

VŠB – Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky

BAKALÁRSKA PRÁCA

2012

Miroslav Králik

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

**Studium implementace WDM-PON
na stávající optickou přístupovou
infrastrukturu**

**Study of the WDM-PON Implementation
to the Existing Optical Access
Infrastructure**

2012

Miroslav Králik

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra telekomunikační techniky

Zadání bakalářské práce

Student: **Miroslav Králík**

Studijní program: B2647 Informační a komunikační technologie

Studijní obor: 2612R059 Mobilní technologie

Téma: **Studium implementace WDM-PON na stávající optickou přístupovou infrastrukturou**
Study of the WDM-PON Implementation to the Existing Optical Access Infrastructure

Zásady pro vypracování:

V současné době se začínají do popředí v optických přístupových sítích dostávat optické přístupové sítě nové generace. Tyto přístupové sítě představují další mezník ve vývoji přístupových sítích. Cílem bakalářské práce je provedení studie implementace WDM-PON na stávající optickou infrastrukturu. Výsledky studie budou doloženy experimentálním měřením v laboratorních podmínkách (dle doporučení RFC 2544 a ITU-T Y.156sam).

1. Popište v současné době využívané technologie optických přístupových sítích, včetně nejčastějších topologií a systému správy.
2. Proveďte studii problematiky sítí nové generace z hlediska implementace na stávající optickou přístupovou infrastrukturu.
3. Výsledky studie ověřte za provozu experimentálním měřením v laboratorních podmínkách (dle doporučení RFC 2544 a ITU-T Y.156sam).

Seznam doporučené odborné literatury:

PRAT, Josep. *Next-Generation FTTH Passive Optical Networks: Research towards unlimited bandwidth access*. Barcelona: Springer, 2008. 187 p. ISBN 978-1-4020-8469-0.


LAM, Cedric. *Passive Optical Networks: Principles and practice*. Oxford: Elsevier Inc., 2007. 324 p. ISBN 978-0-12-373853-0.

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


Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Petr Koudelka**

Datum zadání: 18.11.2011

Datum odevzdání: 04.05.2012


prof. RNDr. Vladimír Vašínek, CSc.
vedoucí katedry




prof. RNDr. Václav Snášel, CSc.
děkan fakulty

Prehlásenie

Prehlasujem, že som celú bakalársku prácu vrátane príloh vypracoval samostatne pod vedením vedúceho bakalárskej práce a uviedol som všetky použité podklady a literatúru, z ktorých som čerpal.

V Ostrave 3. 5. 2012

.....
Miroslav Králík

Pod'akovanie

Ďakujem vedúcemu bakalárskej práce Ing. Petrovi Koudelkovi za užitočnú odbornú pomoc a poskytnuté rady pri spracovaní bakalárskej práce.

Abstrakt:

Bakalárska práca sa zaoberá optickými prístupovými sieťami, s hlavným zameraním na siete s vlnovým multiplexom, tiež na siete novej generácie a ich implementáciu na existujúcu optickú prístupovú infraštruktúru. Prácu tvorí niekoľko základných tematických častí. V úvode sú spomenuté očakávané trendy v budúcnosti, týkajúce sa požiadaviek na kapacitu a možnosti prístupových sietí. Druhá kapitola popisuje základné celky a usporiadanie optických prístupových sietí z hľadiska systému FTTx. Tretia kapitola približuje základné rozdelenie optických prístupových sietí. Nasledujúca kapitola sa zaoberá spôsobmi šírenia optického signálu a najpoužívanejšími topológiami, ako sú P2P a P2MP. Najvyužívanejšie štandardy optických prístupových sietí prináša piata časť. V predposlednej kapitole sú poskytnuté vyhliadky pre siete novej generácie a ich jednotlivé typy. Záverečný bod tvorí praktická časť, tvorená experimentálnymi meraniami a ich výsledkami, ktorých obsahom je testovanie siete WDM-PON a jej implementácie na existujúcu sieť GE-PON.

Kľúčové slová:

Optická prístupová sieť, pasívna optická sieť, vlnový multiplex, siete novej generácie, implementácia

Abstract:

This bachelor thesis deals with optical access networks, with a focus on networks with wavelength division multiplexing, also the next generation networks and their implementation on existing optical access infrastructure. The work consists of several basic parts. At the beginning of the thesis are mentioned expected future trends, relating to capacity requirements and possibilities of access networks. The second chapter describes the basic units and the arrangement of optical access networks in terms of FTTx. The third chapter explains the basic division of optical access networks. The next chapter looks at ways of spreading the optical signal and the most commonly used topologies, such as P2P and P2MP. Mostly used standards for optical access networks brings the fifth part. In the penultimate chapter is given the prospects for next generation networks and their various types. The final point is the practical part, consisting of experimental measurements and results that contain the testing of WDM-PON and its implementation on the existing GE-PON network.

Keywords:

Optical access network, passive optical network, wavelength division multiplex, next generation networks, implementation

Zoznam použitých symbolov a skratiek

| | |
|-----------|---|
| λ | označenie vlnovej dĺžky $\lambda_1 \dots \lambda_n$ |
| 10GE-PON | 10 Gbit/s Ethernet Passive Optical Network |
| APC | Angle Polish Connector – uhlový optický konektor |
| APD | Avalanche-Photodiode – lavínová fotodióda |
| APON | ATM Passive Optical Network – štandard PON založený na ATM |
| ATD | Asynchronous Time Division – asynchrónne časové delenie |
| ATM | Asynchronous Transfer Mode – asynchrónny prenosový mód |
| AWG | Arrayed Waveguide Grating – vlnovody usporiadané do mriežky |
| BPON | Broadband Passive Optical Network – širokopásmový štandard PON |
| CAPEX | Capital Expenditure – kapitálové výdavky |
| CIR | Committed Information Rate – garantovaná prenosová rýchlosť |
| CO | Central Office – centrálna ústredňa |
| CoS | Class of Service – typ metódy používanej na doručenie QoS |
| CWDM | Coarse Wavelength Division Multiplex – hrubý vlnový multiplex |
| DFB | Disturbed FeedBack – typ laseru, DFB laser |
| DRA | Distributed Raman Amplification – zosilňovač na báze Ramanovho zosilnenia |
| DWA | Dynamic Wavelength Assignment – mechanizmus pridelovania kanálov |
| DWDM | Dense Wavelength Division Multiplex – hustý vlnový multiplex |
| EDFA | Erbium Doped Fiber Ampfier – erbiom dotovaný optický zosilňovač |
| EIR | Excess Information Rate – negarantovaná prenosová rýchlosť |
| EMS | Element Management System – port EMS |
| EPON | Ethernet Passive Optical Network – ethernetový štandard PON |
| FDM | Frequency Division Multiplex – frekvenčný multiplex |
| FITL | Fibre In The Loop – ekvivalent názvu FTTx |
| FP | Fabry-Perot – fabry-perotovú laser |
| FP-LD | Fabry-Perot Laser Diode – fabry-perotová laserová dióda |
| FSAN | Full Service Access Network – pracovná skupina telekomunikačných služieb |

| | |
|--------|---|
| FTTB | Fibre To The Building – optické vlákno k budove |
| FTTC | Fibre To The Curb – optické vlákno k chodníku |
| FTTCab | Fibre To The Cabinet – optické vlákno do prístroja |
| FTTH | Fibre To The Home – optické vlákno do domu |
| FTTN | Fibre To The Node – optické vlákno do uzla, rozvádzača |
| FTTO | Fibre To The Office – optické vlákno do kancelárie |
| FTTP | Fibre To The Permisses – |
| FTTx | Fibre To The x – systém zavedenia vlákna v ODN |
| GEM | GPON Encapsulation Method – metóda prenosu v GPON |
| GE-PON | Gbit/s Ethernet Passive Optical Network – gigabit-ethernetový štandard PON |
| GPON | Gigabit Passive Optical Neteork – gigabitový štandard PON |
| IEEE | Institution of Electrical and Electronics Engineers – inštitút pre elektrotechnické a elektronické inžinierstvo |
| IP | Internet Protocol – internetový protokol |
| IPTV | Internet Protocol Television – systém prenosu TV služieb cez internetový protokol |
| ITU | International Telecommunication Union – medzinárodná telekomunikačná únia |
| KPI | Key Performance Indicators - špecifické charakteristiky prevádzky |
| LLID | Logical Link Identification – prepínacia metóda |
| LR-PON | Long Reach Passive Optical Network – PON sieť ďalekého dosahu |
| MAC | Media Access Control – podvrstva linkovej vrstvy |
| MC | Media Converter – prevádzač médií |
| MLM | Multi Longitudinal Mode – spektrum tvorené periodickými vlnami |
| MPCP | Multi-Point Control Protocol – riadiaci protokol |
| NGA | Next Generation Access – termín, ktorý opisuje trendy v sieťach novej generácie |
| OAN | Optical Access Network – optická prístupová sieť |
| OCDMA | Optical Code Division Multiple Access – typ optického multiplexovania |
| ODN | Optical Distribution Network – optická distribučná sieť |
| OFDMA | Orthogonal Frequency Division Multiple Access – typ optického multiplexovania |
| OLT | Optical Line Termination – optické linkové zakončenie |
| ONT | Optical Network Termination – optické sieťové zakončenie |
| ONU | Optical Network Unit – optická sieťová jednotka |

| | |
|---------|--|
| OPEX | Operational Expenditure – operačné náklady |
| P2MP | Point To Multipoint – spojenie bod-viac bodov |
| P2P | Point To Point – spojenie bod-bod |
| PC | Physical Contact – rovný konektor typu SC |
| PIN | P-I-N – dióda s p-typtom a n-typtom polovodiča s vnútorným i-regiónom |
| PMD | Polarization Mode Disperzion – polarizačná vidová disperzia |
| PON | Passive Optical Network – pasívna optická sieť |
| PPV | Pay Per View – služba plateného videa |
| QoS | Quality of Services - termín používaný pre rezerváciu a riadenie dátových tokov |
| RF | Radio Frequency – RF video overlay, technológia pre video prenos |
| RFC | Request For Comment – RFC 2544 testovací štandard |
| RM-OSI | Reference Model of Open Systems Interconnection – referenčný model |
| SC | Subscriber Connector – typ konektoru |
| SDH | Synchronous Digital Hierarchy – typ rámcov |
| SDM | Space Division Multiplexing – typ multiplexovania |
| SOA | Semiconductor Optical Amplifiers – polovodičový optický zosilňovač |
| SONET | Synchronous Optical Networking – typ rámcov |
| STD | Synchronous Time Division – synchronne časové delenie |
| STDM | Statical TDM - statický TDM |
| TDM | Time Division Multiplexing – časový multiplex |
| TDMA | Time Division Multiple Access – kanálová prístupová metóda |
| VCSEL | Vertical Cavity Surface Emitting Laser – typ vysielača s VCSEL |
| VoD | Video on Demand – video na požiadanie |
| VoIP | Voice over Internet Protocol – hlasové služby cez internetový protokol |
| WDM | Wavelength Division Multiplex – vlnový multiplex |
| WDM-PON | Wavelength Division Multiplex Passive Optical Network – štandard PON s metódou vlnového multiplexu |
| WPF | Wavelength Passive Filter – vlnový pasívny filter |
| WWDM | Wide Wavelength Division Multiplex – široký vlnový multiplex |
| XG-PON | XG Passive Optical Network – štandard PON |
| ngPON | Next Generation Passive Optical Network – sieť novej generácie |

Obsah

| | | |
|-----------|---|-----------|
| 1. | Úvod | 1 |
| 2. | Optické prístupové siete | 2 |
| 2.1. | Delenie optických prístupových sietí..... | 2 |
| 3. | Usporiadanie optickej prístupovej siete | 3 |
| 3.1. | Základné funkčné celky OAN | 3 |
| 3.2. | FTTx | 3 |
| 4. | Špecifikácia prenosu optického signálu | 5 |
| 4.1. | Simplex, duplex (WDM, FDM, TDM)..... | 5 |
| 4.2. | Bod-Bod (P2P) a Bod-Multibod (P2MP) | 6 |
| 4.2.1. | Topológia P2P | 6 |
| 4.2.2. | Topológia P2MP | 7 |
| 5. | Pasívna optická prístupová sieť (PON) | 9 |
| 5.1. | APON, BPON, GPON | 9 |
| 5.2. | EPON..... | 11 |
| 5.3. | WDM-PON..... | 12 |
| 5.3.1. | WWDM | 15 |
| 5.3.2. | DWDM | 15 |
| 5.3.3. | CWDM | 15 |
| 5.4. | Porovnanie vybraných typov PON | 16 |
| 6. | Siete novej generácie (Next-generation networks) | 17 |
| 6.1. | 10G Pasívne Optické Siete | 19 |
| 6.2. | Prístupové siete ďalekého dosahu – LR-PON | 20 |
| 6.2.1. | Technológie rozšírenia dosahu v LR-PON..... | 21 |
| 6.2.2. | Výzvy pre LR-PON | 21 |
| 6.3. | Komplementárne prístupové technológie | 22 |
| 6.3.1. | Koherentné WDM-PON | 22 |
| 6.3.2. | OFDMA, (O)CDMA PON | 23 |
| 7. | Praktické meranie | 24 |

| | | |
|-----------|--|-----------|
| 7.1. | Súbor testov | 24 |
| 7.1.1. | RFC2544..... | 24 |
| 7.1.2. | ITU-T Y.156sam (EtherSAM) | 25 |
| 7.2. | Popis pracoviska a použité prístroje | 26 |
| 7.3. | Konfigurácia zariadení..... | 29 |
| 7.4. | Použité topológie | 34 |
| 7.5. | Meranie RFC2544 | 35 |
| 7.5.1. | WDM-PON, WDM-PON / GE-PON | 35 |
| 7.6. | Meranie ITU-T Y.156sam (EtherSAM) | 39 |
| 7.7. | Zhodnotenie výsledkov meraní..... | 42 |
| 8. | Záver | 44 |
| | Zoznam použitej literatúry..... | 45 |
| | Zoznam príloh | 47 |

1. Úvod

Témou tejto bakalárskej práce sú optické prístupové siete, so zameraním na siete WDM-PON a optické prístupové siete novej generácie. Tento typ prístupových sietí znamená ďalší medzník pre vývoj v prístupových sieťach.

V mojej práci ide nielen o všeobecné poznatky ohľadom súčasných optických sietí, ich typov a technológií, ale aj o štúdie optických prístupových sietí novej generácie a ich prípadnú implementáciu na aktuálnu optickú infraštruktúru, resp. podmienky, ktoré musia byť splnené pre ich prijatie do segmentu prístupových sietí. Pre niekoho je už dnes možno zbytočné zdokonaľovať štruktúru optických sietí, keďže dnešné technológie sú už na vysokej a pre mnoho ľudí dostačujúcej úrovni a tiež máme stále k dispozícii klasické metalické siete. Avšak keď vezmeme do úvahy dnešný technický pokrok, časom sa budú požiadavky jednoduchého užívateľa určite zvyšovať, keďže bude požadovať vždy kvalitný produkt. Týka sa to najmä požiadaviek na rýchlejší prenos dát a požiadaviek multimediálneho charakteru, či už ide o sledovanie videa, napr. VoD (*Video on Demand*), PPV (*Pay per View*), sledovanie videa vo vysokom rozlíšení HD (*High Definition*), resp. FullHD (*Full High Definition*), hranie hier (jedného, alebo viacerých online hráčov) na internete, alebo tiež VoIP (*Voice over IP*), ktorých nároky rastú, čím teda rastie aj záťaž na internetové pripojenie a samotnú prípojku. Tu už nám časom nebudú postačovať dnešné internetové pripojky, či už ide o ADSL2+ alebo WiFi, a teda sa dostávajú na radu už spomínané optické prístupové siete. S rastúcim počtom užívateľov a potenciálnych užívateľov je treba stále zdokonaľovať možnosti týchto sietí. Jedným z hlavných faktorov, ktoré ovplyvňujú využívanie tohto druhu pripojenia je aj cena. Na nej závisí ďalší úspech týchto technológií. Momentálne ceny prvkov optických prístupových sietí sú dosť vysoké, avšak náklady klesajú priamo úmerne s ich vývojom. Z hľadiska ceny môžeme povedať, že ako najperspektívnejšia vyzerá pasívna optická prístupová sieť PON (*Passive Optical Network*) a jej jednotlivé typy.

Celkový obsah bakalárskej práce môžem rozdeliť, čo sa týka informácií, na dve časti. Prvá časť je spracovaná na základe poznatkov získaných z voľne dostupných zdrojov a ide o teoretické východiská tejto problematiky. Riešim tu základné rozdelenie optických prístupových sietí, najpoužívanejšie a najperspektívnejšie topológie, spôsoby prenosu optického signálu a technológie podľa 2. vrstvy RM-OSI modelu. Najväčšiu pozornosť sa snažím venovať štandardu WDM-PON. V druhej časti ide o praktické poznatky získané na základe meraní v laboratóriách. Merania sú uskutočnené v prostredíach VŠB TU Ostrava. Ide o testovanie štandardu WDM-PON a tiež testovanie tohto štandardu v kombinácii so štandardom GEPON, čo predstavuje implementáciu na aktuálnu infraštruktúru. V rámci týchto dvoch návrhov prevádzkam testy podľa predpisu RFC2544 a ITU-T Y.156sam (EtherSAM).

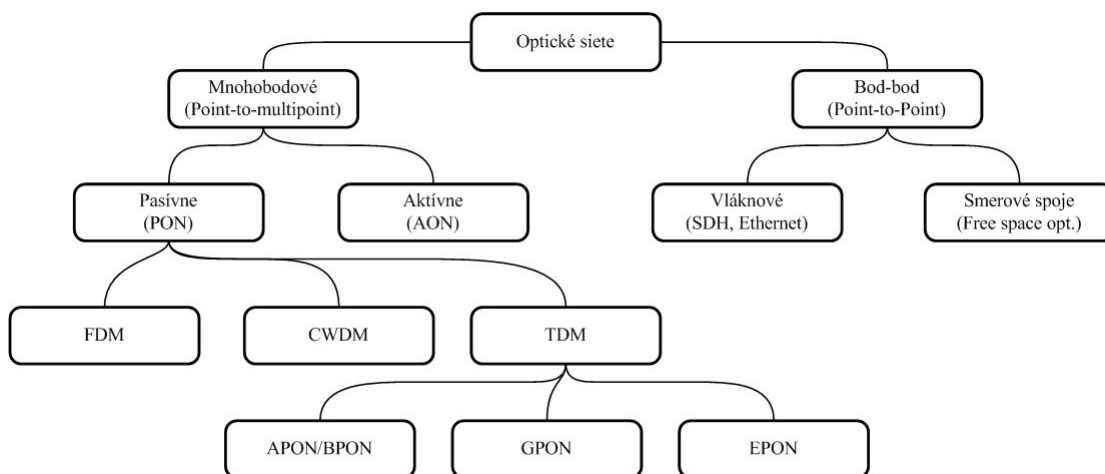
2. Optické prístupové siete

Dátové prenosy a komunikačné technológie sa dnes pohybujú už v iných sférach ako tomu bolo v začiatkoch. Avšak ako v minulosti, tak aj dnes sa rieši jeden spoločný problém a tým je šírka pásma, ktorá sa stáva postupom doby nedostačujúcou. Kedysi, ale tiež aj dnes stále používané metalické telekomunikačné systémy, ktoré sú vo väčšine prípadov používané, sa už často dostávajú ku krajným hraniciam svojich možností. To vytvára potrebu, nahradiť ich novou technológiou a tou je práve optika, resp. optické vlákna, káble. Tie začali vytláčať metalické systémy najprv len z chrbticovej a postupne tiež z transportných, metropolitných a dnes už dokonca aj z prístupových sietí.

Optické prístupové siete nám pomáhajú riešiť viaceré otázky ako: nárast počtu účastníkov, nárast požiadaviek na zavádzanie nových služieb, nárast objemu dátových komunikácií. Vytvárajú tiež konkurenčné prostredie, umožňujú multiplexné využívanie prenosových médií a tiež sa snažia o nezávislosť technológie spojovacej a prístupovej siete.

2.1. Delenie optických prístupových sietí

Základné rozdelenie optických sietí spočíva v počte prepojení v sieti. Delíme ich na siete mnohobodové a siete bod-bod. Tieto dva druhy sa delia do ďalších skupín a podskupín podľa ich vlastností a prvkov, z ktorých sú zložené.



Obr. 1: Základné rozdelenie optických prístupových sietí

3. Usporiadanie optickej prístupovej siete

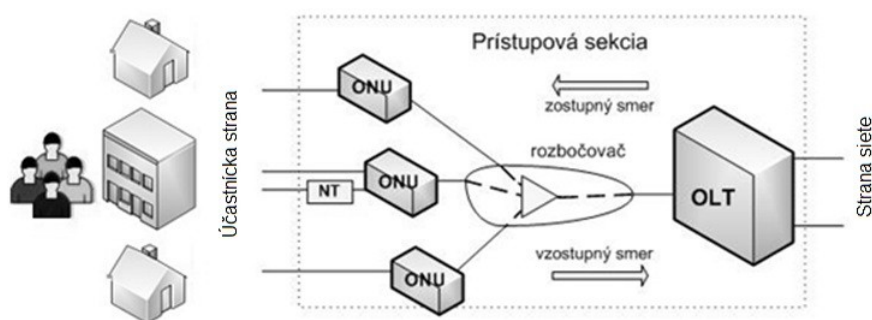
3.1. Základné funkčné celky OAN

Optická prístupová sieť slúži na prenos signálu medzi koncovým bodom a spojovacou sieťou. Dôvod, prečo dochádza k využívaniu optických vlákien na budovanie optických prístupových sietí, je ich schopnosť ponúknuť lepšie prenosové, resp. kapacitné vlastnosti, pre využívanie všetkých služieb požadovaných účastníkom. Pri budovaní OAN (*Optical Access Network*) je treba vzhliadať ku kompromisu, čo sa týka ceny použitých prvkov a systémov a ich prenosových možností.

OAN tvoria tri základné funkčné celky:

- OLT (*Optical Line Termination*), je jednotka nachádzajúca sa na strane siete. OLT – optické linkové zakončenie má funkciu sieťového rozhrania medzi prístupovou sieťou a sieťami telekomunikačných služieb,
- ODN (*Optical Distribution Unit*) – optická distribučná sieť – súbor optických prenosových prostriedkov nachádzajúci sa medzi jednotkou OLT a ONU jednotkami. Je zložená z primárnej (transportnej) a sekundárnej (distribučnej) časti.
- ONU (*Optical Network Unit*) – optické sieťové jednotky. ONU je jednotka na strane účastníka. Zabezpečuje funkciu účastníckeho rozhrania medzi koncovými zariadeniami účastníkov a prístupovou sieťou a tiež môžu nadväzovať sieťové zakončenie NT, tým pádom ide teda o ONT (*Optical Network Termination*) - optické sieťové zakončenie.

Podľa spôsobu umiestnenia sieťových jednotiek ONU a spôsobu ich prevedenia, rozlišujeme rôzne typy optických prístupových sietí OAN. [16]



Obr. 2: Optická prístupová sieť

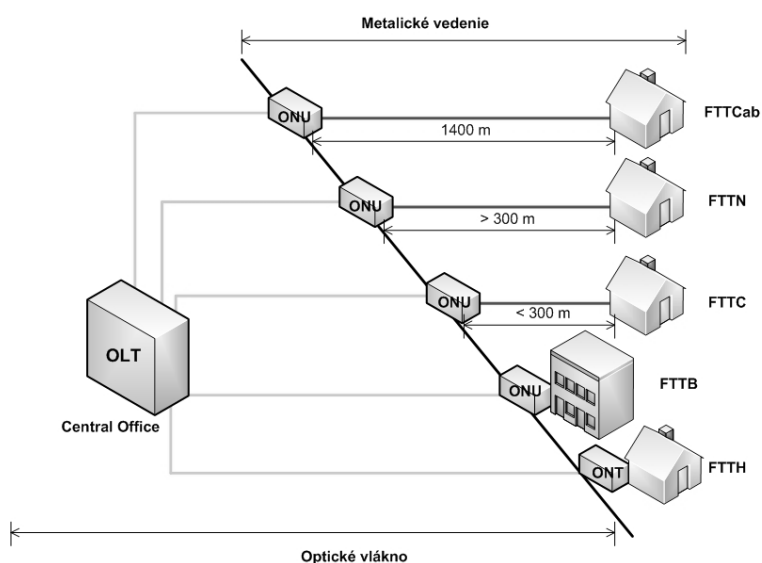
3.2. FTTx

V dnešnej dobe sa využíva systém FITL (*Fiber In The Loop*) pre prístup pripojení v miestnych slučkách. Vlákňové prístupové systémy sú tiež označované ako FTTx (*Fiber To The x*) systém, kde

„X“ môže byť „dom“ (*home*), „obrubič“ (*curb*), „areál siete“ (*premises*), „susedstvo“ (*neighborhood*) atď., v závislosti na tom, ako hlboko je vlákno v teréne, resp. ako blízko je k užívateľovi. V systéme FTTH je vláknom prepojená celá trasa od prevádzkovateľa služby, až k domácomu užívateľovi. V systéme FTTC, je vlákno privedené k okraju komunity, kde je optický signál konvertovaný na elektrický a distribuovaný k užívateľom prostredníctvom metalických káblov. Systém FTTx môže byť v realizovaný ako vláknový prístupový systém bod-bod P2P (*point-to-point*) alebo bod-mnohobod P2MP (*point-to-multipoint*). [1]

Typy FTTx

- FTTC (*Fibre to the Curb*) – je to spôsob, keď sú optické vlákna privádzané k účastníckemu rozvádzaču, ku ktorému sú koncové body pripojené pomocou metalických káblov,
- FTTB (*Fibre to the Building*) – je to spôsob, keď sú optické vlákna privedené až do budov účastníkov, ktorí sú ďalej pripájaní pomocou vnútorných účastníckych rozvodov,
- FTTO (*Fibre to the Office*) – je to spôsob, keď sú optické vlákna zavedené až do priestorov dôležitých účastníkov s veľkými nárokmi na prenosovú kapacitu,
- FTTH (*Fibre to the Home*) – je to spôsob, keď sú optické vlákna zavedené až ku koncovým bodom siete, teda až na účastnícke zásuvky,
- FTTP (*Fibre to the Premises*) – je to spôsob, keď je optické vlákno privedené do areálu účastníckej siete,
- FTTN (*Fibre to the Node*) – je to spôsob, keď je optické vlákno privedené k uzlu, čo je približne vo vzdialenosti 1 km od domov a podnikov. Tento spôsob je schopný dodávať účastníkom prenosovú rýchlosť 20 až 25 Mbit/s,
- FTTCab (*Fibre to the Cabinet*) – je to spôsob, keď je optické vlákno privedené k rozvádzaču, podobné FTTC, odlišujúce sa len vo vzdialenosti umiestnenia ONU jednotky.



Obr. 3: Systém FTTx

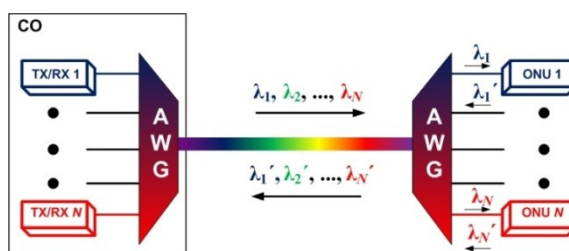
4. Špecifikácia prenosu optického signálu

4.1. Simplex, duplex (WDM, FDM, TDM)

Prenos optického signálu oboma smermi môže byť zaistený niekoľkými spôsobmi.

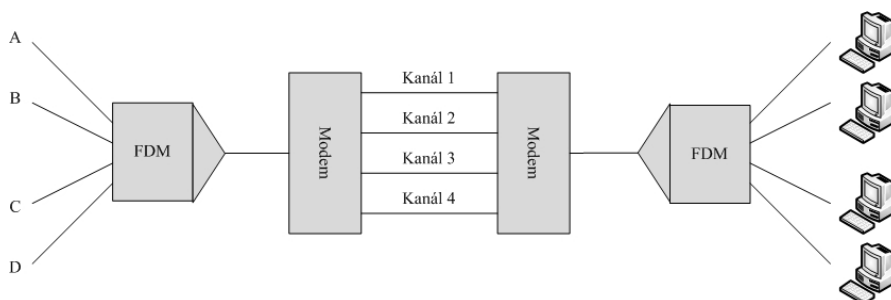
Simplexný prenos, simplexné delenie SDM (*Space Division Multiplexing*), znamená prenos signálu pri ktorom sú použité dve vlákna, t.j. pre každý smer je vyhradené jedno vlákno.

Pri duplexnom prenose sa používajú technológie, podľa spôsobu delenia optického signálu. Delenie WDM (*Wavelength Division Multiplexing*) je založené na delení signálu na základe vlnovej dĺžky. Signály v oboch smeroch sú prenášané v jednom vlákne, pričom jeden smer je prenášaný v oblasti 1 310 nm a druhý 1 550 nm. U vlnového multiplexu WDM ide o myšlienku združenia niekoľkých optických kanálov v jednom vlákne, na základe vlnového delenia. Pôvodne boli tieto optické kanály prenášané každý jedným vláknom. Myšlienka vlnového delenia je veľmi podobná frekvenčnému združovaniu kanálov zo základného pásma do vysokofrekvenčných skupinových signálov, ktoré je použité u analógových nosných systémov. Technológia WDM pracuje s rýchlosťami od až do 10 Gbit/s. [17]



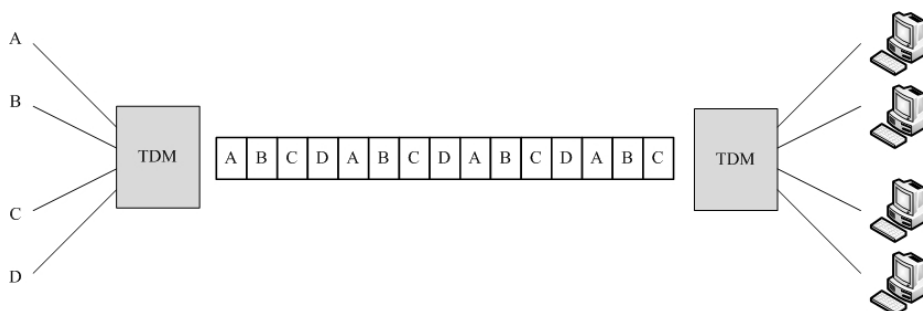
Obr. 4: WDM technológia

Druhý typ, FDM (*Frequency Division Multiplexing*), signál prenáša tak isto po jednom vlákne v jednej oblasti vlnových dĺžok a smery sú tu kmitočtovo oddelené. Technológia FDM využíva to, že prenosová cesta disponuje širším pásmom kmitočtov ako je nutné obsadiť prenášaným signálom. Signály z jednotlivých kanálov sa teda môžu posúvať na vyššie kmitočty tak, aby sa jednotlivé kanály neprekrývali. Toto sa využíva napríklad pri telefónnych prenosoch po metalických káblach, pri obsadzovaní rádiového priestoru, ale tiež u prenosoch ADSL a VDSL. [2]



Obr. 5: FDM technológia

Technológia TDM (*Time Division Multiplexing*) umožňuje vďaka digitalizácii na spoločnej ceste priradiť jednotlivým kanálom iba presne vymedzený časový interval a ostatné časové úseky využívať pre ďalšie kanály. Z hľadiska samotného spôsobu komunikácie môžeme TDM rozdeliť podľa prenosového módu na dve kategórie – synchronnú STD (*Synchronous Time Division*) a asynchrónnu ATD (*Asynchronous Time Division*). Synchronný prenosový mód je založený na pravidelnom výskyte určitého časového intervalu príslušného k jednej relácii. Jeho výhodou je vytváranie prenosových kanálov s premennou rýchlosťou, čo spôsobuje pružnejšie reagovanie na požiadavky prenosu. Asynchrónny prenosový mód pracuje opačne, teda pri nepravidelnom výskyte určitého časového intervalu. Výhoda asynchrónneho prenosového módu je efektívnejšie využitie prenosových trás, ktoré je spôsobené statickým multiplexovaním STDM (*Statical TDM*), keď sa prenosové prostriedky obsadzujú iba v prípade aktívnej komunikácie zostaveného spojenia. [2]



Obr. 6: TDM technológia

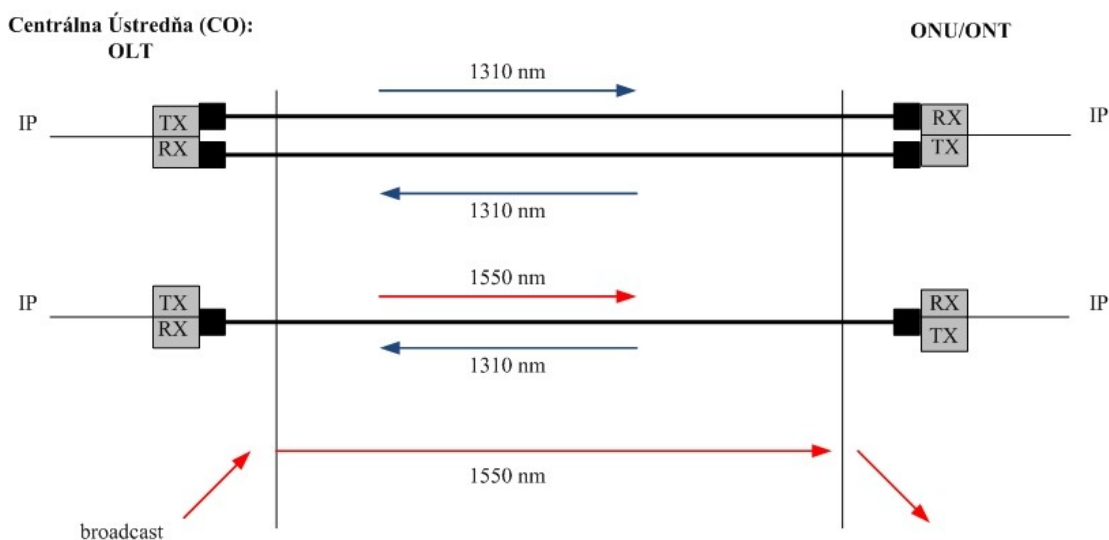
4.2. Bod-Bod (P2P) a Bod-Multibod (P2MP)

Existujú dve alternatívy pre zavedenie optického vlákna do prístupovej slučky: bod-bod – P2P (*point-to-point*) a bod-mnohobod – P2MP (*point-to-multipoint*).

4.2.1. Topológia P2P

Systém P2P používa MC (*media converter*) na dosiahnutie optického spojenia s vyhradeným vláknom putujúcim z centrálnej stanice ku každému koncovému užívateľovi. Odberatelia môžu byť vo vzdialenosti do 80 km od centrálnej stanice. Aj keď je to jednoduchá architektúra, náklady sú

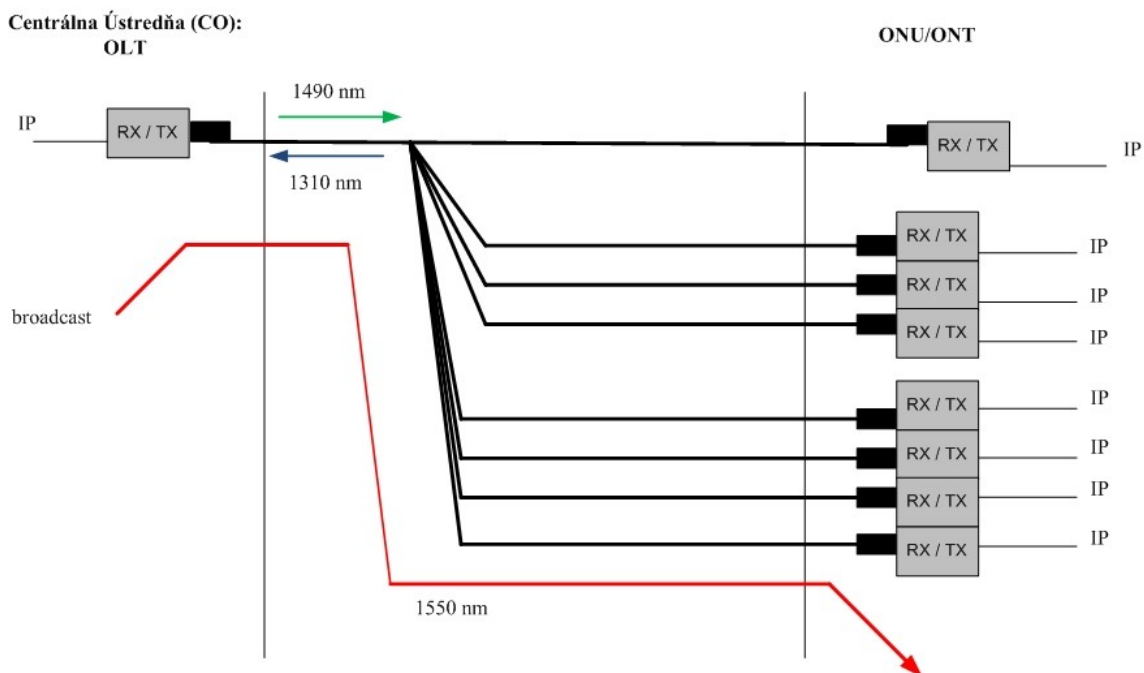
dosť vysoké, v mnohých prípadoch kôli skutočnosti, že je potrebné použiť na trase špeciálne vonkajšie vlákna a tiež aktívne zariadenia. Keď však vezmeme do úvahy N účastníkov v priemernej vzdialenosti L km od centrálnej stanice, tak systém FTTH P2P vyžaduje $2N+2$ vysielače a celkovú dĺžku vlákna $N*L$ (za predpokladu použitia jedného vlákna pre obojsmerný prenos), tak táto sieť v mnohých prípadoch predstavuje menšie náklady ako pri inštalácii pomocou UTP kábla. P2P je veľmi flexibilné riešenie pre prevádzkovateľa a tiež môže byť diaľkovo riadené, pretože zariadenie Ethernet switch v sieti je inteligentné. Avšak hlavnou nevýhodou u architektúr FTTB/N je potreba správy a údržby veľkého počtu aktívnych uzlov. V tomto ohľade FTTH systémy, ktoré sú založené na pasívnych sieťových prvkoch – pasívne optické siete PON – vedú k väčším úsporám prevádzkových nákladov ako staršie širokopásmové siete. [3]



Obr. 7: Topológia bod-bod - P2P

4.2.2. Topológia P2MP

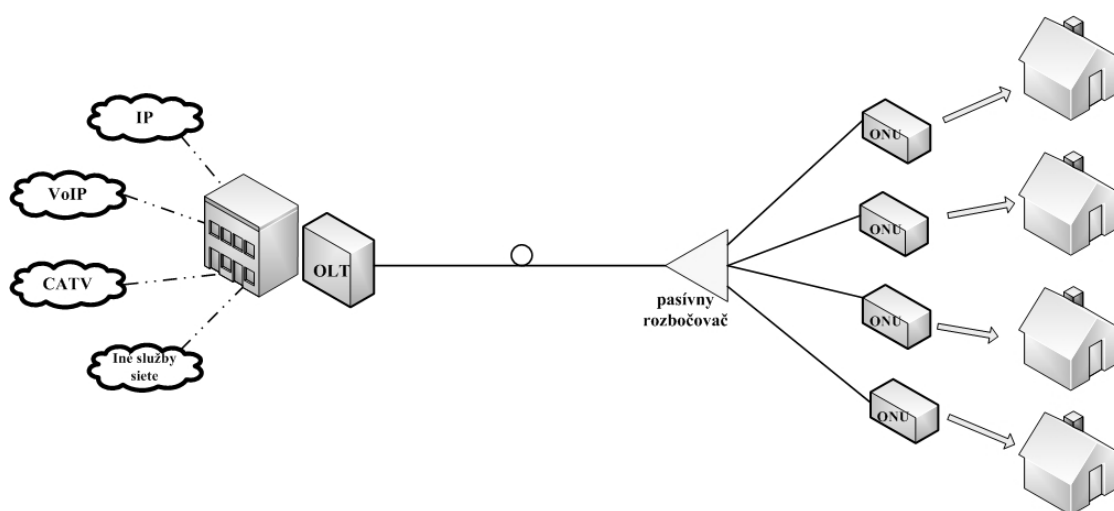
Druhým systémom je P2MP, ktorý používa PON so stromovou topológiou a pasívnymi optickými rozbočovačmi. PON siete majú niekoľko výhod oproti iným architektúram prístupových sietí. Stromová topológia ponúka jeden sieťový port prostredníctvom jedného vlákna pre väčšie množstvo užívateľov. Náklady infraštruktúry a sieťových prvkov na centrálnej stanici sa delia na všetkých užívateľov: napríklad v nasadení FTTH je počet vysielačov $N+1$, kým u P2P je potrebné $2N+2$. Tiež každý užívateľ môže pristupovať k celej šírke pásma, ktorú zdieľajú všetci užívatelia. To umožňuje kvalitnejšie služby pre dané množstvo dostupných zdrojov. Účastníci môžu byť od centrálnej stanice vo vzdialenosti do 20 km. Takže vo väčšine prípadov, PON je najvhodnejšie riešenie pre nasadenia FTTH. [3]



Obr. 8: Topológia bod-mnohobod – P2MP

5. Pasívna optická prístupová sieť (PON)

Ide o architektúru optickej siete, v ktorej sú využívané pasívne optické prvky. Pasívne optické prvky nepotrebujú k svojej prevádzke elektrickú energiu. Distribúcia signálu k účastníkovi je zabezpečená pasívnym rozbočovačom, ktorý pracuje tiež aj v opačnom smere, od účastníka k sieti. Rozbočovač neprevádza zosilňovanie ani iné úpravy, jeho úlohou je iba rozdeliť optický signál do požadovaného počtu čiastkových smerov. Každý účastníckej ukončujúcej jednotke ONU sa dostane kompletný multiplexovaný signál od linkového zakončenia OLT a z neho vyberie iba jej prislúchajúci kanál.



Obr. 9: Pasívna optická sieť

5.1. APON, BPON, GPON

APON/BPON a GPON sú štandardizované skupinou ITU-T Study Group 15 (SG15). APON a BPON sú odlišné názvy pre architektúru TDM-PON, založenú na štandarde ITU-T G.983. Kým názov BPON slúži svojmu marketingovému účelu, keď nesie názov „Broadband“, APON jasne hovorí že používa pre transport ATM rámce v ITU-T G.983 štandarde. Preto môžeme použiť APON ako jasný vzor jednej z tried PON sietí. GPON zastáva gigabitové PON a vzťahuje sa k štandardu ITU-T G.984. GPON je ďalšou generáciou PON sietí vyvinutou ITU-T po APON.

Veľa myšlienok vzťahujúcich sa k štandardu G.983 bolo prenesených do GPON štandardu G.984. Pôvodný štandard G.983.1 publikovaný v roku 1998 definoval prenosové rýchlosti 155,52 Mbit/s a 622,08 Mbit/s. Nová verzia štandardu publikovaná v roku 2005, pridala prenosovú rýchlosť 1 244,16 Mbit/s pre zostupný smer. APON predajcovia si môžu vybrať pre implementáciu symetrické alebo asymetrické, zostupné a vzostupné prenosové rýchlosti. Nasledujúca tabuľka (viď. Tab. 1) ukazuje možné kombinácie týchto rýchlostí pre systém APON.

Tab. 1: Možné kombinácie prenosových rýchlostí u APON

| | Zostupný smer (Mbit/s) | Vzostupný smer (Mbit/s) |
|----|------------------------|-------------------------|
| 1. | 155,52 | 155,52 |
| 2. | 622,08 | 155,52 |
| 3. | 622,08 | 622,08 |
| 4. | 1 244,16 | 155,52 |
| 5. | 1 244,16 | 622,08 |

Okrem jednovláknového riešenia duplexu vlnových dĺžok definovali oba štandardy, G.983.1 a G.984.1 dvojvláknové riešenie s vyhradenými vzostupnými a zostupnými prenosovými rýchlosťami. Všetky ITU PON štandardy obsahujú tri triedy optickej prenosovej vrstvy tvorenej s rôznymi útlmami ODN medzi ONU a OLT. Štandard ITU-T G.982 špecifikuje tri triedy:

- Trieda A: 5-20 dB
- Trieda B: 10-25 dB
- Trieda C: 15-30 dB

Z týchto tried bola pre praktickú implementáciu u systémov PON najvhodnejšia trieda B+ s útlmom 28 dB.

ITU-T G.983 bolo založené na technológii ATM. Bohužiaľ, ATM neprežil prichádzajúce očakávania univerzálneho sieťového protokolu pre pokrytie rôznych aplikácií.

Pre lepšie zvládnutie zmien v komunikačných technológiách a vyhoveniu rýchlo rastúcemu dopytu, ITU-T vytvorilo štandard G.984 pre PON s Gigabitovými schopnosťami, nazývaný GPON, ktorý na 2.vrstve prenáša GEM rámce.

ITU-T G.984.1 ponúka prehľad GPON komponentov a referenčných štruktúr. GPON PMD vrstva, alebo požiadavky vysielateľa sú obsiahnuté v štandarde ITU-T G.984.2. Prenosové rýchlosti definované v G.984 sú:

Tab. 2: Prenosové rýchlosti GPON

| Smer prenosu | Prenosová rýchlosť |
|--------------|---------------------------------|
| Zostupný | 1244,16 Mbit/s / 2488,32 Mbit/s |
| Vzostupný | 155,52 Mbit/s / 622,08 Mbit/s |
| | 1244,16 Mbit/s / 2488,32 Mbit/s |

Pričom pre symetrickú službu platia rýchlosti 1 244,16 Mbit/s / 2 488,32 Mbit/s a pre asymetrickú službu, zo siete k užívateľovi 1 244,16 Mbit/s / 2 488,32 Mbit/s a v opačnom smere 155,52 Mbit/s / 622,08 Mbit/s a 1 244,16 Mbit/s.

Keď rýchlosti pokročili do gigabitového režimu, PON optická vrstva sa stala zložitejšou. Na pokrytie dvadsať kilometrovej prenosovej vzdialenosti nemohli byť viac použité MLM lasery na ONU jednotku, aby sa predišlo rozptylovým chybám. Po druhé, na pokrytie stratových požiadaviek pre Triedu B (10-25 dB) a Triedu C (15-30 dB) optického vlákna, sú potrebné výbojné fotodiódy (APD) namiesto lacnejších PIN prijímačov. Bez vhodných ochranných obvodov sú APD citlivé na poškodenie spôsobujúce lavínový pád, ak vstupný optický výkon bude príliš vysoký. S rovnakou spotrebou vlákna ako u APON, sú u GPON pre podporu vysokých prenosových rýchlostí použité výkonnejšie vysielače, pre splnenie výkonových požiadaviek. GPON špecifikuje výkonnostne úrovňový (*power-leveling*) mechanizmus pre dynamickú kontrolu výkonu. V tomto mechanizme sa OLT zariadenie snaží vyvažovať výkon prijímaný z rôznych ONU jednotiek podľa inštrukcií ONU jednotiek na zvýšenie alebo zníženie vypúšťaného výkonu. V dôsledku toho, ONU jednotka ktorá je bližšie k OLT začína na menšom výkone, ako ONU ktorá je ďalej a zaznamenáva väčšie straty. Tento koncept *power-levelingu* alebo kontroly výkonu existuje už dlho v celulárnych sieťach na vysporiadanie sa s blízkym/vzdialeným (*next/fext*) presluchoвым efektom a šetrí energiu celulárneho zariadenia. [1]

5.2. EPON

EPON je nový prírastok Ethernetovej rodiny. Práce na EPON začali v Marci 2001 skupinou IEEE 802.3ah a skončili v júni 2004. Ethernet pokrýva fyzickú vrstvu a dátovú vrstvu OSI referenčného modelu. EPON je založená na štandarde Ethernet, na rozdiel od iných PON technológií, ktoré sú založené na ATM štandarde. To umožňuje ekonomicky využiť Ethernet a jednoduchú prevádzku, ľahko riadiť spojenie na Ethernetovo založenom IP zariadení, a to ako u zákazníka tak aj a v centrálnej ústredni.

IEEE 802.3ah EPON špecifikácia definuje MPCP (Multi-Point Control Protocol) a dve PMD 1 490/1 310 nm pre 10 a 20 km, potrebné na vybudovanie EPON systému. Typické EPON založené systémy môžu zahŕňať ďalšie funkcie nad štandardom IEEE 802.3ah, vrátane bezpečnosti, overovania a dynamického pridelovania šírky pásma.

EPON je zvyčajne nasadená ako stromová topológia a používa pasívne 1:N optické rozbočovače. EPON sieť zahŕňa OLT umiestnené v centrálnej ústredni a ONU jednotku, v blízkosti alebo u zákazníka, t.j. v sídle účastníka, v budove, alebo pri chodníku. EPON je konfigurovaná v plne duplexnom móde (žiadne CSMA/CD) v jednom vlákne P2MP topológií. Odberatelia, alebo ONU jednotky, vidia prevádzku len z hlavnej stanice a druhý odberateľ nevidí prevádzku prenášanú iným odberateľom. P2P komunikácia prebieha cez odovzdávaciu stanicu alebo OLT. EPON systémy používajú architektúru optického deliča, multiplexované signály s rôznymi vlnovými dĺžkami pre zostupný a vzostupný smer:

- 1 490 nm zostupný smer,
- 1 310 nm vzostupný smer.

Hoci je konfigurovaný ako P2MP, EPON môže byť nasadený na Ethernet prístupovej platforme s oboma možnosťami, P2P aj P2MP. Na riadenie P2MP optickej siete používa EPON MPCP. MPCP vykonáva priradenie šírky pásma, zisťovanie potreby šírky pásma, samovyhľadávanie (*autodiscovery*), a udáva rozsahy. Je implementovaný v MAC vrstve, pomocou neho sa zadávajú nové 64-bytové kontrolné správy:

- GATE a REPORT sú použité na priradenie a žiadosť šírky pásma,
- REGISTER je použitá na ovládanie samovyhľadávacieho procesu.

ONU vykonáva samovyhľadávací proces, ktorý zahŕňa udávanie rozsahov a pridelenie oboch LL (*Logical Link*) ID a šírky pásma. OLT generuje časovo značené správy použité ako globálny časový odkaz. OLT tiež priradí šírku pásma a vykonáva operácie udávania rozsahu. V EPON architektúre sa nevyskytujú kolízie a ani fragmentácia paketov. EPON je vhodný pre FTTH, FTTB a biznis aplikovanie, vrátane hlasových, dátových a video služieb. EPON je typ vláknovo založeného Ethernet prístupu, používajúceho pasívnu optickú 1:N infraštruktúru. EPON sieť je zdieľaná, podobná hybridnej vláknovo-koaxiálnej sieti, ale s lepšou šírkou pásma (1 Gbit/s). EPON systémy sú veľmi atraktívne riešenie prístupu z dôvodu výhodnej ceny a vlastností, vyplývajúce z ich podstaty ako celo-pasívne siete, tiež vďaka P2MP architektúre a pôvodnému Ethernet protokolu. [4]

5.3. WDM-PON

Väčšina nasadení FTTH v posledných rokoch bolo založených na štandardných technológiách ako sú GE-PON a GPON. Úspech týchto štandardov viedol k ich stálym inováciám, čo sa týka samotného systému ako aj komponentov. Tieto systémy sa však aj napriek tomu postupne stávajú nedostačujúcimi. Tu prichádza na radu štandard WDM-PON (*Wavelength Division Multiplexing PON*), ktorý ponúka nové kapacitné možnosti. Jeho aktuálnou nevýhodou je však cena, ktorá je relatívne vysoká v porovnaní s GE-PON a GPON technológiami.

WDM-PON je založená na technológii delenia vlnových dĺžok, keď každému účastníkovi je pridelená vlastná vlnová dĺžka. To je rozdiel oproti tradičným PON architektúram, kde je jeden optický zdroj zdieľaný medzi 32 alebo viac užívateľov, čo obmedzuje vysoké prenosové rýchlosti pre jednotlivých užívateľov. WDM-PON umožňuje efektívne využiť súčasné infraštruktúry, pričom každému užívateľovi umožňuje plné využitie dostupných 1 250 Mbit/s. Pravdaže, sú potrebné určité zmeny v sieti. Prvá vyžaduje nahradenie pasívneho 1:32 deliča pasívnym 1:32 kanálovým demultiplexerom, typický AWG (*Arrayed Waveguide Grating*). To umožní prenesenie 32 vlnových dĺžok po jednom vlákne a následné rozdelenie pre jednotlivých koncových užívateľov s vlastnou vlnovou dĺžkou.

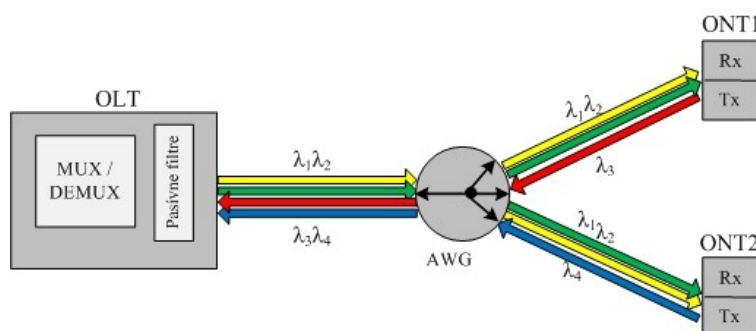
Výhodou WDM-PON je predovšetkým dostupná šírka pásma pre každého účastníka. Ďalšou výhodou je, že WDM-PON poskytuje lepšiu ochranu, pretože každý účastník prijíma iba svoju vlnovú dĺžku. Treťou je jednoduchšia MAC vrstva, pretože WDM-PON zaisťuje P2P spojenie medzi OLT a ONT a nevyžaduje P2MP ovládače prístupových médií, ktoré sú v iných PON

sieťach. Nakoniec, každá vlnová dĺžka je účinné P2P spojenie, umožňujúce používanie odlišnej prenosovej rýchlosti a protokolu pre jednotlivé spojenia, čo vytvára maximálnu flexibilitu.

Na druhej strane však stojí spomínaná cena, ktorá je hlavným problémom. Je vyžadované zložitejšie OLT, ktoré musí vysielať na 32 rôznych vlnových dĺžkach, na rozdiel od jednej zdieľanej u tradičných PON. Tiež sa vyžaduje u každého ONT drahý laditeľný laser, ktorý umožňuje naladiť konkrétnu vlnovú dĺžku pre daného užívateľa. To všetko je cenovo veľmi nákladné, hlavne v počiatočných nákladoch pre raný návrh WDM-PON. [6]

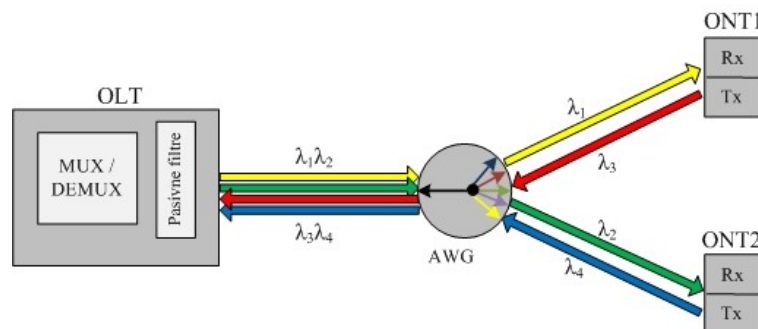
Na základe použitých prvkov a realizácií, môžeme rozdeliť WDM-PON na niekoľko typov:

Prvý variant je s použitím klasického rozbočovača, kde sú pridelené vlnové dĺžky pevne ku koncovým jednotkám. Signál prúdiaci zostupným smerom sa bude šíriť aj ku všetkým koncovým užívateľom. Jednotka ONT obsahuje filter, pevne nastavený, vydeľujúci svoju nosnú vlnovú dĺžku. Každá ONT bude mať svoju vysielačiu vlnovú dĺžku pre vzostupný smer, ktorou budú prúdiť odoslané dáta. ONT jednotky často majú jednu spoločnú vlnovú dĺžku pre vysielačie broadcastu. Čo sa týka topológie, ide o topológiu typu bod-bod. Tento variant má samozrejme niekoľko nevýhod. Je to napríklad nepružnosť siete, z dôvodu pevne pridelených vlnových dĺžok, čo spôsobuje aj nevyužitie prenosových kapacít technológie WDM-PON. Ďalej je tu nutnosť šifrovania, pre zabránenie možnosti odposluchu v zostupnom smere. Nevýhodou je aj nemožnosť behu dvoch jednotiek na rovnakej vlnovej dĺžke. [18]



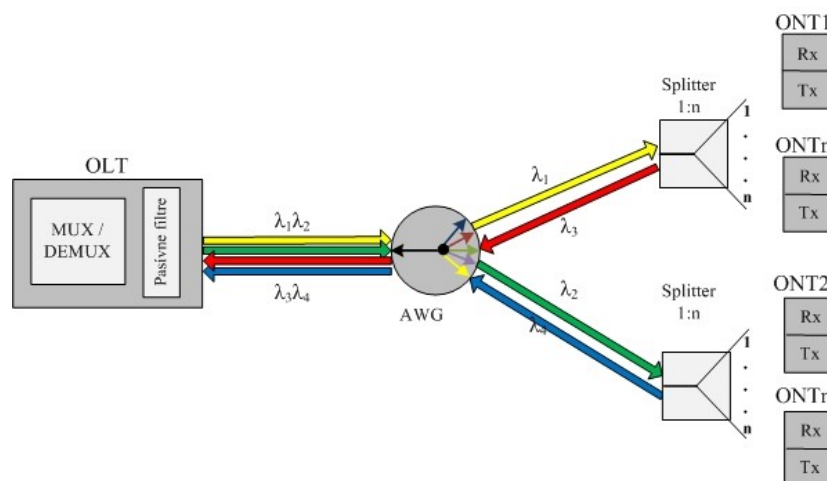
Obr. 10: Variant WDM-PON s použitím klasického pasívneho rozbočovača.

V druhom variante ide o použitie AWG smerovej odbočnice namiesto pôvodných bežných rozbočovačov. Pri vzostupnom smere nie sú žiadne zmeny. Rozdiel oproti predchádzajúcemu variantu je však v zostupnom smere, kde je signál vydeľovaný pomocou AWG na jednotlivé vlnové dĺžky, ktoré sa k ONT jednotkám šíria v oddelených kanáloch. Výhodou použitia AWG demultiplexeru je menší vložený útlm (okolo 5 dB) oproti bežnému rozbočovaču. Ďalšia výhoda je u ONT jednotiek, kde už nie je potreba filtrov, ktoré sú nahradené DFB lasermi, čo tiež znižuje celkový útlm. [18]



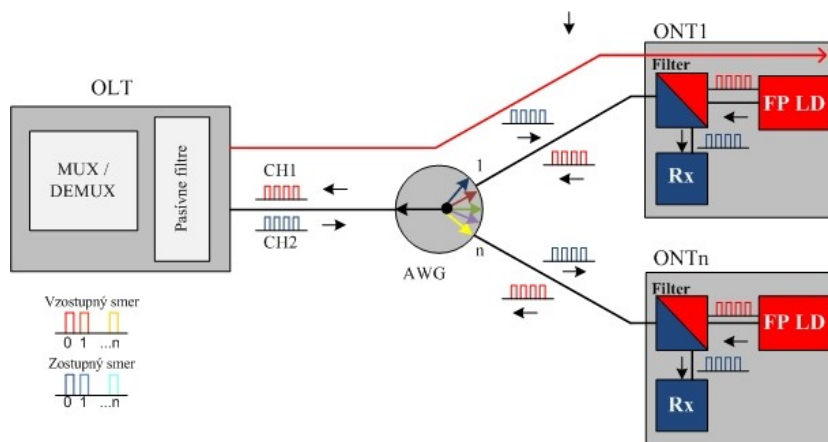
Obr. 11: Variant WDM-PON s použitím AWG smerovej odbočnice

Tretím variantom je WDM-PON založená na kombinácii AWG a klasických rozbočovačov. Týmto spojením je využívané zadeľovanie optických signálov na základe vlnových dĺžok (prevádzané v AWG) s časovým delením, čo umožňuje maximálne využitie prenosového pásma. Použitie voliteľných vlnových dĺžok a univerzálnych ONT jednotiek umožňuje pridelovanie kanálov k jednotkám na základe aktuálnej potreby a požiadaviek. Toto označujeme ako DWA (*Dynamic Wavelength Assignment*). [19]



Obr. 12: Variant WDM-PON s použitím kombinácie AWG smerovej odbočnice a klasického pasívneho rozbočovača.

Posledným variantom je aj WDM-PON založená na princípe AWG ako v predošlých variantoch, s rozdielom u ONT jednotiek. V ONT jednotkách je použitý FP laser opticky zavesený na stimulačnej vlnovej dĺžke prichádzajúcej od AWG. Prichádzajúci svetelný lúč prechádza filtrom, kde sa pre prichádzajúci smer oddelí signál a pokračuje ďalej do prijímacej časti ONT jednotky. Zvyšná časť svetelného lúča prechádza ďalej na FP (*Fabry Perot*) laser. Tu dochádza k zmene spektra, pôvodne tvoreného periodickými vlnami, na spektrum s úzkou spektrálnou čiarou, čo umožňuje využiť FP laser ako vysielateľ pre systém WDM-PON. [19]



Obr. 13: Variant WDM-PON založený na princípe AWG, s rozdielom v ONT jednotkách, kde je použitý FP laser.

5.3.1. WWDM

Jedna z technológií WDM, tzv. technológia „širokého“ vlnového multiplexu WWDM (*Wide Wavelength Division Multiplex*). WWDM patrí medzi staršie techniky, avšak aj dnes je ešte stále používaná z dôvodu nízkych nákladov. U tejto technológie sa najčastejšie používajú štyri vlnové dĺžky v oblasti okolo 1 310 nm a odstup medzi jednotlivými dĺžkami je do 20 nm. Najčastejšie býva táto technológia využívaná u prenosov Gigabit a 10Gigabit Ethernetu. [7]

5.3.2. DWDM

Technológia patriaca medzi najdokonalejšie systémy, ktoré sú v optoelektronike používané. Ide o technológiu tzv. „hustého“ vlnového multiplexu DWDM (*Dense Wavelength Division Multiplex*). Odstup medzi jednotlivými kanálmi je iba 0,8 nm, teoreticky až 0,1 nm, čo umožňuje prenášať v jednom optickom vlákne desiatky kanálov. Tieto kanály sú prenášané paralelne a nezávisle na sebe. Systémy DWDM umožňujú prevádzkovať až 96 kanálov na jednom fyzickom spoji pri prenosovej rýchlosti 2,5 až 10 Gbit/s.[7]

5.3.3. CWDM

Je to technológia ktorá vznikla ako lacnejší variant DWDM, čo je spôsobené používaním nie až tak presných a technologicky náročných prvkov ako u DWDM. Ide o technológiu tzv. „hrubého“ multiplexu CWDM (*Coarse Wavelength Division Multiplex*). Odstup jednotlivých kanálov vlnových dĺžok pre použitie CWDM technológie je definovaný štandardom ITU-T G-694.2 tak, aby bolo možné použiť laserové diódy ako zdroje žiarenia bez nutnosti chladenia. Odstup jednotlivých kanálov je 20 nm. Jednotlivé vlnové dĺžky sú u CWDM zvolené tak, aby boli kompatibilné s vlnovými dĺžkami 1 310 nm a 1 550 nm. CWDM si zatiaľ našlo uplatnenie v metropolitných sieťach, kde vďaka možnosti kombinovania sa s technológiou DWDM môže vytvárať topológie s veľkými možnosťami šírky pásma. V každom kanále CWDM je možný prenos

Gbit Ethernet do vzdialenosti až 80 km s prenosovou rýchlosťou 2,5 Gbit/s do vzdialenosti 50 km. [7]

5.4. Porovnanie vybraných typov PON

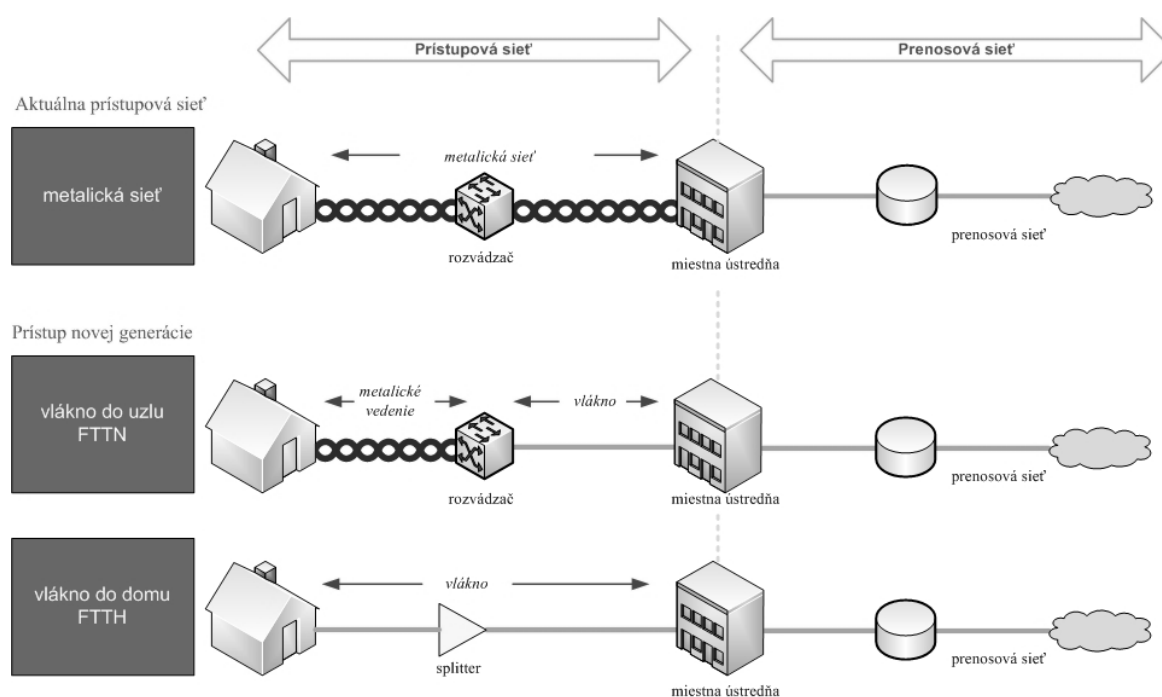
Pre porovnanie som si zvolil typy APON/BPON, GPON, EPON a 10GE-PON pasívnych optických sietí. V nižšie uvedenej tabuľke (viď. Tab.3) je porovnanie základných vlastností týchto typov.

Tab. 3: Porovnanie vybraných typov PON

| Typ PON | APON/BPON | GPON | EPON |
|-------------------------------------|--|--------------------------|--------------|
| Štandard | ITU-T G.983 | ITU-T G.984 | IEEE 802.3ah |
| Prenosová rýchlosť – zostupný smer | 155,52 resp. 622,08 Mbit/s | 1,244 resp. 2,488 Gbit/s | 1,25Gbit/s |
| Prenosová rýchlosť – vzostupný smer | 155,52 resp. 622,08 Mbit/s (sym. BPON) | 1,244 resp. 2,488 Gbit/s | 1,25Gbit/s |
| Vlnová dĺžka – zostupný smer | 1 480 – 1 500 nm | 1 480 – 1 500 nm | 1 490 nm |
| Vlnová dĺžka – vzostupný smer | 1 260 – 1 360 nm | 1 260 – 1 360 nm | 1 310 nm |
| Protokol 2. vrstvy | ATM | ATM, Gem | Ethernet |
| Maximálny počet užívateľov | 32 | 64 (predpoklad 128) | 32 |
| Logický/fyzický dosah siete | 20/20 km | 60/20 km | 20/20 km |

6. Siete novej generácie (Next-generation networks)

Prístupové siete novej generácie sú definované ako pevné prístupové siete, pozostávajúce úplne alebo čiastočne z optických prvkov, ktoré sú schopné prenášať služby širokopásmového prístupu s lepšou charakteristikou (napr. vyššia priepustnosť), v porovnaní so službami poskytovanými cez už existujúce metalické siete. Vo väčšine prípadov sú NGA (*Next Generation Access*) výsledkom vylepšenia už existujúcich metalických, alebo koaxiálnych prístupových sietí. Pri výstavbe NGA sietí môžeme rozlíšiť 2 najčastejšie scenáre: FTTH a FTTN. [8]



Obr. 14: Návrh implementácie NGA prístupových sietí

Exponenciálny rast internetovej prevádzky a širokopásmové aplikácie sú pohonom k prenikaniu vláknových sietí do segmentu prístupových sietí. Prognózy hovoria že medzi rokmi 2009 až 2014, globálna internetová komunikácia porastie 4-krát rýchlejšie so službami bohatými na video, ktoré budú v prevádzke najčastejšie využívané. Poistkou do budúcnosti na zabezpečenie požiadaviek na šírku pásma sú FTTx siete, ktoré boli rozmiestnené v rôznych častiach sveta. Model FTTx, najmä FTTH, FTTC a FTTB ponúka priame vláknové spojenie ku koncovému užívateľovi, alebo v jeho blízkosti. FTTx modely sú založené na jednej z dvoch topológií P2MP alebo P2P.

Väčšina FTTx modelov je založená na PON, pre ich efektívnosť a nízku spotrebu energie za bit. PON ktorá má fyzickú topológiu P2MP má mnoho výhod ktoré plynú z ODN založenej na pasívnom deliči. Jeho nevýhodou je obmedzenie využitia šírky pásma kôli rozdeľovaniu v ODN. Priradená šírka pásma a vlákno medzi CO a každým užívateľom v P2P topológií prekoná

toto obmedzenie, navyše poskytuje vlastnosti ako súkromie dát a ochranu. Hlavnou nevýhodou P2P je veľká spotreba vlákna a koncoviek v CO.

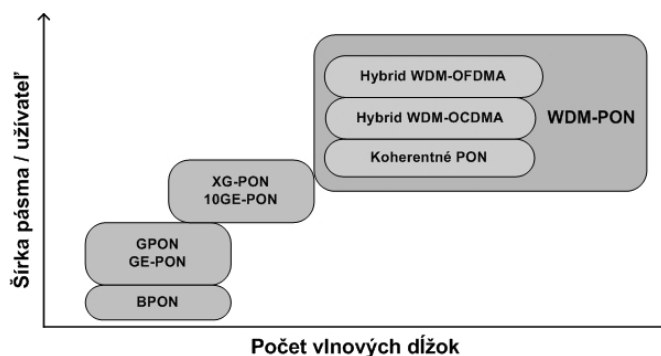
Kým pasívna ODN, založená na pasívnom deliči GPON a GE-PON siete, prináša so sebou mnoho výhod, tak prináša tiež aj nevýhody vo forme stratovosti na deliči, závisiacej na počte podporovaných účastníkov a tým je obmedzený prípadný nárast počtu užívateľov, dosah a tiež aj priemerná užívateľská dátová rýchlosť. Pre vysporiadanie sa s týmito problémami, boli definované oboma spoločnosťami, IEEE aj ITU-T, 10Gbit/s PON štandardy umožňujúce spätnú kompatibilitu a koexistenciu so súčasnou generáciou PON sietí, čo umožňuje vylepšenia s minimálnymi finančnými investíciami na ODN a minimálny prevádzkový dopad na existujúcich užívateľov.

Medzi požiadavky hlavných prevádzkovateľov pre NGA siete patria:

- súčasná podpora dedičstva,
- maximálne využitie existujúcich ODN,
- pružnosť zlepšovania a riadenia šírky pásma,
- schopnosť poskytovať väčšiu šírku pásma/kapacitu a deliaci pomer ako existujúce prístupové siete,
- optimalizované kombinácie technológií z hľadiska nákladov, výkonu a úspor energie,
- priame diagnostiky porúch s rýchlym obnovením služieb.

Nové prístupové technológie musia okrem 10 Gbit/s TDM/TDMA systémov byť navrhnuté tak, aby podporovali symetrické dátové rýchlosti cca 1 Gbit/s na užívateľa, rozšírený systém dosahu od 60 do 100 km, vysoký počet užívateľov až do 100 a heterogénne služby konvergencie, pri splnení nákladového obmedzenia pre prístup na trh.

Nové prístupové technológie, ktoré môžu potenciálne splňať vyššie uvedené kritéria možno rozdeliť na tie, ktoré rozvíjajú technológiu WDM a tie ktoré kombinujú WDM technológiu s vysokorýchlostnými technológiami prostredníctvom hybridného PON riešenia. V čistom WDM-PON je každému užívateľovi vyhradená kapacita prostredníctvom prenosu jedinečných vzostupných a zostupných vlnových dĺžok. V hybridnom WDM/TDMA-PON je kapacita na každej vlnovej dĺžke zdieľaná dynamicky pomocou TDMA medzi viacerých užívateľov. S ohľadom na zdieľanie vlnovej dĺžky viacerými užívateľmi súťažia viaceré prístupové technológie, ako OFDMA a OCDMA. Použitie pokročilých modulačných formátov a digitálnej koherentnej detekcie v kombinácii s niektorými vyššie uvedenými spomenutými hybridnými PON, môže ďalej zvýšiť kapacitu, dosah systému, užívateľskú hustotu a tiež zabezpečiť selektivitu vlnovej dĺžky, bez celkovej opravy ODN. Zobrazenie budúcich trendov ngPON sietí (vid'. Obr. 15), zdôrazňuje počet konkurenčných prístupových technológií ktoré sú komplementárne k WDM technológií. [10]



Obr. 15: Budúce trendy sietí novej generácie

6.1. 10G Pasívne Optické Siete

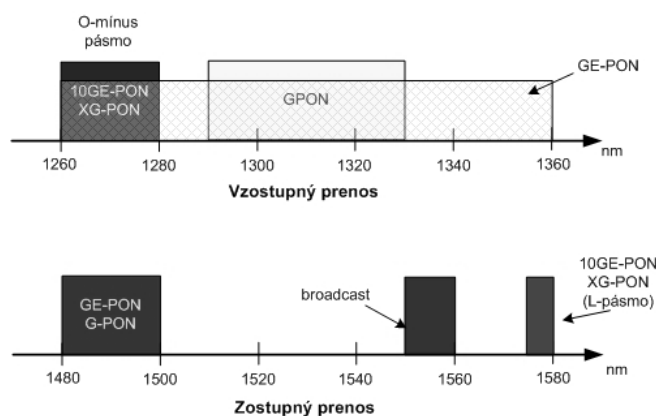
S ohľadom na podporu budúceho rastu šírky pásma cez existujúce ODN, IEEE a ITU-T s FSAN skupinou majú vymedzené svoje postoje pre 10 Gbit/s riešenia a to IEEE štandard 802.3av 10GE-PON a ITU-T XG-PON. Pre oba tieto štandardy, je zdieľanie vzostupnej kapacity koordinované pomocou TDMA. Úsilie v štandardizácii 10GE-PON bolo vykonané pomocou P802.3av Task Force, čoho výsledkom je IEEE štandard 802.3av 10GE-PON ktorý podporuje symetrické (10,3 Gbit/s zostupne a vzostupne) a asymetrické (10,3 Gbit/s zostupne a 1,25 Gbit/s vzostupne) rýchlosti operácií. Oblasti pokusov symetrického 10GE-PON boli hlásené predovšetkým u China Telecom a China Mobile.

Pre porovnanie, skupina FSAN študuje NGA riešenia s cieľom uľahčenia poskytovania veľkého deliaceho pomeru a rozšíreného dosahu. Pri riešení NGA1, ktorého hlavným cieľom je vyvinúť PON, ktorá je kompatibilná s funkčným GPON, ITU-T s FSAN definovali XG-PON1 ktorá podporuje asymetrický variant s rýchlosťami 10/2,5 Gbit/s. XG-PON1 systém je popísaný v ITU-T G.987 doporučení. Lepšie zabezpečenie prostredníctvom overovania riadiacich správ a minimalizovanie spotreby energie po vypnutí časti alebo všetkých ONU, sú kľúčové súčasti uvedené v špecifikácii XG-PON1. Stanovené metódy v minimalizácii spotreby energie ONU jednotiek zahŕňajú:

- vypnutie užívateľských rozhraní siete, ktoré nie sú aktívne používané,
- pracovanie v „doze“ móde čím je ONU vysielač vypnutý keď užívateľ nemá skutočné dáta na odoslanie,
- prevádzkovanie v „sleep“ móde čím sú oba vysielač aj prijímač vypnuté, keď je ONU jednotka nečinná.

Ďalej, ITU-T poskytuje ideu špecifikácie pre XG-PON2 so symetrickou kapacitou šírky pásma 10/10 Gbit/s. Oba štandardy boli testované XG-PON1 a XG-PON2 nad existujúcou GPON FiOS sieťou, demonštrovaním spolužitia s jeho komerčne nasadeným GPON systémom. Na vyrovnanie poklesu v optickej citlivosti 10 Gbit/s prijímačov, bola v oboch štandardoch uvedená FEC (*forward error correction*).

Nasledujúci obrázok (vid'. Obr. 16) znázorňuje vzostupné a zostupné pásma vlnovej dĺžky pre XG-PON, 10GE-PON, GPON, GE-PON a broadcast (RF video overlay). GPON a GE-PON používa 1 480-1 500 nm pre zostupný prenos a 1 550 – 1 560 nm pre broadcast. Pre vzostupný prenos, GPON používa 1 290 – 1 330 nm vlnového pásma vzhľadom k tomu, že GE-PON používa celé O pásmo. Za účelom spolužitia so staršími systémami a tými, ktoré sú implementované s broadcastom (RF video overlay), obe XG-PON a 10GE-PON špecifikujú O-mínus pásmo (1 260 – 1 280 nm) pre vzostupný prenos a L-pásmo (1 575 – 1 580 nm) pre zostupný prenos.



Obr. 16: Vzostupné a zostupné pásma pre XG-PON, 10GE-PON, GPON, GE-PON a broadcast

Pokiaľ ide o výkonnostný rozpočet siete (*link budget*), 10GE-PON špecifikuje 29 dB. Pre XG-PON, boli špecifikované dva. Prvý je 29 dB, dovoľujúci XG-PON spolužitie so štandardizovaným GPON a GE-PON systémami. Druhý je 31 dB, umožňujúci XG-PON spolužitie so super-štandardným 29,5 dB GPON systémom. [9]

6.2. Prístupové siete ďalekého dosahu – LR-PON

Pasívna optická sieť ďalekého dosahu LR-PON (*Long-reach Passive Optical Network*) umožňuje sieťovým operátorom a poskytovateľom služieb doručiť bohatú zmes konvenčných vysoko-širokopásmových prevádzok k obrovskému počtu koncových užívateľov a za nízku cenu. Konsolidácia metropolitných a prístupových sietí dosahuje s LR-PON sieťami zníženie počtu aktívnych sieťových rozhraní, prvkov v poli a minimalizuje sieťové plánovanie. To znižuje kapitálové výdavky CAPEX (*Capital Expenditure*) a prevádzkové výdavky OPEX (*Operational Expenditure*) integrovanej siete. LR-PON siete sú tiež vhodné pre zmiernenie vysokých nákladov na inštaláciu vo vidieckych a odľahlých oblastiach s nízkym počtom účastníkov. Tým že využíva optické zosilňovače v kombinácii s WDM, dosah systému môže byť rozšírený z konvenčných 20 km na 60-100 km pri zachovaní 1:32 alebo vyššom deliacom pomere. Vo WDM/TDMA PON ďalekého dosahu sú rôzne vlnové dĺžky multiplexované v CO a vysielané súčasne k miestnej ústredni (*local exchange*) kde WDM vlnové dĺžky sú opticky zosilnené a demultiplexované. Každý TDMA PON pripojenej k miestnej ústredni je priradený pár vzostupných a zostupných vlnových dĺžok ktorý sa potom delí medzi viacero užívateľov v rámci tejto PON. Vlnové dĺžky pridelené

každej TDMA PON môžu byť statické alebo dynamické. Myšlienka rozšírenia dosahu PON nie je nová, nakoľko bolo vykonaných veľa významných pokusov už v 90-tych rokoch. Avšak pokrok v optickom zosilňovaní a WDM technológie v posledných rokoch spolu s množstvom výroby optických komponentov ako SOA, AWG a WDM filtrov, ktoré znížili náklady na LR-PON siete do takej miery, že sú konkurencieschopné na trhu prístupových sietí. [9]

6.2.1. Technológie rozšírenia dosahu v LR-PON

ODN typickej LR-PON zahŕňa „*feeder*“ rozšíreného dosahu vlákna medzi CO a miestnou ústredňou, a tiež na spojení medzi miestnou ústredňou a užívateľmi. V niektorých LR-PON je umiestnený v miestnej ústredni na kompenzovanie strát výkonu spôsobených dlhou prenosovou vzdialenosťou a vysokým deliacim pomerom. Prehľad technológií „*feeder-ov*“ rozšíreného dosahu:

- optické zosilnenie (*optical amplification*), keď sú použité EDFA (*erbium doped fiber amplifier*), SOA alebo DRA (*Distributed Raman Amplification*) zosilňovače,
- siete založené na elektronickom opakovači (*electronic repeater-based networks*), sú siete, ktoré sú alternatívou k sieťam s optickým zosilnením, keď je u nich použitý elektronický opakovač v miestnej ústredni,
- čisto pasívne (*purely passive*) LR-PON, sú siete, v ktorých ide o použitie pokročilých modulačných formátov a/alebo digitálnej koherentnej detekcie, pre zachovanie pasivity, pretože ODN LR-PON sieť, ktorá využíva optické zosilnenie, alebo elektronickú regeneráciu, sa už nepovažuje za pasívnu, kôli použitiu napájacích zariadení na miestnej ústredni. [9]

6.2.2. Výzvy pre LR-PON

Jednou z hlavných výziev v TDMA PON ďalekého dosahu je dynamické pridelovanie vzostupného pásma, DBA (*dynamic bandwidth allocation*). Kým zostupné pásmo je zdieľané a vysielané pre všetkých užívateľov, vzostupná šírka pásma potrebuje byť účinne dotazovaná medzi ONU v závislosti na požiadavkách šírky pásma, úrovni služby a dostupnej kapacity. Konvenčné DBA algoritmy sú nevhodné pre LR-PON siete. Pri riešení tohto problému bol navrhnutý pre LR-PON siete systém mnohovláknového dotazovania (*multi-thread polling*). Použitím tohto systému môže byť zavedených viacero súbežných „*polling*“ procesov každou ONU a OLT.

Zásobovacie problémy vo WDM-PON sú tiež výzvou v sieťach rozšíreného dosahu a ešte viac v dôsledku vzrastajúceho počtu podporovaných ONU. VCSEL vysielače môžu byť vhodnými kandidátmi pre tieto siete, ale bez adekvátneho optického zosilnenia, bude dosah obmedzený z dôvodu nízkych optických vysielačích výkonov týchto zariadení. Použitie bezfarebných ONU založených na PSOA a „*injection-locked*“ FP-LD boli vhodným riešením pre účely rozšíreného dosahu.

Sieťová ochrana proti zlyhaniu či už vlákna, alebo zariadenia, sú významné úvahy v nasadení všetkých LR-PON, kôli vzrastajúcemu sieťovému dosahu a veľkému počtu podporovaných užívateľov. Ako popisuje ITU-G 984 štandard, môže byť implementovaná „*dual-paranted*“ GPON, pre poskytnutie ochrany proti vláknovému zlyhaniu a zlyhaniu zariadenia v CO. S „*dual-paranted*“ GPON v ktorých každá ONU je spojená s dvoma CO, môže byť ochrana komplexná, zaisťujúca:

- rýchly odklon prepravy na druhú hlavnú stanicu,
- zmena v routovaní rámcov a paketov cez jadro siete tak aby odrážali korešpondujúcu zmenu hlavnej stanice. [9]

6.3. Komplementárne prístupové technológie

Táto časť obsahuje mnoho alternatívnych prístupových technológií, ktoré neposkytujú iba zlepšenie zníženia tolerancie, kapacity a spektrálnej účinnosti, ale tiež možnosť znovu použitia existujúcej ODN. Ide hlavne o kombinácie s WDM ako hybridného PON riešenia. Tieto technológie sú predstavené na splnenie kapacitných požiadaviek vznikajúcich nových služieb a aplikácií. Pokračujúci pokrok vo fotonických integrovaných okruhoch a vysoko-rýchlostných digitálnych signálových procesoroch v kombinácii so vzrastajúcim počtom podporovaných užívateľov, môžu byť vysoké CAPEX v počiatočnom nasadzovaní týchto technológií potenciálne kompenzované nízkym OPEX na užívateľa. [9]

6.3.1. Koherentné WDM-PON

Koherentné WDM-PON je tiež kandidátskou technológiou pre NG-PON2. V koherentnej WDM-PON OLT a ONU vyberú vlnové dĺžky v závislosti na princípe koherentnej detekcie. To znamená že OLT a ONU začnú koherentný príjem iba ak miestne oscilované svetlo a svetlo signálu stretnú koherentné podmienky frekvencie, fázy a polarizácie. Týmto spôsobom, OLT a ONU môžu vybrať ich vlnové dĺžky dynamickým menením ich miestne oscilovaného svetla frekvencií. Okrem toho, koherentné WDM-PON používa pasívnu technológiu pre riešenie otázky „*power budgetu*“.

Koherentné WDM-PON priamo používa technológiu optického koherentného prenosu v optických prístupových sieťach. To uvádza obavy ohľadom kontroly ceny, čo je princíp tvorby všetkých prístupových technológií. Popritom, ONU jednotky v koherentnej WDM-PON sú viac zložité ako tie v iných NG-PON2 technológiách. Takáto technológia je prevažne len v stave výskumu a laboratórnych pokusov. Cena a komplexnosť patria k obavám uplatnenia v oblasti prístupovej siete. [10]

6.3.2. OFDMA, (O)CDMA PON

Okrem už spomínaných NG-PON2 technológií uvedených vyššie, niektorí predajcovia a výskumné inštitúcie navrhujú ďalšie technológie. K dispozícii sú: OFDMA (*Orthogonal Frequency Division Multiple Access*) PON, laditeľné hybridné PON a CDMA (*code division multiple access*) PON, resp. OCDMA (*optical code division multiple access*) PON. OFDMA PON implementuje ortogonálne frekvenčné delenie multiplexovanie v elektrickom spektre. Laditeľné hybridné PON prijíma laditeľné vysielače a prijímače vo svojich termináloch. (O)CDMA PON rozlišuje komunikačné väzby medzi OLT a ONT a implementuje multiplexovanie pomocou kódovania elektrickej domény (CDMA) alebo optickej domény (OCDMA) vo vzostupnom a zostupnom smere. Tieto technológie sú mimo hlavného prúdu vývoja, keďže sú tu značné prekážky v nákladoch spôsobené technickou zložitou a nezrelosťou. Väčšina z nich sú pod laboratórnym výskumom. PON priemysel nepredpokladá rýchlu revolúciu súvisiacu s oblasťou týchto technológií a preto je potrebný ďalší výskum. [10]

Tab. 4: Porovnanie štandardov sietí novej generácie (pozn.: * nešpecifikované parametre)

| Typ PON | WDM-PON | 10GE-PON | XG-PON1 | XG-PON2 |
|--|-------------------------|----------------------------|----------------|--------------|
| Štandard | ITU * | IEEE 802.3av | ITU-T G.987 | ITU-T G.987 |
| Prenosová rýchlosť – zostupný smer | 1.25 Gbit/s pre kanál | 10 Gbit/s | 9,953 Gbit/s | 9,953 Gbit/s |
| Prenosová rýchlosť – vzostupný smer | 1-10 Gbit/s pre kanál | 1 Gbit/s resp. 10Gbit/s | 2,488 Gbit/s | ~ 10 Gbit/s |
| Protokol 2. vrstvy | * | Ethernet | GEM | * |
| Deliaci pomer | 1:16/32/64 | 1:16/32/64 | 1:32/64/128 | * |
| Minimálny dosah | 80-100 km | 10/20 km | 20 km | * |
| Výkonnostný rozpočet (<i>power budget</i>) | 32 dB (bez zosilňovača) | 15/20/29 dB | 29/31/33/35 dB | * |

7. Praktické meranie

Táto časť tvorí tretí bod zadania bakalárskej práce. Ide o praktické dokázanie a získanie výsledkov pre štúdium implementácie WDM-PON na súčasnú prístupovú infraštruktúru. Meranie bolo prevádzané vďaka vybaveniu dostupnému v laboratóriách VŠB – TUO a katedre telekomunikácií (KAT440).

Hlavnou časťou je praktické meranie vykonávané na základe dvoch testovacích doporučení, RFC2544 (*Request for Comment*) a ITU-T Y.156sam (EtherSAM). Vďaka týmto testom zisťujem vlastnosti WDM-PON. Okrem týchto testov tu patrí tiež základné nastavenie a konfigurácia OLT zariadení, či už ide o WDM-PON LG-Ericsson EAST 1100 Release3, alebo tiež GEPON Allied Telesis model iMAP 9102.

7.1. Súbor testov

Cieľom merania je demonštrovať správanie sa siete založenej na WDM-PON. Ako prvé bolo prevádzané meranie na samotnej WDM-PON sieti menších rozmerov. Druhé zapojenie bolo taktiež na základe siete WDM-PON, pričom na túto technológiu bola napojená sieť GEPON, ktoré takto predstavujú implementáciu WDM-PON siete na súčasnú infraštruktúru. V mojom prípade je aktuálna infraštruktúra tvorená GEPON architektúrou.

Pre zisťovanie vlastností siete boli použité dva súčasne používané štandardy RFC2544 a ITU-T Y.156sam (EtherSAM). Druhý spomínaný štandard už postupne nahrádza štandard RFC2544, pretože je komplexnejší, presnejší a tiež rýchlejší.

7.1.1. RFC2544

Je starším z dvojice použitých štandardov. Bol vyvinutý pre poskytnutie výkonnostnej metriky pre Ethernetové siete. Obsahuje štyri testy pre Ethernet:

Priepustnosť (*Throughput*) – definuje maximálny počet rámcov za sekundu ktoré možno prenášať bez chyby.

Zaťažiteľnosť (*Back-to-back*) – hodnotí schopnosť vyrovnávacej pamäti prepínača. Meria sa maximálny počet rámcov prijatých plnou rýchlosťou pred stratou rámcov. U prevádzkovateľa Ethernetových sietí je toto meranie veľmi užitočné, lebo potvrdzuje EIR ako je definované v mnohých SLA.

Stratovosť (*Frame Loss*) – tento test meria reakciu siete v preťažených podmienkach, je teda kritickým indikátorom sieťového prenosu na podporu realtime aplikácií v ktorých veľké množstvo stratených rámcov výrazne znižuje kvalitu služby. Keďže u týchto služieb nie je retransmisia, tieto

služby sa môžu rýchlo stať nepoužiteľné ak rámcová strata nie je kontrolovaná. Stratovosť vypočítame pomocou vzťahu:

$$\text{stratovosť} = \frac{(\text{počet zaslaných rámcov} - \text{počet prijatých rámcov})}{\text{počet zaslaných rámcov}} \times 100 [\%] \quad (1)$$

Oneskorenie (*Latency*) – test meria čas potrebný pre rámec aby prešiel z pôvodného zariadenia cez sieť do cieľového zariadenia (známe ako *end-to-end* testovanie). Keď čas latencie kolíše od rámca k rámcu, spôsobuje to problémy s realtime službami.

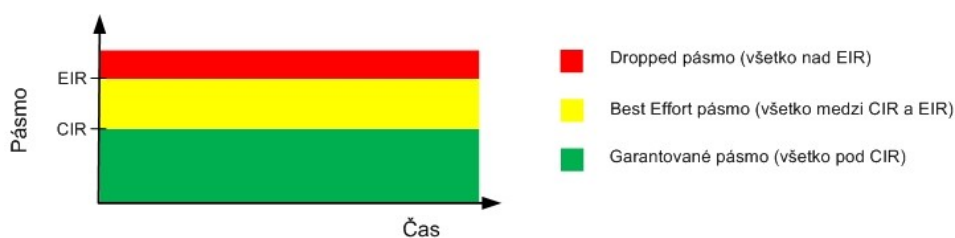
Tento štandard dovoľuje testovať na niekoľkých veľkostiach rámcov. Testy sú robené sekvenčne a dĺžka testu sa nedá ovplyvniť. RFC2544 však neobsahuje meranie kolísania oneskorenia (*jitter*), čo je jeden z kľúčových parametrov pre Mobile Backhaul a Triple Play. [11]

7.1.2. ITU-T Y.156sam (EtherSAM)

EtherSAM je štandardná testovacia metóda ktorá umožňuje kompletnú validáciu Ethernet SLA (*Service Level Agreements*) v jednom, výrazne rýchlejšom teste a s vyššou úrovňou presnosti.

Zákaznícka prevádzka je rozdelená do troch prevádzkových tried a každej je priradená určitá farba: zelená pre dohodnutú prevádzku, žltá pre nadmernú prevádzku a červená pre vyradenú prevádzku.

- CIR (*Committed Information Rate*): Priemerná rýchlosť v bit/s do ktorej sieť prenáša rámce a vyhovuje výkonnostným kritériám definovaných v CoS servisných atribútoch,
- EIR (*Excess Information Rate*): Priemerná rýchlosť v bit/s do ktorej sieť môže prenášať rámce, avšak nemusí vyhovovať výkonnostným kritériám,
- Vyradená prevádzka (*Discarded Traffic*): prevádzka, ktorá je nad CIR alebo CIR/EIR rýchlosťami a nemôže byť odovzdaná bez prerušenia ďalších služieb, červená prevádzka je tým pádom zrušená. [12] [13]



Obr. 17: Pásmo EtherSAM

KPI (*Key Performance Indicators*) sú špecifické charakteristiky prevádzky ktoré označujú minimálny výkon konkrétneho prevádzkového profilu. Pod zelenými prevádzkovými podmienkami musí sieť garantovať, že tieto minimálne výkonnostné požiadavky sú splnené pre celú doprednú prevádzku. Typické KPI zahŕňajú:

- šírka pásma (*Bandwidth*) – šírka pásma sa vzťahuje na maximálne množstvo dát, ktoré môžu byť doručované. Toto meranie je pomer celkového objemu prenesených dát prenášaných pri meraní okna na jednu sekundu,
- rámcové oneskorenie (*Frame delay*) – rámcové oneskorenie alebo latencia je meranie časového oneskorenia medzi vysielaním paketu a jeho prijatím. Toto meranie je rozhodujúce pre hlasové aplikácie, kde príliš veľa latencie môže ovplyvniť kvalitu hovoru vedúcu k vnímaniu ozvien, nesúvislej konverzácií a dokonca pádu hovoru,
- stratovosť (*Frame loss*) – stratovosť, resp. strata rámca môže nastať z mnohých dôvodov, ako sú prenosové chyby alebo preťaženie siete. Chyby zavinené fyzikálnym javom sa môžu stať počas prenosu rámca, čoho výsledkom je, že rámec je znehodnotený sieťovým zariadením ako switch alebo router. Preťaženie siete tiež spôsobuje znehodnotenie rámcov, keď sieťové zariadenie musí zahodiť rámec aby nedošlo k presýteniu linku v preťažených podmienkach,
- kolísanie oneskorenia (*Packet Jitter*) – odkazuje k premenlivosti v časoch príchodu medzi doručenými paketmi. Ako pakety putujú sieťou, sú často usporiadané do fronty a posielané v burstoch na ďalšie smerovanie. Náhodná prioritnosť môže viesť k tomu, že výslednosť v prenose paketov na náhodných prenosových rýchlostiach. Pakety sú tým pádom prijímané v nepravidelných intervaloch. Toto kolísanie sa prajejavuje v zmätku na prijímacom buffery na konci uzla, kde buffery môžu byť nadmerne alebo nedostatočne využívané v prípade veľkých výkyvov kolísania. [13]

7.2. Popis pracoviska a použité prístroje

Základom je rack na budove N, v učebni N311, kde boli prevádzané všetky testy a merania obsiahnuté v tejto práci. Rack je prepojený s jednotlivými pracoviskami v tejto učebni cez dve optické vlákna typu G.652 D a dve optickými vláknami typu G.657.B3. Dvojice vláken sú zakončené na pracoviskách v paneli zásuviek pre rovný (PC) a šikmý (APC) konektor typu SC. Okrem týchto zakončení sú na pracoviská privedené tiež UTP krútené páry..

Samotný rack obsahuje pasívne prvky distribučnej siete a aktívne prvky, ktorými sú OLT pre PON siete. Pre meranie sú z neho použité prvky ako WDM-PON LG-Ericsson EAST 1100 Release3, GEAPON Allied Telesis model iMAP 9102, de/multiplexer AWG Nortel a napájacie zdroje.

WDM-PON LG-Ericsson EAST 1100

LG-Ericsson EAST 1100 (Ethernet Access Service Terminal) je hlavná stanica určená pre inštaláciu do hlavných rozvodní. Zariadenie je prevedené ako modulárne, čím poskytuje možnosť rozšírenia kapacity aj pri nízkych nákladoch. Je vhodné pre služby, ktoré sú dnes už pravidelne využívané, ako napríklad IPTV, VoD, vysokorýchlostný internet a VoIP. Dátová komunikácia ku každému koncovému zariadeniu dosahuje rýchlosť až 1Gbps. Integrované prvky

zahŕňajú dva L2/L3 switche, 8x porty pre karty obsluhy koncových zariadení a diagnostickú kartu systému dohľadu. [14]



Obr. 18: WDM-PON LG-Ericsson EAST1100

GE-PON Allied Telesis iMAP 9102

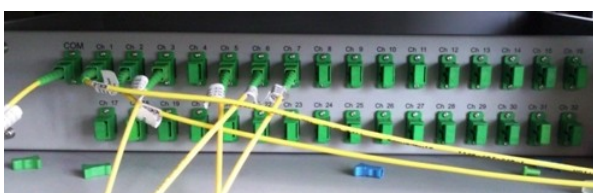
Model je členom Allied Telesis iMAP rodiny na báze IP integrovaných mnohoslužobne prístupových platforiem. Je to najmenšia Ethernet a IP prístupová platforma pre poskytovateľov služieb nasadzujúcich IP hlasové, video a dátové služby. Predný panel sa skladá z CFC12 karty, ktorá obsahuje porty Console a OAM – pre prepojenie k PC, GE2RJ – pre FastEthernet, GE4 - pre pripojenie pomocou vlákna a SFP modulov. Ďalej je tu karta FX 20 BX pre pripojenie optických konektorov typu LC. Poslednou je karta EPON2, ktorá poskytuje prevádzku PON siete, pomocou pripojenia cez SFP moduly. [15]



Obr. 19: GE-PON Allied Telesis iMAP 9102

LG-Nortel WPF 1132c

WPF (*Wavelength Passive Filter*) 1132c je určený pre multiplexovanie a demultiplexovanie optického signálu na trase medzi hlavnou stanicou a koncovým užívateľom. Filter je schopný odfiltrovať jednotlivé vlnové dĺžky na príslušné výstupy a vzájomne tieto linky od seba izolovať. Zariadenie má schopnosť filtrácie vlnových dĺžok až pre 32 koncových staníc. Je pasívne a nevyžaduje žiadne dodatočné napájanie. [14]



Obr. 20: AWG filter

LG-Nortel EARU 1112

LG-Ericsson EARU (*Ethernet Access Residential Unit*) 1112 použité ako koncová jednotka ONT. Patrí do kategórie malých koncových zariadení. Zariadenie poskytuje podporu štandardných dátových služieb, podporuje funkcie QoS. Umožňuje pripojenie pomocou rozhrania PON a štyri porty pre Ethernet. [14]



Obr. 21: ONT jednotky pre WDM-PON (vľavo aktivovaná, vpravo deaktivovaná)

Allied Telesis AT-ON1000 – GE-PON

AT-ON1000 GE-PON ONU od Allied Telesis je kompaktné optické účastnícke zariadenie pre GE-PON siete s možnosťou prenosovej rýchlosti do 1Gbit/s. Je určené predovšetkým pre vysokorýchlostné dátové, hlasové a video služby. Zariadenie je tiež vybavené platformami iMAP (intelligent Multiservice Access Platform) aj iMG (intelligent Multiservice Gateway). [14]



Obr. 22: ONU jednotka pre GE-PON

Okrem zariadení v racku a koncových jednotiek bol k testovaniu potrebný tiež analyzátor EXFO FTB-1/FTB-860 a ako loopback jednotka bol použitý prístroj EXFO AXS-200/850.

EXFO FTB-1/FTB-860 NetBlazer

EXFO FTB-1/FTB-860 NetBlazer je kompaktné výkonné testovacie zariadenie určené pre komplexnú verifikáciu 10Mbit/s až 10Gbit/s Ethernet sietí a pokročilé testovanie Triple Play služieb. Vďaka kompaktným rozmerom a nízkej hmotnosti poskytuje vysoký užívateľský komfort. Dostatočný výkon zabezpečuje procesor Intel ATOM s frekvenciou 1GHz spolu a pamäť 8GB (16G), čím je umožnené aj spustenie niekoľkých súbežných aplikácií. Modul FTB-860 NetBlazer ponúka testovanie výkonnosti Ethernetu prostredníctvom combo portov (10/100/1 000 Base-Tx; 100/1 000Base-Fx) a voliteľne 10 Gbit/s SFP+ portu. FTB-1 má tiež implementované testovacie

nástroje podľa nového štandardu ITU-T Y.156.sam (EtherSAM) spolu s komplexnou analýzou Triple Play služieb. [14]



Obr. 23: EXFO FTB-1/FTB-860 NetBlazer

EXFO AXS-200-850

Ethernet analyzátor EXFO AXS-850 je merací vhodný najmä k overovaniu kvality služieb (QoS) v prístupových a metropolitných sieťach založených na protokole Ethernet. Poskytuje všetky nástroje, potrebné k rýchlemu a efektívnemu prevedeniu testov. Obsahuje dva porty, jeden 10/100/1 000 Base-T Ethernet metalický port a ďalším je Gigabit Ethernet optický port. Umožňuje vykonávať testovanie výkonnosti a priepustnosti podľa RFC2544, testy BERT, funkcia Smart Loopback a ďalšie. [14]



Obr. 24: EXFO AXS-200/850

7.3. Konfigurácia zariadení

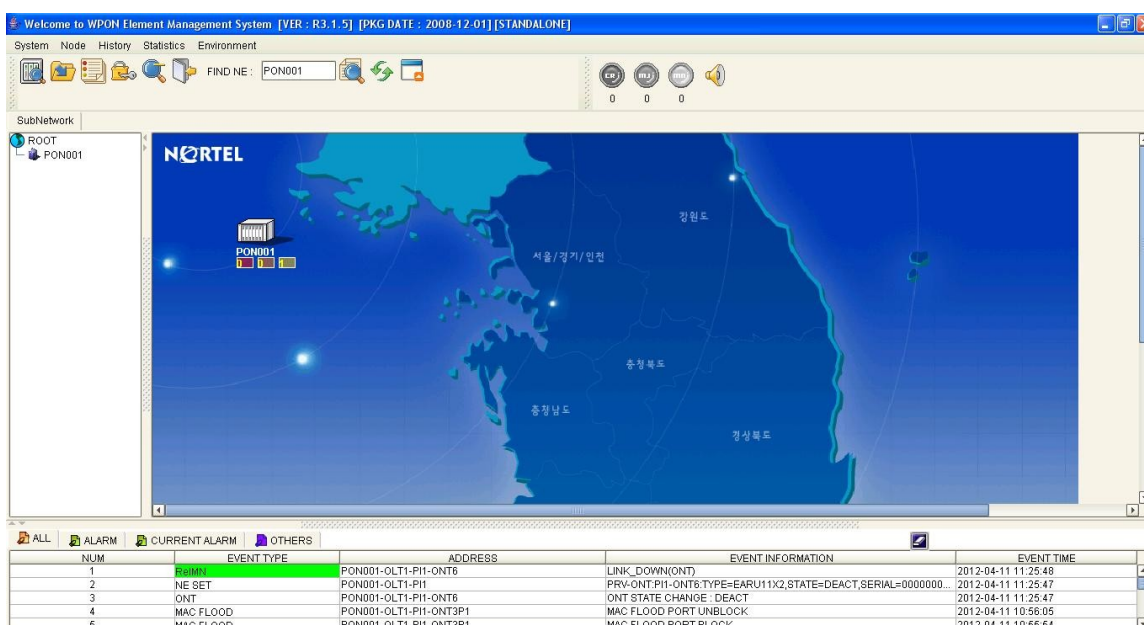
Konfigurácia zariadenia WDM-PON LG-Ericsson EAST 1100 je možná dvoma spôsobmi, buď cez grafické rozhranie, alebo cez príkazový riadok. V mojom prípade som použil variant s grafickým rozhraním, ktoré je pohodlnejšie a umožňuje nastavenie všetkých funkcií OLT zariadenia. Softvér EA Manager som si nainštaloval z príslušného CD. Pre úspešné prepojenie je ďalej potrebné nastaviť IP adresu notebooku tak, aby EMS (*Element Management System*) port a notebook boli v rovnakej sieti. Port EMS má adresu 192.168.142.100, je zbytočné ju meniť, teda na notebooku

nastavíme adresu z rovnakej siete. Po nastavení adresy môžeme spustiť softvér EA Manager v móde StandAlone.



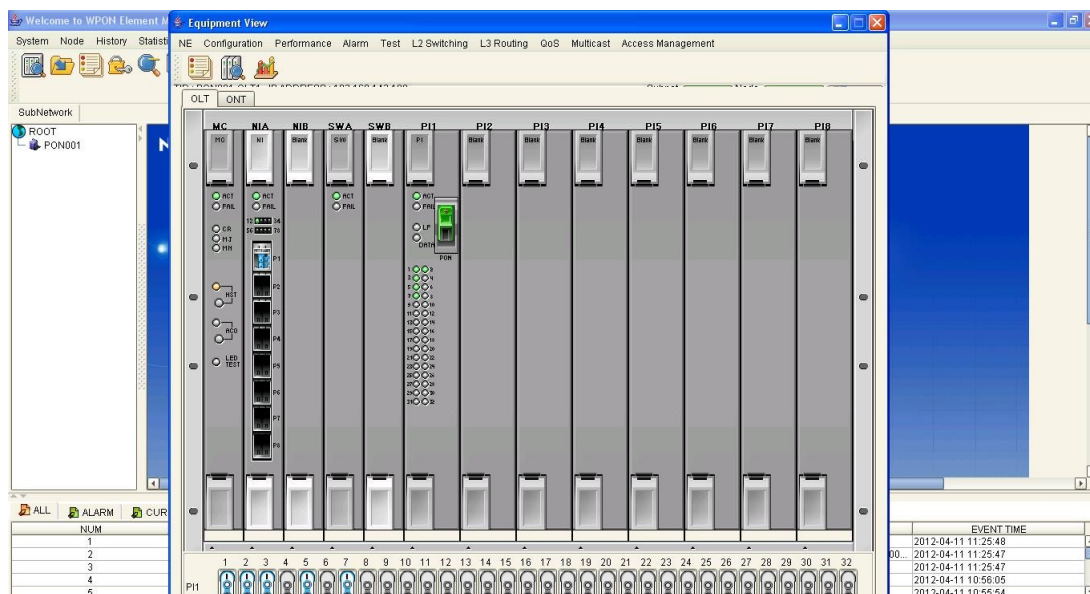
Obr. 25: Prihlasovacie okno

Po spustení náš softvér vyzve k zadaniu *SERVER IP*, čo je adresa našej sieťovej karty, tiež musíme vyplniť *USER ID* – *admin* a *PASSWORD* – *admin* (viď. Obr. 25), tieto údaje sú uvedené v manuály. Po úspešnom vyplnení týchto údajov a úspešnom nalogovaní sa nám objaví úvodné okno EA Managera (viď. Obr. 26).



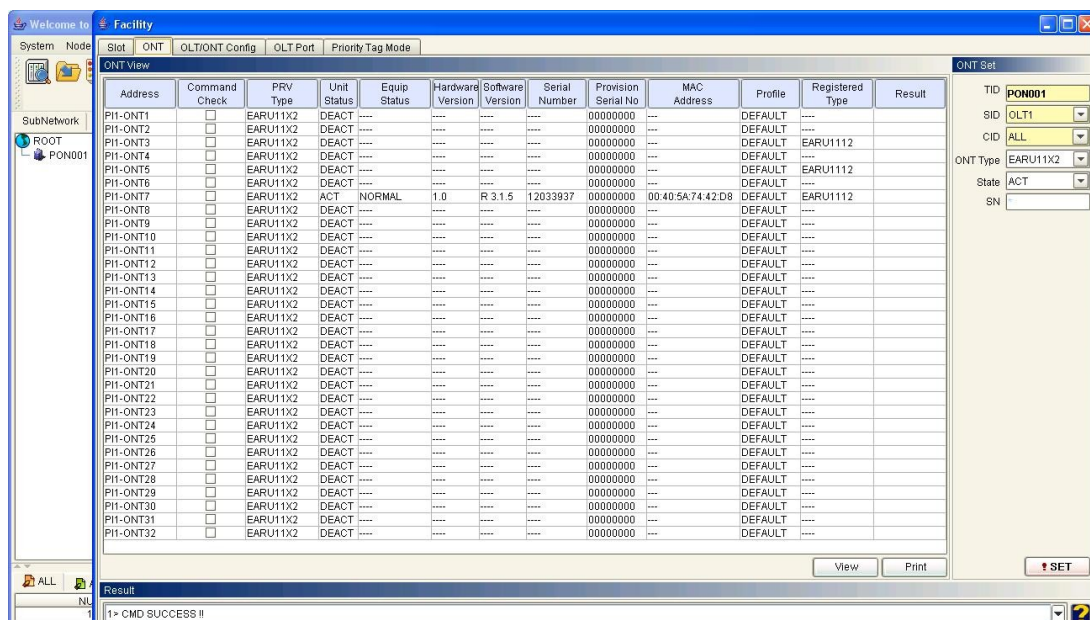
Obr. 26: Úvodné okno EA Managera – rozhrania pre konfiguráciu OLT WDM-PON

Po pridaní nášho zariadenia a následnej synchronizácii môžeme konfigurovať potrebné nastavenia. Kliknutím na ikonu PON001 sa nám zobrazí okno so zásuvnými kartami (viď. Obr. 27).



Obr. 27: Okno EA Managera „Equipment View“, so zobrazeným hlavným panelom OLT WDM-PON

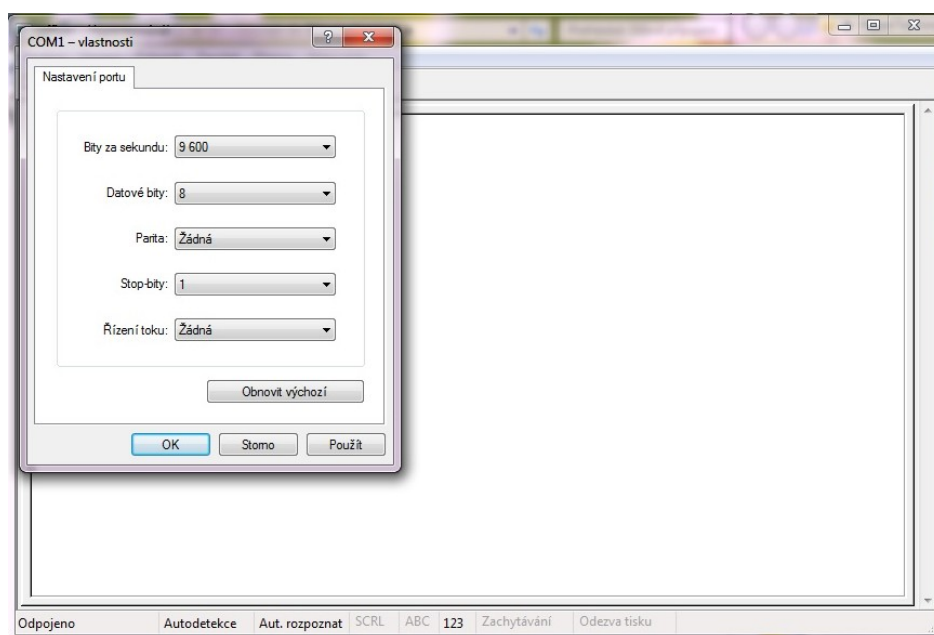
Kliknutím na *Configuration* → *Facility* → *ONT*, som si aktivoval potrebnú ONT jednotku podľa potreby (vid'. Obr. 28). K tejto ONT jednotke som pomocou UTP kábla pripojil FTB-1/FTB-860.



Obr. 28: Okno EA Managera „Facility“, so záložkou ONT, pre aktiváciu, resp. deaktiváciu ONT jednotiek

Ďalej v tom istom okne – *Facility*, som v záložke *OLT Port* aktivoval na *NI A* karte port *P1*, ktorý som použil na pripojenie loopback jednotky AXS-200/850.

Potrebnú konfiguráciu zariadenia GE-PON Allied Telesis model iMAP 9102 som prevádzal na PC v učebni. Pre prístup do OLT som použil príslušnú aplikáciu Hyperterminál. PC a OLT bolo prepojené pomocou kábla, ktorý bol na strane OLT pripojený pomocou konektoru RJ-45 a na strane PC konektorom RS-232. Po spustení aplikácie som nastavil požadované nastavenia portu (vid'. Obr.29).



Obr. 29: Úvodné okno Hyperterminálu, s nastavením pre pripojenie ku GEAPON.

Pre úplný prístup na OLT cez Hyperterminál bolo ešte potrebné zadať *Username* – *officer* a *Password* – *officer* (podľa dokumentácie). Tým úspešne vzniklo spojenie a overenie užívateľa (vid'. Obr.30).



Obr. 30: Hyperterminál po úspešnom spojení s OLT.

Keďže na zariadení GEAPON sa pracovalo už predtým, bolo už nakonfigurované, postačovalo zaregistrovať ONU jednotku. Po zobrazení potrebných výpisov, som zistil napr. stav kariet zariadenia – *show card* (vid'. Obr. 31), informácie o rozhraní – *show interface*, resp. *show interface <číslo rozhrania>* pre podrobné informácie o danom rozhraní.

```

officer SEC>> show card
--- Card Information ---
Slot   Prov      Card Type State           Faults
-----
0      ADSL24B  UP-UP-Online  -
1      FX20     UP-UP-Online  -
2      EPON2    UP-UP-Online  -
3      CFC12    UP-UP-Online (Active) -
4      GE2RJ    UP-UP-Online  -
5      GE4      UP-UP-Online  -
FAN    PEM71    UP-UP-Online  -

```

Obr. 31: Príkaz *show card*

Následne som si zaregistroval ONU jednotku príkazom - *create onu <meno ONU jednotky> onuid=<číslo ONU jednotky v rozsahu 0-31> interface=<dané EPON rozhranie> mac=<MAC adresa ONU jednotky> type=<typ jednotky – nevyplnené, nepotrebuje>*. Po správnom postupe a opätovnom zobrazení *show interface <onuid>* musí byť *State* hodnota našej ONU jednotky *UP-UP*.

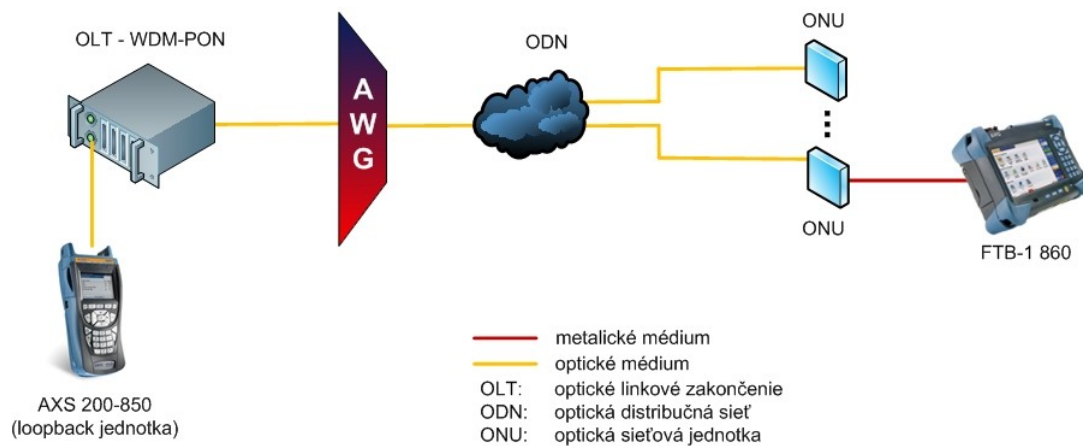
Po konfigurácii OLT zariadení som mohol postupne zostaviť topológiu č.1 (viď. Obr. 32) pre testovanie WDM-PON a topológiu č.2 (viď. Obr. 33) pre testovanie WDM-PON/GE-PON.

Pre samotné testovanie bolo však potrebné nastavenie sofistikovaných zariadení EXFO. Bolo potrebné aby boli v rovnakej sieti a aby medzi sebou komunikovali. Pri testovaní siete WDM-PON som na oboch zariadeniach nastavil adresu zo siete WDM-PON OLT zariadenia. Pre FTB-1/FTB-860 to bola adresa 192.168.142.9 a pre AXS-200/850 adresa 192.168.142.10. Na zariadení FTB-1 som pomocou možnosti *Discover Remote* našiel vzdialené zariadenie a nastavil ho na hodnotu *Looped Up*. Na AXS-200/850 bola nastavená funkcia *Smart Loopback*. Pri testovaní siete WDM-PON/GE-PON som nastavil adresy zo siete GE-PON, pri tomto nastavení zariadenia komunikovali. U FTB-1/FTB-860 to bola adresa 192.168.2.9 a u AXS-200/850 adresa 192.168.2.8. Maska podsiete bola vždy 255.255.255.0.

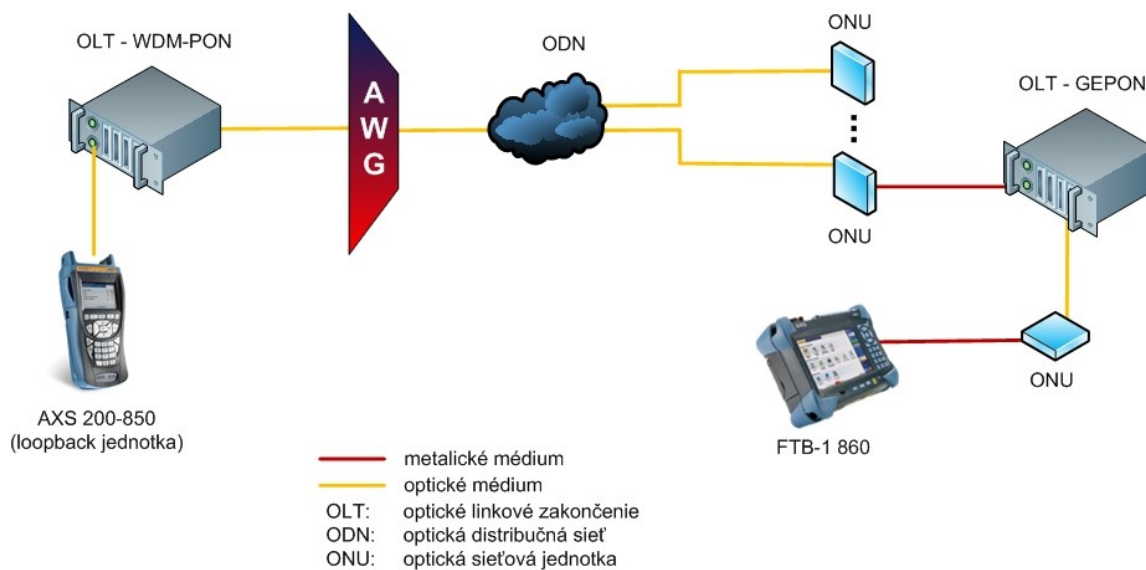
Ako je vidno na topológiach nižšie, všetky prvky boli medzi sebou prepojené. Loopback jednotka AXS-200/850 bola prepojená opticky pomocou duplexného patchordu LC/LC cez SFP moduly. Analyzátor FTB-1/FTB-860 bol prostredníctvom UTP kábla prepojený s ONU jednotkou. Z FTB-1/FTB-860 boli vysielané dátové (video, hlas, dáta) streamy cez ONU jednotku, ODN sieť až do OLT, odkiaľ boli zasielané späť na analyzátor vďaka loopback jednotke.

U topológii WDM-PON/GE-PON bolo za ONU jednotku WDM-PON siete pripojené pomocou UTP kábla OLT zariadenie GE-PON, na ktoré bola ďalej napojená optickým vláknom ONU jednotka pre GE-PON sieť a na ňu opäť UTP káblom analyzátor FTB-1/FTB-860. Zvyšné prvky boli prepojené obdobne ako v predchádzajúcom prípade.

7.4. Použité topológie



Obr. 32: Topológia č.1 - topológia experimentálneho pracoviska pre testovanie na samotnej WDM-PON

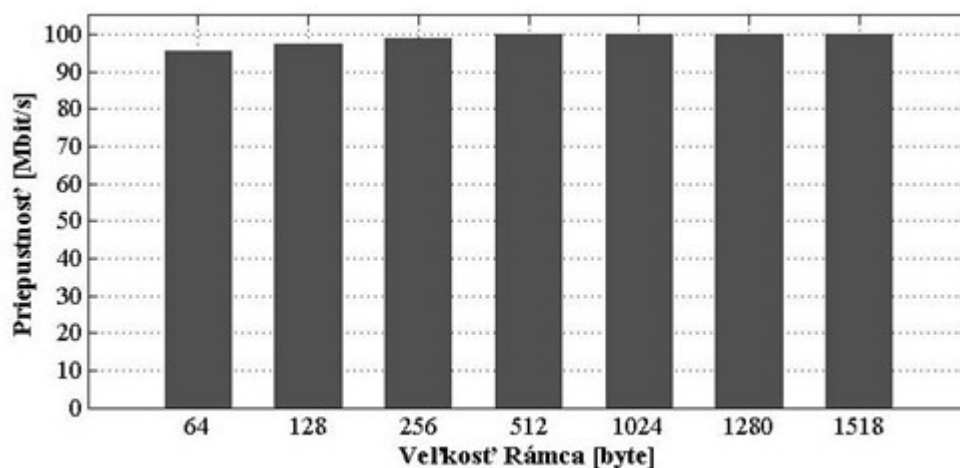


Obr. 33: Topológia č.2 - topológia experimentálneho pracoviska pre testovanie na WDM-PON v kombinácii s GE-PON

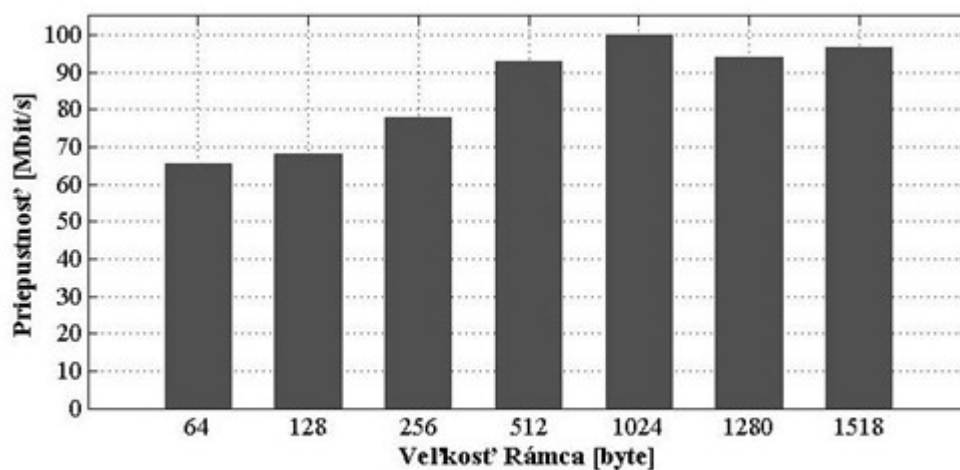
7.5. Meranie RFC2544

7.5.1. WDM-PON, WDM-PON / GE-PON

Na obrázku (vid'. Obr. 34) vidíme grafy testu RFC2544 pre testovanie priepustnosti sietí WDM-PON a WDM-PON v kombinácii s GE-PON. Úrovne grafov sa veľmi neodlišujú a z grafov je zrejmé, že priepustnosť dosahuje dostatočne vysoké hodnoty, čo znamená, že siete sú schopné poskytnúť užívateľovi rýchlosť až do 100 Mbit/s v závislosti na veľkosti prenášaného rámca.



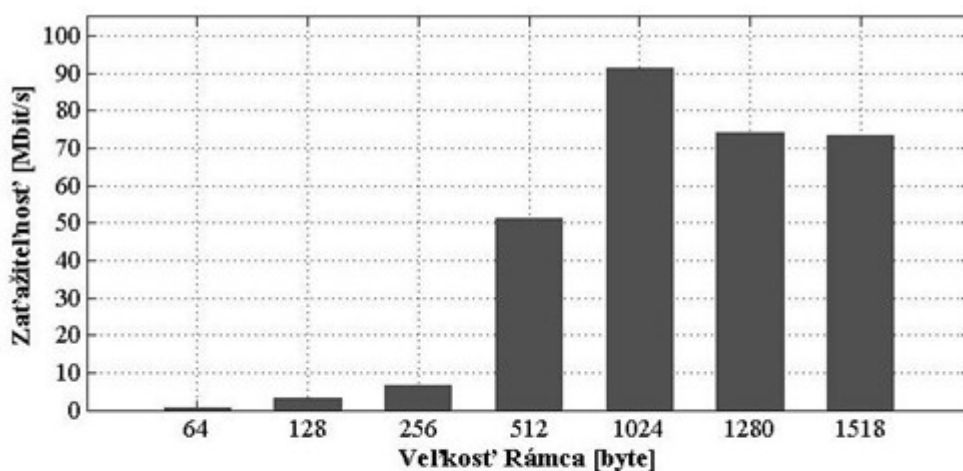
(a)



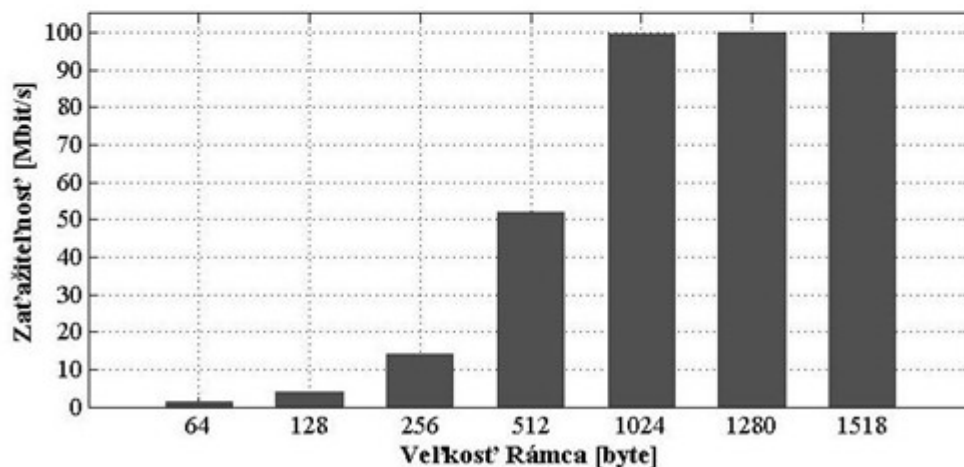
(b)

Obr. 34: Priepustnosť siete: WDM-PON (a), WDM-PON/GE-PON (b)

Na výsledkoch testu zaťažiteľnosti vidíme (viď. Obr. 35), že obe zapojenia majú problémy s rámcami menších veľkostí. Je to však obvyklý jav pri prenose rámcov týchto veľkostí prechádzajúcich či už naším zariadením OLT, alebo akýmkoľvek iným zariadením pracujúcim na 2.vrstve. Je to z toho dôvodu, že rámec ktorý je vyslaný a prechádza cez dané zariadenie, musí byť v tomto zariadení otvorený kôli kontrole a zistení adresy cieľového portu. Táto akcia trvá určitý čas a tým že malých rámcov prichádza veľa za sebou a ak je to pri vysokej rýchlosti (ako aj v našom prípade, keď je nastavená vpúšťaná rýchlosť na 100 Mbit/s), tak u týchto rámcov nestihnú prebehnúť akcie vykonávané na zariadení 2. vrstvy a preto je výsledná hodnota v grafe zaťažiteľnosti pre tieto rámce nízka.



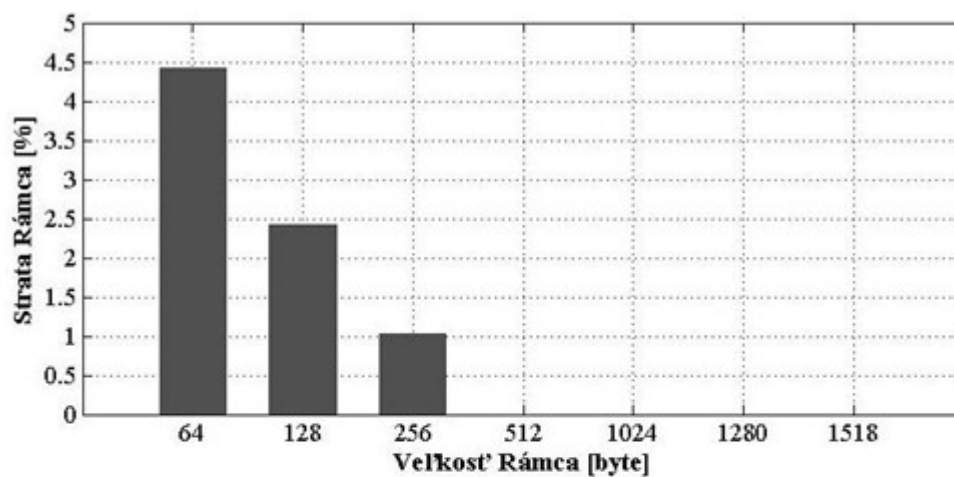
(a)



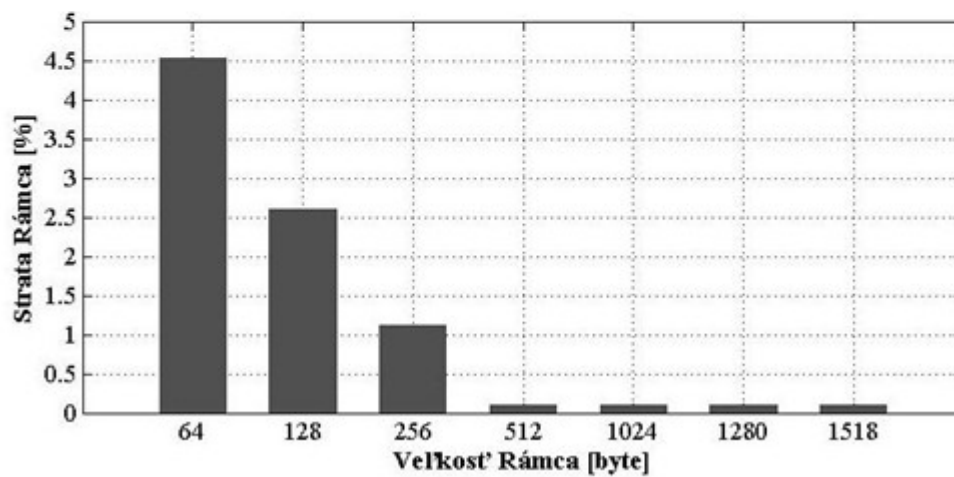
(b)

Obr. 35: Zaťažiteľnosť siete: WDM-PON (a), WDM-PON/GE-PON (b)

Test straty rámca (viď Obr. 36), súvisí s predchádzajúcim testom zaťažiteľnosti. Rámce nestíhajú byť kontrolované a sú zahadzované, preto vykazujú na trase veľké straty a tým pádom nie sú doručené do cieľovej destinácie v takom počte v akom boli zaslané. Straty rámcov sa môžu prejaviť napr. u hlasových služieb, kde môžu spôsobiť vynechávanie hlasu, alebo tiež znížiť kvalitu obrazu u video služieb.



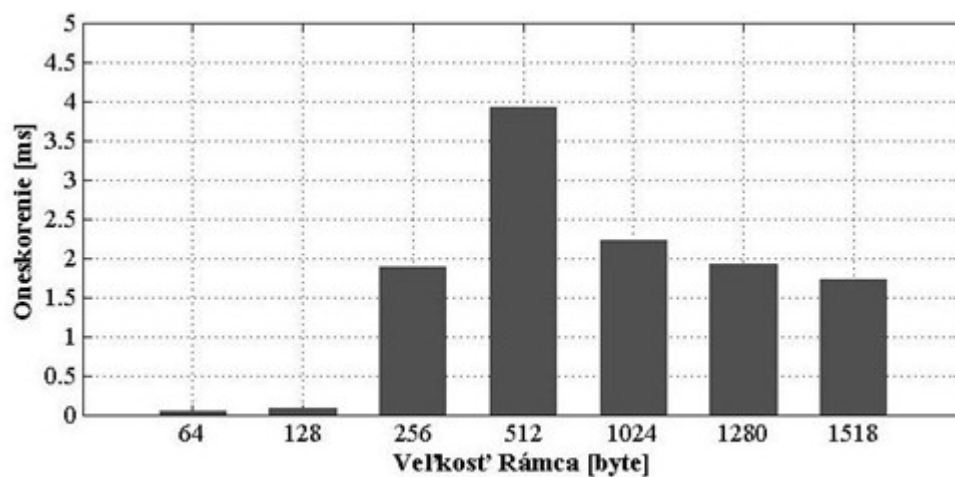
(a)



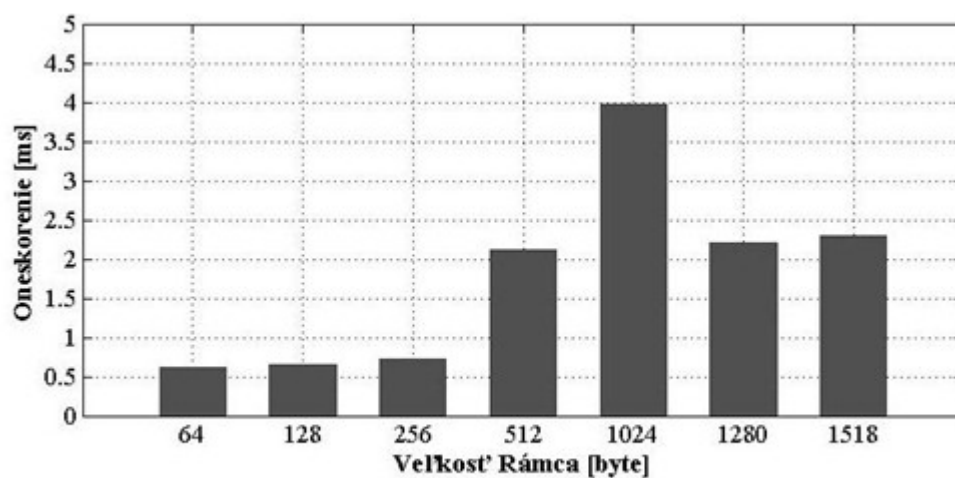
(b)

Obr. 36: Strata rámca siete: WDM-PON (a), WDM-PON / GEAPON (b)

Oneskorenie na trase popisuje graf na nasledujúcom obrázku (vid'. Obr. 37). Aj keď je hodnota oneskorenia u WDM-PON predovšetkým pri veľkosti rámca 512 bytov, výrazne väčšia oproti zvyšným hodnotám, vplyv na akékoľvek služby poskytované sieťou nebude takmer žiadny, pretože akceptovateľné oneskorenie je pre hlasové služby, ktoré sú na oneskorenie citlivé, v rozmedzí 0-150 ms, podľa odporúčenia ITU-T G.114 a užívateľské aplikácie ďalších typov majú už len nižšie nároky.



(a)



(b)

Obr. 37: Oneskorenie siete: WDM-PON (a), WDM-PON / GE-PON (b)

Hodnoty vo všetkých grafoch sú priemermi hodnôt viacerých meraní, pre transparentnosť výsledkov.

7.6. Meranie ITU-T Y.156sam (EtherSAM)

Keď už zariadenia AXS-200/850 a FTB-1/FTB-860 medzi sebou komunikovali, mohol som prejsť na samotné nastavovanie služieb testu EtherSAM na analyzátore FTB-1/FTB-860. Nastavil som tri profily služieb: HDTV – video služba, VoIP – hlasová služba, dáta – služba prenosu dát. Podrobnejšie nastavenie jednotlivých služieb pre samotnú WDM-PON je uvedené v nasledujúcej tabuľke (viď. Tab. 5).

Tab. 5: Konfigurácia služieb testu EtherSAM (topológia č.1 – sieť WDM-PON)

| | Použitý kodek | CIR (Mbit/s) | Max. jitter (ms) | Oneskorenie (ms) | Strata Rámca (%) |
|--------------|---------------|--------------|------------------|------------------|------------------|
| Video | HD (MPEG-4) | 10,59 | 25,0 | 50,0 | 0,0 |
| Hlas | VoIP G.711 | 0,12 | 10,0 | 150,0 | 0,0 |
| Dáta | - | 2,5 | 100,0 | 300,0 | 0,2 |

Výsledné hodnoty vybraných parametrov testu EtherSAM pre topológiu č.1, sieť WDM-PON sú uvedené v nasledujúcich tabuľkách (viď. Tab.6, Tab.7).

Tab. 6: Overenie konfigurácie siete (topológia č.1 – sieť WDM-PON)

| Služba 1 - Video | | |
|--------------------------|---------|------|
| CIR | 10,594 | Pass |
| Max. jitter (ms) | < 0,015 | Pass |
| Strata rámca (%) | 0,000 | Pass |
| Oneskorenie (ms) | 0,417 | Pass |
| Max. priepustnosť | 99,713 | Fail |
| Služba 2 - Hlas | | |
| CIR | 0,12 | Pass |
| Max. jitter (ms) | < 0,015 | Pass |
| Strata rámca (%) | 0,000 | Pass |
| Oneskorenie (ms) | 0,095 | Pass |
| Max. priepustnosť | 97,531 | Fail |
| Služba 3 - Dáta | | |
| CIR | 2,50 | Pass |
| Max. jitter (ms) | < 0,015 | Pass |
| Strata rámca (%) | 0,000 | Pass |
| Oneskorenie (ms) | 0,459 | Pass |
| Max. priepustnosť | 99,740 | Fail |

Tab. 7: Test Služieb (topológia č.1 – sieť WDM-PON)

| Služba 1 – Video | | |
|-------------------------------|---------|------|
| Priemerná priepustnosť | 10,593 | Pass |
| Max. jitter (ms) | 0,052 | Pass |
| Strata rámca (%) | 0,000 | Pass |
| Oneskorenie (ms) | 0,468 | Pass |
| Verdikt služby | - | Pass |
| Služba 2 – Hlas | | |
| Priemerná priepustnosť | 0,126 | Pass |
| Max. jitter (ms) | 0,365 | Pass |
| Strata rámca (%) | 0,000 | Pass |
| Oneskorenie (ms) | 0,455 | Pass |
| Verdikt služby | - | Pass |
| Služba 3 – Dáta | | |
| Priemerná priepustnosť | 2,500 | Pass |
| Max. jitter (ms) | < 0,015 | Pass |
| Strata rámca (%) | 0,000 | Pass |
| Oneskorenie (ms) | 0,458 | Pass |
| Verdikt služby | - | Pass |

Podrobnejšie nastavenie jednotlivých služieb pre WDM-PON v kombinácii s GE-PON je uvedené v nasledujúcej tabuľke (viď. Tab. 8).

Tab. 8: Konfigurácia služieb testu EtherSAM (topológia č.2 – sieť WDM-PON/GE-PON)

| | Použitý kodek | CIR (Mbit/s) | Max. jitter (ms) | Oneskorenie (ms) | Strata Rámca (%) |
|--------------|----------------------|---------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|
| Video | HD (MPEG-2) | 20,44 | 10,0 | 30,0 | 0,0 |
| Hlas | VoIP G.723.1 | 0,02 | 5,0 | 100,0 | 0,0 |
| Dáta | - | 5,00 | 50,0 | 200,0 | 0,2 |

Výsledné hodnoty vybraných parametrov testu EtherSAM pre topológiu č.2, sieť WDM-PON v kombinácii s GE-PON sú uvedené v tabuľkách na nasledujúcej strane (viď. Tab.9, Tab.10).

Tab. 9: Overenie konfigurácie siete (topológia č.2 – sieť WDM-PON/GE-PON)

| Služba 1 - Video | | |
|--------------------------|-------|------|
| CIR | 20,44 | Pass |
| Max. jitter (ms) | 3,749 | Pass |
| Strata rámca (%) | 0,000 | Pass |
| Oneskorenie (ms) | 5,143 | Pass |
| Max. priepustnosť | 20,44 | Pass |
| Služba 2 - Hlas | | |
| CIR | 0,02 | Pass |
| Max. jitter (ms) | 3,658 | Pass |
| Strata rámca (%) | 0,000 | Pass |
| Oneskorenie (ms) | 4,460 | Pass |
| Max. priepustnosť | 0,100 | Pass |
| Služba 3 - Dáta | | |
| CIR | 5,00 | Pass |
| Max. jitter (ms) | 3,257 | Pass |
| Strata rámca (%) | 0,000 | Pass |
| Oneskorenie (ms) | 5,025 | Pass |
| Max. priepustnosť | 5,003 | Pass |

Tab. 10: Test Služieb (topológia č.2 – sieť WDM-PON/GE-PON)

| Služba 1 – Video | | |
|-------------------------------|--------|------|
| Priemerná priepustnosť | 20,444 | Pass |
| Max. jitter (ms) | 4,021 | Pass |
| Strata rámca (%) | 0,000 | Pass |
| Oneskorenie (ms) | 5,228 | Pass |
| Verdikt služby | - | Pass |
| Služba 2 – Hlas | | |
| Priemerná priepustnosť | 0,027 | Pass |
| Max. jitter (ms) | 4,187 | Pass |
| Strata rámca (%) | 0,000 | Pass |
| Oneskorenie (ms) | 5,115 | Pass |
| Verdikt služby | - | Pass |
| Služba 3 – Dáta | | |
| Priemerná priepustnosť | 5,000 | Pass |
| Max. jitter (ms) | 3,511 | Pass |
| Strata rámca (%) | 0,000 | Pass |
| Oneskorenie (ms) | 5,222 | Pass |
| Verdikt služby | - | Pass |

Nastavenie hodnoty CIR bolo u služieb Video a Hlas nastavené pôvodne analyzátorom, na základe zvoleného kódovania. Hodnoty jitter, oneskorenie a strata rámcov som zvolil podľa typu služby. Každá služba má iné akceptovateľné rozmedzia hodnôt. U video služieb (napr. IPTV) sú nároky na oneskorenie a jitter nižšie a je prípustné aj vyššie oneskorenie. U hlasových služieb (napr. VoIP) sú kritéria o niečo prísnejšie a pre kvalitnú prevádzku je požadovaná nízka stratovosť rámcov (zvyčajne do 0,5 %), oneskorenie v rozmedzí 0-150 ms a jitter hodnota okolo 10 ms. Čo sa týka dát, oneskorenie a jitter nemajú vplyv na kvalitu tejto služby, ohľad sa berie iba na hodnotu straty rámcov, ktorá je určená dostupnou šírkou pásma.

Keďže test sa skladá z dvoch fáz – overenie konfigurácie siete a test služieb, výsledky oboch týchto častí testu som uviedol v predchádzajúcich tabuľkách. Report testu EtherSAM nám okrem výpisu výsledkov týchto fáz ponúka aj jednotlivé výsledky KPI parametrov a ďalšie záznamy.

Výsledok merania testu EtherSAM má celkový verdikt *Pass* alebo *Fail*. Výsledky testov pre nastavené hodnoty CIR a pre parametre oneskorenia, jitteru a straty rámcov majú hodnotu *Pass*, čiže v testoch prešli. To znamená že obe siete sú schopné poskytnúť tieto služby pri garancii hodnôt, udaných u jednotlivých služieb. U testu siete so samotnou WDM-PON nadobudla však hodnota *Max*. Priepustnosť, v kroku *Overshoot* výsledný verdikt *Fail*. Bolo to však kôli neprimerane zvolenej hodnote tohto parametru. Táto hodnota však nemá až takú váhu, pretože ide o podmienky, ktoré prevádzkovateľ negarantuje a sú vyradené z prevádzky.

7.7. Zhodnotenie výsledkov meraní

Namerané hodnoty potvrdzujú kvalitu WDM-PON siete a tiež výborné vlastnosti tejto technológie. Výsledky však úplne nezodpovedajú bežnému používaniu PON siete z toho hľadiska, že zaťaženie siete bolo minimálne, resp. žiadne. Merania boli ovplyvnené len všeobecnými faktormi, ako napr. možnosť nečistoty konektorov, alebo ohyby vláken. Každé meranie bolo vykonané opakovanie niekoľko krát, pre transparentnosť nameraných hodnôt. Opakované merania si vyžaduje hlavne štandard RFC2544. V prípade mojich meraní boli potrebné opakované merania pre spomínaný štandard predovšetkým u topológie č.2, sieť WDM-PON v kombinácii s GE-PON. Táto topológia vykazovala rozdiely vo výsledkoch u jednotlivých testov. Tieto rozdiely boli spôsobené prechodom medzi dvoma technológiami – WDM-PON a GE-PON, keďže každá má iné vlastnosti. Čo sa týka testov EtherSAM, aj tu som vykonal opakované merania. V konečnom dôsledku však neboli až tak potrebné, keďže výsledky pri rovnakých nastaveniach vychádzali vždy takmer identické, len s malými rozdielmi. Je tomu tak preto, lebo tento štandard počas merania robí presné priemery jednotlivých parametrov. Viditeľnejšie rozdiely nastali len u služby pre dáta, keď som zvolil odlišnú veľkosť zasielaných rámcov.

Celkovo je teda z výsledkov zrejmé, že lepšie hodnoty boli dosiahnuté u meraní zapojenia so samotnou WDM-PON ako u zapojenia WDM-PON v kombinácii s GE-PON. U testov EtherSAM boli splnené garantované hodnoty, čiže výsledné verdikty u oboch zapojení boli *Pass*, teda testy prešli. Testy RFC2544 tiež potvrdili kvalitu prevádzky oboch sietí. V tomto teste bola pomocou analyzátoru nastavená vpúšťaná prenosová rýchlosť 100Mbit/s. U testov tohto štandardu

boli potvrdené hlavne problémy s rámcami malých veľkostí a to u oboch zapojení. Je to dôsledkom režie pri spracovaní týchto rámcov. Keďže malé rámce prichádzajú v kratších intervaloch, všetky nestihnú byť skontrolované a tým pádom sú niektoré zahodené, čo spôsobuje navýšenie hodnoty u parametru strata rámca a naopak nízke hodnoty pre zaťažiteľnosť, teda nízku schopnosť zasielať rámce malých veľkostí (napr. 64, 128, 256 bytov) vysokými rýchlosťami (napr. 100 Mbit/s).

8. Záver

Bakalárska práca hovorí o optických prístupových sieťach, o nových trendoch a generáciách prístupových sietí a implementácií WDM-PON technológie na existujúcu infraštruktúru. V súčasnosti ešte nie sú prístupové siete využívané v takej miere ako bude potrebné v blízkej budúcnosti. Požiadavky užívateľov na šírku pásma a tiež požiadavky služieb neustále rastú. Nielen vo svete ale aj u nás na Slovensku alebo v Českej republike sa bude výstavba prístupových sietí stále rozširovať. Keďže aj súčasné vysokorýchlostné technológie sa raz dostanú na hranicu svojich možností, bude mať priestor práve technológia WDM-PON sietí a jej hybridné technológie. Pre poskytovateľov týchto služieb však bude potrebné v čo najväčšej miere využitie súčasných infraštruktúr, pre čo najnižšie investičné náklady.

V teoretickej časti som sa venoval optickým prístupovým sieťam zo všeobecného hľadiska, teda ich deleniu, topológiám, spôsobu šírenia signálu a jednotlivým dnes používaným a tiež už aj menej používaným, v súčasnosti nahradzovaným technológiami ako sú APON, resp. BPON. Tu som sa snažil viac rozobrať technológiu WDM-PON. Následne som sa zaoberal sieťami novej generácie, ktoré môžu byť v budúcnosti použité a sú vhodnými kandidátmi pre splnenie požiadaviek, ako užívateľa, tak aj služieb.

Záverečná, praktická časť je dôkazom možnej implementácie WDM-PON technológie na existujúcu infraštruktúru a jej správanie sa, ako samotnej siete, tak aj v spoluzití s inou technológiou. Samotná technológia WDM-PON má vhodné parametre pre akékoľvek služby, ako aj v prípade jej implementácie na existujúcu infraštruktúru (v mojom prípade na sieť GE-PON). Hodnoty priepustnosti nadobúdali maximálne povolené hodnoty, ktoré by mali byť v budúcnosti garantované koncovému užívateľovi, teda rýchlosť prenosu 100Mbit/s. Hodnoty zaťažiteľnosti a straty rámcov vykazovali horšie hodnoty u rámcov malých veľkostí, so zväčšovaním sa rámcov, boli výsledné hodnoty priaznivejšie až bezchybné. Čo sa týka dôležitého parametru, kolísanie oneskorenia (*jitter*), nameraného testom EtherSAM, jeho hodnoty boli dostačujúce pre všetky typy služieb. Pre ďalšie overenie implementácie WDM-PON architektúry, zodpovedajúcej používaniu PON siete v skutočnosti by bolo vhodné vykonať merania pod čo najvyššou záťažou, aby sa zistili hranice možností tejto technológie. Pre problémy s kompatibilitou zariadení na pracovisku sa mi však takéto testy nepodarilo vykonať.

Zoznam použitej literatúry

- [1] LAM, C. F. *Passive Optical Networks: Principles And Practices*. Burlington, USA: Academic Press of Elsevier, 2007, 368 s. zv.1. ISBN 0-12-373853-9.
- [2] GOLENIEWSKI, Lillian. *Telecommunications essentials: The complete global source for communications fundamentals, data networking and the Internet, and next-generation networks* [online]. ed.1. Addison-Wesley Professional, 2002 [cit. 2012-04-29]. ISBN 0-201-76032-0. Dostupné z: <http://flylib.com/books/en/2.567.1.2/1/>
- [3] CHANCLOU, P., S. GOSSELIN, J. FERNANDEZ PALACIOS, V. LÓPEZ ÁLVAREZ a E. ZOUGANELL. Overview of the Optical Broadband Access Evolution: A Joint Article by Operators in the IST Network of Excellence e-Photon/ONE. *Jcbroadband* [online]. 2006 [cit. 2012-04-29]. Dostupné z: <http://www.jcbroadband.com/Library/jcbftp1.pdf>
- [4] THE METRO ETHERNET FORUM. Ethernet Passive Optical Network (EPON) A Tutorial. *Satelinet* [online]. 2005, v2.0 [cit. 2012-04-29]. Dostupné z: <http://www.satelinet.com/EFM%20PON.pdf>
- [5] PEARSON, Dr. Matt. ENABLENCE TECHNOLOGIES INC. WDM-PON: A VIABLE ALTERNATIVE FOR NEXT GENERATION FTTP. *Enablence* [online]. 2010 [cit. 2012-04-29]. Dostupné z: <http://www.enablence.com/media/mediamanager/pdf/104-enablence-article-wdm-pon.pdf>
- [6] SCHLITTER P., Optické přístupové sítě. *CVUT* [online]. 2004 [cit. 2011-12-16]. Dostupné z WWW: <http://access.feld.cvut.cz/view.php?cisloclanku=2004072807>
- [7] ŠIFTA R., FILKA M., Simulace a měření vlnových multiplexů pro pasivní optické sítě. *Elektrorevue* [online]. 2011 [cit. 2011-12-16]. Dostupné z WWW: <http://www.elektrorevue.cz/cz/download/simulace-a-m--eni-vlnovych-multiplex--pro-pasivni-opticke-sit-/>
- [8] ČESKÝ TELEKOMUNIKAČNÍ ÚŘAD. Problematika regulace přístupových sítí nové generace. *CTU* [online]. 2009 [cit. 2012-04-29]. Dostupné z: http://www.ctu.cz/cs/download/aktualni_informace/problematika-regulace-nga_16_12_2009.pdf
- [9] WONG, E. IEEE. Next-Generation Broadband Access Networks and Technologies. *IEEE* [online]. 2012, č.4. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=6094146>
- [10] HUAWEI. Next-Generation PON Evolution. *Huawei* [online]. 2010, 1.0 [cit. 2012-04-29]. Dostupné z: <http://www.huawei.com/en/static/hw-077443.pdf>

-
- [11] GIGUERE, Bruno. EXFO. RFC2544: HOW IT HELPS QUALIFY A CARRIER ETHERNET NETWORK. *Exfo* [online]. Canada, 2008 [cit. 2012-04-29]. Dostupné z: <http://documents.exfo.com/appnotes/anote183-ang.pdf>
- [12] POTROK, Peter. EtherSAM jak jít po kvalitě služeb Triple Play. *PROFIBER NETWORKING* [online]. 2011 [cit. 2012-04-29]. Dostupné z: http://www.profiber.eu/files/B4_Hladky_Potrok_EtherSAM_jak_jit_po_kvalite_sluzeb_TriplePlay.pdf
- [13] DIALLO, Thierino. EXFO. EtherSAM: THE NEW STANDARD IN ETHERNET SERVICE TESTING. *Exfo* [online]. Canada, 2011 [cit. 2012-04-29]. Dostupné z: <http://documents.exfo.com/appnotes/anote230-ang.pdf>
- [14] PROFIBER. *Profiber* [online]. 2010 [cit. 2012-04-29]. Dostupné z: <http://www.profiber.eu/>
- [15] MiniMAP 9100: integrated Multiservice Access Platform. *ALLIED TELESIS* [online]. 2008 [cit. 2012-04-29]. Dostupné z: http://www.alliedtelesis.com/media/datasheets/MiniMAP9100_ds.pdf
- [16] VYDIS. PON (Passive Optical Network). *Vydis* [online]. [cit. 2012-04-29]. Dostupné z: http://www.vydis.cz/download/ke-stazeni/PON_NG_LAR.pdf
- [17] LUCKI, Michal. Optické systémy a sítě. Dostupné z: www.comtel.cz/files/download.php?id=4608
- [18] LAFATA, Pavel a Jíří VODRÁŽKA. SOUČASNÉ A BUDOUCÍ VARIANTY PASIVNÍCH OPTICKÝCH PŘÍSTUPOVÝCH SÍTÍ. [online]. 2009, 2009/39 [cit. 2012-05-01]. Dostupné z: <http://www.elektrorevue.cz/cz/clanky/komunikacni-technologie/75/soucasne-a-budouci-varianty-pasivnich-optickych-pristupovych-siti/>
- [19] GIRARD. A. FTTx PON Technology and Testing., Quebec 2005.

Zoznam príloh

- I Vybrané výpisy výsledkov z reportov testov
- II Vybrané fotografie z experimentálneho pracoviska
- III Ukážky nastavení prístrojov a zariadení

Príloha I: Vybrané výpisy výsledkov z reportov testov

Ukážka výpisu č.1: EtherSAM - Test služieb – KPI hodnoty (topológia č.1 – sieť WDM-PON)

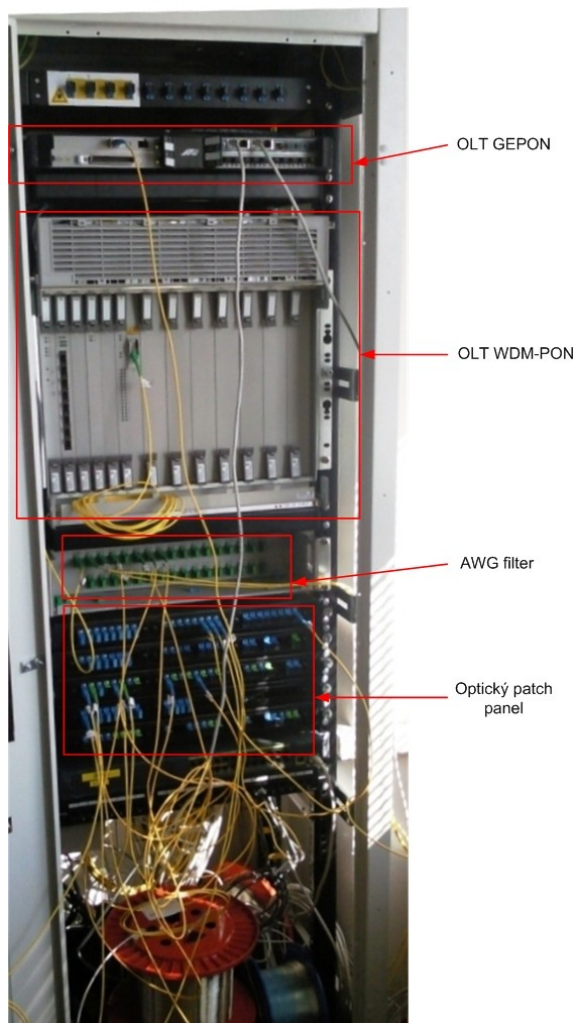
| | Služba 1 - Video | | | |
|---------------------|------------------|---------|---------|--------|
| | Priemer | Minimum | Maximum | Odhad |
| Priepustnosť | 10,593 | 10,583 | 10,594 | - |
| Jitter | < 0,015 | < 0,015 | 0,052 | <0,015 |
| Oneskorenie | 0,418 | 0,415 | 0,468 | - |
| | Služba 2 – Hlas | | | |
| | Priemer | Minimum | Maximum | Odhad |
| Priepustnosť | 0,126 | 0,126 | 0,126 | - |
| Jitter | 0,086 | < 0,015 | 0,365 | 0,160 |
| Oneskorenie | 0,150 | 0,090 | 0,455 | - |
| | Služba 3 – Dáta | | | |
| | Priemer | Minimum | Maximum | Odhad |
| Priepustnosť | 2,500 | 2,498 | 2,510 | - |
| Jitter | < 0,015 | < 0,015 | < 0,015 | <0,015 |
| Oneskorenie | 0,454 | 0,453 | 0,458 | - |

Ukážka výpisu č.2: EtherSAM - Test služieb – KPI hodnoty (topológia č.2 – sieť WDM-PON/GEAPON)

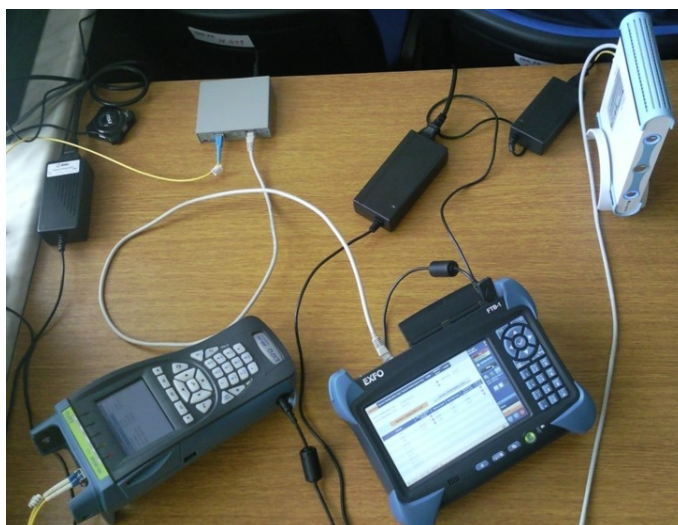
| | Služba 1 - Video | | | |
|---------------------|------------------|---------|---------|-------|
| | Priemer | Minimum | Maximum | Odhad |
| Priepustnosť | 20,444 | 20,364 | 20,520 | - |
| Jitter | 0,715 | < 0,015 | 4,021 | 0,644 |
| Oneskorenie | 3,264 | 1,008 | 5,228 | - |
| | Služba 2 – Hlas | | | |
| | Priemer | Minimum | Maximum | Odhad |
| Priepustnosť | 0,027 | 0,027 | 0,028 | - |
| Jitter | 1,099 | < 0,015 | 4,187 | 0,901 |
| Oneskorenie | 3,105 | 0,761 | 5,115 | - |
| | Služba 3 – Dáta | | | |
| | Priemer | Minimum | Maximum | Odhad |
| Priepustnosť | 5,000 | 4,978 | 5,020 | - |
| Jitter | 1,623 | 1,030 | 3,511 | 1,630 |
| Oneskorenie | 3,229 | 0,857 | 5,222 | - |

Príloha II: Vybrané fotografie z experimentálneho pracoviska

Fotografia č.1: Rack N311



Fotografia č.2: Experimentálne pracovisko – prístroje: AXS-200/860, FTB-1 860, ONU jednotky



Priloha III: Ukázky nastavení prístrojov a zariadení

Obrázok č.1: Ukážka z Hyperterminálu, pre výpis rozhrania EPON

```

GEPON - Hyperterminál
Soubor Úpravy Zobrazit Zavolat Přenos Nápověda

--- EPON Interfaces ---
Interface..... 2.0
Type..... EPON
State..... UP-UP-Online
Description..... <none>
Remote ID..... <none>
External Profile..... <none>
Card Type..... EPON2

Provisioning
Provisioning Profile..... AutoProv (*)
IPMC Source Address..... 192.168.2.1
IPMC VLAN..... 500
Performance Monitoring..... Off

Actual
Direction..... Customer

QoS Policy Information
Broadcast Link (BRUOH)..... NONE
IP Multicast Link (IPMC)..... NONE

Discovered ONU Information
00:15:77:43:98:68..... onu0

--- ONU Interfaces ---
Interface State EPON ID MAC Address
-----
onu0 UP-UP 2.0 0 00:15:77:43:98:68
onu1 UP-DN 2.0 1 00:15:77:43:A5:50

```

Obrázok č.1: Ukážka z Hyperterminálu, pre výpis rozhrania ONU

```

GEPON - Hyperterminál
Soubor Úpravy Zobrazit Zavolat Přenos Nápověda

--- ONU Interfaces ---
Interface..... onu0
Type..... ONU
State..... UP-UP-Degraded
Description..... <none>
Remote ID..... <none>
External Profile..... <none>
Card Type..... EPON2

Interface Faults
Remote Loss of Signal (UNI)..... Info

Provisioning
ID..... 0
Associated EPON..... 2.0
Type..... TK3713
Auto Negotiation..... On
Speed..... Auto
Duplex..... Auto
Flow Control..... Auto
MAC Addresses
MAC 1 (user setting)..... 00:15:77:43:98:68
MAC 2 (generated)..... 00:15:77:43:98:69
MAC 3 (generated)..... 00:15:77:43:98:6A
MAC 4 (generated)..... 00:15:77:43:98:6B
MAC 5 (generated)..... 00:15:77:43:98:6C
MAC 6 (generated)..... 00:15:77:43:98:6D
MAC 7 (generated)..... 00:15:77:43:98:6E
MAC 8 (generated)..... 00:15:77:43:98:6F
Performance Monitoring..... Off

Actual
Product ID..... AT-ON1000-3713
Type..... TK3713
Serial Number..... A03329G074900005 B
Speed..... 100 Mbps
Duplex..... Full
Flow Control..... On

```