prvkem, který provádí kódování vstupních bitů podle 8B/10B. Přijímací část OLT jednotky tvoří fotodioda PIN, dolnoproustní Besselův filtr, 3R regenerátor a BER analyzátor. Blokové schéma OLT jednotky iMAP 9102 je zobrazeno na obrázku Obr. 6.5.



Obr. 6.5 OLT jednotka iMAP 9102.

6.1.2 Optická distribuční síť ODN

Distribuční síť tvoří optický rozbočovač 1:2 (50:50) A, ke kterému je připojena směrová odbočnice AWG a optický rozbočovač 1:7. A dále rozbočovač 1:2 (50:50) B, který integruje vysílání OLT jednotek na jedno optické vlákno a jednovidové optické vlákno. Prvky AWG směrová odbočnice a rozbočovač 1:7 připojující koncové jednotky EARU 1112 a AT ON-1000 jsou popsány v kapitole 6.1.3.



Obr. 6.6 Optické vlákno G.652.D a Optical Delay.

Optické rozbočovače 1:2 (50:50) A a B obsahují ideální multiplexory a demultiplexory, ke kterým jsou připojeny optické útlumové články OA (Optical Attenuator). Útlumové články OA jsou nastaveny na reálné hodnoty změřené metodou 1c a uvedené v kapitole 5.2.1. Schémata optických rozbočovačů jsou uvedeny v příloze L. Optické vlákno je tvořeno prvkem Bidirectional Optical Fiber a dvěma prvky Optical Delay, které slouží pouze pro simulační účely. Zajišťují simulaci obousměrného provozu dat. Bylo nutné v nastavení System zvýšit počet iterací na $n + 1$, kde n je počet prvků Optical Delay, viz obrázek Obr. 6.6.

V simulaci bylo využito optické vlákno G.652.D, které je analogické s optickým vláknem použitým v laboratoři. Pro účely simulace byly vytvořeny tři optická vlákna s rozdílnými parametry, podle použité vlnové délky. Nastavení optických vláken je uvedeno v tabulce Tab. 6.2.

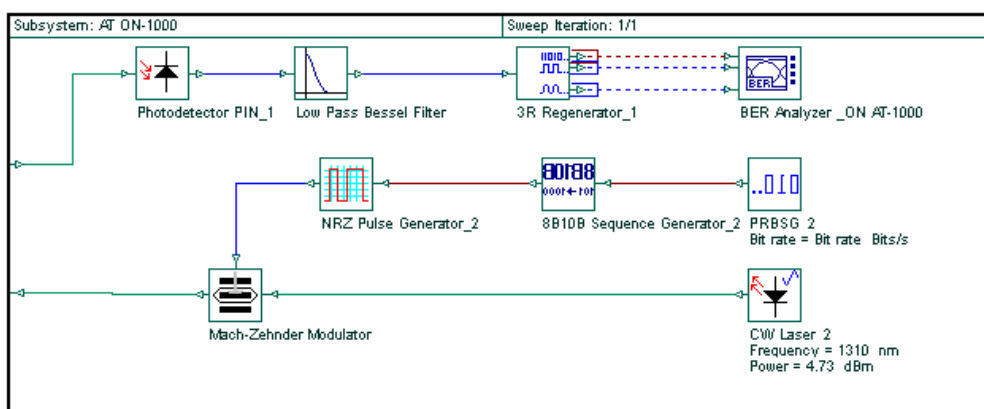
Tab. 6.2 Parametry optických vláken.

Optické vlákno	G.652.D 1 310 nm	G.652.D 1 490 nm	G.652.D 1 550 nm
Vlnová délka [nm]	1 310	1 490	1 550
Délka [m]	5 773	5 773	5 773
Útlum [dB/km]	0,35	0,25	0,25
Disperze [ps/nm/km]	3	16	16

6.1.3 Optické síťové jednotky ONU

Poslední blok simulovaných topologií je tvořen koncovými jednotkami ONU a prvky, které připojují jednotky ONU do sítě. Rozbočovač 1:7 v systému EPON2 a AWG směrová odbočnice v systému DWDM-PON. V topologii A tvoří AWG a koncové jednotky EARU 1112 dva různé bloky, ale v topologiích B a C jsou tyto dva bloky sloučeny z důvodu jednoduchosti a přehlednosti schématu.

Na obrázku Obr. 6.7 je zobrazen blok zobrazující koncovou jednotku AT ON-1000. Vysílací část je tvořena CW laserem vysílající na vlnové délce 1 310 nm s výstupním výkonem 8 dBm, který je připojen do Mach-Zenderova modulátoru (M-Z M), do kterého je přiveden výstup pulsního generátoru bez návratu k nule (NRZ PG). Na vstup NRZ PG je přivedena náhodná sekvence bitů z generátoru PRBSG.

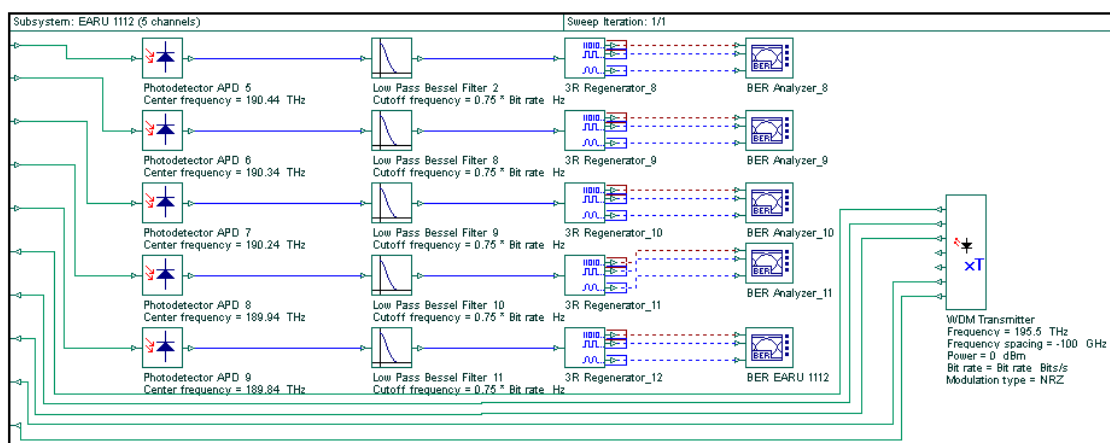


Obr. 6.7 Koncová jednotka AT ON-1000 systému EPON2.

Přijímací část bloku AT ON-1000 tvoří PIN fotodioda nastavená pro příjem signálu na vlnové délce 1 490 nm, dolnoprostupný Besselův filtr, 3R regenerátor a BER analyzář.

Blok reprezentující AWG směrovou odbočnicí WPF 1132c je uveden v příloze L. Obsahuje tři jednosměrné AWG odbočnice, dvě ve funkci demultiplexoru a jednu ve funkci multiplexoru. První ve formě demultiplexoru slouží pro rozdělení širokospektrálního záření v C pásmu na požadované koncové jednotky. Druhé AWG demultiplexuje příspěvkové kanály přenášející užitečná data na koncové jednotky EARU. V tomto prvku se počet portů mění v závislosti na počtu výstupních portů v OLT jednotce dané sestavenou topologií. Poslední směrová odbočnice multiplexuje vstupní kanály vysílaných koncovými jednotkami. Zde se opět mění počet portů v závislosti na topologii.

Poslední blok topologie je přijímací a vysílací část koncových jednotek EARU 1112, na obrázku Obr. 6.8 je zobrazen blok jednotek EARU 1112 pro topologii A. Přijímací část bloku je tvořena APD fotodiodou, dolnoprostupným Besselovým filtrem, 3R regenerátorem a BER analyzářem. Počet přijímacích částí je v závislosti na sestavené topologii. Vysílací část tvoří WDM vysílač s požadovaným počtem výstupních portů s počáteční vysílanou vlnovou délkou 195,5 THz a rozestupy mezi jednotlivými kanály 100 GHz.



Obr. 6.8 Koncové jednotky EARU 1112.

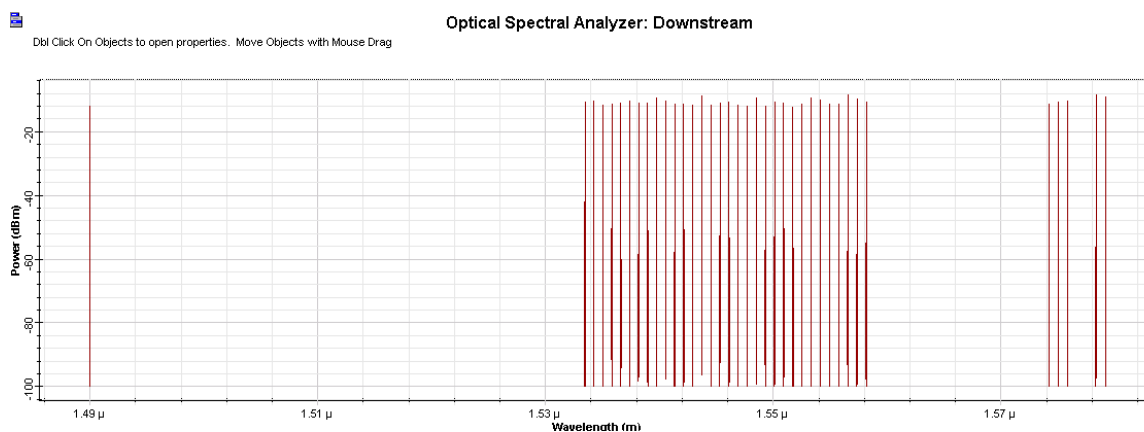
V topologiích B a C byly bloky AWG směrové odbočnice a koncových jednotek EARU 1112 sloučeny do jednoho bloku, aby bylo dosaženo zvýšené přehlednosti schématu obsahující 16 a 32 kanálů. Tyto bloky jsou uvedeny v příloze L.

6.2 Spektrální analýza

První měření simulovaných topologií bylo provedeno pomocí spektrálního analyzáru OSA (Optical Spectral Analyzer). Na rozdíl od reálného měření, v simulačním prostředí bylo možné připojit spektrální analyzář na výstupní port společně s optickým vláknem. Z tohoto důvodu je nutné upozornit na rozdílné hodnoty mezi reálným měřením optického spektra, kde bylo na spektrální analyzátor připojeno pouze 10 % vysílaného optického výkonu OLT jednotkou v sestupném směru a EARU 1112 jednotkami ve vzestupném přenosu dat.

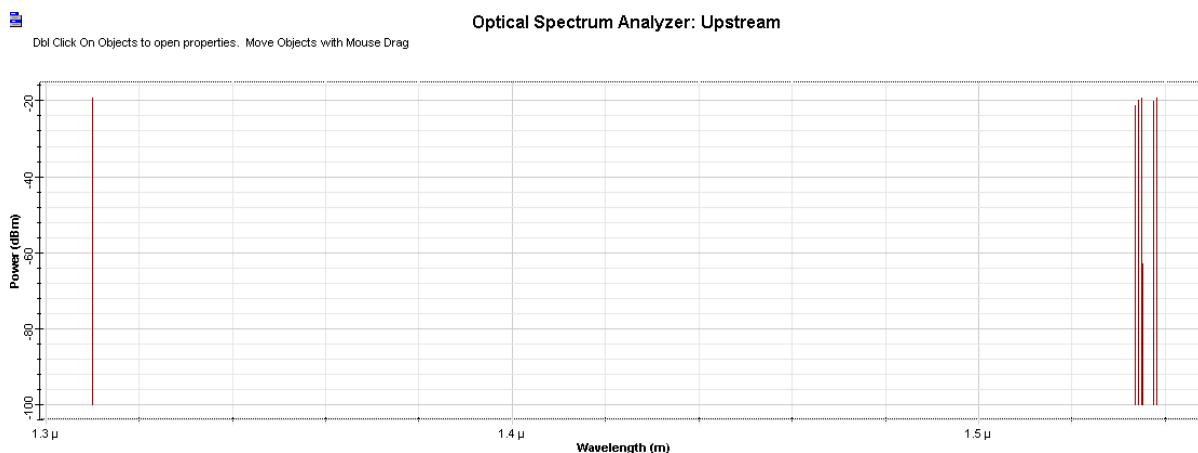
6.2.1 Spektrální analýza v sestupném směru

Spektrální analýza topologie A, která obsahuje pět příspěvkových kanálů systému DWDM-PON byla provedena v sestupném směru přenosu dat na výstupním portu rozbočovače 1:2 (50/50) B, který integruje vysílání OLT jednotek EAST 1100 a iMAP 9102 na jedno optické vlákno.



Obr. 6.9 OSA Sestupný směr na výstupu z rozbočovače 1:2 (50/50) B

Na obrázku Obr. 6.9 lze vidět kanál v S pásmu na vlnové délce 1 490 nm sloužící pro komunikaci OLT jednotky systému EPON2 v sestupném směru. V C pásmu v rozsahu vlnových délek 1 533 nm - 1 558 nm je zobrazeno 32 kanálů, které reprezentují širokospektrální záření BLS OLT jednotky EAST 1100, pomocí kterého se naladí bezbarvé koncové jednotky EARU 1112 na požadované vlnové délky. V simulaci toto BLS záření má pouze informativní charakter a neslouží pro naladění koncových jednotek. Posledních pět kanálů v L pásmu reprezentuje vysílání koncových jednotek EARU 1112. Vynecháním 4. a 5. kanálu bylo docíleno, co nejdokladnější simulace reálných podmínek. Hodnoty Power Peak v zaznamenaném spektru odpovídají 100 % vysílaného výkonu OLT jednotkami, na rozdíl od reálného měření, kde hodnoty Power Peak změřené spektrálním analyzátozem odpovídají pouze 10 % vysílaného výkonu OLT jednotek.



Obr. 6.10 OSA Vzestupný směr na výstupu z rozbočovače 1:2 (50/50) A.

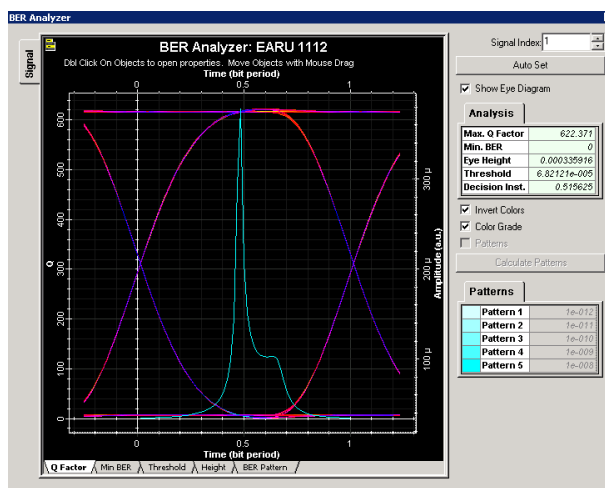
Optické spektrum ve vzestupném směru bylo měřeno na výstupním portu rozbočovače 1:2 (50/50) A, který integruje na jedno optické vlákno datový provoz vysílaný koncovými jednotkami AT ON-1000 a EARU 1112, viz obrázek Obr. 6.10. První kanál na hodnotě vlnové délky 1 310 nm indikuje vysílání koncových jednotek AT ON-1000 a v C pásmu na vlnových délkách 1 533 nm až

1 538 nm lze vidět pět příspěvkových kanálů pěti koncových jednotek EARU 1112. I zde byly vynechány kanály číslo 4 a 5. Opět je nutné zdůraznit, že hodnoty Power Peak změřené v simulaci odpovídají 100 % vysílaného výkonu koncových jednotek, na rozdíl od reálného měření, kde je měřeno optické spektrum pouze na 10 % výkonu.

V příloze L jsou uvedeny spektrální analýzy ve vzestupném směru na výstupu z AWG směrové odbočnice zobrazující pět příspěvkových kanálů vysílaných pěti jednotkami EARU 1112 a spektrum v sestupném směru na výstupním portu číslo 1 AWG směrové odbočnice zobrazující dva kanály, reprezentující vysílání OLT jednotky na vlnové délce 1 574 nm a kanál na vlnové délce 1 533 nm, který slouží pro naladění koncové jednotky. Spektrální analýzy vzestupného a sestupného směru přenosu dat pro topologie B a C jsou uvedeny v příloze L uvedeny také.

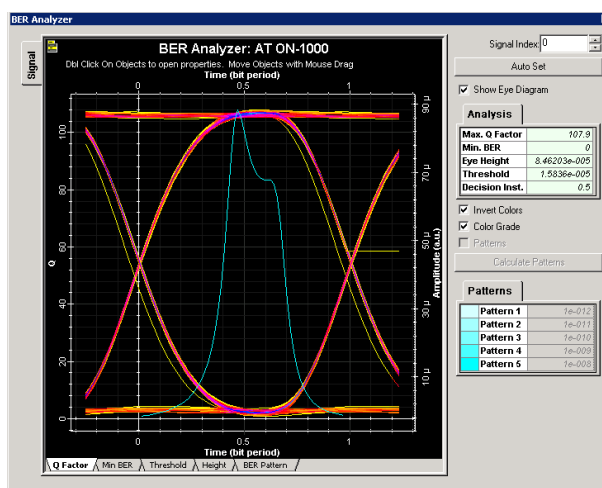
6.3 Diagramy oka

Druhým testem v simulačním prostředí Optiwave OptiSystem 12 bylo zobrazení diagramu oka na koncových jednotkách AT ON-1000 a EARU 1112. Diagram oka je vytvořen prvkem BER Analyzer, který je připojen na 3R regenerátor v přijímací části koncových jednotek. Následující obrázky Obr. 6.11 a Obr. 6.12 zobrazují diagramy oka pro koncové jednotky systémů DWDM-PON a EPON2.



Obr. 6.11 Diagram oka pro jednotku EARU 1112 na kanále 1.

První obrázek patří jednotce EARU 1112 komunikující na kanále číslo 1, tzn. vysílá na vlnové délce 1 533,4 nm a přijímá na vlnové délce 1 574,1 nm. Simulace byla provedena při přenosové rychlosti 100 Mbit/s na optickém vlákně s parametry pro vlnovou délku 1 550 nm. Z diagramu oka pro koncovou jednotku EARU 1112 lze určit, že zpracovaný signál BER Analyzárem je vysoce kvalitní. Otevřenost oka, která určuje rozeznatelnost logické 1 a 0 je téměř maximální, z čehož plyne, že bitová chybovost BER je nulová.

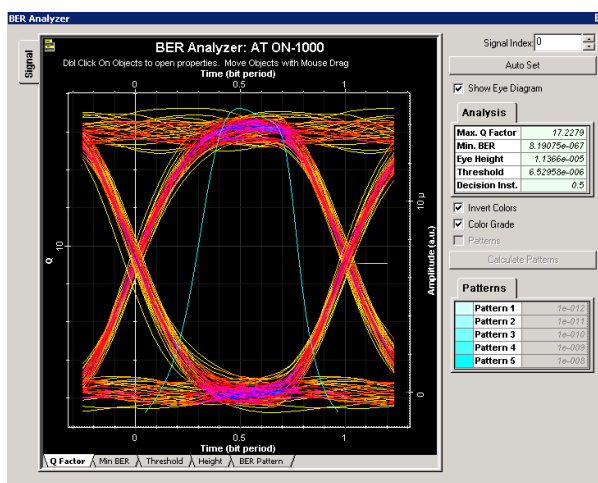


Obr. 6.12 Diagram oka pro koncovou jednotku AT ON-1000.

Obrázek Obr. 6.12 zobrazující diagram oka patří koncové jednotce AT ON-1000. Zde lze vidět, že již není tak kvalitní jako u jednotky EARU 1112. Otevřenost oka již není, tak velká jako u jednotky EARU 1112, ale i přes to BER analyzátor nezaznamenal žádnou bitovou chybovost. Diagram oka byl změřen při přenosové rychlosti 1,25 Gbit/s a optickým vláknem s parametry pro vlnovou délku 1 490 nm.

6.4 Diagramy oka při zvyšování útlumu trasy

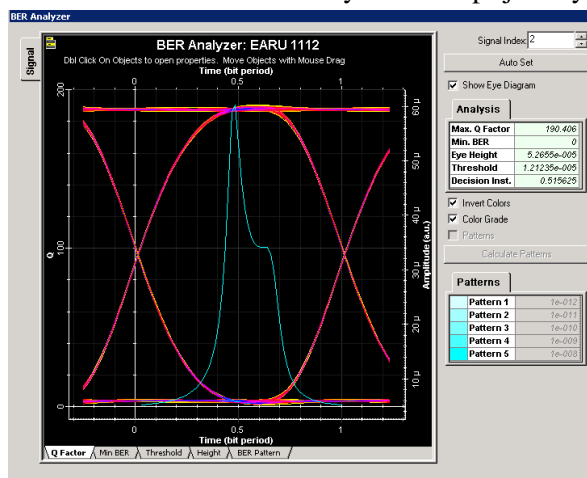
Posledním testem bylo zkoumání diagramu oka koncových jednotek v závislosti na hodnotě vloženého útlumu do optické trasy. Do obou směrů přenosu dat byly vloženy útlumové články OA (Optical Attenuator), které reprezentovaly digitální atenuátor FVA 60 B použitý v reálném měření, na kterém byla zvyšována hodnota útlumu. A následně byl proveden výpočet simulace se zobrazením diagramů oka na koncových jednotkách AT ON-1000 a EARU 1112.



Obr. 6.13 Koncová jednotka AT ON-1000 při vloženém útlumu + 8 dB.

Při zvýšení vloženého útlumu do trasy na optických atenuátorech OA na hodnotu + 8 dB byla zaznamenána u koncové jednotky bitová chybovost. Ale kvalita přijímaného byla vysoká, i když na diagramu oka lze vidět snižující rozevřenost oka a zvětšující se hodnotu kolísání zpoždění, viz obrázek Obr. 6.13 . Při stejné hodnotě zvýšení hodnoty útlumu a pro přenosovou rychlost 100 Mbit/s byl

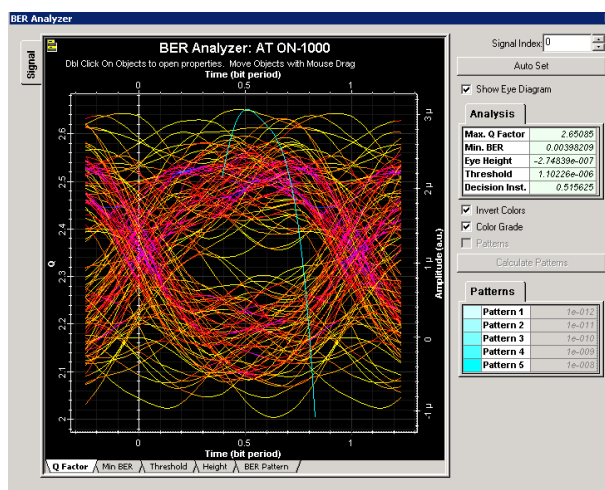
zobrazen diagram oka koncové jednotky EARU 1112. Na obrázku Obr. 6.14 lze vidět, že při zvýšení vložného útlumu o + 8 dB nedochází k žádné bitové chybovosti a přijímaný signál je vysoce kvalitní.



Obr. 6.14 Koncová jednotka EARU 1112 při vložném útlumu + 8 dB.

V tomto bodě je již zřejmý rozdíl mezi provedenou simulací a reálným měřením. Zatímco v reálném měření došlo při zvýšení vložného útlumu o 8,2 dB k rozpadu všech koncových jednotek EARU 1112 v provedené simulaci nebyla zaznamenána žádná bitová chybovost. U koncové jednotky AT ON-1000, která v simulaci při hodnotě vložného útlumu + 8 dB vykazuje zvýšenou bitovou chybovost se dá její stav porovnat s reálným měřením, protože při této hodnotě byly ve spojení s OLT jednotkou ještě všechny koncové jednotky.

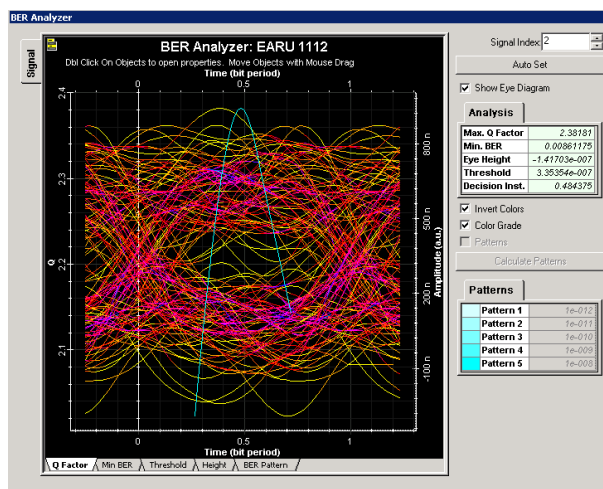
Na obrázku Obr. 6.15 je zobrazen diagram oka koncové jednotky AT ON-1000 v mezním stavu těsně před rozpadem spojení. Hodnota vložného útlumu je + 16 dB. Přijímaný signál je vysoce zkreslen a bitová chybovost je značná. Při zvýšení útlumu na + 17 dB dochází k rozpadu spojení mezi ONU a OLT jednotkou. V reálném měření došlo k rozpadu spojení mezi všemi koncovými jednotka v hodnotě vložného útlumu + 11,3 dB, což činí rozdíl mezi simulací a reálným měřením přibližně + 4,7 dB ve prospěch simulace.



Obr. 6.15 Koncová jednotka AT ON-1000 při vložném útlumu + 16 dB.

Obrázek Obr. 6.16 reprezentuje diagram oka koncové jednotky EARU 1112 komunikující s OLT jednotkou na prvním kanále DWDM-PON sítě. Diagram oka je vysoce zkreslen, otevřenost oka

je téměř minimální a bitová chybovost značná. Obrázek rozbrazuje stav přijímaného signálu těsně před rozpadem spojení mezi koncovou jednotkou a OLT.



Obr. 6.16 Koncová jednotka EARU 1112 při vloženém útlumu + 28 dB.

Tento diagram oka je zaznamenán při hodnotě vloženého útlumu + 28 dB, který se od reálného měření velice liší. V reálném měření došlo k rozpadu spojení mezi všemi koncovými jednotkami a OLT jednotkou DWDM-PON sítě při hodnotě + 7 dB. To znamená, že rozdíl mezi reálným měřením a simulací je + 21 dB ve prospěch simulace.

Změřené rozdíly dosahu sítě, resp. hodnoty vloženého útlumu mezi reálným měřením a simulací jsou způsobeny nepřesným nastavením použitých prvků v simulaci. Navrhnutá síť v simulačním prostředí Optiwave Optisystem je velmi komplexní a obsahuje velkou řadu použitých prvků, které zanášejí do měření nepřesnosti, proto jsou změřené data ve výsledku tolik odlišná od reálných dat. A nastavení hodnot parametrů odpovídající reálným podmínkám je velice obtížné, protože společnosti vyrábějící použité prvky obvykle tak detailní informace o svých výrobcích neposkytují.

V příloze N jsou uvedeny diagramy oka se zvyšující se hodnotnou vloženého útlumu do optické trasy pro obě koncové jednotky AT ON-1000 a EARU 1112 systémů EPON2 a DWDM-PON.

Závěr

Cílem bakalářské práce bylo vytvořit vláknově optickou integrovanou síť sloučením dvou generací optických sítí na jedno optické vlákno, čímž vznikl speciální typ optické sítě. Topologie vytvořené sítě byla inspirována prací pana Ing. Ladislava Peřka z firmy Slovak Telekom, který v rámci projektu OASE vytvořil migrační scénář přechodu z GPON sítě na TWDM-PON síť. Laboratoř přístupových sítí N311 na katedře telekomunikační techniky při VŠB-TUO nedisponuje těmito technologiemi, proto byla integrovaná síť vytvořena z technologií EPON2 a DWDM-PON, kterými je laboratoř vybavena.

V teoretické části se práce zabývá popisem pasivní optické sítě EPON na bázi časově děleného multiplexu, popisem principu přenosu dat a vysvětlením sestavní spojení mezi OLT a ONU. Dále je popsána síť nové generace WDM-PON, která je založena na vlnově děleném multiplexu. V této části je uvedeno rozdělení WDM sítí podle rozteče vlnových délek na CWDM a DWDM, a také popis architektur WDM-PON sítí. Poslední kapitola teoretické části je zaměřena na síť nové generace, konkrétně na standard IEEE 802.3 av a speciální typy sítí SUCCESS a SARDANA.

V praktické části byla v laboratoři sestavena integrovaná síť sloučením technologií EPON2 a DWDM-PON na jedno optické vlákno. První měření sítě bylo provedeno pomocí spektrálního analyzáru FTB 5240B od firmy EXFO. Druhým měřením byla zjištěna útlumová bilance sítě pomocí reflektogramu FTB 7200D. Dále bylo provedeno měření maximálního dosahu sítě pomocí digitálního atenuátoru byl zvyšován vložný útlum optické sítě. První odpojená jednotka byla od systému DWDM-PON a po zvýšení o další 4 dB, v přepočtu přibližně 16 km došlo k odpojení první koncové jednotky EPON2 systému.

Po těchto třech měřeních byl proveden hlavní bod praktické části. A to pomocí testovacích metod RFC 2544 a ITU-T Y.1564 změření parametrů sítě s cílem zjistit, zdali se jednotlivé systémy nasazené na jedno optické vlákno vzájemně ovlivňují nebo ne. Měření bylo provedeno pomocí měřicího přístroje FTB 860 od firmy EXFO, který tyto dva testy obsahuje. Testy byly provedeny celkem na čtyřech variantách. V první a druhé variantě byl měřicí přístroj připojen na prvky sítě EPON2, kde nejprve byla OLT jednotka technologie DWDM-PON aktivní a poté byla deaktivována. Třetí a čtvrtá varianta měření probíhala analogicky s tím rozdílem, že FTB 860 byl připojen na prvky systému DWDM-PON.

Změřená data byla zpracována do grafů, ze kterých lze jednoznačně určit, že nasazení dvou odlišných technologií na jedno optické vlákno nemá zásadní vzájemný vliv těchto dvou systémů. Důležité je ovšem zmínit, že veškeré měření bylo provedeno na optickém vlákně délky 5 773 m a při aktivitě pěti koncových jednotek u každého systému bez jakéhokoliv dalšího datového zatížení, kromě testovacího provozu generovaného přístrojem FTB 860.

V druhé části bakalářské práce byly vytvořeny v simulačním prostředí Optiwave Optisystem 12 tři integrované optické sítě. První analogická s reálnou sítí sestavenou v laboratoři, druhá a třetí byla upravena na 16 a 32 příspěvkových kanálů DWDM-PON sítě. Nastavení správných hodnot požadovaných parametrů v simulačním programu bylo velice obtížné a ne vždy je možné správně parametry zadat, protože detailní informace o využitých součástích v prvcích použitých systémů nejsou veřejně dostupné a firmy tyto specifické informace obvykle neposkytují. Z těchto důvodů nelze brát výsledky simulace jako závazné, spíše informativní a k vytvoření obecného přehledu.

V simulaci integrované sítě pro pět příspěvkových kanálů DWDM-PON bylo provedeno měření maximálního dosahu sítě, které bylo porovnáno s daty získanými reálným měřením. Rozdíly mezi reálnými hodnotami a daty získanými simulací jsou značné. U DWDM-PON rozdíl činí přibližně + 20 dB ve prospěch simulace, což je obrovský rozdíl, který byl způsoben nastavením odlišných parametrů a hodnot od reálné sítě. V systému EPON2 již rozdíl nebyl tak markantní, zde činil + 5 dB ve prospěch simulace. Jako poslední měření provedené v simulaci byla spektrální analýza všech vytvořených integrovaných sítí v sestupném i vzestupném směru přenosu dat.

Tato bakalářská práce může sloužit jako vhodný podklad pro detailnější studium integrovaných optických sítí. Například nasazením různých typů optických zesilovačů a sestavením integrované sítě pomocí jiných technologií než byly použity v této práci.

Použitá literatura

- [1] AZADEH, Mohammad. *Fiber optics engineering*. New York: Springer, c2009, xii, 374 p. Optical networks series. ISBN 14-419-0303-8.
- [2] BRILLANT, Avigdor. *Digital and analog fiber optic communications for CATV and FTTx applications*. Bellingham: SPIE Press ; Wiley Interscience /, 2008, xxxiv, 1055 s. ISBN 978-0-8194-6757-7.
- [3] IEEE Standard for Information technology: Telecommunications and information exchange between systems--Local and metropolitan area networks-- Specific requirements Part 3: Carrier Sense Multiple Access with Collision Detection (CSMA/CD) Access Method and Physical Layer Specifications - Section Five. In: [online]. IEEE Std 802.3, 2005. DOI: 10.1109/IEEESTD.2005.243262.
- [4] KRAMER, Glen, Biswanath MUKHERJEE a Ariel MAISLOS. Ethernet Passive Optical Network (EPON). In: [online]. Dostupné z: http://users.encs.concordia.ca/~assi/courses/encs6811/epon_wiley.pdf.
- [5] LAM, Cedric F. *Passive optical networks: principles and practice*. Boston: Elsevier/Academic Press, c2007. ISBN 01-237-3853-9.
- [6] ITU-T G.983.3. *SERIES G: TRANSMISSION SYSTEMS AND MEDIA, DIGITAL SYSTEMS AND NETWORKS Digital sections and digital line system – Optical line systems for local and access networks: A broadband optical access system with increased service capability by wavelength allocation*. Geneva, : INTERNATIONAL TELECOMMUNICATION UNION, 2001. Dostupné z: <https://www.itu.int/rec/T-REC-G.983.3-200103-I/en>.
- [7] ITU-T G.984.1. *SERIES G: TRANSMISSION SYSTEMS AND MEDIA, DIGITAL SYSTEMS AND NETWORKS Digital sections and digital line system – Optical line systems for local and access networks: Gigabit-capable passive optical networks (GPON): General characteristics*. Geneva, : INTERNATIONAL TELECOMMUNICATION UNION, 2009. Dostupné z: <http://www.itu.int/rec/T-REC-G.984.1-200803-I/en>.
- [8] RAATIKAINEN, Sami Lallukka. *Passive optical networks: transport concepts*. Espoo: VTT, 2006. ISBN 95-138-6706-4.
- [9] DUTTA, Achyut K., N. DUTTA a M. FUJIWARA. *WDM technologies: optical networks : volume III*. Boston: Elsevier Academic Press, c2004, xix, 315 p. ISBN 01-222-5263-2.
- [10] ITU-T G.694.1. *SERIES G: TRANSMISSION SYSTEMS AND MEDIA, DIGITAL SYSTEMS AND NETWORKS Transmission media and optical systems characteristics – Characteristics of optical systems: Spectral grids for WDM applications: DWDM frequency grid*. Geneva, : INTERNATIONAL TELECOMMUNICATION UNION, 2012. Dostupné z: <http://www.itu.int/rec/T-REC-G.694.1-201202-I/en>.
- [11] PRAT, Josep. *Next-generation FTTH passive optical networks*. New York: Springer, 2008, p. cm. ISBN 978-140-2084-690.

-
- [12] ITU-T G.652. *SERIES G: TRANSMISSION SYSTEMS AND MEDIA, DIGITAL SYSTEMS AND NETWORKS Transmission media and optical systems characteristics – Optical fibre cables: Characteristics of a single-mode optical fibre and cable*. Geneva,: INTERNATIONAL TELECOMMUNICATION UNION, 2009. Dostupné z: <http://www.itu.int/rec/T-REC-G.652-200911-I/en>.
- [13] ITU-T G.694.2. *SERIES G: TRANSMISSION SYSTEMS AND MEDIA, DIGITAL SYSTEMS AND NETWORKS Transmission media characteristics – Characteristics of optical components and subsystems: Spectral grids for WDM applications: CWDM wavelength grid*. Geneva,: INTERNATIONAL TELECOMMUNICATION UNION, 2004. Dostupné z: <http://www.itu.int/rec/T-REC-G.694.2-200312-I>.
- [14] MUKHERJEE, Biswanath. *Optical WDM networks*. New York: Springer, c2006, xliii, 953 p. ISBN 978-038-7290-553.
- [15] LEIJTENS, Xaveer J. M., Berndt KUHLOW, Meint K. SMIT, S. YAM, E. HU, K. SHRIKHANDE a L.G. KAZOVSKY. Arrayed Waveguide Gratings: A Next-Generation Hybrid WDM/TDM Optical Access Network Architecture. *Wavelength Filters in Fibre Optics*. Springer Berlin Heidelberg, 2006, vol. 28, issue 4, s. 125. DOI: 10.1007/3-540-31770-8_5.
- [16] AN, F.-T., K.S. KIM, D. GUTIERREZ, S. YAM, E. HU, K. SHRIKHANDE a L.G. KAZOVSKY. SUCCESS: A Next-Generation Hybrid WDM/TDM Optical Access Network Architecture. *Journal of Lightwave Technology*. 2004, vol. 22, issue 11, s. 2557-2569. DOI: 10.1109/JLT.2004.836768.
- [17] TANAKA, K., A. AGATA, Y. HORIUCHI, S. YAM, E. HU, K. SHRIKHANDE a L.G. KAZOVSKY. IEEE 802.3av 10G-EPON Standardization and Its Research and Development Status: A Next-Generation Hybrid WDM/TDM Optical Access Network Architecture. *Journal of Lightwave Technology*. 2010, vol. 28, issue 4, s. 651-661. DOI: 10.1109/JLT.2009.2038722.
- [18] AN, F.-T., K.S. KIM, D. GUTIERREZ, S. YAM, E. HU, K. SHRIKHANDE a L.G. KAZOVSKY. SUCCESS: A Next-Generation Hybrid WDM/TDM Optical Access Network Architecture. *Journal of Lightwave Technology*. 2004, vol. 22, issue 11, s. 2557-2569. DOI: 10.1109/JLT.2004.836768.
- [19] PRAT, Joseph, J. A. LAZARO, P. CHANCLOU, R. SOILA, P. VELANAS, A. TEIXEIRA, G. TOSI BELEFFI, I. TOMKOS a K. KANONAKIS. Passive Optical Network for Long-Reach Scalable and Resilient Access. In: EDITORS IVANA PODNAR ŽARKO, Boris Vrdoljak. *ConTEL 2009: proceedings of the 10th International Conference on Telecommunications, Zagreb, Croatia, June 8-10, 2009*. Zagreb: University of Zagreb, Faculty of Electrical Engineering and Computing, 2009, 271 - 275. ISBN 9789531841306.
- [20] LG-NORTEL. *Ethernet Access 1100: System Description*. 4. vyd. Korea, 2010.
- [21] ALLIED TELESIS NETWORKS. *ATI Series: Feature Guide*. 14. vyd. 2010.
- [22] FIBERXON. *SC Receptacle SFP GE-PON OLT Transceiver FTM-9712S-SL20(E)(G): (IEEE 802.3ahTM-2004 1000Base-PX20-D)*. Santa Clara, 2006. Dostupné z: <http://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/284375/SOURCE/FTM-9712S-SL20.html>
-

-
- [23] LÁTAL, Jan a Petr KOUDELKA. *Telekomunikační sítě: Optické přístupové sítě OAN na bázi technologie EPON a jejich integrita*. Ostrava: VŠB-TUO, 2012.
- [24] ALLIED TELESIS INC. *AT ON-1000: Installation Guide*. 2006.
- [25] PROFIBER NETWORKING. *AXS 200-850: Quick Reference Guide*. 2010. Dostupné z: <http://www.profiber.eu/files/AXS%20200-850%20Quick%20Reference%20Guide-2.pdf>
- [26] EXFO INC. *FTB-860 NetBlazer Series Ethernet Testers*. Canada, 2013. Dostupné z: http://www.exfo.com/Documents/TechDocuments/Specification_Sheets/EXFO_spec-sheet_FTB-860-v8_en.pdf.
- [27] ITU-T G.989.1. *SERIES G: TRANSMISSION SYSTEMS AND MEDIA, DIGITAL SYSTEMS AND NETWORKS Digital sections and digital line system – Optical line systems for local and access networks: 40-Gigabit-capable passive optical networks (NG-PON2): General requirements*. Geneva: International Telecommunication Union, 2013. Dostupné z: <https://www.itu.int/rec/T-REC-G.989.1-201303-I/en>
- [28] JAREŠ, Petr. Diagnostika přenosových systémů a sítí využívajících technologii Ethernet. In: [online]. Praha : České vysoké učení technické v Praze Fakulta elektrotechnická. Dostupné z: http://data.cedupoint.cz/oppa_e-learning/2_KME/152.pdf.
- [29] OPTIWAVE. *OptiSystem Getting Started: Optical Communication System Design Software*. 12. vyd. Ottawa, 2013.
- [30] ITU-T G.987.1. *SERIES G: TRANSMISSION SYSTEMS AND MEDIA, DIGITAL SYSTEMS AND NETWORKS Digital sections and digital line system – Optical line systems for local and access networks: 10-Gigabit-capable passive optical networks (XG-PON): General requirements*. Geneva, : INTERNATIONAL TELECOMMUNICATION UNION, 2010. Dostupné z: <https://www.itu.int/rec/T-REC-G.987.1-201001-I/en>.

Seznam příloh

Příloha.A:	Popis rozvodných skříní R-A N311 a R-B N311	i
Příloha.B:	Detailní schéma sestavené topologie.....	ii
Příloha.C:	Reflektograf pro vlnovou délku 1 310 nm	iii
Příloha.D:	Optické spektra ve vzestupném směru při zvyšování vloženého útlumu	iv
Příloha.E:	Tabulky hodnot ve vzestupném směru při zvyšování hodnoty útlumu	viii
Příloha.F:	RFC 2544 - tabulky	ix
Příloha.G:	RFC 2544 - Grafy.....	x
Příloha.H:	ITU-T Y.1564 Konfigurační test služeb - tabulky	xi
Příloha.I:	ITU-T Y.1564 Výkonnostní test služeb - Tabulky.....	xii
Příloha.J:	ITU-T Y.1564 Výkonnostní test služeb - Grafy.....	xiv
Příloha.K:	Blokové schéma topologie B a topologie C	xv
Příloha.L:	Schémata použitých bloků v simulaci	xvi
Příloha.M:	Spektrální analýzy v simulačním prostředí	xvii
Příloha.N:	Diagramy při zvyšování hodnoty vloženého útlumu.....	xix

Součástí BP je CD.

Adresářová struktura přiloženého CD:

1. Elektronická verze bakalářské práce
2. Simulace integrované optické sítě

Seznam obrázků

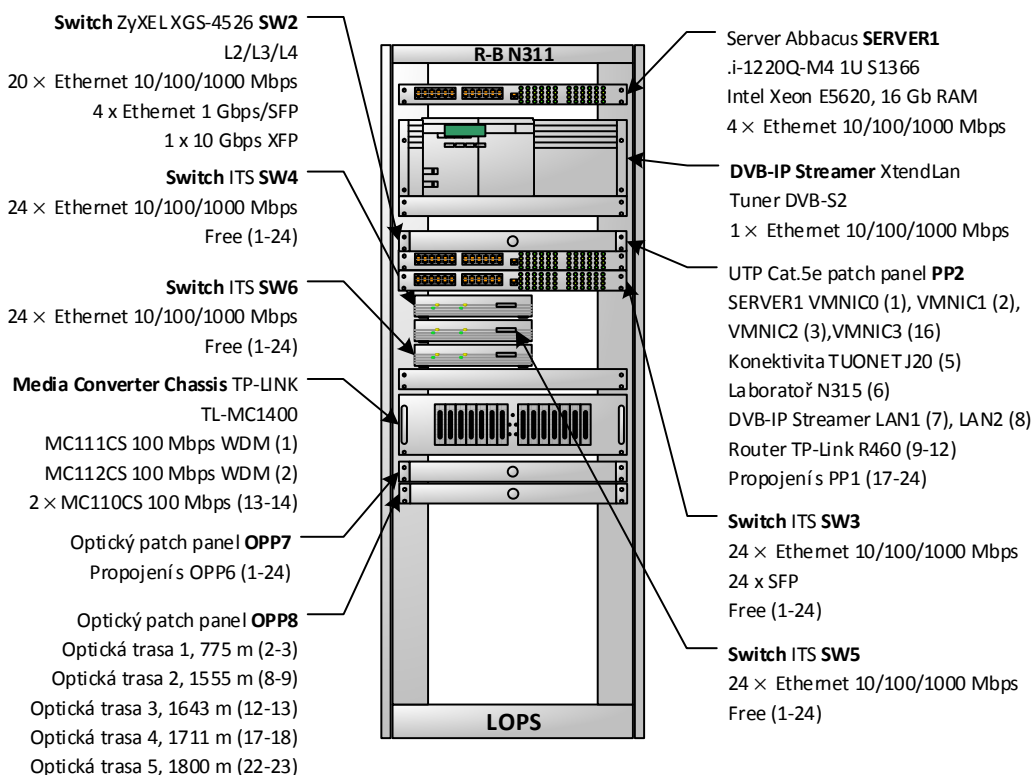
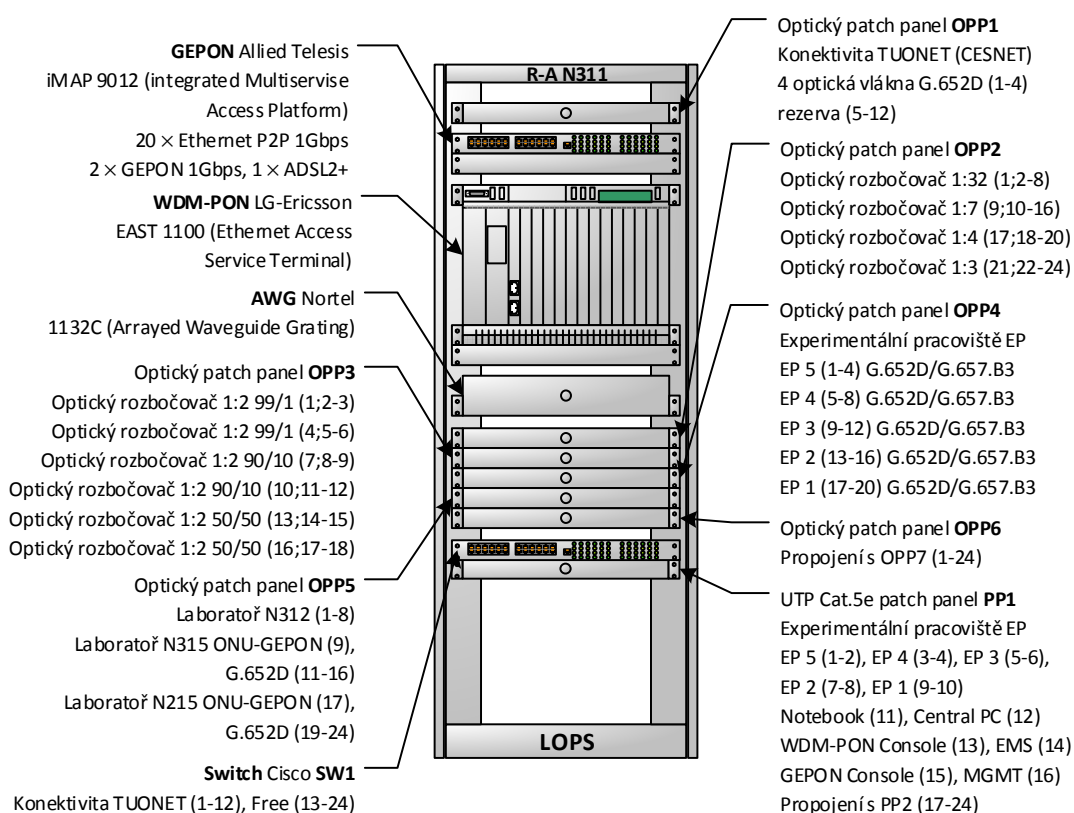
<i>Obr. 1.1 Sestupný směr přenosu dat v EPON sítích [4].</i>	2
<i>Obr. 1.2 Vzestupný směr přenosu dat v EPON sítích [4].</i>	3
<i>Obr. 1.3 Standardní formát ethernetového rámce [5].</i>	3
<i>Obr. 1.4 P2MP ethernetové vrstvy v EPON [5].</i>	4
<i>Obr. 1.5 a) Protokolová jednotka MPCPDU, b) Operační kódy MPCPDU [5].</i>	6
<i>Obr. 1.6 Proces automatického zjišťování ONU jednotek [5].</i>	7
<i>Obr. 1.7 Synchronizační proces pomocí zpráv Gate a Report [5].</i>	7
<i>Obr. 2.1 WRPON a WPON [8].</i>	9
<i>Obr. 2.2 CWDM [9].</i>	10
<i>Obr. 2.3 Kompozitní PON síť [14].</i>	11
<i>Obr. 2.4 Architektura LARNET [14].</i>	11
<i>Obr. 2.5 Architektura RITENET [14].</i>	12
<i>Obr. 2.6 Vícestupňová WDM-PON architektura [14].</i>	13
<i>Obr. 2.7 Spojení CWDM a TDM-PON sítí [11].</i>	13
<i>Obr. 2.8 Konstrukce AWG směrovače a směrovací tabulka vlnových délek [5].</i>	14
<i>Obr. 3.1 Koexistence 1G a 10G EPON [17].</i>	16
<i>Obr. 3.2 Využití vlnových délek v 1G EPON a 10G EPON [17].</i>	17
<i>Obr. 3.3 Architektura SUCCESS [18].</i>	19
<i>Obr. 3.4 Architektura SARDANA [19].</i>	20
<i>Obr. 4.1 Koncové jednotky AT ON-1000 (nahore) a EARU 1112 (dole).</i>	25
<i>Obr. 4.2 Měřicí přístroj AXS 200/850 (vlevo) a dva měřicí přístroje AXS 200/350 (vpravo).</i>	27
<i>Obr. 4.3 Modulární platforma FTB-500 (vlevo) a měřicí přístroj FTB-860 (vpravo).</i>	28
<i>Obr. 4.4 Digitální atenuátor FVA 60B.</i>	28
<i>Obr. 5.1 Topologie integrované optické sítě.</i>	29
<i>Obr. 5.2 Schéma připojení reflektometru EXFO FTB 7200D.</i>	31
<i>Obr. 5.3 Reflektogram ve směru od OLT k rozbočovači 1:7 na vlnové délce 1 550 nm.</i>	32
<i>Obr. 5.4 Topologie se zapojeným spektrometrem v sestupném směru.</i>	33
<i>Obr. 5.5 Spektrum vlnových délek v rozsahu od 1 483 do 1 498 nm v sestupném směru.</i>	33
<i>Obr. 5.6 Spektrum vlnových délek v rozsahu od 1 498 do 1 598 nm v sestupném směru.</i>	34
<i>Obr. 5.7 Spektrum vlnových délek v rozsahu od 1 571 do 1 581 nm v sestupném směru.</i>	34
<i>Obr. 5.8 Topologie se zapojeným spektrometrem ve vzestupném směru.</i>	36
<i>Obr. 5.9 Spektrum vlnových délek v rozsahu od 1 300 nm do 1 333 nm ve vzestupném směru.</i>	37
<i>Obr. 5.10 Spektrum vlnových délek v rozsahu od 1 531 do 1 540 nm ve vzestupném směru.</i>	38
<i>Obr. 5.11 Topologie se zapojeným spektrometrem ve vzestupném směru a digitálním atenuátorem.</i>	39
<i>Obr. 5.12 Optické spektrum v rozsahu od 1 531 do 1 540 nm s vloženým útlumem v hodnotě + 7 dB.</i>	40
<i>Obr. 5.13 Testování sítě EPON2.</i>	41
<i>Obr. 5.14 Testování sítě DWDM-PON.</i>	42
<i>Obr. 5.15 RFC 2544 propustnost DWDM-PON sítě.</i>	44
<i>Obr. 5.16 RFC 2544 propustnost sítě EPON 2.</i>	44
<i>Obr. 5.17 RFC 2544 zpoždění sítě DWDM-PON.</i>	45
<i>Obr. 5.18 RFC 2544 zpoždění sítě EPON 2.</i>	45

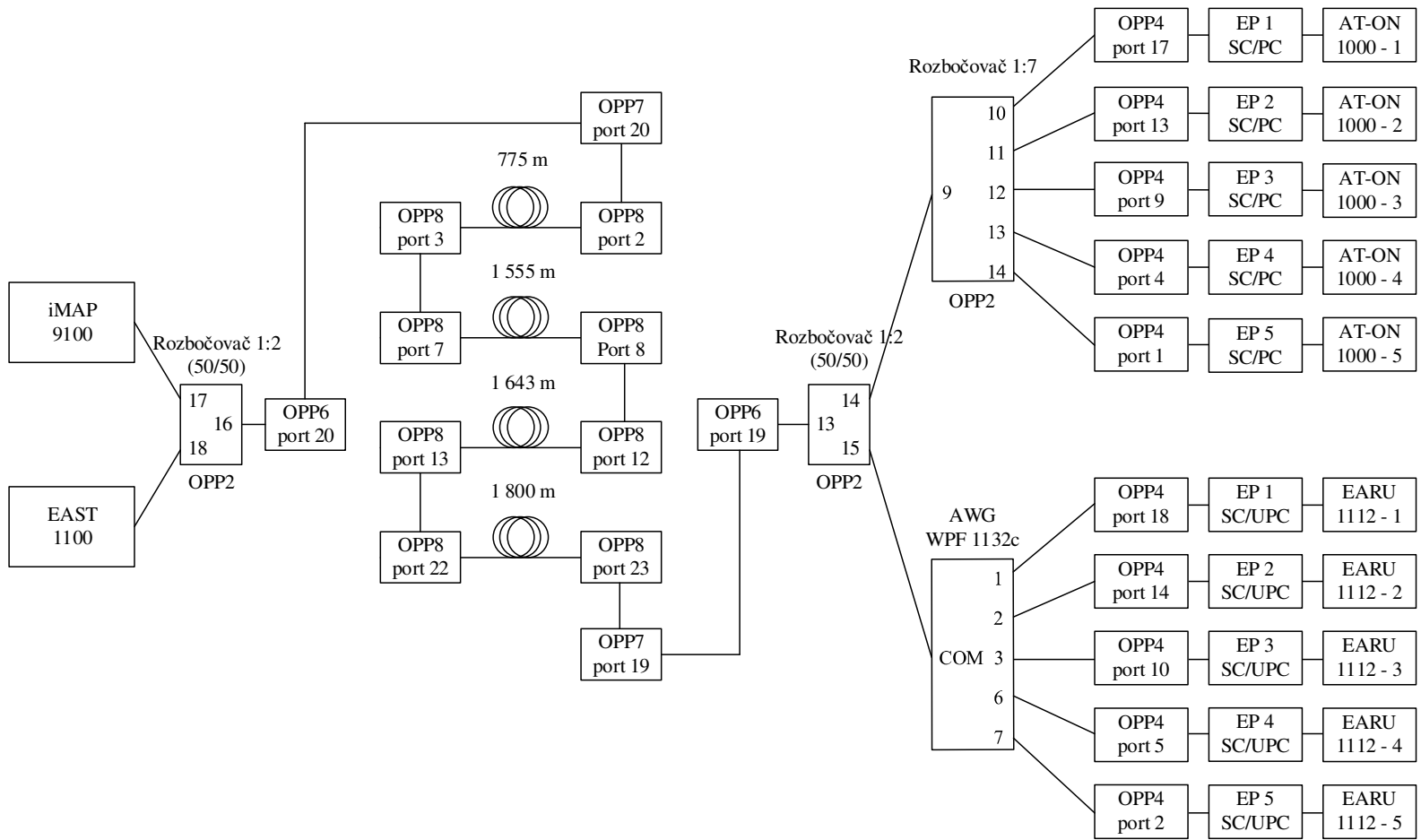
<i>Obr. 5.19 Grantované, Best Effort a Dropped pásma standardu ITU-T Y.1564</i>	46
<i>Obr. 5.20 Maximální velikost kolísání zpoždění sítě EPON2</i>	48
<i>Obr. 5.21 Maximální velikost kolísání zpoždění sítě DWDM-PON</i>	49
<i>Obr. 5.22 Obousměrné zpoždění sítě EPON2</i>	49
<i>Obr. 5.23 Obousměrné zpoždění sítě DWDM-PON</i>	49
<i>Obr. 6.1 Integrovaná síť v simulačním prostředí Optiwave OptiSystem</i>	51
<i>Obr. 6.2 WDM vysílač pro 5 kanálů</i>	52
<i>Obr. 6.3 WDM přijímač pro 5 kanálů</i>	52
<i>Obr. 6.4 WDM vysílač širokospektrálního záření BLS</i>	52
<i>Obr. 6.5 OLT jednotka iMAP 9102</i>	53
<i>Obr. 6.6 Optické vlákno G.652.D a Optical Delay</i>	53
<i>Obr. 6.7 Koncová jednotka AT ON-1000 systému EPON2</i>	54
<i>Obr. 6.8 Koncové jednotky EARU 1112</i>	55
<i>Obr. 6.9 OSA Sestupný směr na výstupu z rozbočovače 1:2 (50/50) B</i>	56
<i>Obr. 6.10 OSA Vzestupný směr na výstupu z rozbočovače 1:2 (50/50) A</i>	56
<i>Obr. 6.11 Diagram oka pro jednotku EARU 1112 na kanále 1</i>	57
<i>Obr. 6.12 Diagram oka pro koncovou jednotku AT ON-1000</i>	58
<i>Obr. 6.13 Koncová jednotka AT ON-1000 při vloženém útlumu + 8 dB</i>	58
<i>Obr. 6.14 Koncová jednotka EARU 1112 při vloženém útlumu + 8 dB</i>	59
<i>Obr. 6.15 Koncová jednotka AT ON-1000 při vloženém útlumu + 16 dB</i>	59
<i>Obr. 6.16 Koncová jednotka EARU 1112 při vloženém útlumu + 28 dB</i>	60

Seznam tabulek

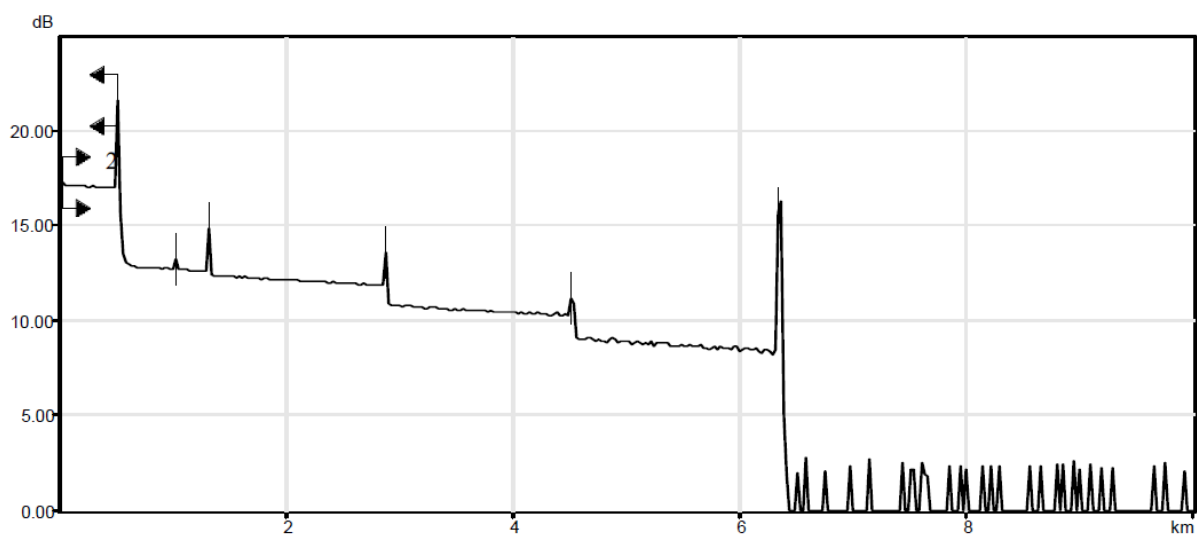
<i>Tab. 1.1 Vlastnosti IEEE 802.3 ah EPON přijímačů</i>	5
<i>Tab. 1.2 Vlastnosti IEEE 802.3 ah EPON vysílačů</i>	5
<i>Tab. 3.1 Porovnání vlastností 10G EPON a 1G EPON</i>	18
<i>Tab. 4.1 Parametry modulu FTM-9712S-SL20 [22]</i>	24
<i>Tab. 4.2 Parametry optického portu v ONU jednotce [24]</i>	25
<i>Tab. 4.3 Nastavení loopback jednotky AXS 200/850</i>	26
<i>Tab. 4.4 Nastavení měřicího přístroje FTB-860 NetBlazer</i>	27
<i>Tab. 5.1 Hodnoty útlumů na rozbočovačích typu 1:2 v OPP3</i>	30
<i>Tab. 5.2 Hodnoty útlumu na rozbočovači 1:7 v OPP2</i>	30
<i>Tab. 5.3 Hodnoty útlumů optických vláken a optické trasy</i>	30
<i>Tab. 5.4 Finální topologie</i>	31
<i>Tab. 5.5 Peaký v sestupném směru přenosu dat integrované optické sítě</i>	35
<i>Tab. 5.6 Porovnání reálných a teoretických hodnot vlnových délek v sestupném směru</i>	35
<i>Tab. 5.7 Peaký 1 až 5 ve vzestupném směru přenosu dat pro síť EPON2</i>	36
<i>Tab. 5.8 Peaký 6 až 10 ve vzestupném směru přenosu dat pro síť EPON2</i>	36
<i>Tab. 5.9 Příspěvkové kanály 1, 2, 3, 6 a 7 DWDM-PON sítě ve vzestupném směru</i>	37
<i>Tab. 5.10 Porovnání reálných a specifikovaných hodnot vlnových délek</i>	38
<i>Tab. 5.11 Připojené a odpojené ONU jednotky na základě zvýšeného útlumu trasy</i>	39
<i>Tab. 5.12 Hodnota vloženého útlumu do trasy: + 7dB</i>	40
<i>Tab. 5.13 Hodnota vloženého útlumu do trasy: + 8,2 dB</i>	40
<i>Tab. 5.14 Hodnota vloženého útlumu do trasy : + 10,4 dB</i>	41
<i>Tab. 5.15 Varianty Triple play služeb</i>	47
<i>Tab. 5.16 Maximální propustnost a ztrátovost rámců v síti EPON2</i>	47
<i>Tab. 5.17 Maximální propustnost a ztrátovost rámců v síti DWDM-PON</i>	48
<i>Tab. 6.1 Nastavení WDM vysílačů v topologiích A, B a C</i>	51
<i>Tab. 6.2 Parametry optických vláken</i>	54

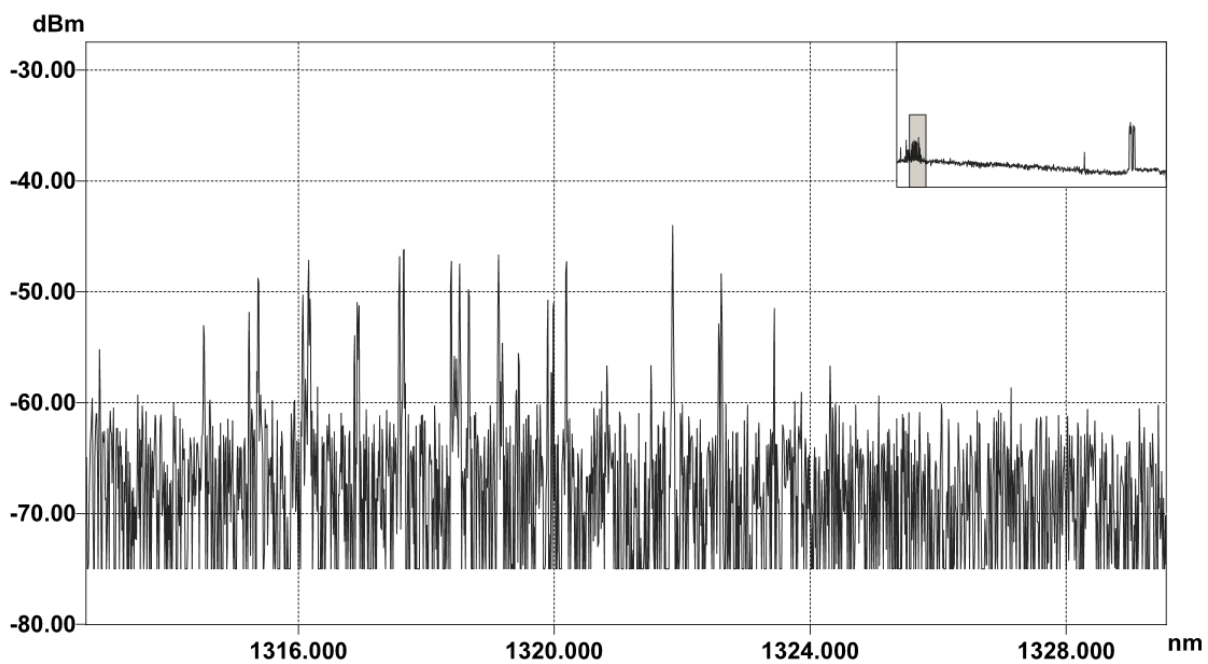
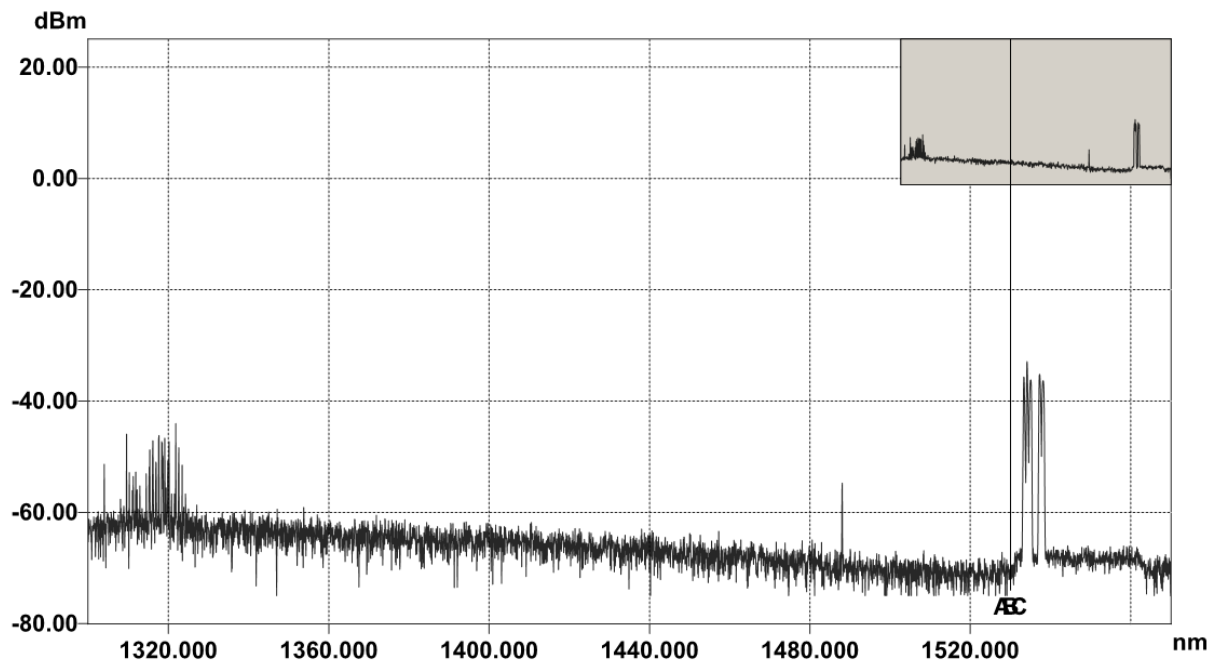
Příloha.A: Popis rozvodných skříní R-A N311 a R-B N311

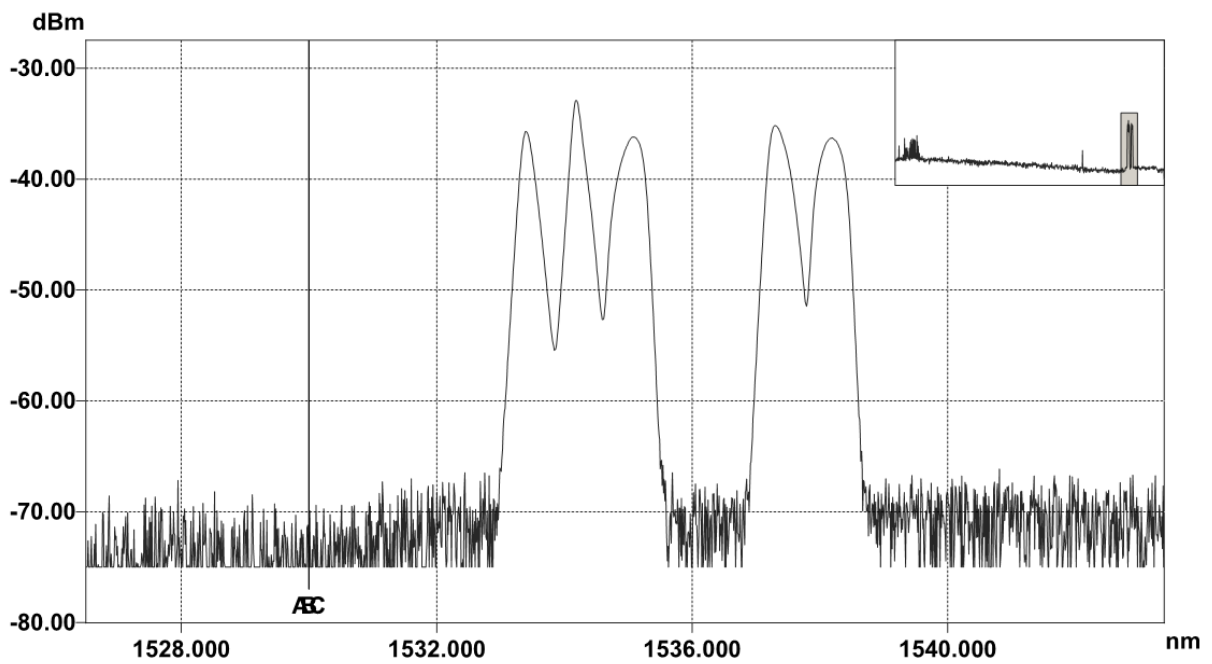




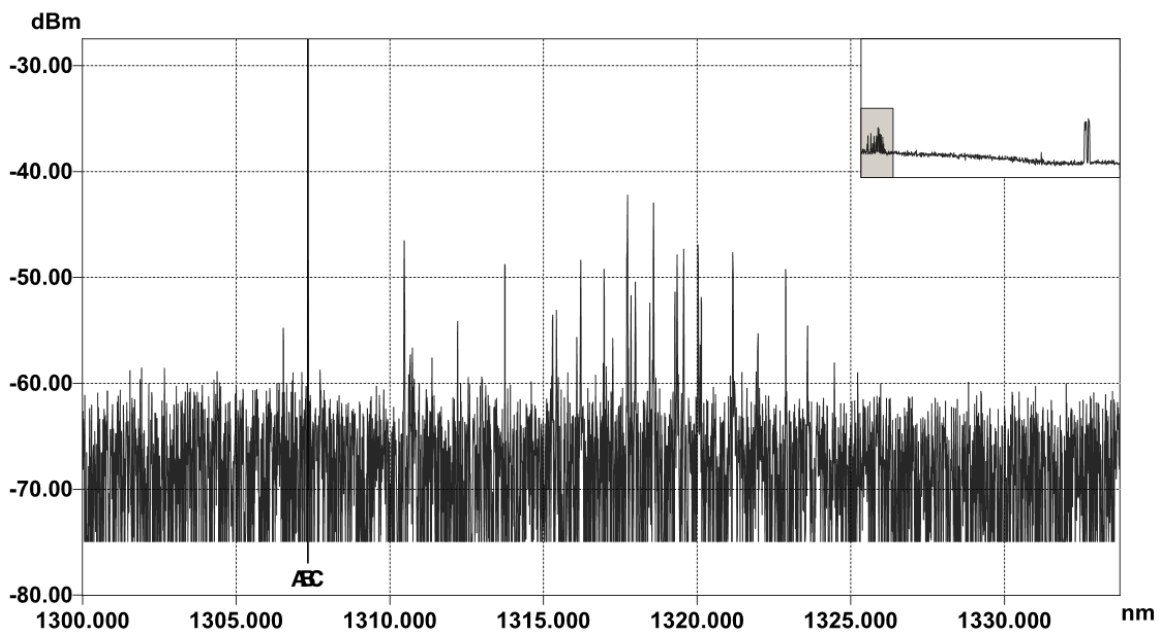
Příloha.B: Detailní schéma sestavené topologie

Příloha.C: Reflektograf pro vlnovou délku 1 310 nm

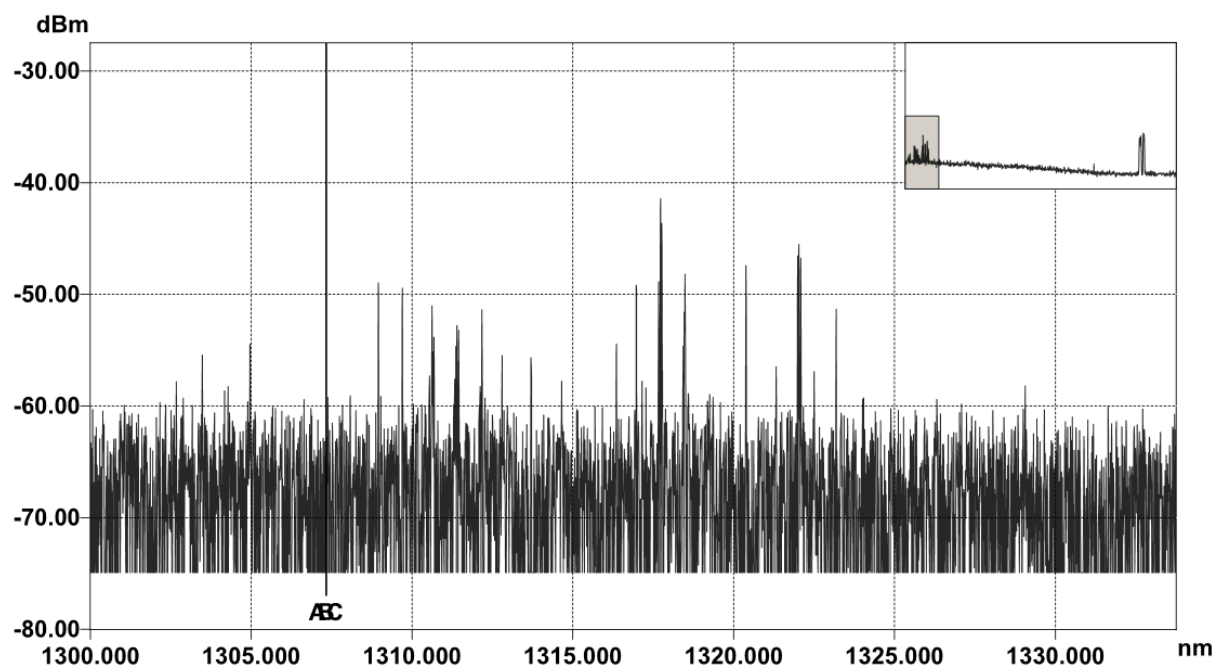
Příloha.D: Optické spektra ve vzestupném směru při zvyšování vloženého útlumu



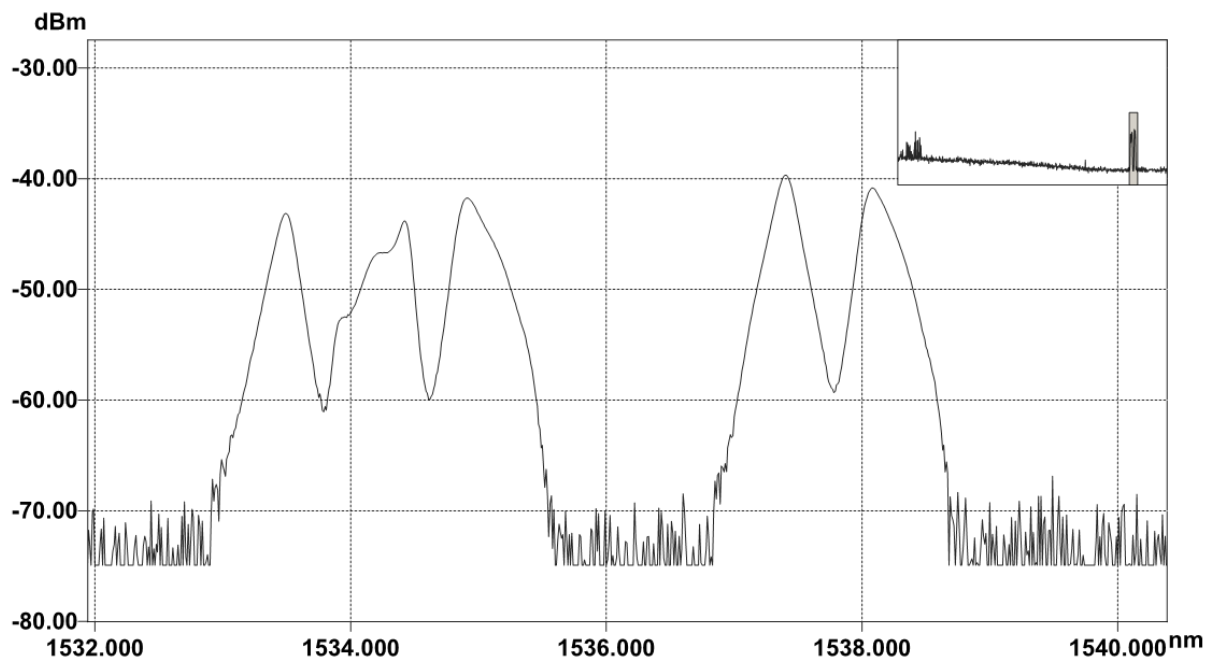
Optické spektrum v rozsahu 1 529 nm - 1 544 nm s vloženým útlumem v hodnotě + 6 dB.



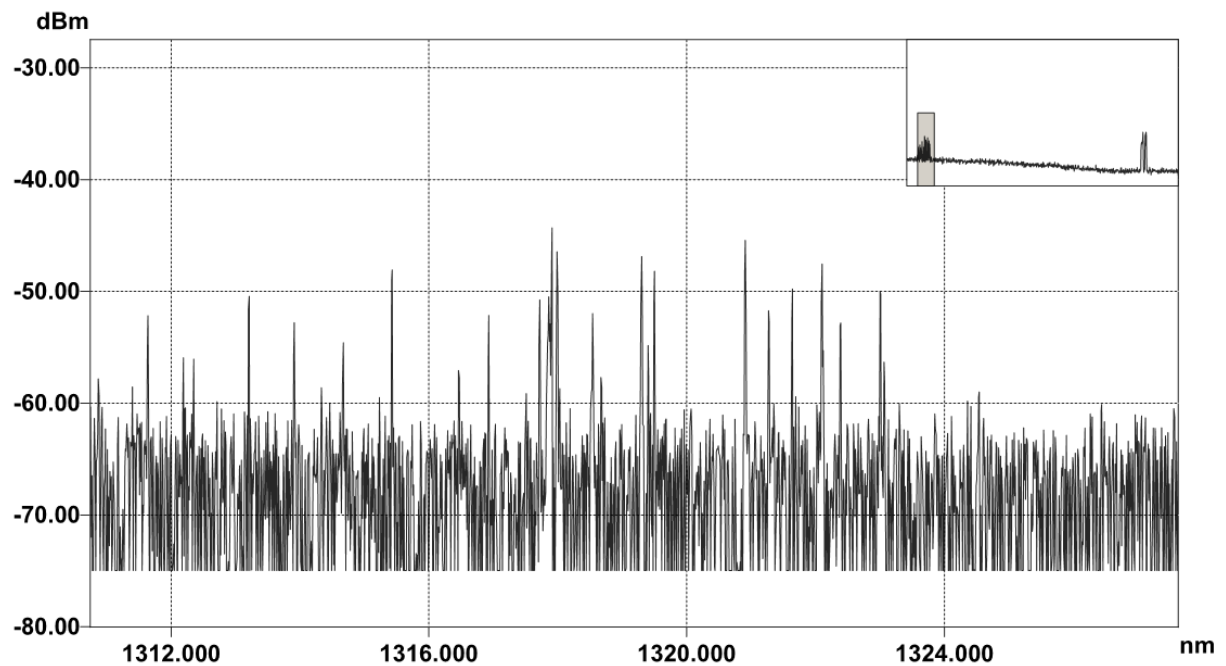
Optické spektrum v rozsahu 1 300 nm - 1 334 nm s vloženým útlumem v hodnotě + 7 dB.



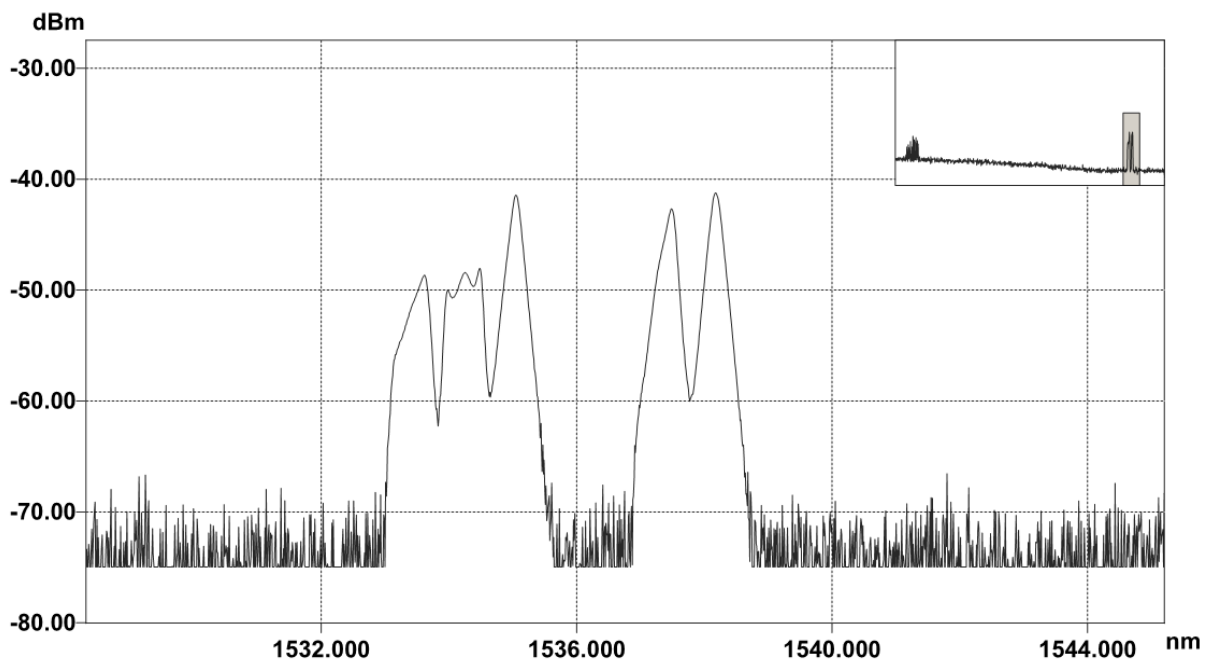
Optické spektrum v rozsahu 1 300 nm - 1 334 nm s vloženým útlumem v hodnotě + 8,2 dB.



Optické spektrum v rozsahu 1 532 nm - 1 541 nm s vloženým útlumem v hodnotě + 8,2 dB.



Optické spektrum v rozsahu 1 311 nm - 1 328 nm s vloženým útlumem v hodnotě + 10,4 dB.



Optické spektrum v rozsahu 1 528 nm - 1 545 nm s vloženým útlumem v hodnotě + 10,4 dB.

Příloha.E: Tabulky hodnot ve vzestupném směru při zvyšování hodnoty útlumu*Hodnota vloženého útlumu do trasy: + 2 dB.*

Peak	1	2	12	13	14	15	16
Kanál	ge1310	ge1310	1	2	3	6	7
λ [nm]	1309,58	1313,37	1533,41	1534,19	1535,05	1537,34	1538,18
Pp[dBm]	- 45,52	- 48,45	- 35,70	- 32,92	- 36,23	- 35,19	- 36,36

Hodnota vloženého útlumu do trasy: + 4 dB.

Peak	1	2	3	9	10	11	12	13
Kanál	ge1310	ge1310	ge1310	1	2	3	6	7
λ [nm]	1312,95	1314,5	1315,34	1533,44	1534,28	1535,02	1537,35	1538,15
Pp[dBm]	- 46,05	- 47,71	- 44,51	- 36,09	- 33,40	- 37,70	- 34,58	- 37,07

Hodnota vloženého útlumu do trasy: + 6 dB.

Peak	1	2	12	13	14	15	16
Kanál	ge1310	ge1310	1	2	3	6	7
λ [nm]	1309,58	1315,375	1533,41	1534,19	1535,05	1537,34	1538,18
Pp[dBm]	- 45,52	- 48,45	- 35,70	- 32,92	- 36,23	- 35,19	- 36,36

Příloha.F: RFC 2544 - tabulky

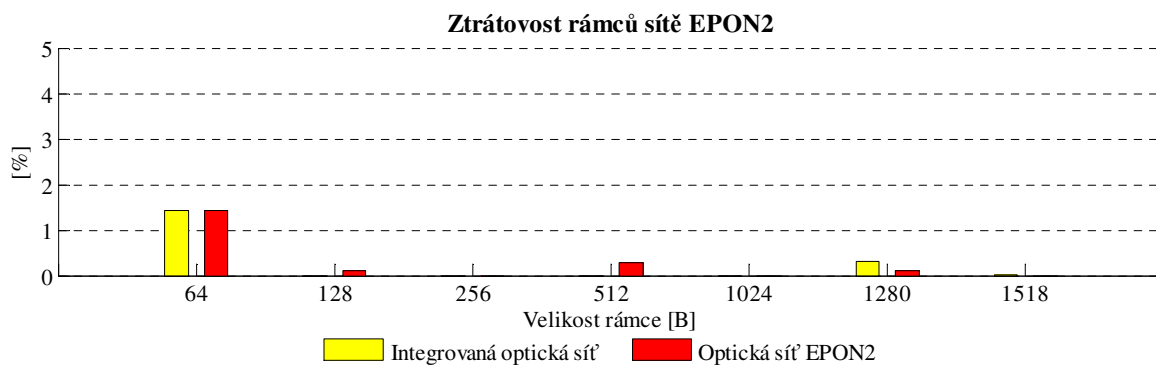
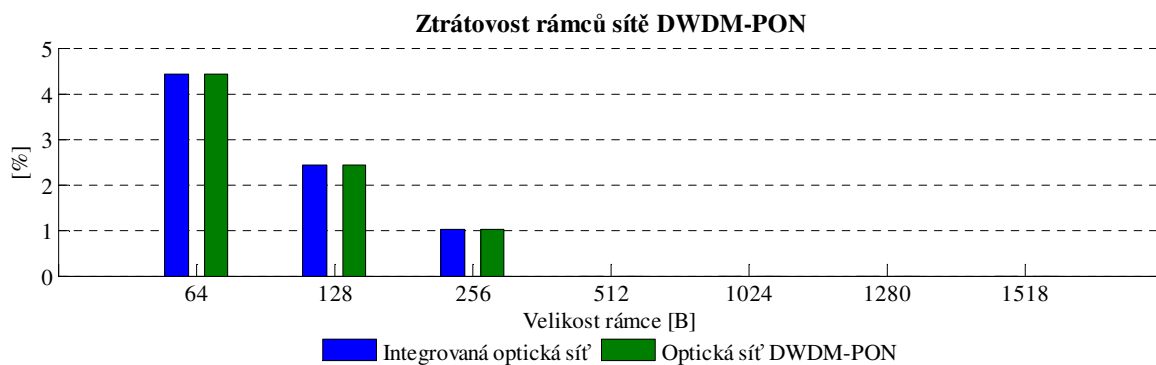
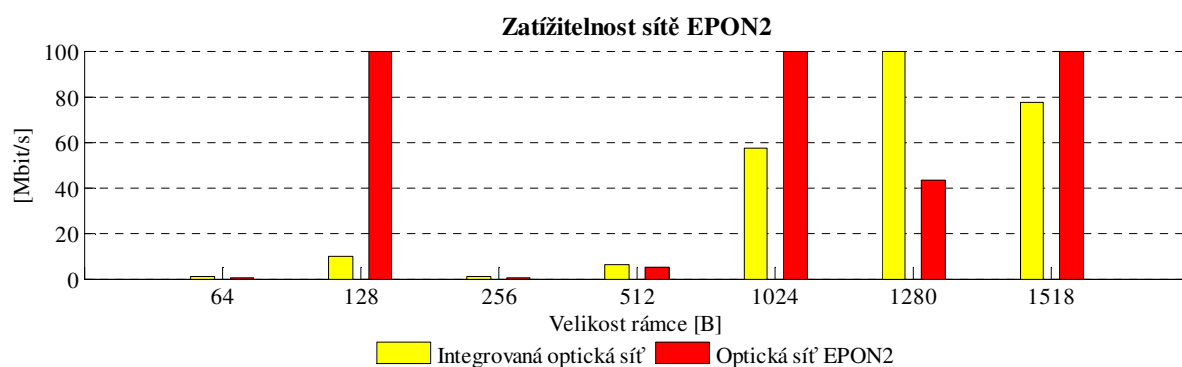
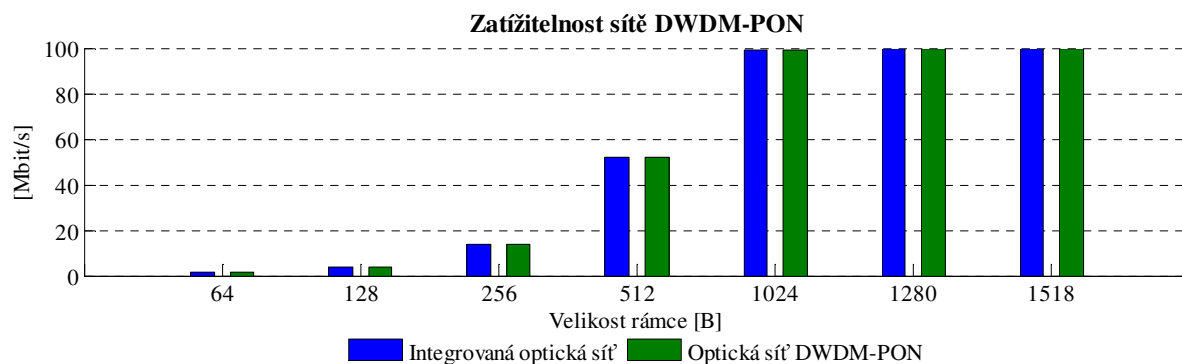
Velikost rámce [B]	Propustnost [Mbit/s]						
	64	128	256	512	1024	1280	1518
Integrovaná síť DWDM-PON	95,45	95,48	97,52	100	100	100	100
Optická síť DWDM-PON	95,45	95,48	97,52	100	100	100	100
Integrovaná síť EPON2	45,16	70,14	30	97,61	35,01	85,02	35,01
Optická síť EPON2	55,26	60,16	48,16	100	57,52	70,01	90,04

Velikost rámce [B]	Ztrátovost [%]						
	64	128	256	512	1024	1280	1518
Integrovaná síť DWDM-PON	4,42	2,41	1,02	0	0	0	0
Optická síť DWDM-PON	4,42	2,41	1,02	0	0	0	0
Integrovaná síť EPON2	1,42	0	0	0	0	0,31	0,01
Optická síť EPON2	1,42	0,11	0	0,28	0	0,09	0

Velikost rámce [B]	Zatížitelnost [Mbit/s]						
	64	128	256	512	1024	1280	1518
Integrovaná síť DWDM-PON	1,34	4,11	14,08	51,96	99,21	99,98	99,98
Optická síť DWDM-PON	1,34	4,11	14,08	51,97	99,21	100	100
Integrovaná síť EPON2	0,58	9,47	0,78	6,26	57,51	100	77,31
Optická síť EPON2	0,09	100	0,12	5,08	100	43,23	100

Velikost rámce [B]	Zpoždění [ms]						
	64	128	256	512	1024	1280	1518
Integrovaná síť DWDM-PON	0,11	0,11	0,14	3,97	2,29	1,96	1,77
Optická síť DWDM-PON	0,09	0,11	0,14	3,97	2,25	1,95	1,79
Integrovaná síť EPON2	0,67	0,72	0,61	0,78	0,75	0,92	0,73
Optická síť EPON2	0,67	0,73	0,7	0,89	0,89	0,89	1,01

Příloha.G: RFC 2544 - Grafy



Příloha.H: ITU-T Y.1564 Konfigurační test služeb - tabulky

Konfigurační test sítě EPON2

Služby	Maximální kolísání zpoždění [ms]		Obousměrné zpoždění [ms]		
	Integrovaná optická síť	Optická síť EPON2	Integrovaná optická síť	Optická síť EPON2	
Video	SDTV (MPEG-2)	5,685	5,677	8,733	8,863
	HDTV (MPEG-2)	7,107	7,072	8,881	8,904
	HDTV (MPEG-4)	7,019	7,011	8,751	8,79
VoIP	VoIP G.711	6,576	6,511	8,554	8,567
	VoIP G.732.1	7,716	7,723	8,429	8,46
	VoIP G.729	7,699	7,725	8,457	8,611
Data	CIR 10 Mbit/s	8,224	8,138	8,748	8,829
	CIR 20 Mbit/s	8,126	8,164	8,911	8,901
	CIR 30 Mbit/s	8,189	8,131	8,949	8,929

Konfigurační test sítě DWDM-PON

Služby	Maximální kolísání zpoždění [ms]		Obousměrné zpoždění [ms]		
	Integrovaná optická síť	Optická síť EPON2	Integrovaná optická síť	Optická síť EPON2	
Video	SDTV (MPEG-2)	0,015	0,015	0,48	0,471
	HDTV (MPEG-2)	0,015	0,015	0,471	0,472
	HDTV (MPEG-4)	0,015	0,015	0,472	0,471
VoIP	VoIP G.711	0,015	0,015	0,149	0,149
	VoIP G.732.1	0,015	0,015	0,136	0,136
	VoIP G.729	0,015	0,015	0,134	0,134
Data	CIR 10 Mbit/s	0,382	0,381	0,509	0,509
	CIR 20 Mbit/s	0,382	0,382	0,509	0,509
	CIR 30 Mbit/s	0,382	0,381	0,509	0,509

Příloha.I: ITU-T Y.1564 Výkonnostní test služeb - Tabulky

Výkonnostní test sítě EPON2

	Služby	Průměrná propustnost [Mbit/s]		Ztrátovost rámců [%]	
		Integrovaná optická síť	Optická síť EPON2	Integrovaná optická síť	Optická síť EPON2
Triple play 1	SDTV (MPEG-2)	3,972	3,972	0	0
	VoIP G.711	0,126	0,126	0	0
	CIR 10 Mbit/s	10	10	0	0
Triple play 2	HDTV (MPEG-2)	17,137	17,126	16,177	16,231
	VoIP G.732.1	0,022	0,022	17,526	18,334
	CIR 20 Mbit/s	16,468	16,476	17,376	17,305
Triple play 3	HDTV (MPEG-4)	9,239	9,236	12,774	12,806
	VoIP G.729	0,034	0,034	13,479	14,123
	CIR 30 Mbit/s	25,821	25,806	13,97	13,973

Výkonnostní test sítě EPON2

	Služby	Maximální kolísání zpoždění[ms]		Obousměrné zpoždění [ms]	
		Integrovaná optická síť	Optická síť EPON2	Integrovaná optická síť	Optická síť EPON2
Triple play 1	SDTV (MPEG-2)	6,914	6,653	8,945	8,915
	VoIP G.711	7,671	7,789	8,74	8,859
	CIR 10 Mbit/s	8,184	8,358	8,933	8,965
Triple play 2	HDTV (MPEG-2)	8,069	8,064	8,966	8,943
	VoIP G.732.1	7,965	7,964	8,745	8,862
	CIR 20 Mbit/s	8,115	8,099	8,966	8,943
Triple play 3	HDTV (MPEG-4)	8,114	8,102	8,95	8,94
	VoIP G.729	8,126	8,101	8,743	8,762
	CIR 30 Mbit/s	8,262	8,253	8,993	8,94

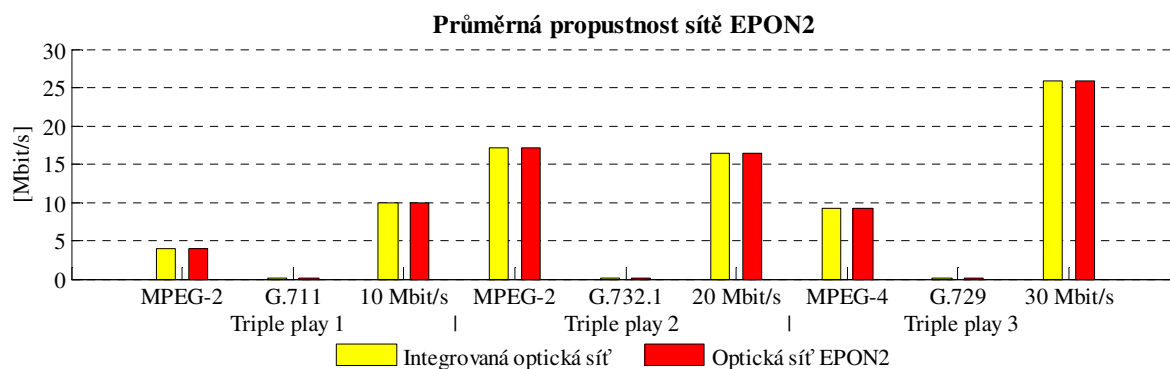
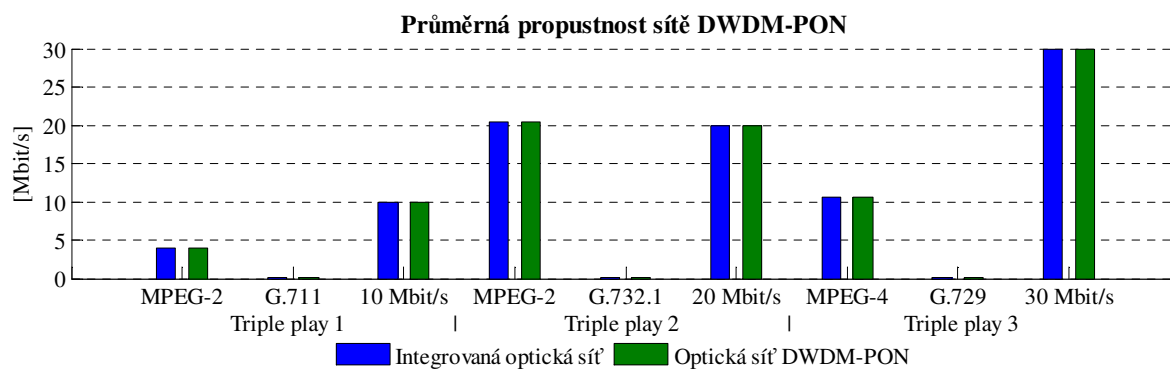
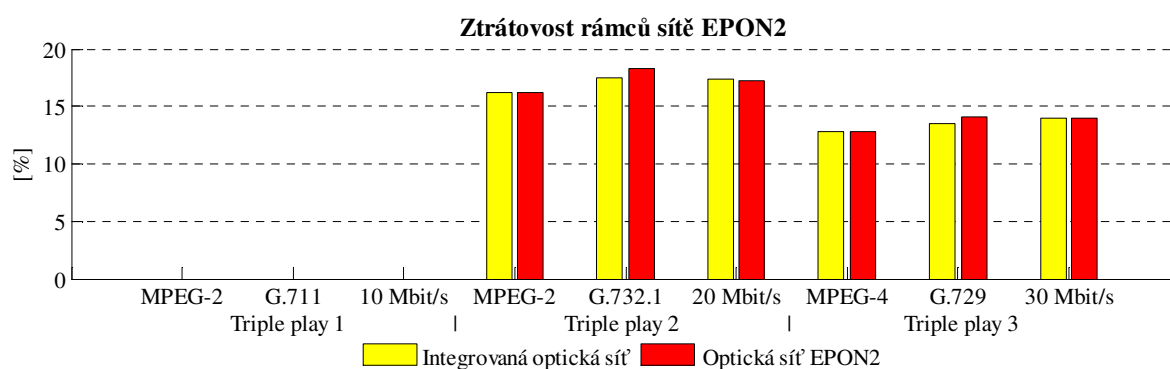
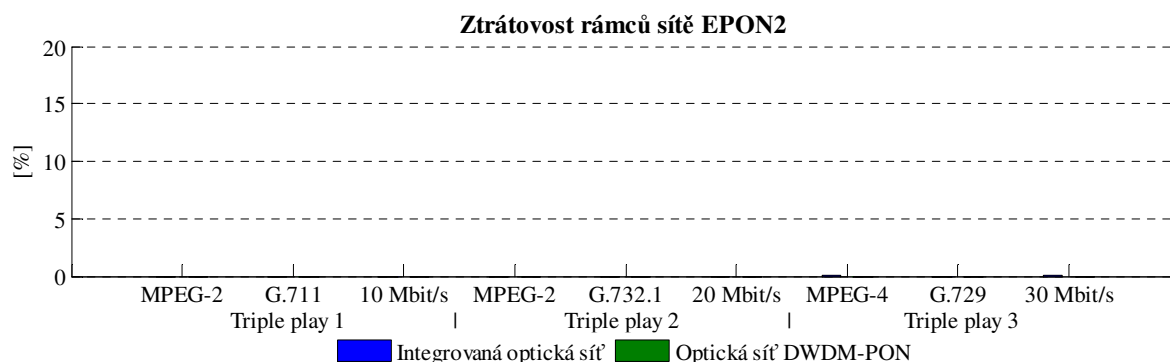
Výkonnostní test sítě DWDM-PON

	Služby	Průměrná propustnost [Mbit/s]		Ztrátovost rámců [%]	
		Integrovaná optická síť	Optická síť DWDM-PON	Integrovaná optická síť	Optická síť DWDM-PON
Triple play 1	SDTV (MPEG-2)	3,972	3,972	0	0
	VoIP G.711	0,126	0,126	0	0
	CIR 10 Mbit/s	10	10	0	0
Triple play 2	HDTV (MPEG-2)	20,444	20,444	0	0
	VoIP G.732.1	0,027	0,027	0	0
	CIR 20 Mbit/s	20	20	0	0
Triple play 3	HDTV (MPEG-4)	10,593	10,593	0,002	0
	VoIP G.729	0,039	0,039	0	0
	CIR 30 Mbit/s	29,999	30	0,003	0

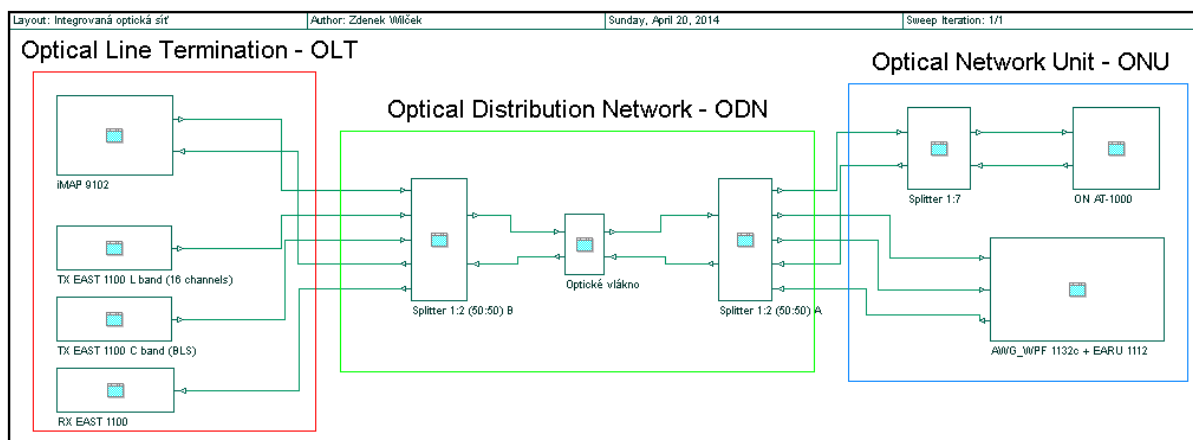
Výkonnostní test sítě DWDM-PON

	Služby	Maximální kolísání zpoždění [ms]		Obousměrné zpoždění [ms]	
		Integrovaná optická síť	Optická síť DWDM-PON	Integrovaná optická síť	Optická síť DWDM-PON
Triple play 1	SDTV (MPEG-2)	0,038	0,039	0,509	0,509
	VoIP G.711	0,363	0,364	0,509	0,509
	CIR 10 Mbit/s	0,382	0,383	0,509	0,51
Triple play 2	HDTV (MPEG-2)	0,039	0,039	0,509	0,509
	VoIP G.732.1	0,368	0,368	0,509	0,509
	CIR 20 Mbit/s	0,381	0,381	0,509	0,509
Triple play 3	HDTV (MPEG-4)	0,395	0,039	0,509	0,509
	VoIP G.729	0,372	0,368	0,509	0,509
	CIR 30 Mbit/s	0,36	0,36	0,509	0,509

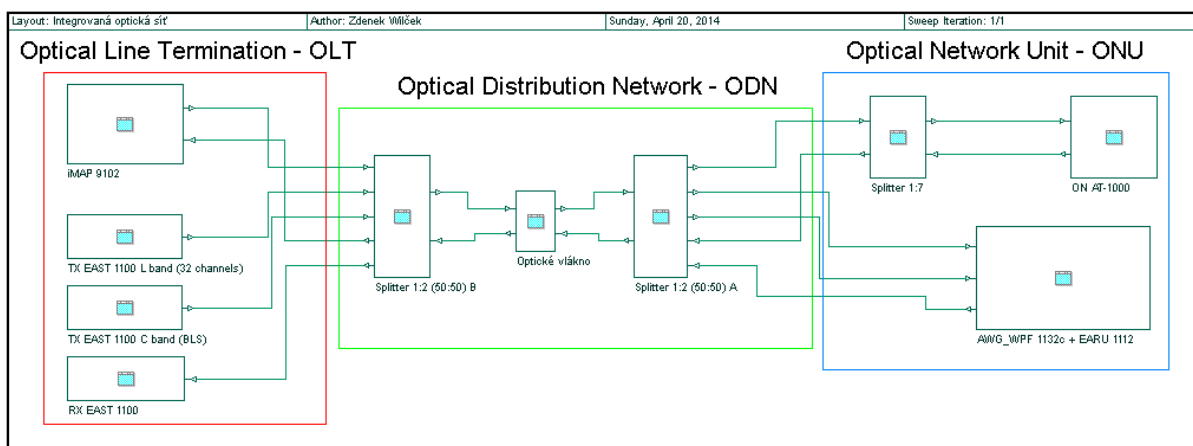
Příloha.J: ITU-T Y.1564 Výkonnostní test služeb - Grafy



Příloha.K: Blokové schéma topologie B a topologie C

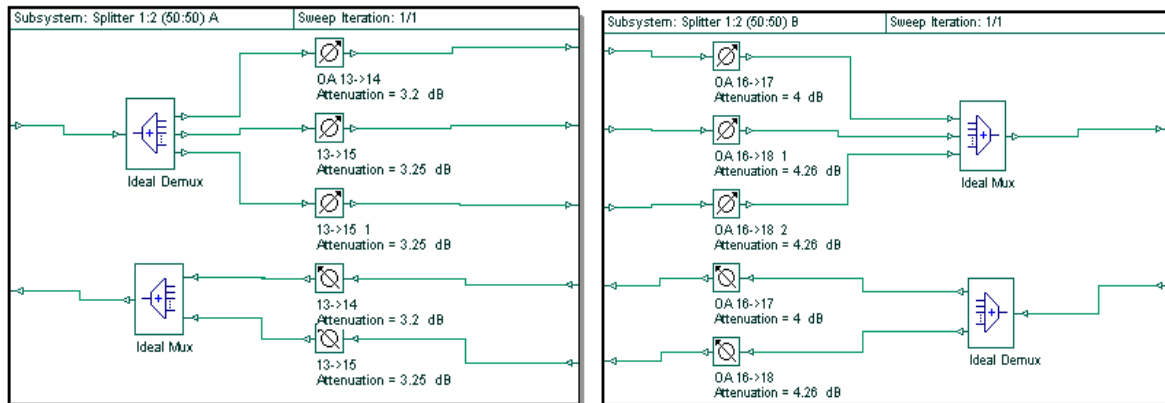


Blokové schéma topologie B pro 16 DWDM kanálů.

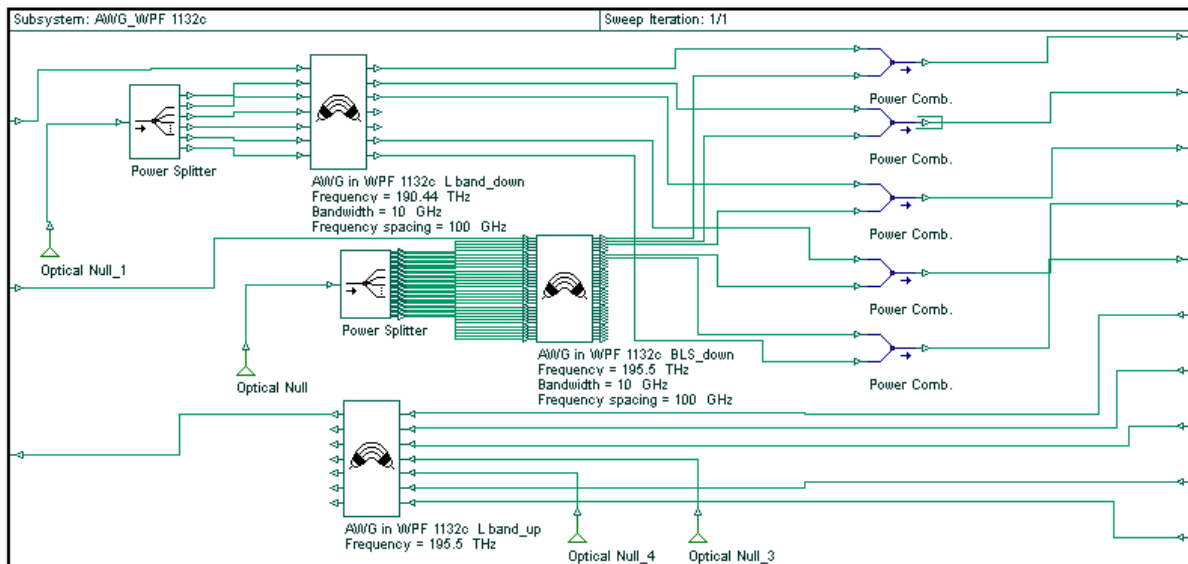


Blokové schéma topologie B pro 32 DWDM kanálů.

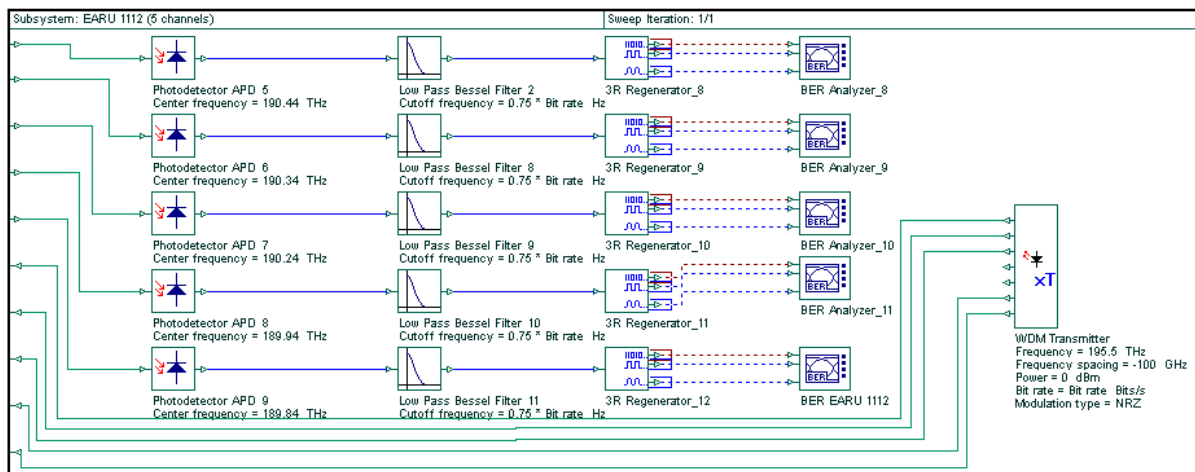
Příloha.L: Schémata použitých bloků v simulaci



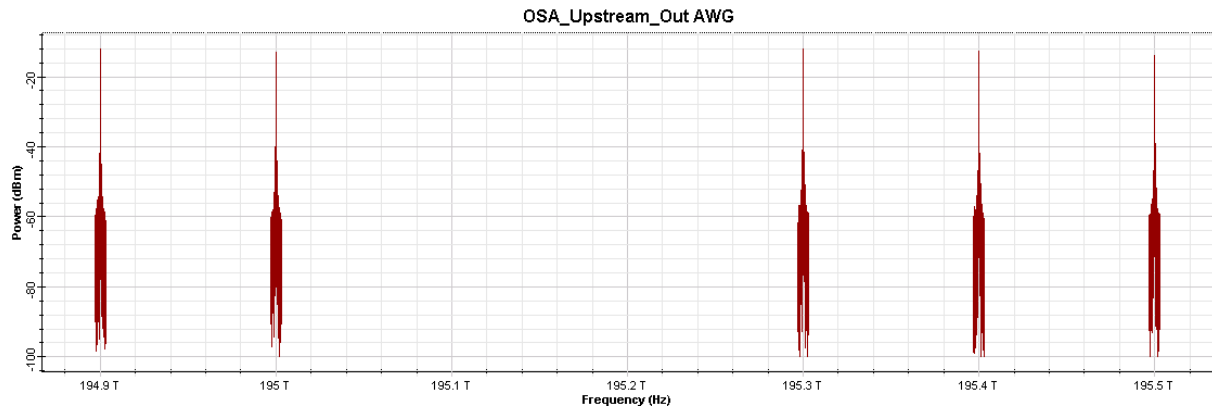
Blokové schéma rozbočovačů 1:2 (50/50) A a 1:2 (50/50) B.



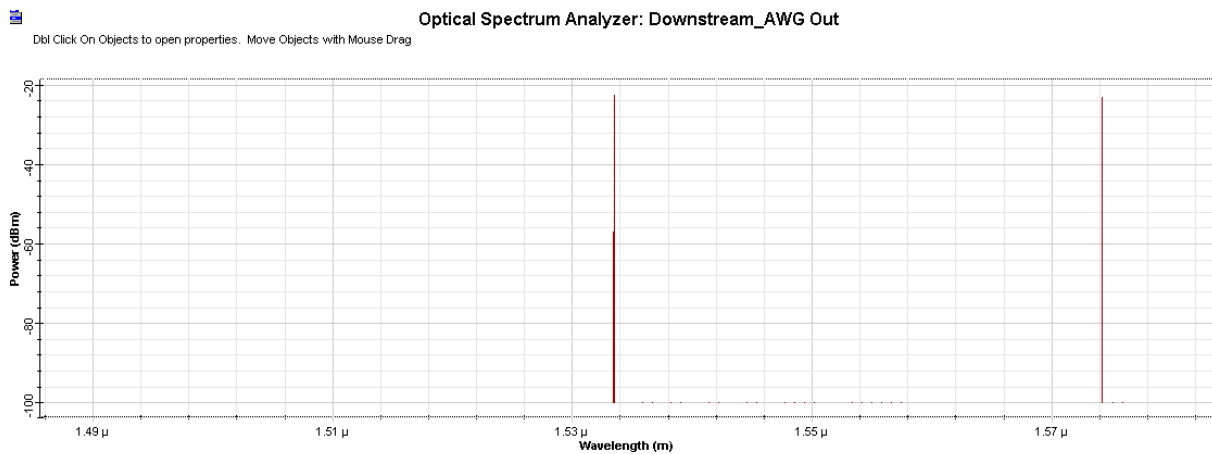
Blokové schéma AWG směrové odbočnice pro 5 kanálů.



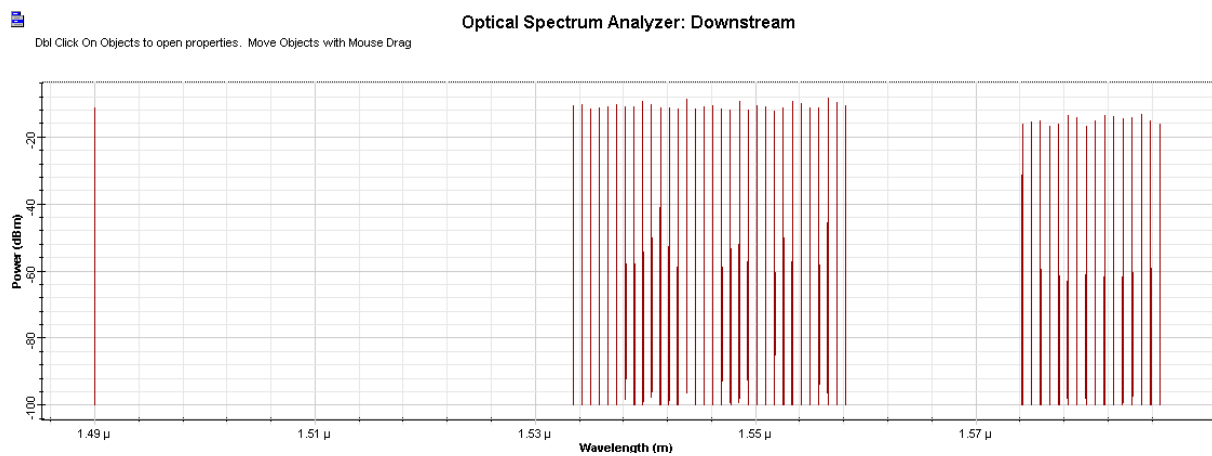
Blokové schéma koncové jednotky EARU 1112 pro 5 kanálů.

Příloha.M: Spektrální analýzy v simulačním prostředí

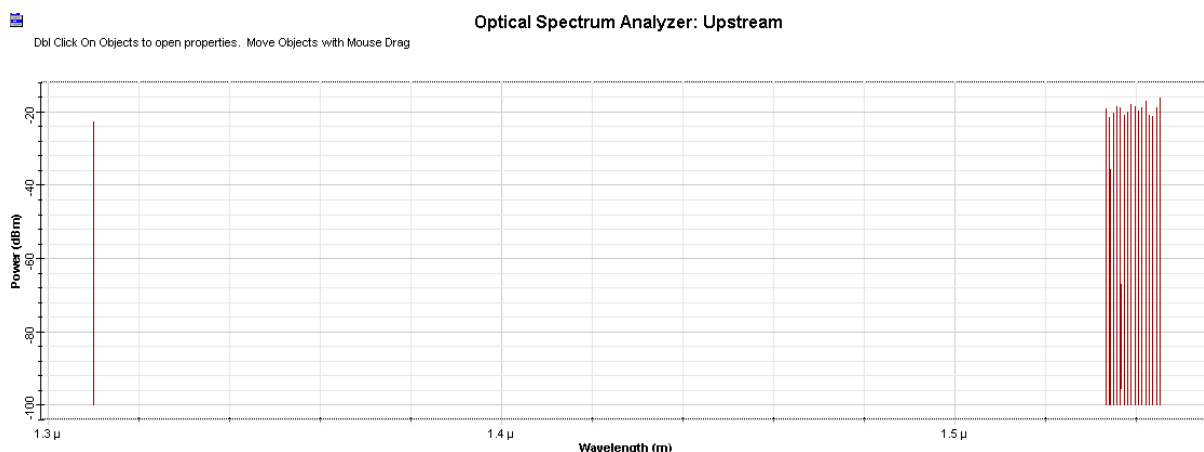
Vzestupný směr na výstupu z AWG směrové odbočnice pro 5 kanálů.



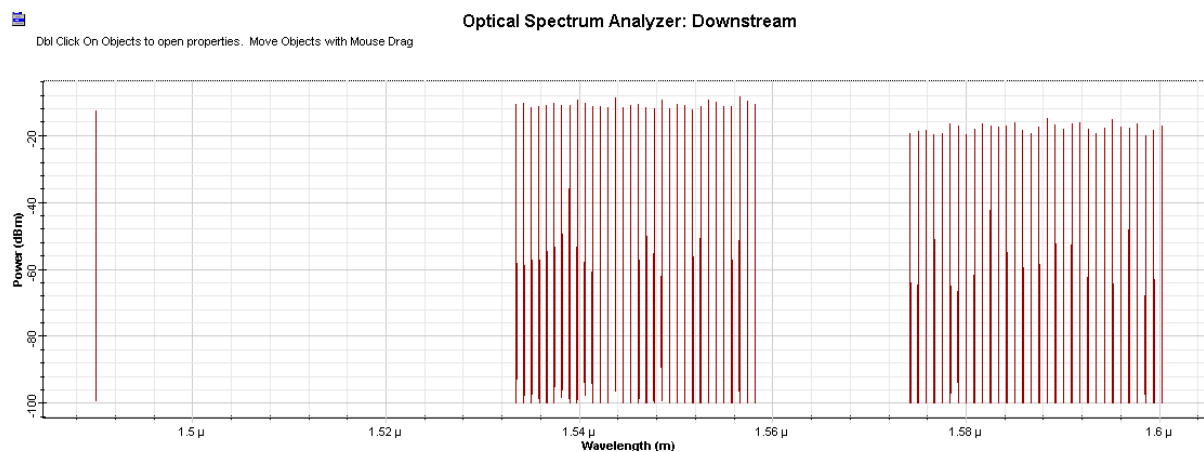
Sestupný směr na výstup z AWG filtru na portu číslo 1.



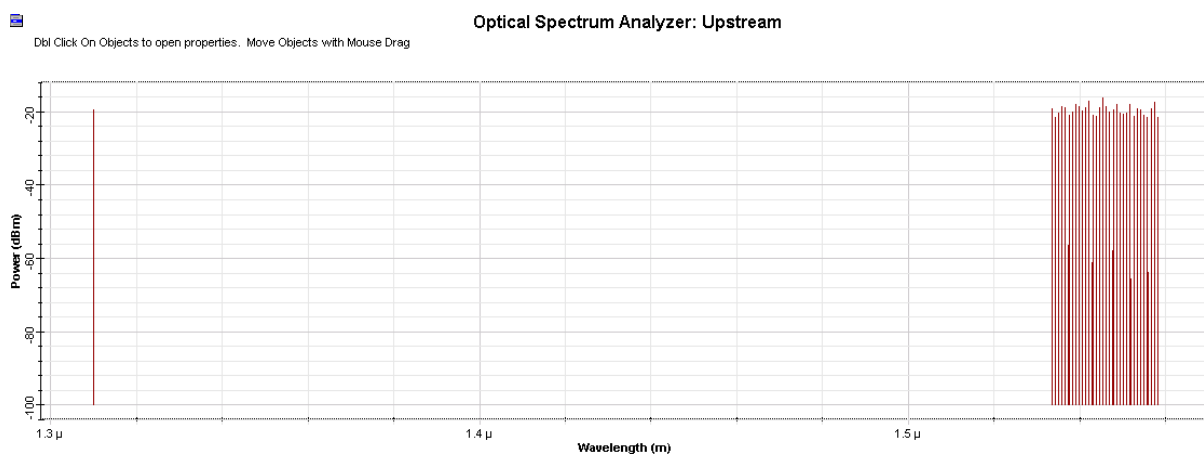
Sestupný směr na výstupu z rozbočovače 1:2 (50/50) B pro 16 DWDM kanálů.



Vzestupný směr na výstupu z rozbočovače 1:2 (50/50) A pro 16 DWDM kanálů.

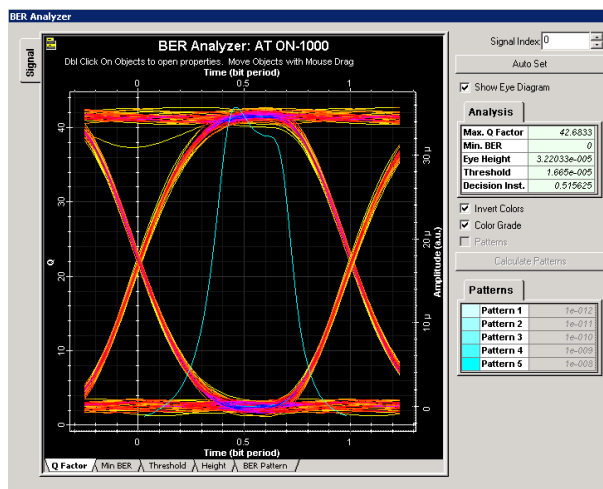


Sestupný směr na výstupu z rozbočovače 1:2 (50/50) B pro 32 DWDM kanálů.

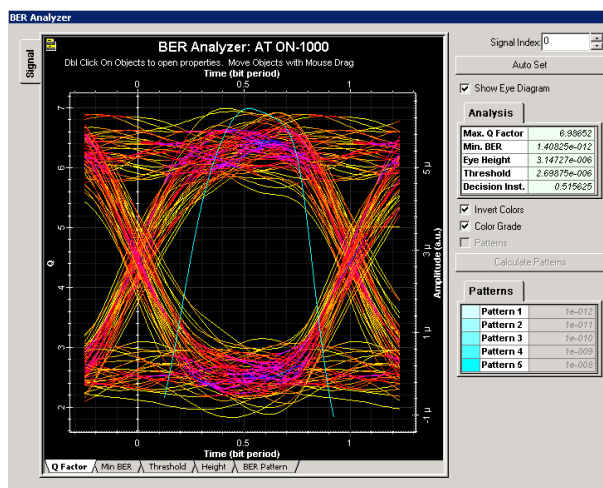


Vzestupný směr na výstupu z rozbočovače 1:2 (50/50) A pro 32 DWDM kanálů.

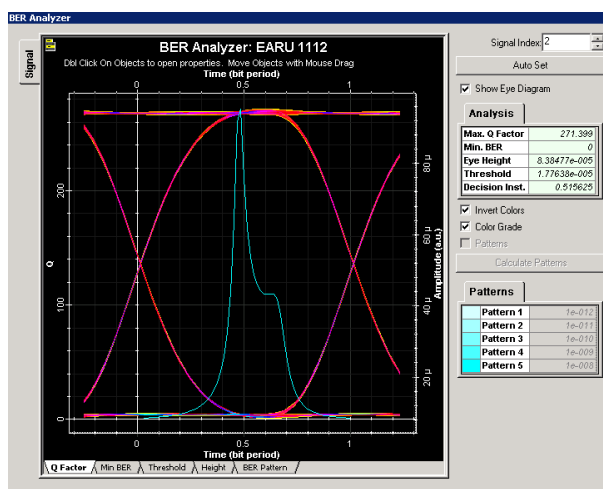
Příloha.N: Diagramy při zvyšování hodnoty vloženého útlumu



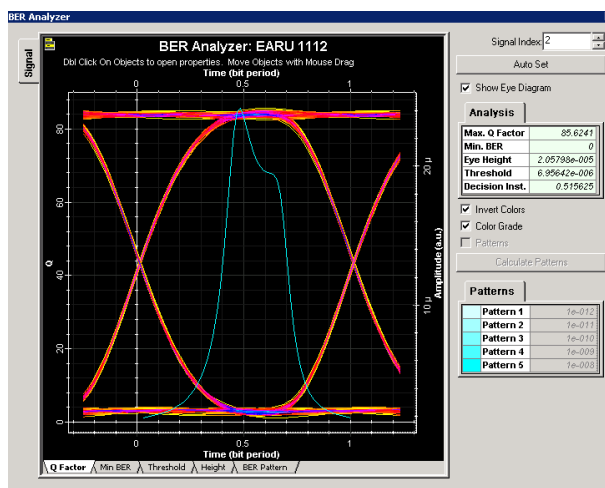
Koncová jednotka AT ON-1000 při vloženém útlumu + 4 dB.



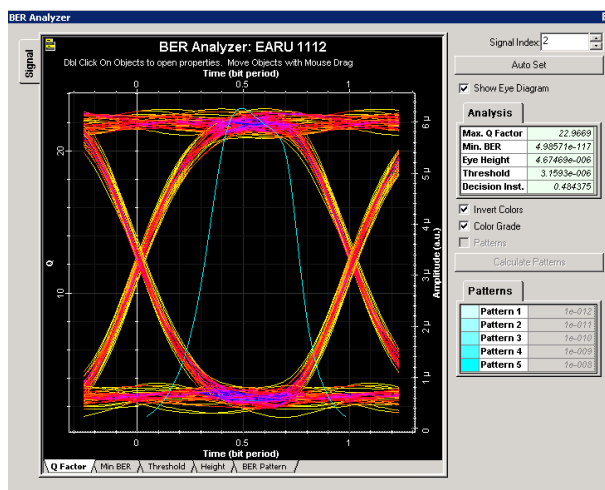
Koncová jednotka AT ON-1000 při vloženém útlumu + 12 dB.



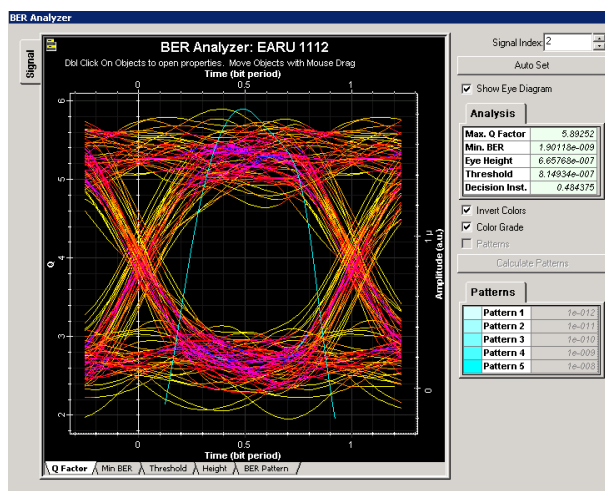
Koncová jednotka EARU 1112 při vloženém útlumu + 6 dB.



Koncová jednotka EARU 1112 při vloženém útlumu + 12 dB.



Koncová jednotka EARU 1112 při vloženém útlumu + 18 dB.



Koncová jednotka EARU 1112 při vloženém útlumu + 24 dB.