



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



**FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ**

ÚSTAV TELEKOMUNIKACÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF TELECOMMUNICATIONS

MODERNÍ OPTICKÉ PŘÍSTUPOVÉ SÍTĚ

MODERN OPTICAL ACCESS NETWORKS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

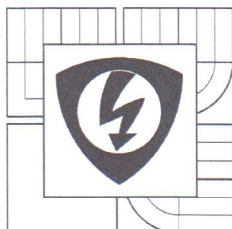
VÍTĚZSLAV TŘETINA

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. RADIM ŠIFTA

BRNO 2013



VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

Ústav telekomunikací

Bakalářská práce

bakalářský studijní obor
Teleinformatika

Student: Vítězslav Třetina

Ročník: 3

ID: 125327

Akademický rok: 2012/13

NÁZEV TÉMATU:

Moderní optické přístupové sítě

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Popište problematiku pasivních optických přístupových sítí. Provedte podrobný rozbor jednotlivých standardů. Zvláště se zaměřte na technologie WDM-PON a hybridní WDM/TDM-PON. Vytvořte animaci, ve které budete názorně demonstrovat funkci WDM-PON a WDM/TDM-PON. Dále vytvořte v simulačním prostředí optSim v5.2 model sítě typu WDM-PON a WDM/TDM – PON. Provedte několik simulací pro více přenosových rychlostí a výsledky přehledně zpracujte – nalezněte maximální funkční parametry (dosažitelná vzdálenost, maximální překlenutelný útlum, dělicí poměr atd.).

DOPORUČENÁ LITERATURA:

- [1] S.-J. Park, C.-H. Lee, K.-T. Jeong, H.-J. Park, J.-G. Ahn, K.-H. Song, "Fiber-to-the-home services based on wavelengthdivision-multiplexing passive optical network", Lightwave Technology, Journal of, Vol. 22, No. 11, Nov. 2004, pp. 2582– 2591
- [2] PFEIFFER, Thomas, et al. OPTICAL FIBERS PAVE THE WAY TO FASTER BRODBAND ACCESS. In PFEIFFER, Thomas, et al. Alcatel Telecommunications Review. 2005th edition. [s.l.] : [s.n.], [2005]. s. 1-9.
- [3] MILOSLAV, Filka. Optoelektronika pro telekomunikace a informatiku. první. Brno : Centa, spol. s r. o., 2009. 371 s. ISBN 978-80-86785-14-1.

Termín zadání: 11.2.2013

Termín odevzdání: 5.6.2013

Vedoucí práce: Ing. Radim Šifta

Konzultanti bakalářské práce:


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



UPOZORNĚNÍ:

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

Výzkum popsany v této habilitační práci byl realizován v laboratořích podpořených z projektu SIX; registrační číslo CZ.1.05/2.1.00/03.0072, operační program Výzkum a vývoj pro inovace.

Abstrakt

Bakalářská práce pojednává o problematice pasivních optických sítí. V úvodu se práce zaměřuje na seznámení se základními funkčními prvky sítí a jsou popsány jednotlivé možnosti realizace vedení optického vlákna k uživateli.

Hlavním cílem práce je analyzovat jednotlivé standardy pasivních optických sítí. Tyto specifikace jsou popsány v kapitolách 2 a 4, kde jsou rozebrány jejich jednotlivé technické parametry. Zvláštní pozornost je věnována technologii vlnového dělení. Závěr teoretické části práce je věnován popisu měřicí přístrojů vhodných k měření C/DWDM systémů.

Praktická část této práce je rozdělena do dvou oddílů. Úkolem první části bylo vytvořit dvě animace, kde první zobrazuje princip pasivní optické sítě založené na vlnovém dělení (WDM – PON). Druhá animace je zaměřena na praktickou ukázkou kombinace vlnového a časového dělení (WDM/TDM – PON). Druhý oddíl praktické části práce se skládá ze simulací několika scénářů pasivních optických sítí v programu Optsim 5.2. U těchto scénářů jsou hledány maximální možné parametry PON sítí např. překlenutelný útlum, překlenutelná vzdálenost nebo rozbočovací poměr.

Klíčová slova

Optická přístupová síť, vlnové dělení, hybridní pasivní optická síť, simulace, WDM PON

Abstract

The bachelor's thesis is about technology of passive optical networks. In the introduction, the paper focuses on introducing the basic functional elements of the networks and describes the different possibilities for implementing fiber optic lines as close as possible to the user.

The main goal of the theoretical part of this work is the analysis of the various standards of passive optical networks. These specifications are described in the second and fourth chapter, where are discussed their different technical parameters. Particular attention is given to the technology of wavelength division multiplexing. The conclusion of the theoretical part is devoted to the description of the measuring instruments which are suitable for measuring C/DWDM systems.

The practical part of this thesis is divided into two sections. The task of the first section is about creating two animations where the first of them shows the principle of passive optical networks based on wavelength division multiplexing (WDM - PON). The second animation is focused on the practical demonstration of a combination of wavelength and time division multiplexing (WDM/TDM - PON). The second section of the practical part consists of simulating multiple scenarios of passive optical networks in the OptSim 5.2. In these scenarios are searched for maximal possible parameters PON networks such as reachable attenuation, reachable distance or split ratio.

Keywords

Optical access network, wavelength division multiplexing, hybrid passive optical network, simulation, WDM PON

Prohlášení

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma „Moderní optické přístupové sítě“ jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské práce jsem neporušil autorská práva třetích osob zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních nebo majetkových a jsem si plně vědom následku porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právu souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 trestního zákoníku č. 40/2000 Sb.

V Brně dne

.....

(podpis autora)

Poděkování

Rád bych poděkoval vedoucímu bakalářské práce panu Ing. Radimovi Šiftovi za odborné vedení, cenné rady a trpělivost při realizaci této práce.

V Brně dne

.....

(podpis autora)

Obsah

Úvod	10
1. Optické přístupové sítě.....	11
1.1.Funkční prvky optické sítě	12
1.2.FTTx	12
2. Pasivní optické sítě založené na časovém dělení	13
2.1.APON/BPON	13
2.2.GPON.....	14
2.3.XG – PON	14
2.4.EPON	15
2.5.10GEAPON.....	16
2.6.Srovnání technologií xPON.....	17
3. Technologie vlnového dělení.....	17
3.1.Technologie WWDM.....	18
3.2.Technologie DWDM.....	19
3.3.Technologie CWDM.....	19
4. Pasivní optické sítě založené na vlnovém dělení	19
4.1.Způsoby realizace WDM – PON.....	20
4.2.WDM / TDM – PON	22
4.3.Nové generace WDM / TDM PON.....	22
5. Měření optoelektronických systémů	24
5.1.Optický spektrální analyzátor	24
5.2.Měřič optického výkonu.....	25
5.3.Měřič vlnových délek.....	25
5.4.Měření bitové chybovosti	25
5.5.Diagram oka	26
6. Animace.....	27
6.1.WDM-PON animace.....	27
6.2.WDM-TDM PON animace	28
7. Návrh optických přístupových sítí	30
7.1.Útlumová kalkulace	31
7.2.Prvky použité v síti	33
7.3.Základní parametry simulací	35
7.4.Simulace TDM-PON.....	36

7.5.Simulace WDM-PON	37
7.6.Simulace WDM/TDM-PON.....	39
7.7.Srovnání maximálních parametrů PON sítí.....	41
8. Závěr	44
Použitá literatura.....	46
Použité zkratky	49
Seznam příloh.....	51

Úvod

Optické spoje jsou plnohodnotnou náhradou za dnes často nedostačující metalické spoje. Výhodami optického přenosu jsou vysoká přenosová kapacita sítě, malý průměr a hmotnost vláken, dále také výborná odolnost vůči elektromagnetickému rušení (EMI) a vnějším vlivům prostředí. Další dobrou vlastností optických vláken je vysoká odolnost proti odposlechu a to díky tomu, že vlákno nevyzařuje žádné elektromagnetické pole. Nevýhodou optických vláken je značně složitá technologie výroby, od čehož se odvíjí i následné vyšší náklady při stavbě sítě.

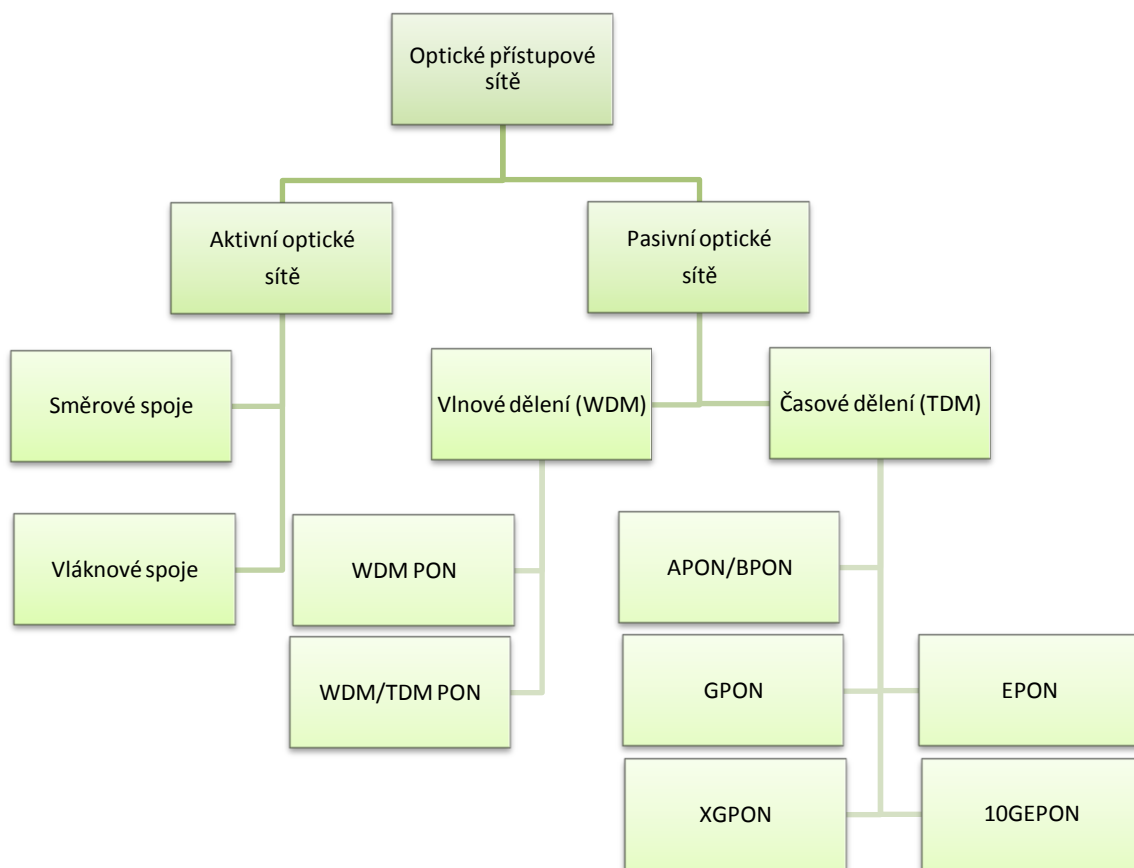
Optické vedení byly využívány původně pouze v páteřních částech sítí. V současnosti jsou však optické přípojky čím dál více instalovány co nejbližší k jednotlivým účastníkům v síti. Moderní optické přístupové sítě používají pro přenos dat kombinaci přenosových technologií vlnového a časového dělení (WDM-TDM). Z historického hlediska pasivní optické sítě nejprve využívaly pouze technologii časového dělení, poté následovala implementace vlnového dělení. Kombinování těchto dvou technologií je do budoucna vysoce perspektivní.

V úvodu této bakalářské práce je základní seznámení s optickými přístupovými sítěmi, jejich dělení a jsou popsány druhy možných realizací vedení optických vláken směrem k uživateli. Následuje sled kapitol, které popisují jednotlivé standardy pasivních optických sítí dle použité technologie. Značná pozornost je věnována sítím PON využívajícím vlnové nebo hybridní multiplexování. Na konci teoretické části této práce jsou popsány některé měřicí přístroje C/DWDM systémů.

Praktická část této práce je rozdělena do dvou částí. První část je zaměřena na grafický popis technologie WDM PON a hybridní kombinace WDM/TDM PON. Tyto dvě topologie jsou realizovány pomocí dvou animací vytvořených v programu Macromedia flash. Následuje druhá část, ve které jsou testovány tři druhy pasivních optických sítí s různými přenosovými rychlostmi v programu Optsim 5.2. Všechny simulace vycházejí z maximálních parametrů standardu ITU-T G.984.1 „Gigabit-capable Passive Optical Networks (G-PON): General characteristics“. Tyto parametry jsou mezi sebou porovnány a poté jsou u jednotlivých scénářů testovány jejich maximální parametry.

1. Optické přístupové sítě

V současné době mezi zákazníky narůstají nároky na objem přenesených dat, přenosovou rychlost a služby jako jsou IP TV (Internet Protocol Television) a VoD (Video on Demand). Těmto požadavkům již klasické metalické spoje přestávají stačit. Proto se začínají čím dál více uplatňovat optické přístupové sítě (OAN). Tyto sítě nabízejí na základě zvolené technologie, přenosové rychlosti v řádech stovek megabitů až jednotek gigabitů za sekundu. Na obrázku Obr. 1.1 je znázorněno technologické rozdělení optických přístupových sítí.



Obr. 1.1: Hierarchie optických přístupových sítí.

Jednou z hlavních překážek pro globální rozšíření optických přístupových sítí je vysoká pořizovací cena součástí potřebných ke stavbě nových sítí. Jedním z hlavních témat této práce jsou pasivní optické sítě. Ty se označují jako pasivní, jelikož na trase mezi OLT (Optical Line Termination) a ONT (Optical Network Termination) nejsou použity žádné aktivní prvky. Čili na trase vedení jsou použity pouze prvky nevyžadující napájení, jako jsou například pasivní optické rozbočovače a vazební členy.

1.1. Funkční prvky optické sítě

Optická distribuční síť (Optical Distribution Network - ODN)

- ODN lze definovat jako souhrn všech prvků a prostředků, které se mohou vyskytnout mezi jednotkami OLT a ONT,ONU. Jedná se o rozbočovače, vlnové filtry, konektory a další pasivní prvky.

Optické linkové zakončení (Optical Line Termination - OLT)

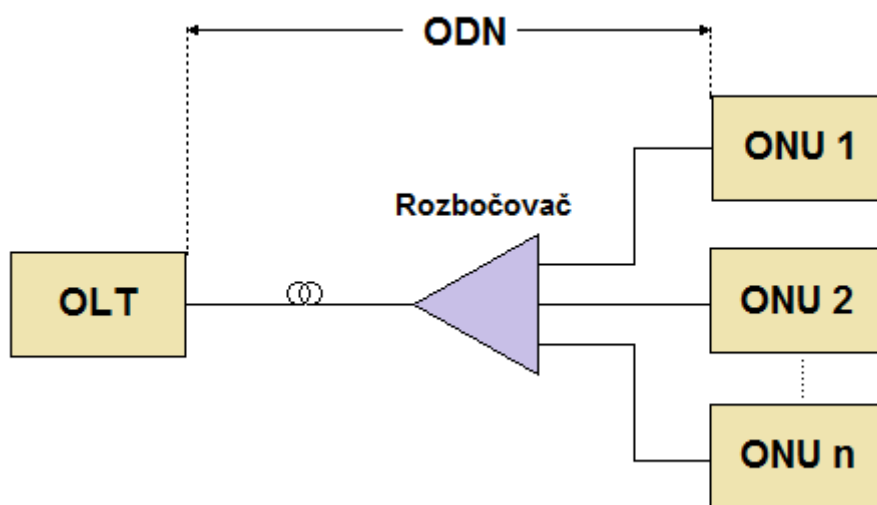
- OLT je koncové zařízení zajišťující funkci síťového rozhraní mezi sítí přístupovou a sítí s telekomunikačními službami.

Optické síťové zakončení (Optical Network Termination - ONT)

- ONT zajišťuje funkce účastnického rozhraní mezi koncovými zařízeními účastníků a přístupovou sítí.

Optická síťová jednotka (Optical Network Unit - ONU)

- ONU můžeme charakterizovat jako převodník mezi optickou a metalickou částí přístupové sítě [14][25].



Obr. 1.2: Obecné schéma optické sítě.

1.2. FTTx

Značka FTTx (Fiber To The x) je obecné označení pro druh realizace optické přístupové sítě. Technologicky je síť FTTx vystavěna pomocí optických vláken vedoucích z CO (Central Office) od zdroje, až co nejbližší ke koncovému uživateli v cílové destinaci. V současné době je v Evropě a USA nejrozšířenější technologie EPON, čili technologie pasivní optické sítě založené na přenosu

ethernetových rámců. V Asii (Japonsko) je naopak rozšířena technologie GPON. Podle toho, kde se nachází ukončení optického vlákna (rozvaděč, budova, atp.), lze tyto sítě rozdělit do několika typů. Druhů těchto sítí je mnoho, tudíž budou uvedeny pouze nejčastěji používané [14].

- FTTB (Fiber To The Building) optické vlákno je v této síti přivedeno přímo (až) do budovy, účastníci jsou připojeni prostřednictvím interní sítě,
- FTTH (Fiber To The Home) optické vedení je přivedeno až přímo k účastníkovi domů do jeho zásuvky,
- FTTO (Fiber To The Office) optické vlákna jsou zavedena přímo až do účastníkovra přístroje, nejčastěji do počítače,
- FTTC (Fiber To The Curb) je označení pro síť, ve které jsou optická vlákna dovedena pouze k optickému rozvaděči. Koncové body jsou následně napojeny pomocí metalických kabelů (UTP/STP),
- FTTEEx (Fiber To The Exchange) optická vlákna jsou ukončena v místě telefonní ústředny. Tam je umístěn DSLAM multiplexor a účastníci jsou následně propojeni pomocí metalického vedení,
- FTTCab (Fiber To The Cabinet) optická vlákna jsou zavedena do prostor uvedených účastníkem, s velkými nároky na přenosovou rychlost [25].

2. Pasivní optické sítě založené na časovém dělení

Mezi základními sítěmi PON je značně rozšířena technologie přenosu pomocí časového dělení (TDM – Time Division Multiplex). Časový multiplex je specifický tím, že data jsou vysílána k uživateli v krátkých časových intervalech tzv. timeslotech a všesměrově. V těchto intervalech je zapouzdřen identifikační rámec, podle kterého koncový účastník přijímá data pouze jemu přidělená. Toto jde ruku v ruce s rizikem odposlechu přenášených dat, tudíž je u časového dělení nutnost šifrování. Pro směr vzestupný je využita přístupová technologie TDMA (Time Division Multiple Access). Tento systém udává přesně vyhrazené časové intervaly, ve kterých mohou jednotlivé ONU vysílat data směrem k CO (Central Office). V následujících kapitolách jsou popsány standardy některých sítí.

2.1. APON/BPON

APON (ATM Based Passive Optical Network) byla standardizována v roce 1998 specifikací ITU - T G. 983.1. Tento typ sítě pracuje na bázi přenosu pomocí ATM (asynchronous transfer mode) buněk. Komunikaci lze zajistit dvěma způsoby a to symetricky s přenosovou rychlostí $155,52 \text{ Mbit.s}^{-1}$ oběma směry (downstream i upstream), anebo asymetricky s rychlostmi $622,08 \text{ Mbit.s}^{-1}$ pro sestupný směr (downstream) a $155,52 \text{ Mbit.s}^{-1}$ pro směr vzestupný (upstream).

Standard BPON (Broadband Passive Optical Network) byl schválen v roce 2001 specifikací ITU - T G. 693.3. Jde o rozšíření předchozího standardu APON s tím rozdílem, že BPON zavádí přenosovou rychlost $622,08 \text{ Mbit.s}^{-1}$ při symetrickém přenosu oběma směry.

Oba tyto standardy užívají tzv. prostorově dělený multiplex, což znamená buď nasazení jednoho vlákna pro každý směr vysílání nebo využití technologie WDM. Pro využití WDM jsou rezervovány tyto vlnové délky: [14]

- 1260 až 1360 nm pro vzestupný směr,
- 1480 až 1500 nm pro sestupný směr.

2.2. GPON

GPON (Gigabit capable Passive Optical Network) byl specifikován v roce 2003 standardem ITU – T G. 984.1. Tento typ sítě je jako oba předchozí standardy založen na přenosu pomocí ATM. GPON poskytuje rychlosti ve dvou variantách:

- symetrická služba s rychlostmi $1,244 \text{ Gbit.s}^{-1}$ nebo $2,488 \text{ Gbit.s}^{-1}$,
- asymetrická služba s rychlostmi $1,244 \text{ Gbit.s}^{-1}$ nebo $2,488 \text{ Gbit.s}^{-1}$ (downstream) a $155,52 \text{ Gbit.s}^{-1}$, $622,08 \text{ Gbit.s}^{-1}$ a $1,244 \text{ Gbit.s}^{-1}$ (upstream).

Fyzický dosah sítě je typicky 10 až 20 km [11].

U GPON je stejně jako u předchozích standardů APON a BPON použito pro přenos oběma směry současně dvou separátních vláken nebo technologie WDM. Vlnové délky využívané pro provoz jsou definovány standardem ITU – T G. 984.2, jsou však totožné s délkami APON/BPON. Toleranční rozmezí vlnových délek je stanoveno na 20 nm, může však dosáhnout až hodnoty 100 nm, v závislosti na kvalitě použitých optických vláken [11].

Novinkou u GPON oproti předchozím standardům je využívání protokolu GFP (Generic Framing Procedure), díky němuž lze uskutečnit přenos v nativním módu (přirozeném tvaru). To v závěru znamená, že není nutno hlas ani data zapouzdřovat do IP paketů nebo ATM buněk. Přenos je realizován dvěma způsoby a to buď pomocí ATM buněk, nebo metodou GEM (GPON Encapsulation Method), kde GEM se používá pro přenos rámců s proměnlivou délkou. Prvky obou dvou metod jsou přenášeny společně v podobě rámců se striktní délkou $125 \mu\text{s}$ [8][11].

2.3. XG – PON

Standard XG – PON měl v první řadě za úkol zachování zpětné kompatibility se starší specifikací GPON. Proto byly navrženy dvě varianty realizace GPON. XG – PON1 je založena na časově sdíleném přístupu (TDMA) a vlnového multiplexu využívá pouze okrajově, kdežto varianta XG – PON2 (nebyla standardizována) plně využívá technologie WDM a díky tomuto typu dělení vlnových délek může dosáhnout sdílených rychlostí až 40 Gbit.s^{-1} . Druhá z variant ovšem nezajišťuje plnou kompatibilitu vzhledem ke standardu GPON, tudíž bylo přistoupeno k realizaci první varianty.

XG – PON tedy vychází z implementace doplňků do sítě GPON, a tedy i využití již stávajících prvků GPON v síti. Z toho vyplývá nutnost volby vhodných vlnových délek pro přenos dat. [9]

- sestupný směr 1575 – 1580 nm (oddělení od pásma vlnových délek GPON),
- vzestupný směr 1260 – 1280 nm.

Výběr vlnových délek pro vzestupný směr si vyžádalo aktualizaci stávajících vlnových délek zpětně ve standardu GPON z 1260 – 1360 nm na novou hodnotu 1290 – 1330 nm. Toto rozšíření je popsáno ve specifikaci ITU – T G. 984.5. Rozsah vlnových délek byl zvolen z důvodu zachování pilotní vlnové délky 1310 nm. Dále také díky této změně nedochází k prolínání jednotlivých vlnových délek, tudíž vzniká dostatečná rezerva mezi jednotlivými délkami. Pro přenosovou rychlost byla klíčová volba kódování. Zvolena byla možnost kódování NRZ a skrambleru, což vychází z principu SDH (Synchronous Digital Hierarchy). Výsledné rychlosti byly stanoveny na parametry:

- Sestupný směr 9,95328 Gbit.s⁻¹ (STM – 64),
- Vzestupný směr 2,48832 Gbit.s⁻¹ (STM – 16) [9].

2.4. EPON

EPON (Ethernet based Passive Optical Network) byla specifikována standardem IEEE 802.3ah. Standard EPON se od GPON liší jen minimálně. Hlavním rozdílem těchto sítí je rozdíl v technologii, kde ATM je nahrazeno technologií Ethernetu. Lze se také setkat s označením EFMF (Ethernet in the First Mile Fibre) tedy „Ethernet v první optické míli“. U EPON lze dosáhnout přenosových rychlostí až 1244,16 Mbit.s⁻¹ a to v závislosti na použitém rozhraní. EPON je navržena pro komunikaci P2MP, ovšem lze ji emulací modifikovat i na P2P resp. P2PE a také ji lze realizovat jako EFMC, kde je jako přenosové médium použita metalická přípojka. Pro tyto tři různá média jsou definovány rozdílné typy rozhraní. [14]

- Metalická přípojka – EFMC:
 - 10 PASS – TS – O/R (Short haul, Central Office/Remote unit) – 10 až 100 Mbit.s⁻¹, 1 pár (VDSL), dosah 750 m,
 - 2 BASE – TL – O/R (Long haul, Central Office/Remote unit) – 2 až 5,696 Mbit.s⁻¹, 1 pár (SHDSL), dosah 2,7 km.
- Optické připojení bod – bod (P2P), dosah 10 km:
 - 100 BASE – BX 10 – D/U (Downstream – OLT, Upstream – ONU), 1 vidové vlákno,
 - 100 BASE – LX 10 – 2 jednovidová vlákna,
 - 1000 BASE – BX 10 – D/U (Downstream – OLT, Upstream – ONU), 1 vidové vlákno,
 - 1000 BASE – LX 10 – 2 jednovidová vlákna (případně 2 mnohavidová vlákna s dosahem maximálně 550 m).

- Mnohabodová optická síť:
 - 1000 BASE – PX 10 - D/U (Downstream – OLT, Upstream – ONU) – 1 jednovláknové vlákno do 10 km, při maximálním rozbočení 1 : 16 (max. 16 ONT),
 - 1000 BASE – PX 20 - D/U (Downstream – OLT, Upstream – ONU) – 1 jednovláknové vlákno do 20 km při maximálním rozbočení 1 : 32 (max. 32 ONT) [24].

Nejperspektivnější variantou je EFMP, čili mnohabodové optické sítě označované jako 1000 BASE – PX. Tato varianta využívá vlnového dělení směrů přenosu (WDM). Pro přenos jsou rezervovány vlnové délky 1310 nm pro vzestupný směr a pro sestupný směr jsou vyhrazeny délky 1490 a 1550 nm. U těchto mnohabodových řešení optické sítě, ale i u specifických řešení P2P připojení, se můžeme setkat také s označením 10GEPON, které označuje standard EPON s rychlostí 10 Gbit.s⁻¹ [24].

2.5. 10GEPON

Hlavním cílem specifikace 10GEPON je zachování zpětné kompatibility s předchozím standardem EPON. To spočívá v možnosti provozovat obě varianty v rámci jedné distribuční sítě, ale také v možnosti nahradit stávající síťové prvky EPON novějšími modely pro řadu 10GEPON. Standard byl specifikován v roce 2009 s označením IEEE 802.3av.

I technologie 10GEPON je založena na přenosu Ethernetových rámců a i zde je využito vlnového dělení směrů přenosu, ovšem s malou změnou, a sice že pro vzestupný směr je k přenosu využita pouze jedna vlnová délka a k tomu je implementována přístupová metoda na základě časového dělení (TDMA). Dále na rozdíl od EPON nabízí 10GEPON dvě varianty přenosových rychlostí a to symetrickou a nesymetrickou. Symetrická varianta nám nabízí přenosové rychlosti obousměrně 10 Gbit.s⁻¹, kdežto asymetrická verze má přenosové rychlosti ve vzestupném směru 1 Gbit.s⁻¹ a v sestupném směru je zachována rychlost 10 Gbit.s⁻¹ [12].

Hodnoty maximálního rozbočení jsou standardně stejné jako u EPON, ovšem jedná se pouze o doporučené hodnoty. Maximální rozbočení by se dalo navýšit i na hodnoty 1 : 64 a 1 : 128, ale pouze za předpokladu dodržení hraniční hodnoty celkového překlenutelného útlumu a na úkor jednoho z parametrů (vyšší rozbočovací poměr znamená kratší dosah sítě).

Za účelem zachování koexistence s předchozím standardem EPON musely být přiděleny specifikaci 10GEPON nové vlnové délky pro přenos dat. Pro sestupný směr byly vyhrazeny pro přenos vlnové délky 1575 – 1580 nm. U vzestupného směru byla kvůli zpětné kompatibilitě zachována vlnová délka 1310 nm, a proto se muselo přistoupit k oddělení optických signálů pomocí časového multiplexu (TDM).

Důležitým faktorem pro zachování zpětné kompatibility je implementace dvourychlostního rozhraní schopného pracovat s přenosovými rychlostmi 1 a 10 Gbit.s⁻¹ do jednotlivých OLT a ONU/ONT [12].

2.6. Srovnání technologií xPON

Tabulka č. 2.1 přehledně porovnává jednotlivé standardy sítí xPON založené na časovém dělení. Přes značnou podobnost parametrů je nutno zdůraznit, že jednotlivé typy PON nejsou vzájemně kompatibilní. Zachována byla kompatibilita pouze u G-PON > XG-PON a E-PON > 10GE-PON, což je patrné ze značné podobnosti některých parametrů.

Tab. 2.1: Srovnání technologií xPON.

Technologie	Jednotka	B-PON	G-PON	E-PON	XG-PON	10GE-PON
Standard	-	ITU-T G.983.x	ITU-T G.984.x	IEEE 802.3ah	ITU-T G.987.x	IEEE 802.3av
Vlnová délka upstream	nm	1260 - 1360	1260 - 1360	1310	1310	1260 - 1280
Vlnová délka downstream	nm	1480 - 1500	1480 - 1500	1490	1575 - 1580	1575 - 1580
Přenosová rychlost upstream	Gbit.s ⁻¹	0.155 - 0.62	0.155, 0.62, 1.25, 2.48	1.25	2.5 - 10.0	10.0
Přenosová rychlost downstream	Gbit.s ⁻¹	0.155, 0.62, 1.25	1.25 - 2.5	1.25	10.0	10.0
Maximální dosah	km	20	20	10,20	20	10,20
Maximální počet účastníků	-	32	64	32	64 (128/256)	64 (128)
Přenosová technologie	-	ATM	ATM, TDM, WDM, Eth.	Ethernet	TDM, WDM, Ethernet	Ethernet
Maximální vložný útlum	dB	20/25/30	20/25/28/30/32	15/20	20 - 30	20/24/29

3. Technologie vlnového dělení

Z historického hlediska byl koncept vlnového dělení publikován v roce 1970, ovšem až v roce 1978 byl fyzicky realizován v laboratorních podmínkách. Technologie WDM (Wavelength Division Multiplexing) je založená na přenosu dat pomocí optických spojů. Spočívá tedy v tom, že jedním optickým vláknem přenáší několik optických signálů pomocí vybraných vlnových délek [5][9].

Vlnový multiplex vychází z konceptu frekvenčního multiplexu (FDM). Rozdíl je však v tom, že u WDM je signál popsán a modulován svojí přidělenou vlnovou délkou, kdežto FDM je popsán pomocí přiřazené frekvence. U obou těchto technologií se informace šíří pomocí elektromagnetického

vlnění, z toho i vyplývá vztah frekvence a vlnové délky, které jsou k sobě nepřímo úměrné. Dalším z patrných rozdílů je uplatnění v praxi. WDM se využívá v oblasti optického přenosu, naopak FDM je doménou rádiové techniky [1].

Při využití jednoho optického vlákna nastává otázka, jak jednotlivé nosné vlny signálu distribuovat ke koncovým uživatelům. K tomu slouží pasivní optické rozbočovače (splittery) nebo směrové odbočnice (AWG). Pasivní rozbočovače vysílají optický signál všesměrově a následně je na koncovém zařízení, aby přijalo pouze ta data, která jsou mu určena. Aby každé ONU získalo na přijímači pouze svou přidělenou vlnovou délku, obsahuje ještě pasivní filtr, který odfiltruje „nežádoucí“ nosné signály. Funkce optického filtru odpadá při použití vlnové odbočnice, která vydělí jednotlivé vlnové délky. Ty jsou potom směrovány už přímo ke své cílové ONU. Každé koncové zařízení také obsahuje opticko-elektrický převodník. A to proto, že samotný optický signál není vhodný ke zpracování [10].

Technologie vlnového dělení má spoustu předností, kterými lze vylepšit vlastnosti optické sítě:

- jednoduchá implementace do již existujících optických sítí,
- transparentnost: nezávislost na přenášeném protokolu,
- jednoduchá škálovatelnost: Namísto přechodu na nové technologie lze jednoduše přidat nový kanál k již stávajícím kanálům. Firmy tedy mohou platit pouze za šířku pásma, kterou opravdu potřebují [1].

Postupem času byly navrženy technologie „hustého“ a „hrubého“ vlnového dělení (CWDM/DWDM). Tyto dvě normy značně přispěly k zefektivnění přenosu většího množství vlnových délek pomocí jednoho vlákna. Oba typy těchto multiplexů jsou popsány v kapitolách 3.2 a 3.3.

3.1. Technologie WWDM

WWDM (Wide Wavelength Division Multiplex) lze přeložit do češtiny jako tzv. „široký“ vlnový multiplex. Technologie je realizována nejčastěji pro přenos gigabitového a deseti-gigabitového ethernetu. Pro přenos většinou využívá vlnových délek ve třech oblastech.

- 850 nm s využitím vícevidových optických vláken,
- 1300 a 1310 nm s využitím vícevidových i jednovidových vláken.

Jednotlivé vlnové délky mají odstup typicky 25 nm [14].

3.2. Technologie DWDM

DWDM (Dense Wavelength Division Multiplex) patří mezi nejšpičkovější technologie, se kterými se lze setkat v optoelektronice. Jak už název napovídá tzv. „hustý“ multiplex uplatňuje koncept minimálních odstupů mezi jednotlivými kanály. To v kostce znamená, že do jednoho vlákna lze implementovat i desítky vlnových délek.

Technologii DWDM specifikuje standard ITU – T G. 694.1 „Spectral grids for WDM applications: DWDM frequency grid“. Tato technologie se začala objevovat okolo 90. let minulého století. Tehdy byly rozestupy mezi jednotlivými vlnovými délkami okolo 400 GHz [6]. Následně s vývojem WDM prvků a příchodem zařízení podporujících 16 a více kanálů, se objevila první zmínka o tzv. hustém vlnovém multiplexu. DWDM pracuje v oblasti vlnových délek od 1490 – 1620 nm (pásma S, C, L). Oproti 90. létům se odstupy jednotlivých kanálů značně změnily. Nyní jsou odstupy jednotlivých nosných určeny frekvencí 100 GHz, což odpovídá vlnové délce 0,8 nm. Lze také realizovat odstupy kanálů dosahující i razantně nižších hodnot a to 50 GHz (0,4 nm), 25 GHz (0,1 nm -> Ultra DWDM) a do budoucna i hodnotu 12,5 GHz. Pro základní hodnotu odstupu 100 GHz je definována odchylka s tolerancí $\pm 0,16$ nm [3][14].

3.3. Technologie CWDM

CWDM (Coarse Wavelength Division Multiplex) tzv. „hrubý“ vlnový multiplex přišel jako levnější varianta za technologii DWDM, jelikož neklade tak vysoké nároky na přesné a technologicky náročné prvky. Specifikace ITU – T G. 694.2 definuje velikost odstupu jednotlivých kanálů vlnových délek za účelem využití laserových diod jako zdroje záření bez nutnosti realizace chlazení.

Pro technologii CWDM byly zvoleny hodnoty vlnových délek zpětně kompatibilní s vlnovými délkami 1310 nm a 1550 nm. Mezi jednotlivými vlnovými délkami (kanály) je odstup charakterizován hodnotou 20 nm. V každém kanálu lze přenášet technologii gigabitového ethernetu a to až do vzdálenosti 80 km. Ovšem při rychlostech dosahující STM – 16 ($2,5 \text{ Gbit.s}^{-1}$) lze dosáhnou pouze okolo 50 km.

„Hrubý“ vlnový multiplex se v největší míře uplatňuje u dvoudobých spojů uspořádaných do kruhové topologie do čtyř uzlů. Často se tak CWDM užívá v metropolitních sítích jako řešení problému tzv. „poslední míle“ [14][24].

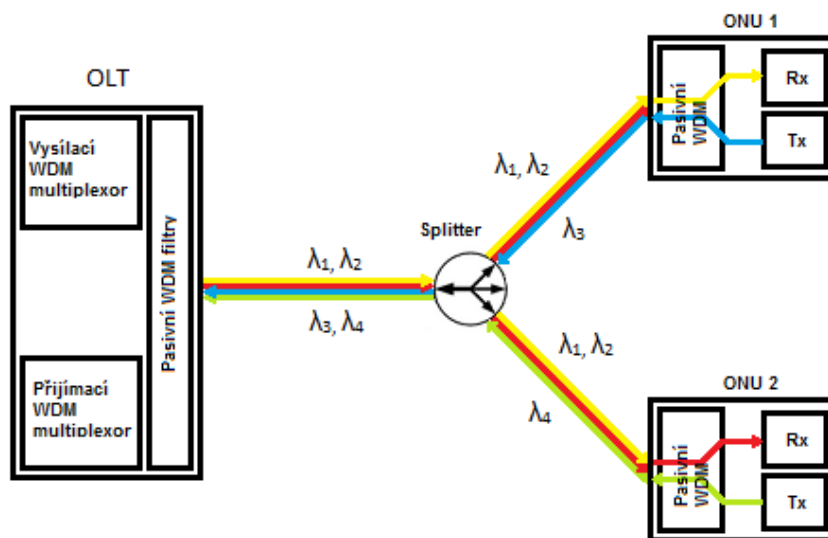
4. Pasivní optické sítě založené na vlnovém dělení

Jelikož sítě založené na časovém dělení již přestávají pomalu stačit požadavkům zákazníků, je WDM – PON (Wavelength Division Multiplex – Passive Optical Network) budoucností pasivních optických sítí. Jak již plyne z názvu, jedná se o síť využívající technologii vlnového dělení.

Specifickým prvkem WDM – PON z hlediska fyzické topologie je nahrazení klasického pasivního rozbočovače novou směrovou odbočnicí zkráceně AWG (Arrayed Waveguide Grating). Lze samozřejmě využít i osvědčených pasivních rozbočovačů, ovšem z hlediska využití se odbočnice vyplatí mnohem více. Z hlediska logické topologie je patrné, že jelikož každý uživatel v síti má přidělenou svou vlastní vlnovou délku (přenosový kanál) o kterou se s nikým nemusí dělit, jedná se o topologii P2P čímž se WDM – PON liší od klasických pasivních optických sítí [13][14].

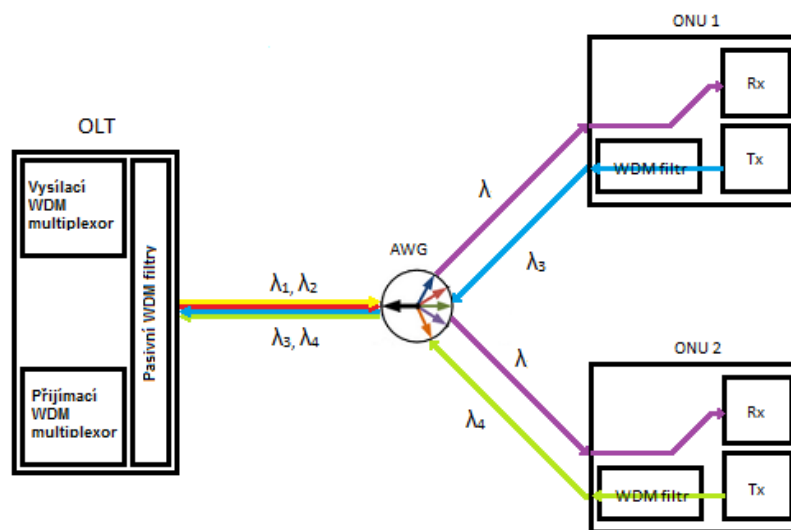
4.1. Způsoby realizace WDM – PON

Prvním způsob realizuje pasivní optickou síť pomocí klasického pasivního rozbočovače (splitteru) a každý uživatel má pevně přidělenou vlnovou délku. Každé ONU pak obsahuje vlastní filtr, který vyfiltruje svou nosnou vlnovou délku. Ve vzestupném směru budou mít všechny ONU svou individuální vlnovou délku, pomocí které pak budou vysílat odchozí pakety. Pro všesměrové šíření (broadcast) mají ONU vyhrazeny jednu speciální vlnovou délku. Nevýhody tohoto provedení jsou patrné již z pevného přidělení vlnových délek, což znamená nevhodné nakládání s přenosovými kapacitami a také celá síť je značně nepružná k jakékoliv změně. Další problém je nutnost šifrování v sestupném směru kvůli zabránění odposlechu. Poslední značnou nevýhodou je, že se v síti nemohou objevit dvě jednotky komunikující na stejné vlnové délce [10].



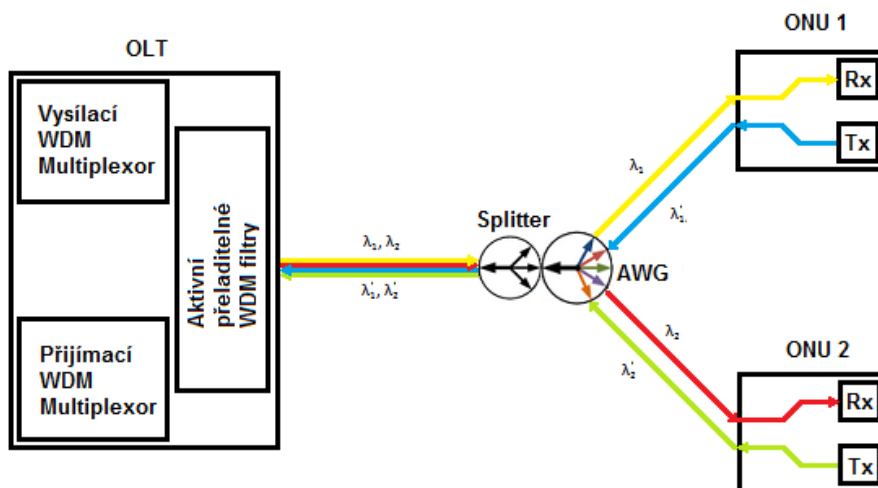
Obr. 4.1: WDM - PON s využitím pasivního rozbočovače [9].

Druhé provedení pasivní optické sítě (WDM – PON) nahrazuje pasivní rozbočovač prvkem směrové odbočnice (AWG). Hlavním rozdílem je, že odbočnice na rozdíl od rozbočovače již rozdělí signál na jednotlivé vlnové délky, které pak šíří dále po síti k určeným jednotkám ONU. Výhodou této varianty je značný pokles vloženého útlumu i o 5 dB na rozdíl od varianty s využitím klasických pasivních rozbočovačů. Dále odpadá nutnost, aby každé ONU obsahovalo svůj filtr, což má také vliv na snížení útlumu [10].



Obr. 4.2: WDM - PON s využitím AWG odbočnice [9].

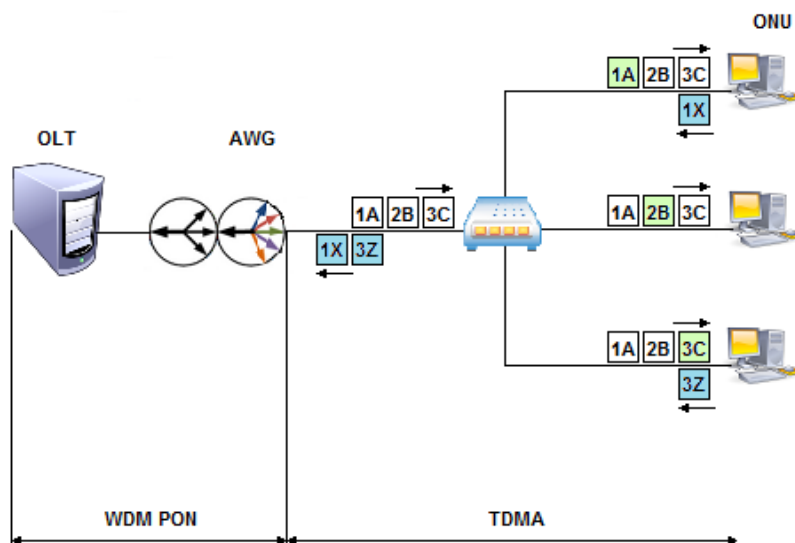
Třetí varianta využívá oproti předchozím technologiím jiné koncové jednotky ONT. V těchto jednotkách se využívá opticky zavěšeného FP laseru. Tento laser pracuje na stimulační vlnové délce, jejíž signál přichází směrem od směrové odbočnice. Při průchodu odbočnicí se oddělí signál pro příchozí směr a pokračuje dále k cílové ONT. Další část světelného paprsku projde skrz filtr dále na FP laser. Díky zavěšení FP laseru dochází ke změně spektra a laser lze následně využít jako vysílač [10].



Obr. 4.3: WDM - PON s využitím pasivního rozbočovače a AWG odbočnice [9].

4.2. WDM / TDM – PON

Technologie WDM / TDM – PON, často označované jako hybridní, v sobě sdružují možnosti vlnového a časového dělení. Nejjednodušší realizaci WDM/TDM – PON si lze představit jako propojení několika optických sítí založených na časovém dělení, které mají přiděleny své dvě vlastní vlnové délky, na kterých komunikují ONU obousměrně pomocí TDM. Díky přiděleným vlnovým délkám odpadá nutnost implementace řídicího protokolu (MAC) [13][19].



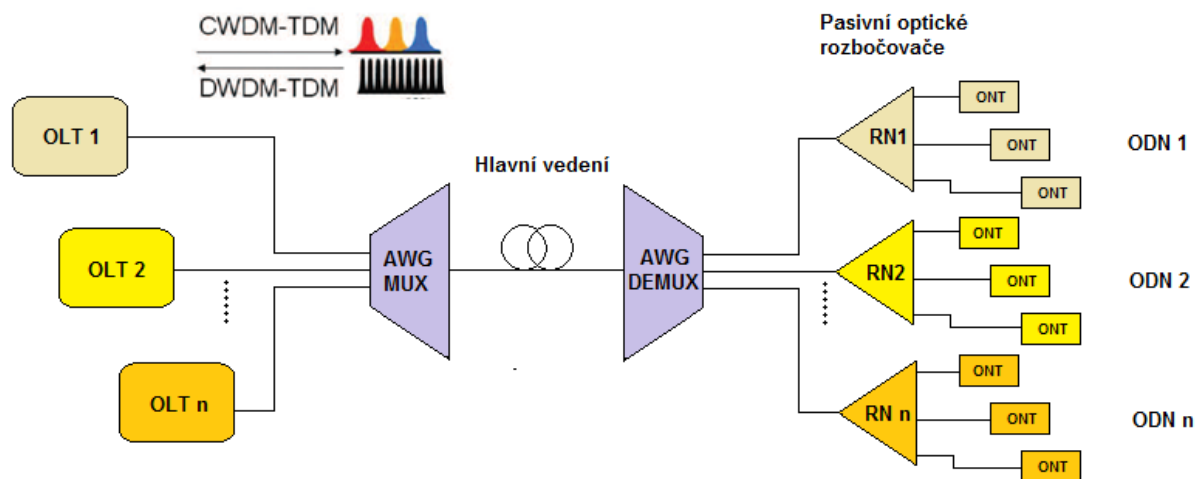
Obr. 4.4: WDM/TDM PON.

V síti lze dále implementovat technologii DWA (Dynamic Wavelength Assignment), která zaručuje dynamické přidělování vlnových délek jednotlivým ONU. S DWA lze kombinovat i mechanismus DBA (Dynamic Bandwidth Allocation), čili dynamické přidělování šířky pásma. Technologie DWA / DBA umožňuje kromě dynamického přidělení vlnové délky také přidělování časového intervalu pro vysílání. Tento mechanismus je implementován v OLT a toto koncové zařízení zastává funkci síťového rozhraní a přiděluje jednotkám ONU jak časový interval pro vysílání, tak i vlnovou délku. Uvedený systém razantně zefektivňuje alokaci přenosových prostředků [5][13].

4.3. Nové generace WDM / TDM PON

Požadavky koncových uživatelů na parametry jako jsou dosah sítě a přenosová rychlost narůstají každým dnem. Hledají se tedy nová řešení jak požadované parametry navýšit. Jako velmi slibný se jeví koncept CWDM/TDM PON, čili implementace „hrubého“ vlnového dělení v kombinaci s časovým dělením. Ovšem ještě technologicky lepší možností se zdá být CWDM/DWDM TDM PON. Tato síť využívá kombinaci jak „hrubého“ tak i „hustého“ vlnového dělení, kde každá

technologie je určena pro jeden směr komunikace. Systém TDMA se stará o organizaci mezi koncovými uživateli. Příklad je uveden na obrázku 4.5 [5].



Obr. 4.5: C/DWDM-TDM PON.

Jak je patrné z obrázku 4.5, konkrétní síť využívá CWDM pro downstream a DWDM pro upstream. Pro komunikaci uživatelů používá mechanismus TDMA (Time Division Multiplexing Access). Vlnové délky určené k přenosu pomocí CWDM jsou rozděleny do pěti pásem v rozmezí 1260 – 1625 nm viz ITU – T G. 694.2. [19][24].

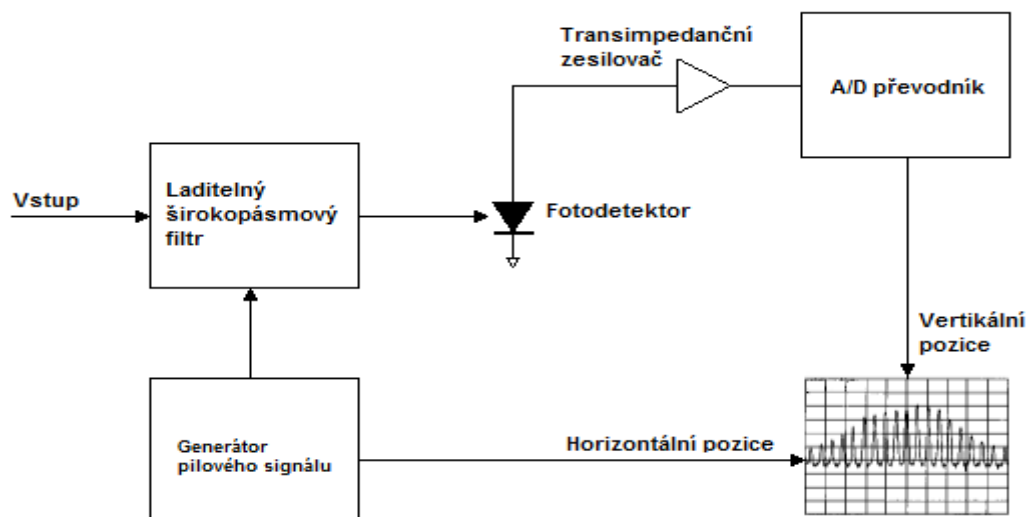
Další možností pro budování budoucích optických sítí jsou sítě nazývané SPON (Super PON) anebo sítě LR – PON (Long Reach PON). Díky těmto technologiím lze dosáhnout i vzdáleností vyšších než je 100 km, nebo při začlenění vlnového dělení dosáhnout připojení až několika set účastníků (ONU). Tato technologie má však jednu nevýhodu, a to tu, že by bylo nutno na trase sítě vhodně umístit aktivní prvky v podobě zesilovačů. Tudíž by se již nejednalo o čistě pasivní optickou síť. V úvahu přicházejí Erbium dopované optické zesilovače (R – P EDFA) a reflektivní polovodičové optické zesilovače (RSOA). Dalším krokem by byla výměna dnes již zaběhlých fotodetektorů (PIN diod) za technologicky vyspělejší „lavinové“ fotodiody (APD). Všechny tyto změny by byly razantně náročné pro realizaci, již kvůli ceně pořizovacích prostředků [13][24].

Šířku pásma lze také navýšit pomocí OTDM (Optically Time Division Multiplexing). Tuto technologii lze považovat za nástupce NG-PON2 (10.2 Tbps na kanál). Velice perspektivní je spojení technologií WDM a OTDM. Výhodou této kombinace je výborné zabezpečení, velká šířka pásma a značný fyzický dosah sítě (více než 100 km). Dalšími možnými vylepšeními pasivních optických sítí je využití ortogonálního frekvenčního multiplexu (OFDM PON) nebo kódového přístupu pomocí CDMA (Code Division Multiple Access). Možným vylepšením PON sítí je také technologie ODSM (Opportunistic and Dynamic Spectrum Management) [15].

5. Měření optoelektronických systémů

5.1. Optický spektrální analyzátor

Principiálně optický spektrální analyzátor, nebo také OSA (Optical Spectrum Analyzer), rozkládá pomocí difrakční mřížky přijatý signál a rozložený signál následně analyzuje pomocí fotodetektoru. Na obrázku 5.1 je vyobrazeno blokové schéma obecného optického analyzátoru.



Obr. 5.1: Zjednodušené blokové schéma spektrálního optického analyzátoru [15].

Vysílaný signál prochází skrz širokopásmový filtr, který zpracuje jednotlivé spektrální složky individuálně. Signál následně prochází fotodetektorem, který jej převede na elektrický proud úměrný hodnotě dopadajícího optického výkonu. Proud z fotodetektoru je pomocí transimpedančního zesilovače přeměněn na napětí a po průchodu A/D převodníkem převeden do digitální formy. Od tohoto bodu se již všechny korekční kroky atp. provádí digitální cestou. Signál je pak přiveden na displej jako tzv. vertikální pozice tj. amplituda signálu. Generátor pilovitého signálu poté zajistí horizontální část signálu. Generátor také řídí optický filtr tak, aby jeho rezonanční vlnová délka korespondovala se zbytkem systému [2].

OSA je velice výkonným přístrojem, vhodným k měření velice slabých signálů a to díky vysoké citlivosti až - 80 dB. Jednou z nevýhod optického spektrálního analyzátoru je snížená přesnost měřené vlnové délky (+/- 0,4 dB) a horší selektivita přístroje. To je způsobeno obtížností měřené optické soustavy [2]. Velice výhodným je OSA hlavně pro měření OSNR (Optical Signal-To-Noise Ratio). Tento parametr udává, jak moc bude signál znehodnocen po průchodu optickou sítí. Lze jej také definovat jako poměr signálu a šumu. Hodnota OSNR se značně „zhoršuje“, pokud roste počet zesilovačů na trase [2][16].

5.2. Měřič optického výkonu

Měřič optického výkonu pracuje na principu přeměny výkonu světelného paprsku, vyzařovaného rozmanitými zdroji světelného záření, na signál elektrický. Tento proces zajišťuje opticko-elektrický převodník. Základní OPM (Optical Power Meter) obsahuje tyto tři části:

- Adaptér - vhodně upravuje signál pro jednodušší zpracování v senzoru.
- Senzor - stará se o převedení optického signálu na elektrický, lze o něm mluvit jako o opticko-elektronickém převodníku.
- Indikátor - zprostředkovává výsledek pomocí displeje

Důležitým faktorem při zpracovávání signálu pomocí adaptéru je, že datový tok musí být tak vhodně upraven, aby jeho parametry byly následně zpracovatelné i pro senzor. To mimo jiné znamená přivést značnou část výkonu na senzor [2][16].

5.3. Měřič vlnových délek

Principiálně pracuje měřič vlnových délek (MWM) stejně jako interferometr, kde je interferenční obraz zobrazen a zpracován pomocí rychlé Fourierovy transformace (FFT). Velikou výhodou MWM je vysoká selektivita. MWM dosahuje až o řád (a více) lepší selektivity než optický spektrální analyzátor (OSA). Nevýhodou MWM je nízká citlivost měření optického výkonu (typicky - 45 dBm) což znemožňuje měření slabých signálů. Tato dysfunkce je způsobena již zmíněnou obtížností FFT. Kalibraci interferometru lze provést pomocí spektrálně čistého a stabilního HeNe laseru, čímž dosáhneme značné přesnosti měření vlnových délek až $\pm 0,004$ nm [2].

5.4. Měření bitové chybovosti

Bitová chybovost (BER) je hlavním parametrem pro posouzení kvality optické přístupové sítě. Hodnotu BER, udává poměr chybně přijatých bitů vzhledem k celkovému počtu přijatých bitů koncovým uživatelem za určitou dobu viz vzorec 4. 1 [2].

$$BER = \frac{bE}{vp.t} \quad [-] \quad (5.1)$$

Kde v udává hodnotu přenosové rychlosti,
 t je doba měření.

Dále lze BER vypočítat se znalostí hodnoty Q – faktoru. Tento parametr udává kvalitu analogového signálu vzhledem k jeho odstupu mezi signálem a šumem. Obsahuje všechna fyzikální zhoršení, která mohou působit na vysílaný signál na trase. Tyto nežádoucí jevy (nonlinearity,

chromatická i polarizační disperze) se projevují jako tzv. šum, který může způsobovat bitové chyby v systému. Q-faktor lze vypočítat dle vzorce [2].

$$Q = \frac{I_1 - I_0}{\sigma_1 + \sigma_0} \quad [-] \quad (5.2)$$

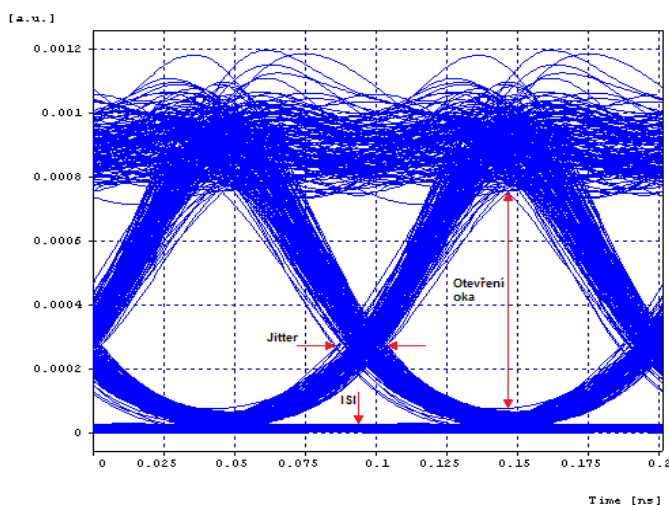
Kde I_1 je logická úroveň „1“,
 I_0 je logická úroveň „0“,
 σ_1 je standardní odchylka logické úrovně „1“,
 σ_0 je standardní odchylka logické úrovně „0“.

S využitím vypočítaného parametru Q – faktoru lze následně pomocí vzorce 4.3 vypočítat bitovou chybovost BER [2].

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

5.5. Diagram oka

Diagram oka zobrazuje superpozici všech navzájem překryvných bitů v signálu. Na první pohled lze z diagramu oka vysledovat dva nežádoucí parametry. Jedná se o mezisymbolovou interferenci tzv. ISI (Intersymbol interference) a druhým parametrem je kolísání zpoždění tedy jitter. Tento efekt lze popsat jako krátkodobé vychýlení digitálního signálu z jeho ideální pozice. Čím větší je parametr jitteru, tím menší je rušení a útlum na vedení. To v konečném důsledku znamená vyšší kvalitu přenášeného signálu. Na obrázku 5.2 je vyobrazen diagram oka s vyznačenými hlavními parametry [2].



Obr. 5.2 Diagram oka (program Optsim 5.2).

6. Animace

Úvodem je nutné zmínit program, který posloužil k vytvoření animací. Volba padla na Macromedia Flash 8 Professional, jehož 30-ti denní trial verze je volně dostupná ke stažení na internetu.

Na první pohled je v animacích patrné oddělení jednotlivých vysílacích směrů. Je však nutné podotknout, že toto opatření je využito pouze v animacích, obecně sítě PON pracují plně duplexně.

6.1. WDM-PON animace

Animace je rozdělena do dvou částí tak, aby byl oddělen downstream a upstream. V dolní části animace jsou patrné popisky momentálního děje v animaci. Průběh celé animace je popsán dále.

Downstream:

Z Central Office (ústředny), ve které se nachází výchozí OLT, je vyslán multiplexovaný signál směrem k vlnové odbočnici (AWG). Tok dat reprezentovaný tímto signálem je vyobrazen dvoubarevným pruhem postupujícím směrem k AWG. To, že oba pruhy proudí směrem k AWG zároveň, znázorňuje časovou nezávislost jednotlivých vlnových délek na sobě. V odbočnici se multiplexovaný signál vydělí na jednotlivé vlnové délky. V případě animace jsou pro názornost zvoleny pouze dvě vlnové délky, v reálné síti by bylo délek razantně více. Každá cílová ONU má přiřazenou svou privátní vlnovou délku. Pro lepší pochopení byl od AWG vyslán pouze jeden „blok dat“ na dané vlnové délce. Tento blok následně dorazí na přijímač RX cílové ONU.

Upstream:

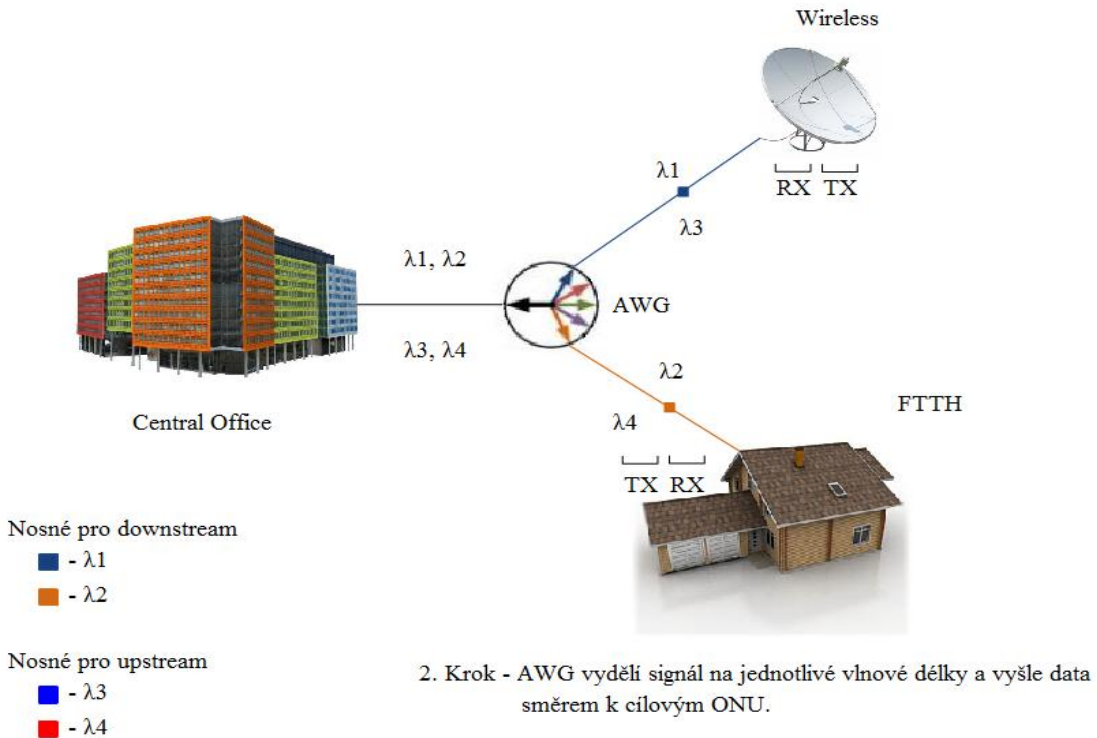
Pro přenos směrem k ústředně má každý uživatel (ONU) přidělenou svou novou privátní vlnovou délku určenou pro vzestupný směr. Toto je rozlišeno opět barevně. Z TX je vyslán blok dat, směrem k AWG. Po průchodu skrz AWG se data na privátních vlnových délkách šíří směrem k ústředně (CO) v podobě vlnově multiplexovaného optického signálu, který je následně v CO dále zpracováván.

Závěr:

Je nutné si uvědomit, že síť proudí data permanentně. V animaci je ale podstatné znázornit průběhy jednotlivých režimů. Tudíž v momentě, kdy datový tok po vydělení vlnových délek pomocí AWG zmizí, data za CO proudí i nadále, pouze nejsou v animaci vyobrazena. Topologie animace WDM-PON je vyobrazena na obrázku 6.1.

WDM - PON s využitím směrové odbočnice (AWG)

Downstream



Obr. 6.1: Topologie WDM-PON s využitím směrové odbočnice.

6.2. WDM-TDM PON animace

Na rozdíl od předchozí aplikace WDM PON přibyl v animaci nový prvek pasivní rozbočovač (splitter).

Downstream:

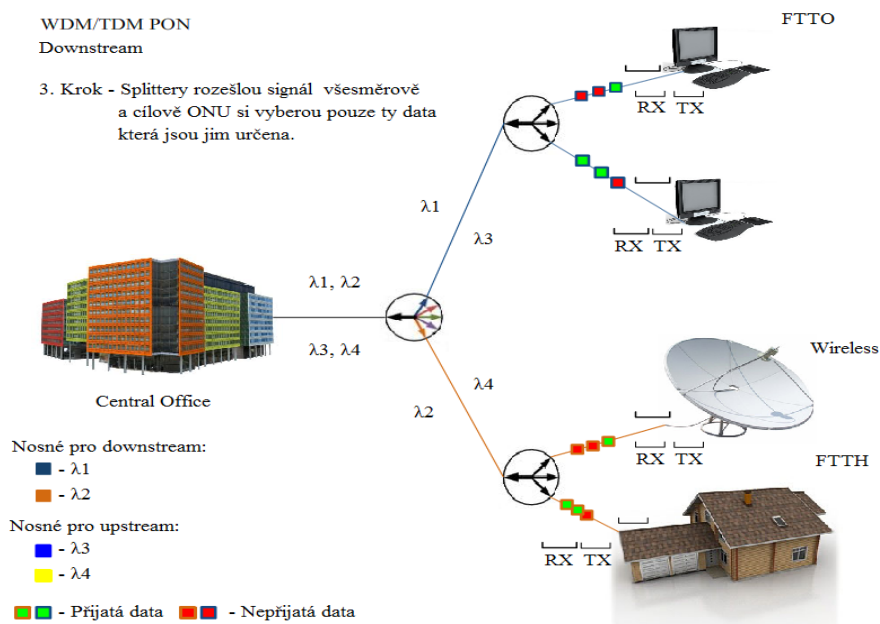
Začátek animace je totožný s průběhem z animace WDM PON. Z CO je veden multiplexovaný signál (zobrazený paralelně postupujícími barevnými pruhy) směrem k vlnové odbočnici AWG. Odbočnice tento signál rozdělí na jednotlivé vlnové délky a vyšle je k cílovým uživatelům. Pro větší názornost je datový tok zobrazen pomocí jednoho bloku (barevný čtverec), který je přenášén směrem k pasivnímu rozbočovači. Tento rozbočovač rozesílá přijatý signál všesměrově a cílově ONU přijmou pouze ty informace, které jsou pro ně určeny (mechanismus TDMA). Data se šíří stále na stejné vlnové délce. To je znázorněno barevným okrajem kolem přenášěných datových bloků. Ty, které jsou určeny dané ONU, jsou označeny zelenou barvou a jsou přijaty na přijímač RX. Červeně označené pakety nejsou určeny pro danou ONU a jsou zahozeny.

Upstream:

Každá ONU má přidělen svůj časový interval, ve kterém může vysílat data. Tudiž se v síti jednotlivé koncové jednotky střídají při vysílání dat směrem k CO. Toto je v animaci znázorněno tak, že jednotlivé ONU posílají blok dat postupně za sebou. Pro vysílání mají ONU přiděleny nové privátní vlnové délky (což je znázorněno pomocí nové barvy). Při průchodu skrz AWG se signál od rozbočovače přemění na multiplexovaný datový tok, který se po optickém vlákne šíří směrem k CO.

Závěr:

Je důležité poznamenat, že stejně jako u předchozí animace data tečou obousměrně nepřetržitě, ovšem pro názornost jsou posílány jen jednotlivé bloky dat. Stejně jako u předchozí animace jsou odděleny downstream a upstream. Platí zde i stejný mechanismus s datovým tokem. Tedy když při kontaktu s AWG datový tok z CO zmizí, data vláknem i nadále prochází, pouze nejsou zobrazena. Topologie sítě je zobrazena na obrázku 6.2.



Obr. 6.2: Topologie WDM/TDM PON s využitím AWG a pasivních rozbočovačů.

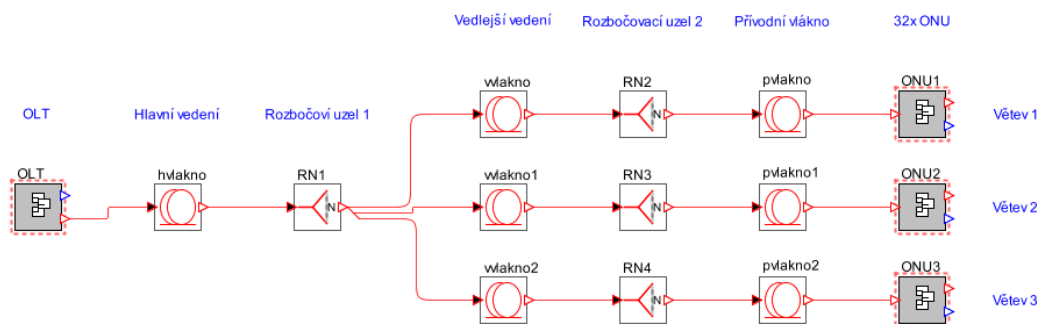
7. Návrh optických přístupových sítí

Pro simulaci optických přístupových sítí byl vybrán program Optsim 5.2. Jedná se o program, který umožňuje simulovat široké spektrum optických měření. Jednou z jeho chyb je možnost simulovat pouze jednosměrný provoz. Tento nedostatek lze nahradit jednoduchou zpětnou linkou tzv. loopback, ovšem pro potřeby simulování maximálních parametrů sítě je tento prvek nepotřebný. V programu Optsim 5.2, byl k simulaci jednotlivých optických sítí zvolen, tzv. Sample Mode – vzorkovací mód. Byly simulovány celkem tři scénáře: TDM-PON, WDM PON, WDM-TDM PON. Každý z těchto scénářů byl simulován při přenosových rychlostech 1,25; 2,5; 10,0 Gbit.s⁻¹. V simulacích nebyly využity žádné zesilovací prvky. Na trase z OLT k ONU byly použity vlákna dle normy G.652.D s parametry útlumu 0,25 dB/km a chromatickou disperzí 16,75 ps/nm.km. Rozbočovací poměry jednotlivých rozbočovačů byly voleny viz tab. 7.1.

Tab. 7.1: Hodnoty SR jednotlivých rozbočovačů.

Rozbočovací poměr (SR)	1:3	1:8	1:16	1:32	1:64
Útlum	4,77	9,03	12,04	15,05	18,06

Tyto parametry budou ještě rozebrány v následující kapitole. Optické odbočnice AWG mívají hodnoty útlumu 2 – 4 dB. Zvolil jsem pro AWG hodnotu útlumu 4dB. Na obrázku 7.1 je naznačena topologie testovaných sítí. Jednotlivé scénáře byly topologicky sjednoceny, aby byla možnost mezi sebou scénáře porovnat.



Obr. 7.1: Obecná topologie všech PON scénářů.

Topologie je jednoduchá, skládá se z hlavního vedení, vedlejšího vedení a přívodního vedení, u kterého jsou již jednotlivé vzdálenosti různé. Mezi jednotlivými vedeními jsou rozbočovací stupně RN1 a RN2. Z OLT je k prvnímu rozbočovacímu stupni RN1 vedeno přívodní vlákno (hlavní vedení) dlouhé 15,0 km. Následuje rozbočení do tří větví rozbočovačem s poměrem 1:3 a útlumem 4,77 dB. Následuje mezilehlé vlákno (vedlejší vedení) 4 km vedené k rozbočovacímu stupni RN2, kde signál

přichází na rozbočovače, které mají rozbočovací poměr 1:8 nebo 1:16¹ s útlumem viz tab. 7.1 (AWG = 4 dB). Poté následují přípojovací vlákna (přívodní vedení), která mají staticky zadané vzdálenosti dle požadovaných parametrů měření. Nakonec následují jednotlivé ONU.

7.1. Útlumová kalkulace

Úvodem útlumové kalkulace je nutné zmínit, že celý model sítě je do jisté míry idealizován. To znamená, že například u pasivních rozbočovačů jsou zanedbány ztráty na konektorech a svárech, což by mohlo odpovídat řádově jednotce decibelu. Také není ponechána žádná útlumová rezerva z důvodu hledání maximálních parametrů. Útlumové bilance jednotlivých scénářů jsou v tab. 7.2 – 4.

Útlum jednotlivých rozbočovačů je vypočten podle vzorce 7.1.

$$A = A_d + A_z \quad [dB] \quad (7.1)$$

$$A_d = 10 \cdot \log(N) \quad [dB] \quad (7.2)$$

kde A_d je útlum dělení a A_z je ztrátový útlum rozbočovače. Ve všech simulacích je zanedbán ztrátový útlum, čili hodnoty nominálního útlumu u rozbočovačů RN1 a RN2 jsou dány pouze vzorcem 7.2.

Tab. 7.2 Hodnoty útlumové bilance TDM-PON.

Médium	délka km	nominální útlum dB	RN2 = 1:8	RN2 = 1:16	RN2 = 1:32	RN2 = 1:64
			útlum dB	útlum dB	útlum dB	útlum dB
hlavní vlákno	15,0	0,25	3,75	3,75	3,75	3,75
RN 1 = 1:3	-	4,77	4,77	4,77	4,77	4,77
vedlejší vlákno	4,0	0,25	1,00	1,00	1,00	1,00
RN 2	-	viz tab. 7.1	9,03	12,04	15,05	18,06
přívodní vlákno	1,0	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25
Celkem	-	-	18,8	21,81	24,82	27,83

Pro simulaci topologie s vlnovým dělením byly využity na obou rozbočovacích stupních pasivní AWG odbočnice s nominálním útlumem 4 dB.

¹ Pro jednotlivé scénáře byly testovány i jiné rozbočovací poměry.

Tab. 7.3 Hodnoty útlumové bilance WDM-PON.

Médium	délka	nominální útlum	AWG
	km	dB	útlum dB
hlavní vlákno	15,0	0,25	3,75
RN 1 AWG	-	4,00	4,00
vedlejší vlákno	4,0	0,25	1,00
RN 2 AWG	-	4,00	4,00
přívodní vlákno	1,0	0,25	0,25
Celkem			13,00

U poslední kombinované topologie jsou využity jak pasivní rozbočovače (tab. 7.1), tak i pasivní AWG odbočnice s hodnotou útlumu 4 dB.

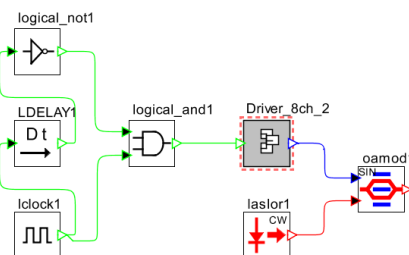
Tab. 7.4 Hodnoty útlumové bilance WDM/TDM-PON.

Médium	délka km	nominální útlum dB	RN2 = 1:8	RN2 = 1:16	RN2 = 1:32	RN2 = 1:64
			útlum dB	útlum dB	útlum dB	útlum dB
hlavní vlákno	15,0	0,25	3,75	3,75	3,75	3,75
RN 1 AWG	-	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00
vedlejší vlákno	4,0	0,25	1,00	1,00	1,00	1,00
RN 2	-	viz tab. 7.1	9,03	12,04	15,05	18,06
přívodní vlákno	1,0	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25
Celkem	-	-	18,03	21,04	24,05	27,06

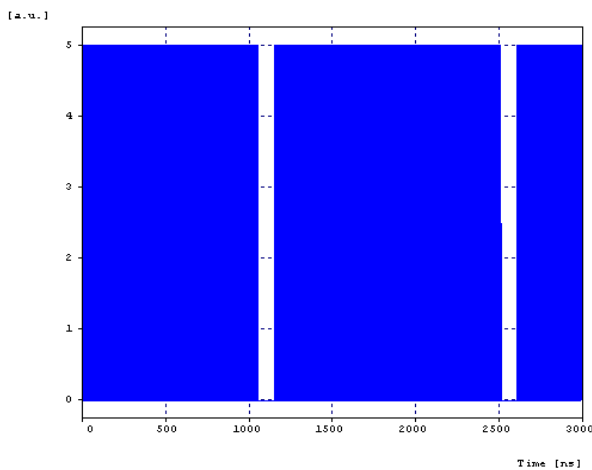
7.2. Prvky použité v síti

TDM OLT (vysílač)

Pro simulování datového toku v sítích využívajících časové dělení je využita OLT jednotka vyobrazená na obr. 7.2. OLT jednotka se skládá z čtyř částí (časové základny, ovladače, modulátoru a laseru). Jednotka vytváří datový tok ve tvaru burstů (pulzů) dlouhých 1280 μs viz obr. 7.3. V OLT je seřazeno několik těchto jednotek, kde každá z nich je určena jednotlivému ONU.



Obr. 7.2: schéma TDM OLT².

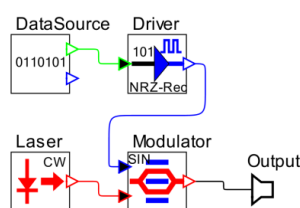


Obr. 7.3: Zobrazení burstů vysílaných pomocí TDM OLT.

² Koncept této OLT jednotky vychází z bakalářské práce Bc. Jana Ryšavého, následně byl tento koncept modifikován. [19]

WDM OLT (vysílač)

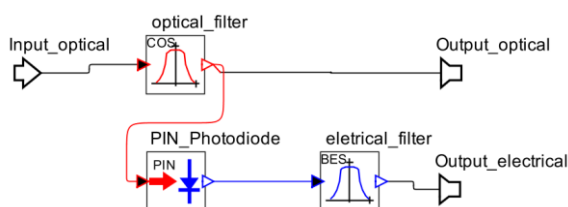
Jednotka WDM OLT je podstatně jednodušší než TDM OLT. Tvoří ji kaskáda několika jednotek skládajících se z jednoduchého generátoru datového toku, NRZ modulátoru, laseru a modulátoru viz obr. 7.4. Tyto jednotky jsou následně sruzeny pomocí WDM multiplexoru do jednoho vlákna a vysílají signál směrem k ONU.



Obr. 7.4: WDM OLT.

ONU (přijímač)

Jednotka ONU se skládá ze tří částí. První částí je optický filtr s pásmovou propustí, přes který je propuštěn pouze signál na požadované vlnové délce. Jako přijímač je použita PIN dioda a poslední částí přijímače je besselův filtr, který vyhladí výstupní elektrický signál. Jednotka je využita jak u topologie s časovým dělením tak i u topologie s vlnovým dělením.



Obr. 7.5: Optická síťová jednotka (ONU).

7.3. Základní parametry simulací

Obecné parametry simulací jsou nastaveny takto:

- | | |
|--------------------------|----------------------------|
| ▪ Simulační metoda | Proměnná šířka pásma (VBS) |
| ▪ Nastavení simulace VBS | Plně VBS |
| ▪ Optický šum | Ano |
| ▪ Elektrický šum | Ano |

Parametry scénářů GPON a XGPON:

- | | |
|--------------------------|--|
| ▪ Vlnová délka: | 1490.0 nm |
| ▪ Vyzářený výkon OLT: | 3.99 mW (6.008 dBm) |
| ▪ Testované datové toky: | 1.25 Gbit.s ⁻¹ , 2.5 Gbit.s ⁻¹ , 10.0 Gbit.s ⁻¹ |

Parametry scénářů WDM:

- | | |
|--------------------------|--|
| ▪ Vlnové délky: | 1526.43818 – 1553.3288 nm |
| ▪ Vyzářený výkon OLT: | 4.11 mW (6.138 dBm) |
| ▪ Testované datové toky: | 1.25 Gbit.s ⁻¹ , 2.5 Gbit.s ⁻¹ , 10.0 Gbit.s ⁻¹ |

Parametry scénářů WDM/TDM PON:

- | | |
|--------------------------|--|
| ▪ Vlnové délky: | 1546.91671, 1540.55734, 1534.25004 nm |
| ▪ Vyzářený výkon OLT: | 4.06 mW (6.085 dBm) |
| ▪ Testované datové toky: | 1.25 Gbit.s ⁻¹ , 2.5 Gbit.s ⁻¹ , 10.0 Gbit.s ⁻¹ |

Výkonové parametry a datové toky jednotlivých simulačních scénářů jsou záměrně voleny stejné, aby bylo následně možné výsledky mezi sebou porovnat a vyhodnotit. U všech testovaných sítí je nastavena citlivost přijímače na 0,5 A/W.

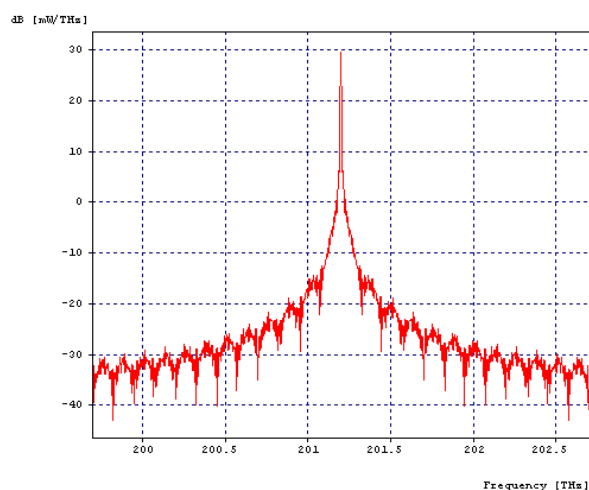
Pro výpočet maximálního překlenutelného útlumu byl využit vzorec 7.3.

$$A_{max} = l_{Hv} \cdot A_{Hv} + A_{RN1} + l_{Vv} \cdot A_{Vv} + A_{RN2} + l_{Pv} \cdot A_{Pv} \quad [\text{dB}] \quad (7.3)$$

- Kde
- | | |
|-----------|--------------------------------------|
| l_{Hv} | je délka hlavního vedení, |
| A_{Hv} | je měrný útlum hlavního vedení, |
| A_{RN1} | je útlum prvního rozbočovacího uzlu, |
| l_{Vv} | je délka vedlejšího vedení, |
| A_{Vv} | je měrný útlum vedlejšího vedení, |
| A_{RN2} | je útlum druhého rozbočovacího uzlu, |
| l_{Pv} | je délka přívodního vedení, |
| A_{Pv} | je měrný útlum přívodního vedení. |

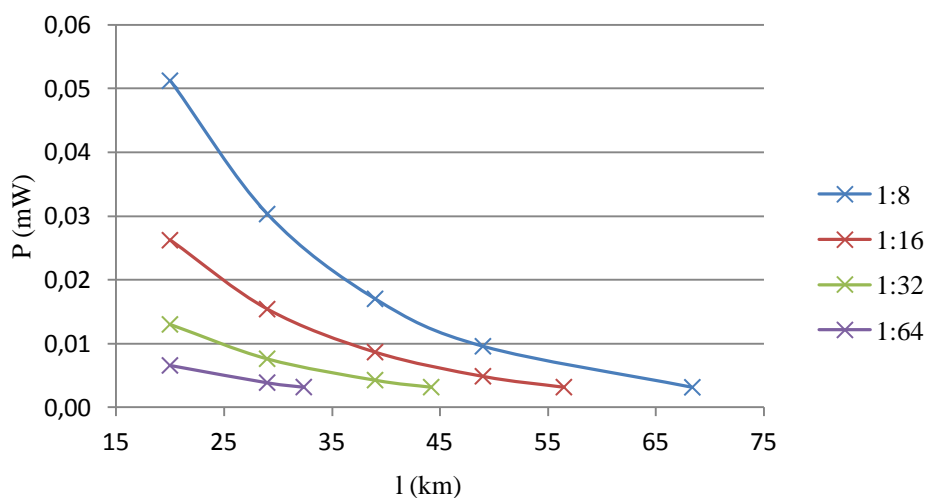
7.4. Simulace TDM-PON

Scénáře simulace TDM-PON byly nastaveny podle parametrů popsaných v kapitole 7.2. Na obrázku 7.6 je vyobrazeno spektrum vysílaného signálu. Naměřené hodnoty maximální překlenutelné vzdálenosti jsou rozděleny do dvou částí. V první části je síť testována do vzdálenosti 20 km, což je dle ITU T G.984 maximální normovaná dosažitelná vzdálenost. V druhé části je testována maximální dosažitelná vzdálenost vyšší než dovoluje norma. Naměřené hodnoty včetně topologie sítě jsou uvedeny v příloze.



Obr. 7.6: Spektrum signálu.

Dalším testovaným parametrem byl maximální rozbočovací poměr. Ten byl měřen až do poměru $SR = 1:64$. Od maximálního rozbočovacího poměru se ovšem odvíjí maximální překlenutelná vzdálenost. Závislost výkonu na překlenutelné vzdálenosti vzhledem k rozbočovacímu poměru je zobrazena na obr. 7.7.

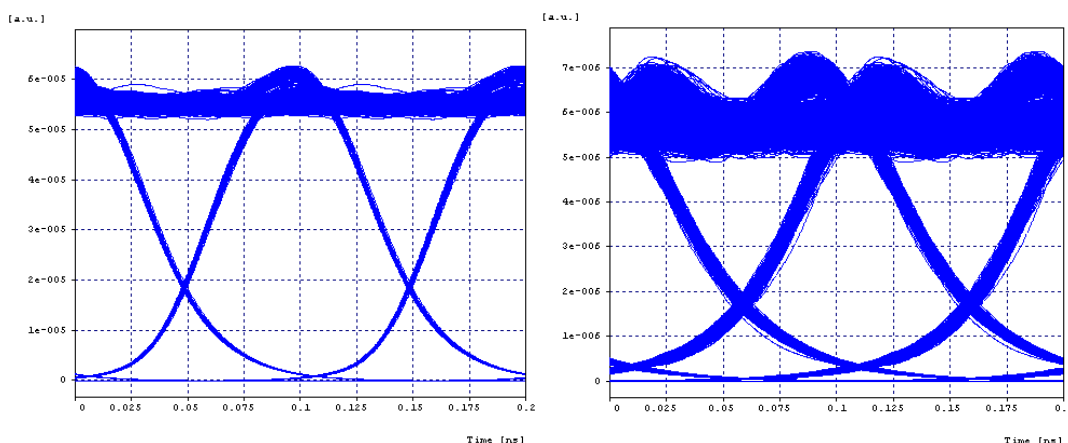


Obr. 7.7: Závislost výkonu vzhledem k překlenutelné vzdálenosti (TDM PON).

Hodnota maximálního překlenutelného útlumu A_{max} byla vypočítána pomocí vztahu 7.3 viz výpočet 7.4.

$$A_{max} = 15,0,25 + 4,77 + 4,0,25 + 9,03 + 49,4,0,25 = 30,9 \text{ dB} \quad (7.4)$$

Tato hodnota byla odvozena z maximální naměřené vzdálenosti, u které byla hodnota výkonu na přijímači ještě v přijatelných mezích tedy - 25 dBm ($\pm 0,05$ dBm). Na obrázku 7.8 a) a b) jsou zobrazeny diagramy oka v 20 a 68,4 kilometrech.



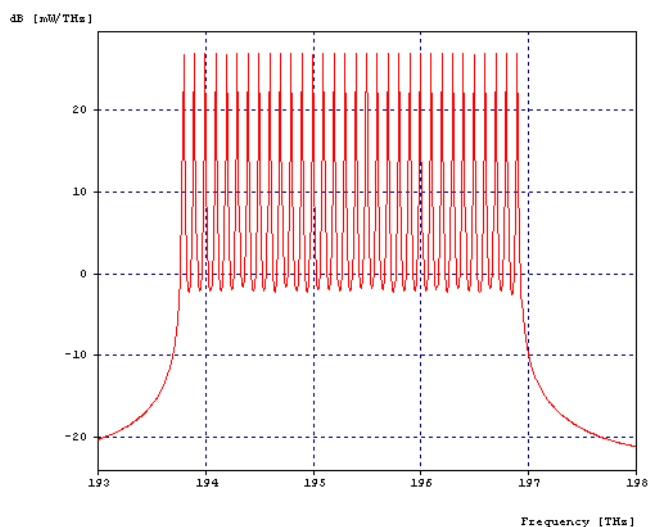
Obr. 7.8: Diagramy oka a) Norma GPON – TDM/PON (20 km) b) maximální výkon na přijímači (cca. 68,4 km).

7.5. Simulace WDM-PON

Základní parametry scénáře WDM-PON byly popsány v kapitole 7.2. Na obr. 7.9 je vyobrazeno spektrum vlnových délek, které jsou vysílány z OLT. Naměřené parametry maximální překlenutelné vzdálenosti jsou rozděleny do tří částí. První část porovnává naměřené hodnoty s GPON normou (čili max. 20 km). Poté následují dvě části, kde je zkoumána vzdálenost z hlediska limitních hodnot BER a také výkonových limitů. Tabulky s naměřenými hodnotami a topologie sítě jsou uvedeny v příloze.

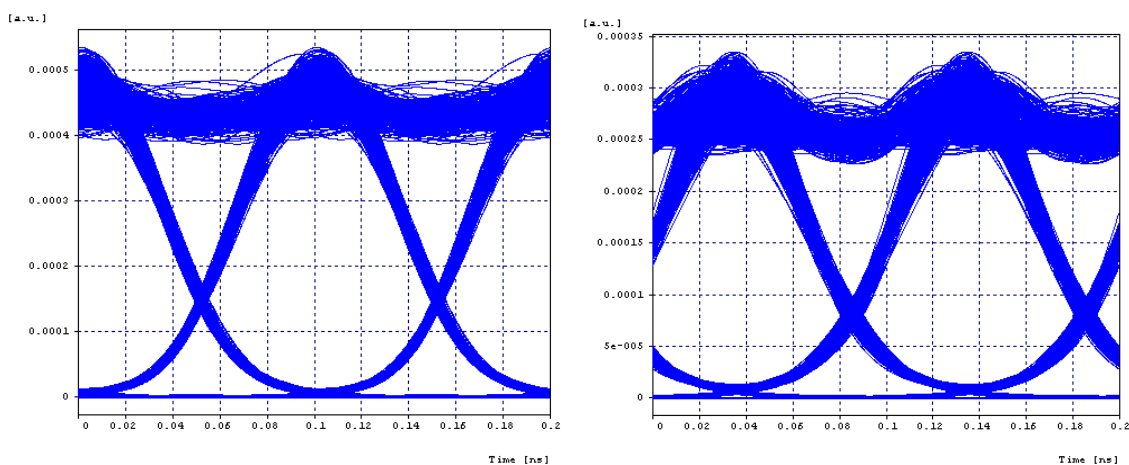
Maximální překlenutelný útlum byl vypočítán z parametru překlenutelné vzdálenosti, kde ještě hodnota bitové chybovosti odpovídala požadované kvalitě ($\geq 10^{-11}$). Útlum optického vlákna dle G. 652. D je 0.25 dB/km a hodnota AWG odbočnice byla zvolena 4 dB. Výpočet viz vzorec 7.5.

$$A_{max} = 15,0,25 + 4 + 4,0,25 + 4 + 50,0,25 = 25,25 \text{ dB} \quad (7.5)$$

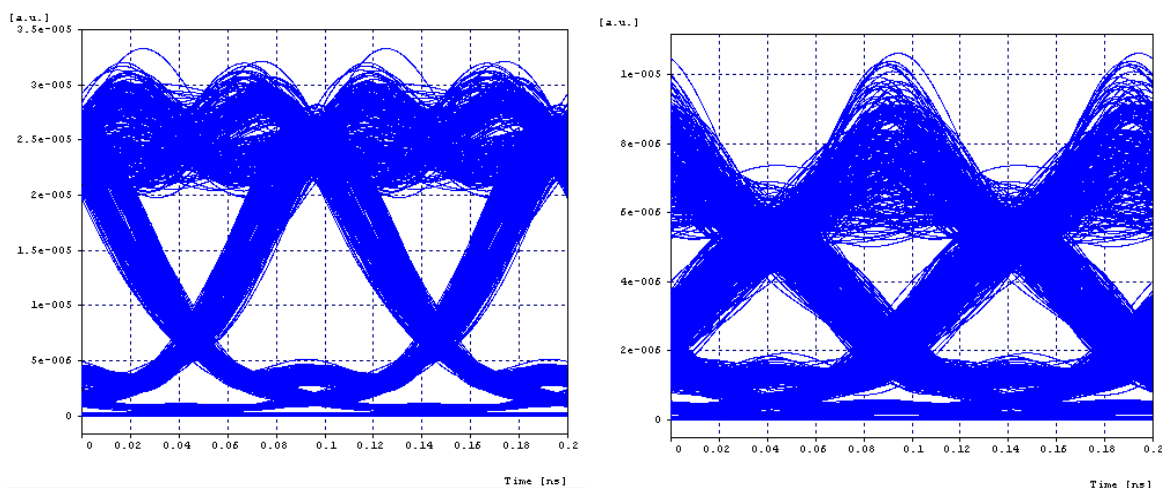


Obr. 7.9: Spektrum vysílaného signálu.

Maximální rozbočovací poměr není vzhledem k idealizaci AWG odbočnice uveden. Na obr. 7.10 jsou zobrazeny diagramy oka odpovídající limitním hodnotám normy GPON. Na následujícím obr. 7.11 jsou znázorněny diagramy oka v 75 km, kde se nachází limit bitové chybovosti. Druhý diagram zobrazuje otevření oka v maximální vzdálenosti 95 km, kde bylo naměřeno výkonové maximum (- 25 dBm). Na obrázku 7.11 je také patrné, že oba diagramy oka vykazují zvýšené hodnoty ISI a jitteru.



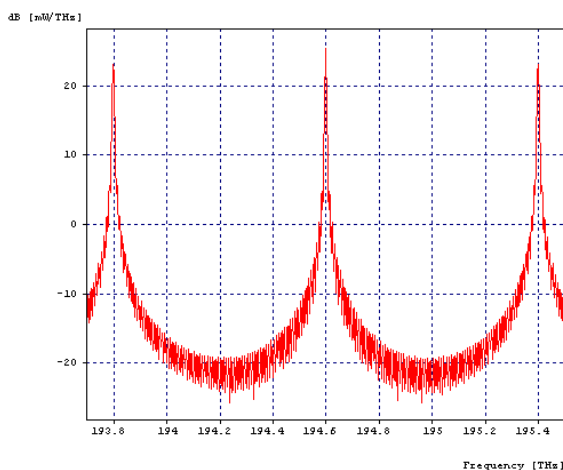
Obr. 7.10: Diagramy oka pro srovnání GPON normy – WDM PON (20 km).



Obr. 7.11: Diagramy oka - WDM PON a) BER limit (cca. 75 km) b) výkonový limit (cca. 94 km)

7.6. Simulace WDM/TDM-PON

Pro simulaci topologie s kombinovaným multiplexem bylo využito spektrum zobrazené na obrázku 7.12. Maximální dosažitelné vzdálenosti jsou v úvodu opět testovány pouze do 20 km (GPON norma) a následně jsou otestovány vzdálenosti vyšší. Z výkonového hlediska může tato síť dosahovat až do vzdálenosti $l = 86$ km, bez využití jakéhokoli aktivního zesilovacího prvku. U této vzdálenosti byl naměřen parametr BER řádově 10^{-9} , což už neodpovídá požadované hodnotě minimálně 10^{-11} . Nejbližší vhodný měřený úsek byl $l = 69$ km, kde byla naměřena hodnota bitové chybovosti BER řádově 10^{-13} . Naměřené hodnoty na celé trase sítě a topologie jsou uvedeny v příloze.

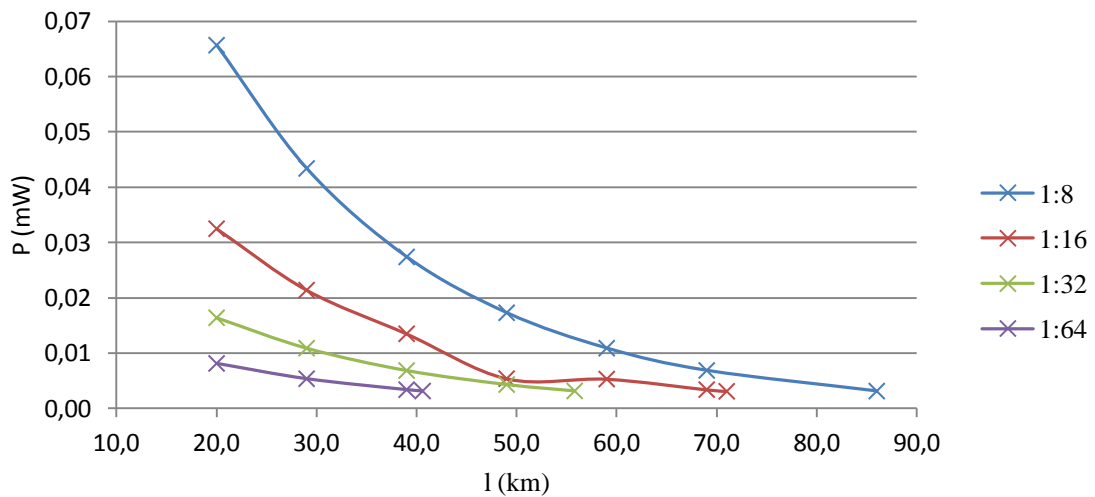


Obr. 7.12: Spektrum vysílaného signálu.

Parametr maximálního překlenutelného útlumu A_{\max} byl vypočten dle vzorce 7.3, viz výpočet 7.5. Útlum vlákna byl zvolen opět 0,25 dB/km a AWG odbočnice měla útlum $A_d = 4$ dB. Útlum rozbočovače byl vybrán dle tabulky 7.1.

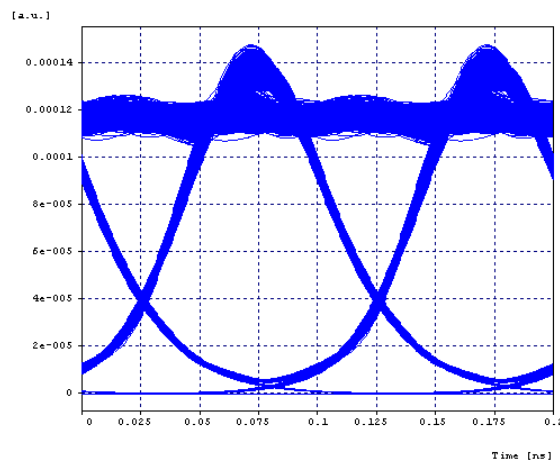
$$A_{max} = 15,0,25 + 4 + 4,0,25 + 9,03 + 50,0,25 = 30,28 \text{ dB} \quad (7.5)$$

Maximální rozbočovací poměr byl testován do hodnoty SR = 1:64. Závislost maximální překlenutelné vzdálenosti a vstupního výkonu přijímače vzhledem k použitému rozbočovacímu poměru je zobrazen na obr. 7.13.



Obr. 7.13: Závislost výkonu vzhledem k překlenutelné vzdálenosti.

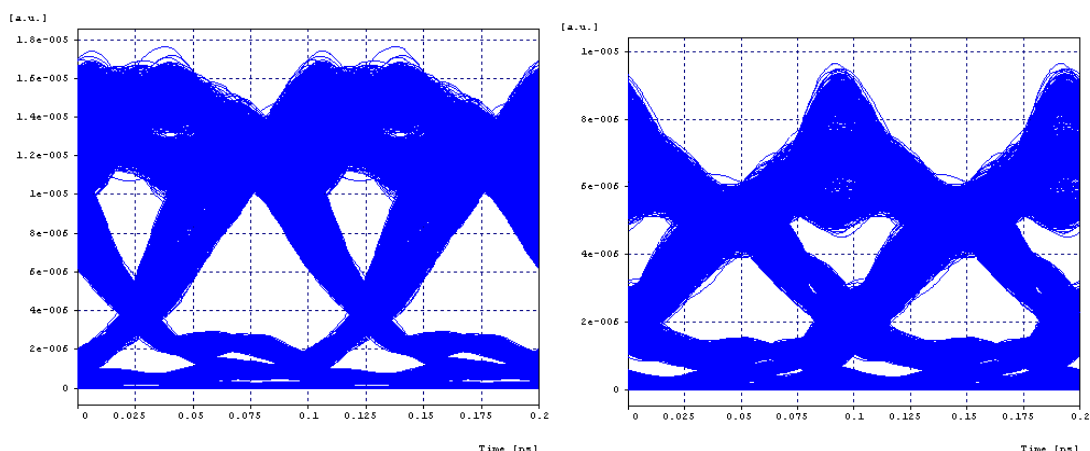
Na obrázku 7.14 je vyobrazen diagram oka naměřený ve vzdálenosti 20 km od zdroje signálu (OLT). Na obrázku je vidět nepatrný jitter a téměř žádné intersymbolové interference.



Obr. 7.14: Diagram oka pro srovnání GPON normy – WDM/TDM PON (20 km).

Na obrázku 7.15a je zobrazen diagram oka ve vzdálenosti cca. 70 km od OLT. V této vzdálenosti se nachází tzv. BER limit, což znamená, že zde byla naměřena hodnota bitové chybovosti vyšší než 10^{-11} . Druhý diagram oka zobrazuje průběh signálu ve vzdálenosti cca. 86 km, kde se

nachází výkonový limit ($P = \max. - 25.0 \text{ dBm}$). Na obou diagramech obrázku 7.15 jsou již vidět značné intersymbolové interference a jitter.



Obr. 7.15: Diagramy oka – WDM/TDM PON a) BER limit (cca. 70 km) b) výkonový limit (cca. 86 km).

7.7. Srovnání maximálních parametrů PON sítí

Maximální překlenutelná vzdálenost:

Jak je ze simulací zřejmé, nejlepších výsledků z hlediska překlenutelné vzdálenosti dosáhla topologie využívající vlnové dělení (WDM). Toho je docíleno využitím AWG multiplexorů, které mají výrazně nižší útlumové parametry ($A = 4 \text{ dB}$) než klasické pasivní rozbočovače. Pokud bychom hodnotili testované topologie z hlediska limitních hodnot bitové chybovosti, dosahují všechny scénáře téměř shodných hodnot BER ve vzdálenosti cca. 70 km od vysílače (OLT). Je nutné zdůraznit, že naměřené hodnoty bitové chybovosti mohou být značně zkreslené vzhledem k idealizaci všech topologií v programu Optsim. Jak je patrné z obrázků 7.11 a 7.15 je signál na diagramu oka již značně zkreslen a vykazuje značný jitter (kolísání zpoždění). To může být způsobeno nedokonalou optimalizací AWG multiplexorů jak u scénáře WDM-PON tak i WDM/TDM-PON.

Maximální překlenutelný útlum:

Nejnižší hodnota překlenutelného útlumu byla vypočtena u scénáře WDM-PON, a to opět díky využití nízko-útlumových AWG multiplexorů. Útlumový parametr byl vypočten jako součet všech útlumů na trase distribuční sítě až do vzdálenosti, kde byl naměřen limit bitové chybovosti (cca. 70 km). Pokud by byly využity naměřené hodnoty se zanedbanou chybovostí BER, hodnota maximálního překlenutelného útlumu by u scénářů WDM-PON a WDM/TDM-PON ještě trochu více vzrostla (viz soubor Naměřené_hodnoty.xls v příloze). Nejvyšší hodnota maximálního překlenutelného útlumu v místě naměřeného BER limitu (cca 70 km) byla vypočtena u scénáře TDM-PON rovna $A_{\max} = 30,9 \text{ dB}$. Hodnota největšího maximálního překlenutelného útlumu byla naměřena v maximální vzdálenosti topologie WDM-PON (94 km) rovna $A_{\max} = 32,0 \text{ dB}$.

Maximální rozbočovací poměr:

Parametr maximálního rozbočovacího poměru byl simulován pouze do hodnoty $SR = 1:64$ ($SR = \text{Split Ratio}$) a to vzhledem k náročnosti jednotlivých simulací. Jak je patrné z obrázků 7.7 a 7.13, při využití pasivních rozbočovačů dochází s rostoucím rozbočovacím poměrem k poklesu maximální překlenutelné vzdálenosti. U scénáře WDM-PON nebyly simulace s vyšším rozbočovacím poměrem prováděny z důvodu konstantní hodnoty útlumu na AWG multiplexorech. Pasivní optické rozbočovače v programu Optsim vykazovaly výborné adaptabilní chování (signál na vstupu byl vyslán všesměrově na všechny výstupy s požadovaným útlumem). To se ovšem nedá konstatovat o defaultních WDM multiplexorech, které byly definovány programem. Ty vykazovaly vysoký útlum na pasivních filtrech, což mělo za následek značnou výkonovou ztrátu na výstupech multiplexorů.

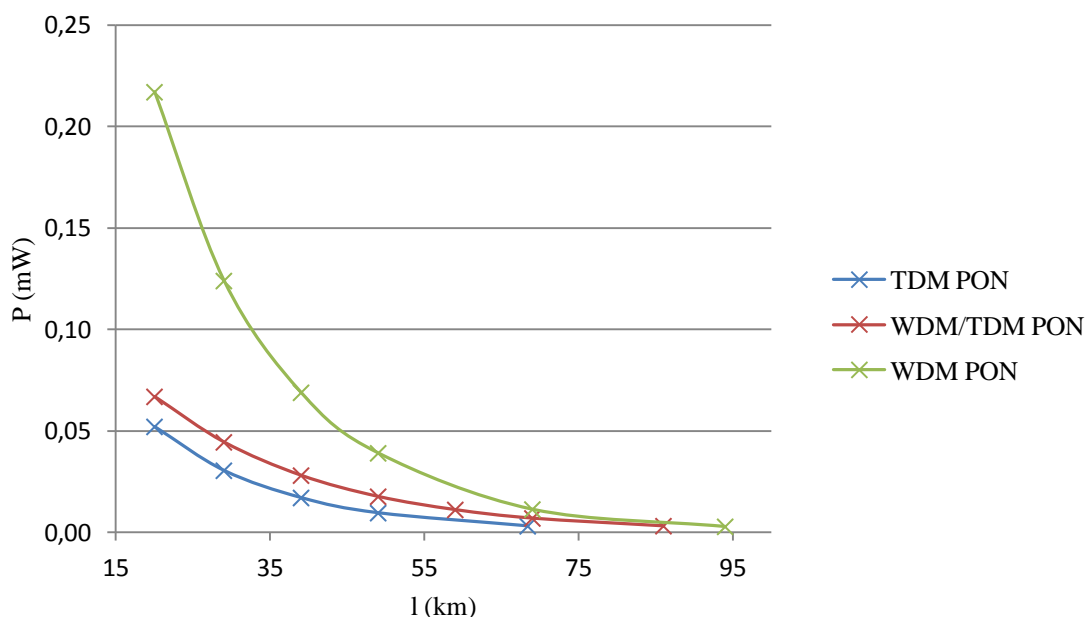
Chybovost BER a Q – faktor:

Při testování jednotlivých topologií na přenosových rychlostech $1,25 \text{ Gbit.s}^{-1}$ a $2,5 \text{ Gbit.s}^{-1}$ byly naměřeny hodnoty bitové chybovosti vyšší než 10^{-40} , což znamená, že při těchto rychlostech byl na trase ODN prakticky dokonalý přenos. Při rychlosti 10 Gbit.s^{-1} byla naměřena opět konstantní hodnota $0,999 \cdot 10^{-4}$ pouze do vzdálenosti 20 km (testovaný parametr GPON normy). Se zvyšující se vzdáleností docházelo k razantnímu nárůstu chybovosti BER, kde u topologií využívajících časové dělení (TDM-PON, WDM/TDM-PON) byl naměřen limit BER okolo 70 km od OLT. Scénář WDM-PON měl naměřený BER limit cca kolem 75 km. Tento limit bitové chybovosti byl definován parametrem, kdy chybovost nepřesáhla hodnotu nižší než 10^{-11} .

Kvalita Q - faktoru s rostoucí překlenutelnou vzdáleností klesala. To se projevovalo i na diagramech oka, kdy oko diagramu bylo čím dál méně otevřeno, což je patrné hlavně z obr. 7.11 a 7.15. Ve vzdálenosti limitních hodnot BER (TDM a hybridní topologie – 70 km, WDM – 75 km) byla naměřena hodnota Q – faktoru rovna $Q_{\text{TDM}} = 17,606 \text{ dB}$ (7,591 lin) a $Q_{\text{WDM/TDM}} = 17,036 \text{ dB}$ (7,109 lin). Kvalita Q – faktoru u hybridní topologie je značně zkrácená v důsledku využití neoptimalizované AWG odbočnice. Nejlepší hodnota Q – faktoru ve vzdálenosti 70 km od OLT (BER limit) vyšla u topologie WDM rovna $Q_{\text{WDM}} = 18,711 \text{ dB}$ (8,621 lin).

Hodnocení:

Z výsledků simulací je zřejmé, že nejlepších parametrů dosahuje testovaná topologie využívající technologii vlnového dělení a to díky, jak již bylo mnohokrát zmíněno, využití AWG multiplexorů s nízkým vložným útlumem. Na obrázku 7.16 jsou porovnány maximální překlenutelné vzdálenosti jednotlivých standardů vzhledem k využití technologii.



Obr. 7.16: Maximální překlenutelná vzdálenost jednotlivých standardů.

Parametr maximálního rozbočovacího poměru lze hodnotit pouze okrajově. U topologie WDM/TDM PON byl veliký problém optimalizovat AWG multiplexor tak, aby fungoval dle předpokladů. Na experimentálním prvku byly během simulace generovány nepřijatelné hodnoty útlumu, což mělo za následek získání irelevantních výkonových hodnot na výstupu multiplexoru. Částečné kompenzace útlumu na AWG odbočnici jsem docílil snížením vložného útlumu vláken na trase o 0,05 dB. Dle teoretických předpokladů se díky využití odbočnice pohybuje scénář WDM/TDM PON někde na rozmezí mezi oběma testovanými topologiemi (WDM PON, TDM PON).

Vypočtené hodnoty maximálního překlenutelného útlumu jsou také pouze orientační vzhledem k zanedbání útlumu na svárech, konektorech a útlumové rezervy.

8. Závěr

Bakalářská práce se zaměřuje na popis standardů pasivních optických sítí od počátku jejich vývoje. Zvýšená pozornost je kladena na pasivní optické sítě využívající technologii vlnového dělení. Další pasáž práce je věnována možnostem implementace nových technologií v pasivních optických sítích a následně jsou popsány některé přístroje vhodné k měření optických síťových systémů.

V praktické části práce byly vytvořeny dvě animace v prostředí Macromedia Flash 8 Professional, které znázorňují technologické postupy sítí WDM-PON a WDM/TDM-PON. Tyto dvě animace jsou dostupné v přílohách.

Následně byly simulovány, pomocí programu Optsim 5.2, tři různé topologie pasivních optických sítí, u kterých byly testovány maximální přípustné parametry pro chod sítě. Kromě dvou zmiňovaných topologií znázorněných animacemi byla testována ještě síť využívající pouze časové dělení. Všechny tyto scénáře byly testovány při přenosových rychlostech $1,25 \text{ Gbit} \cdot \text{s}^{-1}$, $2,5 \text{ Gbit} \cdot \text{s}^{-1}$ a $10,0 \text{ Gbit} \cdot \text{s}^{-1}$. Mezi hledanými maximálními parametry byla maximální překlenutelná vzdálenost topologie, maximální překlenutelný útlum sítě a maximální rozbočovací poměr.

Z hlediska maximální překlenutelné vzdálenosti byly všechny tři scénáře testovány původně do vzdálenosti 20 km od OLT. V této vzdálenosti byly u všech testovaných topologií naměřeny téměř dokonalé přenosové parametry, a proto byly jednotlivé scénáře testovány pro vyšší překlenutelné vzdálenosti. Nejvyšší překlenutelné vzdálenosti dosáhla topologie WDM-PON, která byla rovna cca 92 km. Této vzdálenosti mohla dosáhnout hlavně díky využití nízko-útlumových směrových AWG odbočnic. Z délky této trasy byla vypočtena i nejvyšší hodnota překlenutelného útlumu $A_{\text{MAX}} = 32,0 \text{ dB}$. Při porovnání překlenutelného útlumu v místě BER limitu byla nejvyšší hodnota naměřena u topologie TDM rovna $A_{\text{MAX}} = 31,9 \text{ dB}$. Parametr maximálního rozbočovacího poměru byl testován pouze u topologií využívajících časové dělení a vzhledem k náročnosti jednotlivých simulací pouze do poměru $SR = 1:64$. U topologie WDM-PON tento parametr testován nebyl kvůli využití optimalizované kaskády pasivních AWG odbočnic.

Během testování bitové chybovosti BER byly při využití přenosových rychlostí nižších než $10,0 \text{ Gbit} \cdot \text{s}^{-1}$ naměřeny téměř ideální parametry s hodnotou chybovosti $\geq 10^{-40}$. Následně u testovaných scénářů s rychlostí $10,0 \text{ Gbit} \cdot \text{s}^{-1}$ docházelo po překlenutí 20 kilometrové trasy ke zhoršování bitové chybovosti až do vzdálenosti cca 70 km, kde se nacházel u všech topologií limit bitové chybovosti. Kvalita Q – faktorů také razantně klesala se zvyšující se překlenutelnou vzdáleností což je možné srovnat na obrázcích 7.11 a 7.15, kde je patrné menší rozevření oka na diagramu, což může vést ke vzniku chyb.

Všechny simulované sítě jsou do jisté míry idealizovány a doporučil bych je pouze jako ověření teoretických předpokladů pro výstavbu budoucí reálné sítě, která se bude vzhledem k vnějším vlivům a vlastnostem jednotlivých prvků sítě chovat jinak.

Program Optsim bych doporučil pouze jako orientační nástroj vzhledem k již zmiňované idealizaci celé simulované sítě. Značným nedostatkem celého programu je dle mého názoru přímočarost v nastavení jednotlivých parametrů předdefinovaných prvků. Jistá náhrada je možnost složit si vlastní „Compound“ komponent, ovšem ten v konečném měřítku tvoří stejnou součástku jako

předdefinovaný prvek. Kladně bych chtěl vyzdvihnout funkci „Symbols“, tedy definování symbolů, která mi při dokončování práce velmi pomohla. Dále také program vykazoval značnou chybovost při kombinování obtížnějších komponent v síti.

Soubory se simulovanými scénáři v programu Optsim jsou přístupné v příloze na DVD.

Použitá literatura

- [1] BISCHOFF, Dominik. Wavelength multiplexing: WDM and DWDM systems. [online]. February 4, 2009 [cit. 2013-03-23]. Dostupné z URL: <<http://www.n.ethz.ch/~dominikb/Texte/WDMFibreoptics>>
- [2] BROUČEK, Jan; HÁJEK, Martin. PRAKTICKÉ ZKUŠENOSTI Z MĚŘENÍ DWDM. mikrokom.eu [online]. [cit. 2013-03-23]. Dostupné z URL: <<http://www.mikrokom.eu/cz/pdf/zkusenosti-merDWDM.pdf>>
- [3] DWDM over CWDM network. Packetlight.com [online]. [cit. 2013-03-23]. Dostupné z URL: <<http://www.packetlight.com/technology/dwdm-over-cwdm/>>
- [4] GIRARD. A. FTTx PON Technology and Testing. EXFO, Quebec 2005 [cit. 2013-03-23].
- [5] Grobe, K., Elbers J.-P.: PON Evolution from TDMA to WDM-PON. IEEE Xplore [online], [cit. 2013-03-23]. Dostupné z URL: <<http://ieeexplore.ieee.org/iel5/4512186/4528018/04528293.pdf>> ADVA AG Optical Networking, Martinsried, Germany. Optical Society of America, 2007.
- [6] ITU-T: G.694.1 : Spectral grids for WDM applications: DWDM frequency grid. [online], [cit. 2013-30-05]. ITU-T, 2003. Dostupné z URL: <<http://www.itu.int/rec/T-REC-G.694.1/>>
- [7] ITU-T: G.694.2 - Spectral grids for WDM applications: CWDM wavelength grid. [online], [cit. 2013-03-23]. ITU-T, 2003. Dostupné z URL: <<http://www.itu.int/rec/T-REC-G.694.2-200312-I/>>.
- [8] ITU-T: G.984.1 - Gigabit-capable passive optical network (GPON): General characteristics. [online], [cit. 2013-03-23] ITU-T, 2008. Dostupné z URL: <<http://www.itu.int/rec/T-REC-G.984.1-200803-I/>>.
- [9] LAFATA, P.: Pasivní optické sítě s rychlostí 10Gbit/s, Access server [online], 2011, roč. 9 č. 20110310, [cit. 2011-12-14]. Dostupné z URL: <<http://access.feld.cvut.cz/view.php?navezclanku=pasivni-opticke-site-s-rychlosti-10-gbits&cislocclanku=2011030001>>. ISSN 1217-9675
- [10] LAFATA, P.: Pasivní optické sítě WDM-PON. Access server [online]. 2009, roč. 7, č. 200905, [cit. 2011-12-14]. Dostupné z URL: <<http://access.feld.cvut.cz/view.php?cislocclanku=2009050004>>. ISSN 1214-9675
- [11] LAFATA, P., VODRÁŽKA, J.: Pasivní optická síť GPON. Access server [online]. 2009, roč. 7, č. 200905, [cit. 2013-03-23]. Dostupné z URL: <<http://access.feld.cvut.cz/view.php?cislocclanku=2009050002>>. ISSN 1214-9675
- [12] LAFATA, P., VODRÁŽKA, J.: Pasivní optická síť 10GEPON. Elektrověue [online]. 2010, č.2010/49, s. 49-1-49-6 [cit. 2013-03-23]. Dostupné z URL: <<http://www.elektrověue.cz/cz/clanky/komunikacnietechnologie/>>. ISSN 1213-1539

- [13] LAFATA, P., VODRÁŽKA, J.: Současné a budoucí varianty pasivních optických přístupových sítí. *Elektrorevue* [online]. 2009, č. 2009/39, s. 39-1-39-10 [cit. 2011-12-14]. Dostupné z URL: <<http://www.elektrorevue.cz/cz/clanky/komunikacnietechnologie/>>. ISSN 1213-1539
- [14] MILOSLAV, Filka. *Optoelektronika pro telekomunikace a informatiku*. první. Brno: Centa, spol. s.r.o., 2009. 371 s. ISBN 978-80-86785-14-1.
- [15] Munster, P.: *OTDM BASED PASSIVE OPTICAL NETWORKS*. FEKT VUT [cit. 2013-05-22]. Dostupné z URL: <<http://www.feec.vutbr.cz/EEICT/2012/sbornik/03doktorskeprojekty/01elektronikaakomunikace/03-xmunst01.pdf>>
- [16] Optical Power Measurement. Newport.com [online]. [cit. 2013-03-23]. Dostupné z URL: <<http://www.newport.com/Tutorial-Optical-Power-Measurement/139634/1033/content.aspx>>
- [17] Optical Spectrum Analysis. AGILENT TECHNOLOGIES. Agilent.com [online]. [cit. 2013-03-23]. Dostupné z: <http://cp.literature.agilent.com/litweb/pdf/5963-7145E.pdf>
- [18] PFEIFFER, Thomas, et al. Optical fibers have the way to faster broadband access. In PFEIFFER, Thomas, et al. *Alcatel Telecommunications Review*. 2005th edition. [s.l.] : [s.n.], [2005]. s.1-9.
- [19] REICHERT, Pavel; ŠIFTA, Radim; FILKA, Miloslav. Nová generace pasivních optických sítí WDM - PON. VUT Brno. 2011, 0, s. 1-6.
- [20] RYŠAVÝ, Jan.: Aplikace nových technologií v optických přístupových sítích: bakalářská práce. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav telekomunikací, 2012. 70 s. Vedoucí práce byl Ing. Radim Šifta,
- [21] Rujian, L.: Next Generation PON in Emerging Networks. *IEEE Xplore* [online], [cit. 2013-03-23]. Dostupné z URL: <<http://ieeexplore.ieee.org/iel5/4512186/4528018/04528701.pdf>>. R&D Center of Modern Comm. Eng., Shanghai University. Optical Society of America, 2008.
- [22] S.-J. PARK, C.-H. LEE, K.-T. JEONG, H.-J. PARK, J.-G. AHN, K.-H.SONG, “Fiber-to-thehomeservices based on wavelengthdivision-multiplexing passive optical network”, *LightwaveTechnology, Journal of*, Vol. 22, No. 11, Nov. 2004, pp. 2582– 2591
- [23] TEJKAL, Vladimír, Miloslav FILKA, Pavel REICHERT a Jan ŠPORIK. DVOUSTAVOVÉ MODULAČNÍ FORMÁTY V OPTICKÝCH PŘÍSTUPOVÝCH SÍTÍCH. [Http://dspace.vsb.cz](http://dspace.vsb.cz) [online]. [cit. 2013-03-24]. Dostupné z URL: <<http://dspace.vsb.cz/bitstream/handle/10084/84189/AEEE-2010-8-4-96-tejkal.pdf?sequence=1>>
- [24] VODRÁŽKA, J.: Optické přístupové sítě EPON a CWDM, Access server [online]. 2005, roč. 3, č. 200507, [cit. 2013-03-23]. Dostupné z URL: <<http://access.feld.cvut.cz/view.php?nazevclanku=opticke-pristupove-site-epon-acwdm&cisloclanku=2005070401>>. ISSN 1214-9675
- [25] VODRÁŽKA, J.: Základy FTTx. Access server [online]. 2006, roč. 4, č. 200605, [cit. 2013-03-23]. Dostupné z URL: <<http://access.feld.cvut.cz/view.php?nazevclanku=zakladyfttx&cisloclanku=2006051702>>. ISSN 1214-9675

- [26] Y. B. CHOI; S. J. PARK; , "The low cost Hybrid CWDM/DWDM-TDM-PON system for NEXT FTTH" Optical Fiber Communication & Optoelectronic Exposition & Conference, 2008. AOE 2008. Asia, vol., no., pp.1-3, Oct. 30 2008-Nov. 2 2008. Dostupné z URL: <<http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=5348730&isnumber=5348545>>
- [27] Zheng, J., Mouftah, H.: Media Access Control for Ethernet Passive Optical Networks: An Overview. IEEE Xplore [online], Dostupné z URL: <<http://ieeexplore.ieee.org/iel5/35/30297/01391515.pdf>> [cit. 2013-03-23]. University of Ottawa, Ottawa. IEEE Communications Magazine, February 2005.

Použité zkratky

10GEPON	10 Gigabit Ethernet PON	10 Gigabitová ethernetová pasivní optická síť
APON	ATM based PON	Pasivní optická síť založená na ATM
ATM	Asynchronous Transfer Mode	Asynchronní přenosový režim
AMP	Amplifier	Zesilovač
AWG	Arrayed Waveguide Grating	Technologie pasivní směrové odbočnice
BPON	Broadband PON	Širokopásmová pasivní optická síť
CO	Central Office	Ústředna
CWDM	Coarse Wavelength Division Multiplex	Hrubý vlnový multiplex
DBA	Dynamic Bandwidth Allocation	Dynamické přidělování přenosových kapacit
DWA	Dynamic Wavelength Assignment	Dynamické přidělování vlnových délek
DWDM	Dense Wavelength Division Multiplex	Hustý vlnový multiplex
EDFA	Erbium Doped Fibre Amplifier	Erbiem dotovaný optický zesilovač
EFMC	Ethernet in the First Mile Cable	Ethernet v první kabelové míli
EFMF	Ethernet in the First Mile Fibre	Ethernet v první optické míli
EPON	Ethernet based PON	Pasivní optická síť založená na ethernetu
FDM	Frequency Division Multiplex	Frekvenční dělení
FTTB	Fiber To The Building	Optické vlákno do budovy
FTTC	Fiber To The Curb	Optické vlákno k rozvaděči
FTTCab	Fiber To The Cabinet	Optické vlákno do prostor s vysokými nároky
FTTEx	Fiber To The Exchange	Optické vlákno k ústředně
FTTH	Fiber To The Home	Optické vlákno do domu
FTTO	Fiber To The Office	Optické vlákno do účastníkového přístroje
Gbit.s ⁻¹	Gigabit per second	Gigabitů za sekundu
GEM	GPON Encapsulation Method	Metoda linkové vrstvy GPON určená pro přenos
GFP	Generic Frame Procedure	Mapování různých typů datových zpráv
GHz	Giga Hertz	Giga hertz
GPON	Gigabit Capable PON	Gigabitová pasivní optická síť
HD	High Definition	Vysoké rozlišení

IEEE	Institute of Electrical & Electronics Eng.	Institut pro elektrické a elektronické inženýrství
IP TV	Television over Internet Protocol	Internetová televize
ITU	International Telecommunication Union	Mezinárodní telekomunikační unie
ITU-T	ITU telecommunication Standard. Sectpr	Skupina ITU zaměřená na telekomunikace
kbit.s ⁻¹	kilobites per second	Kilobitů za sekundu
LR PON	Long - Reach PON	Pasivní optická síť s dlouhým dosahem
MAC	Medium Access Control	Řídící protokol
Mbit.s ⁻¹	Megabit per second	Megabitů za sekundu
nm	nanometer	Nanometr
NRZ	Non-Return-to-Zero	Bez návratu k nule
OAN	Optical Access Network	Optická přístupová síť
ODN	Optical Distribution Network	Optická distribuční síť
OLT	Optical Line Termination	Optické linkové zakončení
ONT	Optical Network Termination	Optické síťové zakončení
ONU	Optical Network Unit	Optická síťová jednotka
P2MP	Point-to-multipoint	Mnohobodové spojení
P2P	Point-to-point	Spojení bod-bod
PON	Passive Optical Network	Pasivní optická síť
RSOA	Reflective Semiconductor Optical Amp.	Reflektivní polovodičový optický zesilovač
SDH	Synchronous Digital Hierarchy	Standard multiplexování digitálního přenosu
SPON	Super PON	Super PON
STM	Synchronous Transport Module	Synchronní transportní modul
TDM	Time Division Multiplex	Časové dělení
TDMA	Time Division Multiplex Access	Přístup pomocí časového dělení
VoD	Video on Demand	Video na požádání
WDM	Wavelength Division Multiplex	Vlnové dělení
WWDM	Wide Wavelength Division Multiplex	Široký vlnový multiplex
WDM/TDM	WDM/TDM	Kombinace vlnového a časového dělení
XG-PON	10 Gigabit PON	10 Gigabitová pasivní optická síť

Seznam příloh

A. Přílohy – Topologie

A. 1 – Příloha 1. Topologie TDM PON

A. 2 – Příloha 2. Topologie WDM PON

A. 3 – Příloha 3. Topologie WDM/TDM PON

B. Přílohy – tabulky naměřených hodnot

B. 1 – Příloha 1. Naměřené_hodnoty.xls

C. Přílohy – Animace

C. 1 – Příloha 1. WDM.swf

C. 2 – Příloha 2. WDMTDM.swf

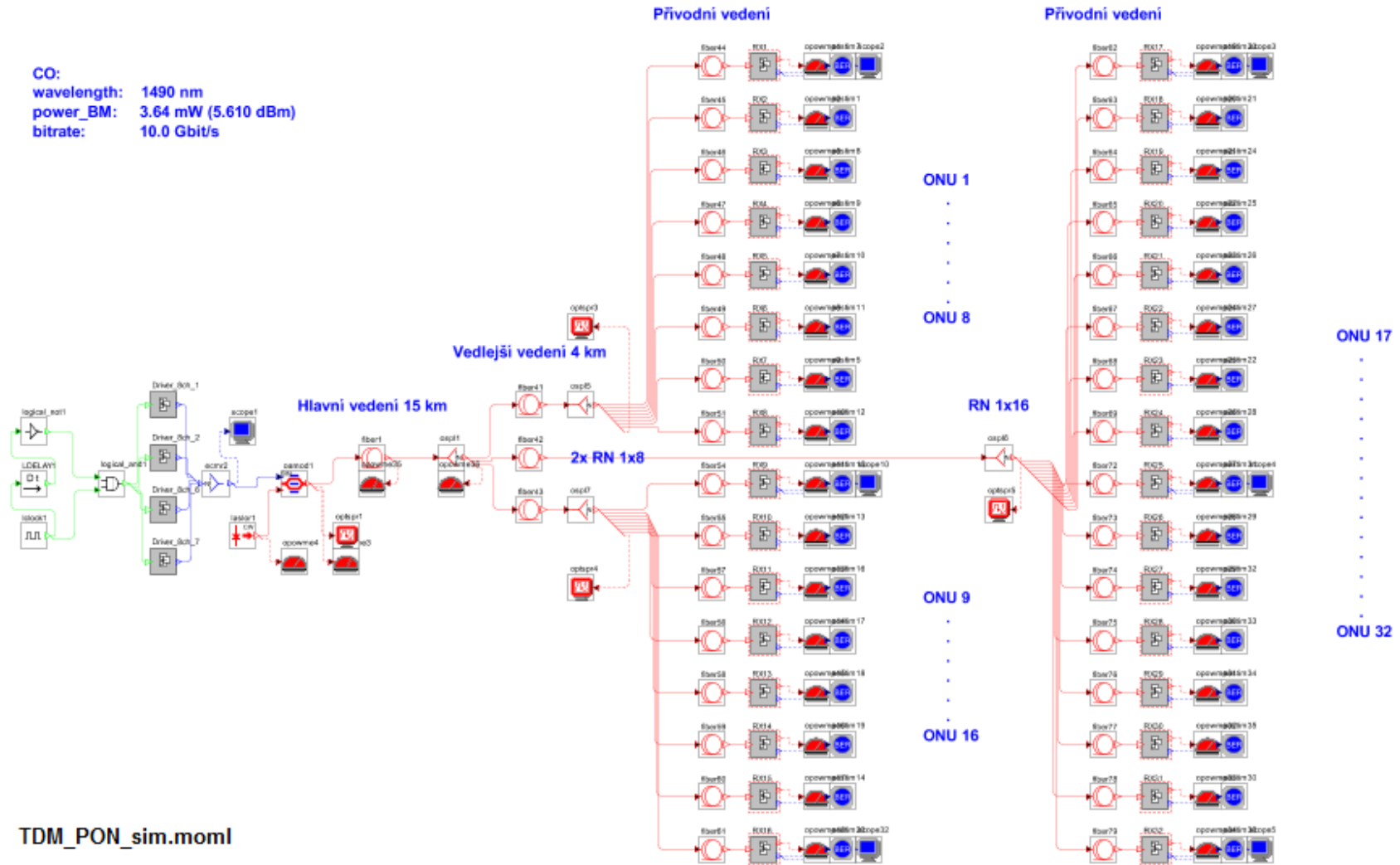
D. Přílohy – Optsim simulace

D.1 – Příloha 1. TDM_PON_sim.moml

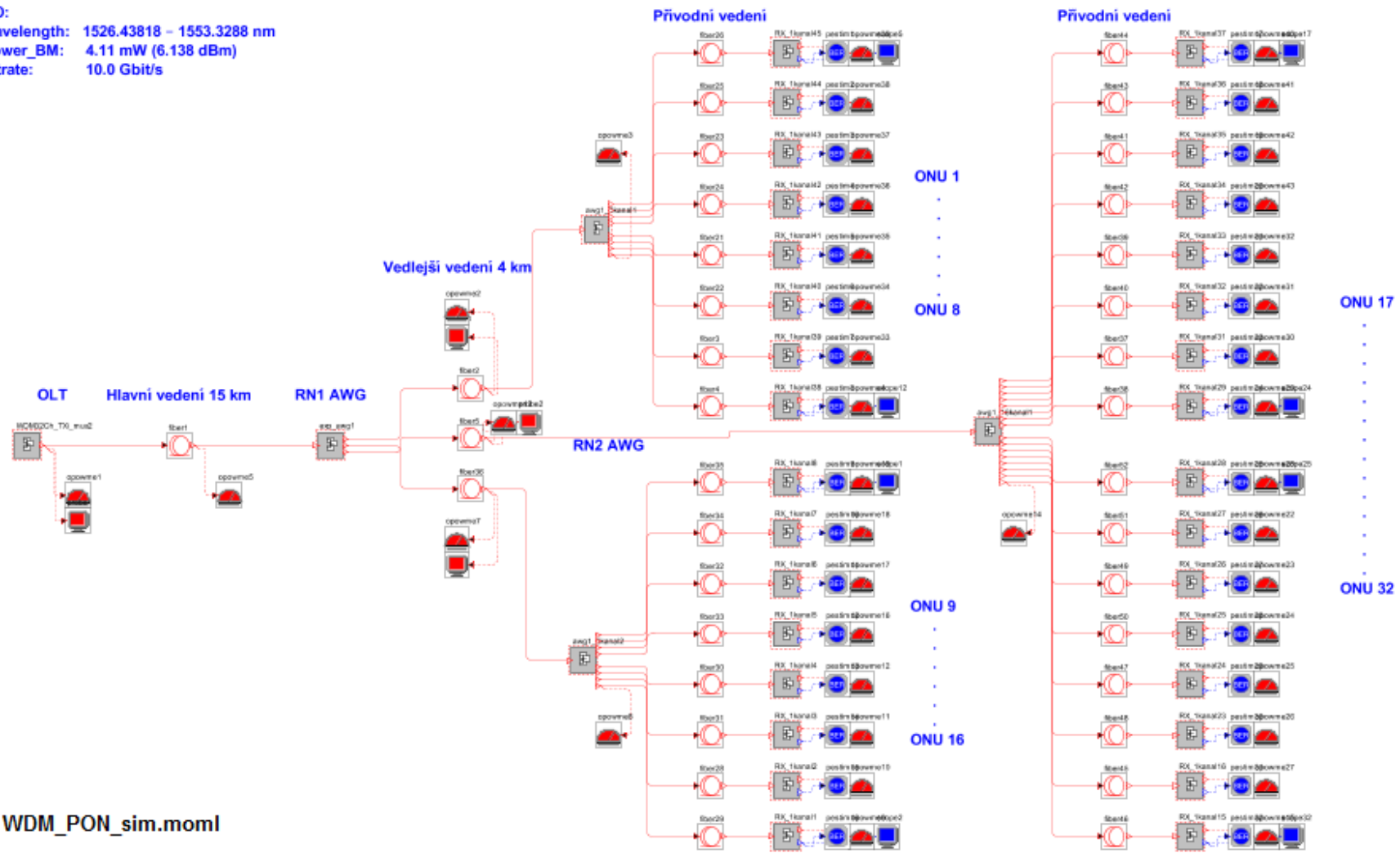
D.2 – Příloha 2. WDM_PON_sim.moml

D.3 – Příloha 3. WDMTDM_PON_sim.moml

CO:
 wavelength: 1490 nm
 power_BM: 3.64 mW (5.610 dBm)
 bitrate: 10.0 Gbit/s

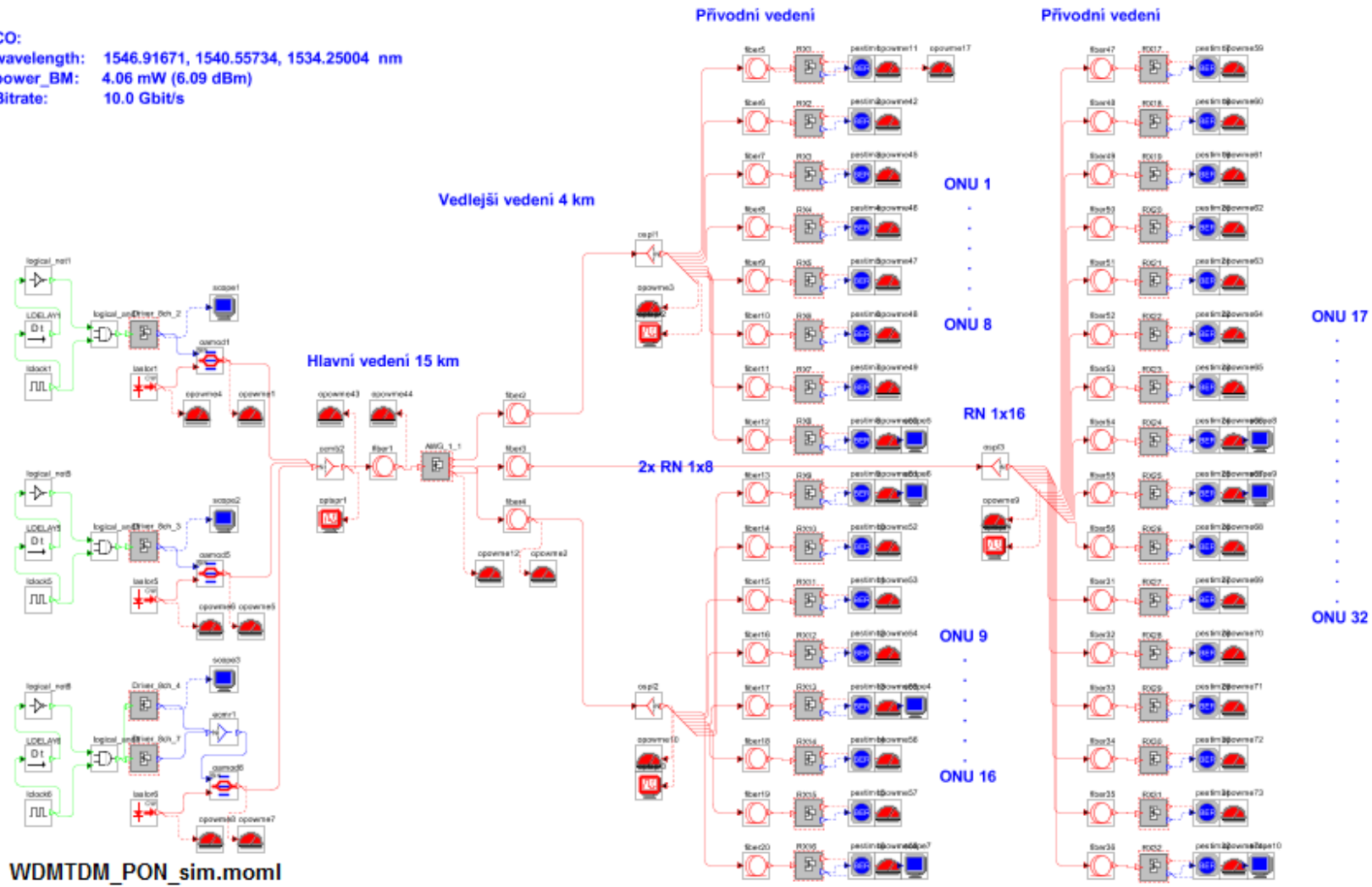


CO:
 wavelength: 1526.43818 – 1553.3288 nm
 power_BM: 4.11 mW (6.138 dBm)
 bitrate: 10.0 Gbit/s



WDM_PON_sim.moml

CO:
 wavelength: 1546.91671, 1540.55734, 1534.25004 nm
 power_BM: 4.06 mW (6.09 dBm)
 Bitrate: 10.0 Gbit/s



WDMTDM_PON_sim.momi