

Řešení vlastností multimediálních služeb v hybridních sítích s implementací optických zesilovačů v trase

Determination of Multimedia Services Properties in Hybrid Networks with
Implemented Optical Amplifiers in Line

Bc. Jiří Štípal

Diplomová práce

Vedoucí práce: Ing. Jan Látal, Ph.D.

Ostrava, 2022

Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Jiří Štůpal**

Studijní program: N2647 Informační a komunikační technologie

Studijní obor: 2601T013 Telekomunikační technika

Téma: **Řešení vlastností multimediálních služeb v hybridních sítích s implementací optických zesilovačů v trase**
Determination of Multimedia Services Properties in Hybrid Networks with Implemented Optical Amplifiers in Line

Jazyk vypracování: čeština

Zásady pro vypracování:

Práce se bude zabývat aktuálním tématem na poli ICT poskytovatelů internetového připojení, kteří řeší otázku konvergence metalických a optických sítí. Cílem práce je pak zhotovit experimentální zapojení xPON sítě s xDSL technologií a vytvořit tak hybridní přístupovou síť xPON/xDSL na které poté budou měřeny parametry (např. SSIM, PSNR, MSE aj.) multimediálních služeb např. HD, SD video apod. Student provede na zhotovené topologii základní měření výkonu, útlumu, disperzí. Kromě toho, bude implementovat optické zesilovače a zkoušet maximální dosah sítě. Nedílnou součástí dané práce je i proměření integrity dané topologie pomocí měření testů RFC 6349 a ITU-T Y.1564.

1. Proveďte studium hybridních fotonických sítí z dosud známých poznatků.
2. Realizujte reálné zapojení hybridní fotonické sítě v rámci laboratoře a proveďte měření.
3. Implementujte optické zesilovače do hybridní fotonické sítě v rámci laboratoře a proveďte měření.
4. Porovnejte dosažené výsledky pro navrhnutou hybridní fotonickou síť bez a s implementací zesilovače/čů.

Seznam doporučené odborné literatury:

- [1] KAZOVSKY, Leonid G., et al.; Broadband Optical Access Networks. Canada: Wiley, 2011. 283 p. ISBN 978-0-470-18235-2.
- [2] MA, Maode. Current Research Progress of Optical Networks. 1st Edition. [s.l.]: Springer, 2009. 282 p. ISBN 978-1402098888.
- [3] LAM, Cedric. Passive Optical Networks: Principles and practice. Oxford: Elsevier Onc., 2007. 324 p. ISBN 978-0-12-373853-0.
- [4] GORALSKI, Walter. ADSL and DSL technologies. New York: McGraw-Hill, c1998, xxxii, 379 p. ISBN 00-702-4679-3.
- [5] HENS, Francisco J a Jose Manuel CABALLERO. Triple play: building the converged network for IP, VoIP and IPTV. Hoboken, NJ: Wiley, c2008, 401 s. ISBN ISBN 978-0-470-75367-5.
- [6] GORSHE, Steve. Broadband access: wireline and wireless, alternatives for internet services. Chichester, England: Wiley, 2014. ISBN 978-1-118-87880-4.
- [7] SAMI LALLUKKA. Passive optical networks: transport concepts. Espoo: VTT, 2006. ISBN 95-138-6706-4.
- [8] MICHAEL J. CONNELLY. Semiconductor Optical Amplifiers. Boston, MA: Kluwer Academic Publishers, 2004. ISBN 03-064-8156-1.

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

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Jan Látal, Ph.D.**

Datum zadání: 01.09.2020

Datum odevzdání: 30.04.2022

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

prof. Ing. Jan Platoš, Ph.D.
děkan fakulty

Abstrakt

Diplomová práce se zabývá řešením aktuálního tématu na poli poskytovatelů internetového připojení a multimediálních služeb, kteří řeší konvergenci optických a metalických sítí. Cílem práce je sestavení a konfigurace experimentálního zapojení gigabitové pasivní optické sítě s vysokorychlostní digitální účastnickou přípojkou a tedy vytvoření hybridní přístupové sítě GPON/VDSL2, na které budou měřeny parametry multimediálních služeb SD, HD a Full HD videí. Na hybridní topologii je rovněž provedeno základní měření výkonu, útlumu a disperzí. Dále následuje implementace optických zesilovačů a nalezení maximální dosahu sítě. V rámci měření integrity sítě jsou provedeny testy dle doporučení RFC 6349 a normy ITU-T Y.1564. Práce je rozdělena do desíti kapitol, přičemž prvních šest řeší teoretickou část práce a další čtyři se zabývají praktickou částí. V teoretické části jsou popsány gigabitové pasivní optické sítě, digitální účastnické přípojky, optické zesilovače, hybridní fotonické sítě a sítě s velmi vysokou kapacitou. Praktická část práce se zabývá realizací reálného zapojení hybridní fotonické sítě v rámci laboratoří, dále implementací optických zesilovačů do této hybridní fotonické sítě, porovnáním jednotlivých výsledků a závěrem.

Klíčová slova

GPON, VDSL2, ITU-T Y.1564, RFC 6349, OLT, ONT, ONU, DLSAM, VLC, propustnost, ztrátovost paketů, kolísání zpoždění, zpoždění, IPTV, data, OTDR, PPM, CD, PMD, SOA, MOS, PSNR, LAN, WAN

Abstract

The thesis deals with the solution of the current topic in the field of providers of internet connection and multimedia services, which solves the convergence of optical and metallic networks. The aim of the thesis is to build and configure an experimental connection of a gigabit passive optical network with a high-speed digital subscriber connection and thus to create a hybrid access network GPON/VDSL2, on which parameters of multimedia services of SD, HD and Full HD videos will be measured. On the hybrid topology, basic measurement of performance, attenuation and dispersion is also performed. Next comes the implementation of optical amplifiers and finding the maximum network range. Within the framework of the measurement of network integrity, tests are carried out according to the recommendation of RFC 6349 and the ITU-T Y.1564 standard. The thesis is divided into ten chapters, the first six solve the theoretical part of the thesis and the next four

deal with the practical part. The theoretical part describes gigabit passive optical networks, digital subscriber connections, optical amplifiers, hybrid photonic networks and networks with very high capacity. The practical part of the work deals with the implementation of the real connection of the hybrid photonic network within laboratories, implementation of optical amplifiers into this hybrid photonic network, comparison of individual results and conclusion.

Keywords

GPON, VDSL2, ITU-T Y.1564, RFC 6349, OLT, ONT, ONU, DLSAM, VLC, Throughput, Packet Loss, Jitter, Latency, IPTV, Data, OTDR, PPM, CD, PMD, SOA, MOS, PSNR, LAN, WAN

Poděkování

Diplomová práce je podpořena v rámci projektu "Hybridní metalicko-optické systémy s korigovaným provozem na vyšších vrstvách" z fondu rozvoje sdružení CESNET s reg. číslem 650/2019.

Rád bych poděkoval panu doktoru Janu Látalovi, za vedení celým průběhem práce, panu inženýru Danielu Stříbnému, za ochotu, odbornou pomoc a konzultace při realizaci síťové části práce, panu inženýru Zdeňku Wilčkovi, za podnětné návrhy a pomoc při zhotovení hybridní fotonické sítě, panu inženýru Martinu Horákovi, za konzultace týkající se gigabitové pasivní optické sítě, panu inženýru Pavlu Nevludovi, za konzultace v rámci digitálních účastnických přípojek, panu doktoru Petru Koudelkovi, za podnětné rady a měření proti ČTÚ zařízení, panu inženýru Aleši Vanderkovi, za propůjčení a pomoc s měřicími přístroji a konečně kolegovi bakaláři Kamilu Trubákovi za spolupráci na vybudování praktické části této práce.

Obsah

Seznam použitých symbolů a zkratk	9
1 Úvod	14
2 Gigabitové pasivní optické sítě	15
2.1 GPON	15
2.2 XG-PON	28
3 Digitální účastnické přípojky	31
3.1 ADSL	31
3.2 VDSL	32
3.3 VDSL2	32
3.4 Problémy v DSL	33
4 Optické zesilovače	35
4.1 SOA	36
4.2 EDFA	37
4.3 Ramanův	38
5 Hybridní fotonické sítě	39
6 Sítě s velmi vysokou kapacitou	42
7 Realizace reálného zapojení hybridní fotonické sítě v rámci laboratoří	44
7.1 Topologie hybridní fotonické sítě	44
7.2 Popis použitých zařízení	45
7.3 Popis použitých pasivních zařízení	50
7.4 Popis použitých měřících zařízení	51
7.5 Popis použitých programů	56
7.6 Konfigurace jednotlivých zařízení	56
7.7 Měření optických parametrů sítě	64

7.8	Měření integrity sítě	69
7.9	Měření multimediálních služeb	84
8	Implementace optických zesilovačů do hybridní fotonické sítě	90
8.1	Topologie hybridní fotonické sítě s implementací zesilovačů	90
8.2	Popis použitých zařízení	91
8.3	Popis použitých pasivních zařízení	91
8.4	Konfigurace jednotlivých zařízení	92
8.5	Měření optických parametrů sítě	93
8.6	Měření integrity sítě	96
8.7	Měření multimediálních služeb	107
9	Porovnání dosažených výsledků hybridní fotonické sítě bez a s implementací zesilovačů	111
9.1	Porovnání měření dle normy ITU-T Y.1564	111
9.2	Porovnání měření dle doporučení RFC 6349	120
9.3	Porovnání měření multimediálních služeb	123
10	Závěr	125
	Literatura	128

Seznam použitých zkratk a symbolů

ACL	– Access Control List - seznam pravidel, řídících přístup k objektům
ADSL	– Asymmetric Digital Subscriber Line - asymetrická digitální účastnická přípojka
AES	– Advanced Encryption Standard - druh symetrické blokové šifry
Alloc-ID	– Allocation Identifier - identifikátor vyhrazených vysílacích okamžiků v GPON, XG-PON a dále
ATM	– Asynchronous Transfer Mode - asynchronní přenosový mód – best-effort - metoda přenosu datových jednotek bez garance doručení – Booster - výkonový zesilovač – broadcast - všesměrový síťový provoz
CD	– Chromatic Dispersion - chromatická disperze
CIR	– Committed Information Rate - horní limit garantované přenosové kapacity pro danou službu
CoS	– Class of service -úroveň služeb
CPE	– Customer Premise Equipment - zařízení na straně zákazníka
ČTÚ	– Český telekomunikační úřad
DBA	– Dynamic Bandwith Allocation - metoda dynamického přidělování přenosové kapacity
DBRu	– Dynamic Bandwidth Report upstream - zpráva o dynamické šířce pásma ve vzestupném směru
DMT	– Discrete MultiTone Modulation - modulace s více nosnými MCM pro přenos digitálních dat – Downstream - sestupný směr přenosu
DSL	– Digital Subscriber Line - digitální účastnická přípojka
DRAM	– Dynamic Random Access Memory - druh počítačové paměti, která uchovává data v podobě elektrického náboje v kondenzátoru
DVB-S/S2	– Digital Video Broadcasting-Satellite - digitální televizní standard

DVB-T/T2	– Digital Video Broadcasting-Terrestrial - digitální televizní standard přes pozemní vysílače
DWDM	– Dense WDM - husté vlnové dělení
EPON	– Ethernet PON - PON síť založená na protokolu Ethernet
FDH	– Fiber Distribution Hub - vláknový rozvaděč
FDT	– Fiber Distribution Terminals - vláknové distribuční terminály
EDFA	– -Doped Fiber Amplifier - typ optického zesilovače na bázi erbiem dopovaného vlákna
FEC	– Forward Error Correction - typ oprávněného kódování
FEI	– Fakulta elektrotechniky a informatiky
FEXT	– Far-end crosstalk - přeslech na vzdáleném konci
FFS	– for future study - pro budoucí studium
FSAN	– Full Service Access Network - název společnosti
FTTB	– Fibre to the Building - optické přípojky se zakončením v budově
FTTC	– Fibre to the Curb - optické přípojky se zakončením ve venkovním rozvaděči
FTTCab	– Fibre to the Cabinet - optické přípojky se zakončením ve venkovním rozvaděči
FTTH	– Fibre to the Home - optické přípojky se zakončením u uživatele v bytě, rodinném domě
FTTx	– Fiber To The x - označení koncepce dělení optických přípojek
GEM	– GPON Encapsulation Mode - přenosový protokol ve variantě GPON
GPON	– Gigabit Passive Optical Network - gigabitová pasivní optická síť
GTC	– GPON Transmission Convergence - adaptační podvrstva ve vrstevném modelu GPON
HTTP	– Hypertext Transfer Protocol - internetový protokol určený pro komunikaci s WWW servery
IEEE	– Institute of Electrical and Electronics Engineers - Institut pro elektrotechnické a elektronické inženýrství
IGMP	– Internet Group Management Protocol - označení pro rozšíření původní IP verze 4 o možnost přeposílání datagramů z jednoho zdroje více koncovým stanicím
	– In-line - mezilehlý zesilovač
IPTV	– přenos TV vysílání prostřednictvím IP
ITU-T	– International Telecommunication Union–Telecommunication Standardization Sector – mezinárodní telekomunikační unie – telekomunikační standardizační sektor
KiB	– Kibibyte - Kibibajt - jednotka kapacity paměťových médií

LAN	– Local Area Network - označení pro lokální datové sítě
LCD	– Liquid Crystal Display - Displej z kapalných krystalů
MOS	– Mean Opinion Score - Průměrné vyhodnocení skóre
MTU	– Maximum Transmission Unit - maximální velikost paketu (datové jednotky) pro daný přenosový spoj
	– multicast - režim, kdy datagramy z jednoho zdroje jsou rozesílány více koncovým stanicím
NEXT	– Near-end crosstalk - přeslech na blízkém konci
NGA	– Next Generation Access - obecné označení moderních přístupových technologií
NG-PON1	– Next-Generation Passive Optical Network 1 - označení vývojového směru sítí PON v rámci standardizace ITU-T
NG-PON2	– Next-Generation Passive Optical Network 2 - označení vývojového směru sítí PON v rámci standardizace ITU-T
NT	– Network Termination - síťové zakončení
OAN	– Optical Access Network - soubor optických distribučních sítí ODN
ODN	– Optical Distribution Network - optická distribuční síť
	– off-chip - paměť není na stejném čipu jako CPU
OID	– Object Identifier - identifikátor objektu v SNMP
OLT	– Optical Line Termination - optické linkové zakončení
OLTS	– Optical Loss Test Set - souprava pro testování optického útlumu
OMCC	– Optical Network Unit Management and Control Channel - komunikační kanál v GPON vyhrazený pro přenos služebních zpráv
OMCI	– Optical Network Unit Management and Control Interface - rozhraní pro řízení a správu optických jednotek v síti GPON
ONT	– Optical Network Termination - optické síťové zakončení
ONU	– Optical Network Unit - optická síťová jednotka
ONU-ID	– ONU Identifier - identifikátor koncové jednotky ONU, ONT v síti GPON, XG-PON a dalších
	– on-chip - paměť je na stejném čipu jako CPU
OSA	– Optical Spectrum Analyzer - analyzátor optického spektra
OTDR	– Optical Time Domain Reflectometry - metoda analýzy optických vláken založená na vyhodnocování zpětných rozptylů a odrazů
PAT	– Port Address Translation - překlad pomocí jedné adresy a čísel zdrojových portů
PCBd	– Physical Control Block downstream - označení služebního záhlaví GTC rámců ve směru sestupném

PLOAM	– Physical Layer Operations and Maintenance - označení služebních ATM buněk pro řízení a správu V ITU-T sítích PON
PLOu	– Physical Layer Overhead - režie fyzické vrstvy
PMD	– Physical Medium Dependent - podvrstva fyzické vrstvy ATM
PMD	– Polarisation Mode Dispersion - polarizační vidová disperze
PON	– Passive Optical Network - pasivní optická síť
Port-ID	– identifikátor spojení v sítích GPON, XG-PON a dalších
PPM	– PON Power Meter - měřič úrovně optických signálů optimalizovaný pro použití v PON – Pre-amplifier - předzesilovač
PSNR	– Peak Signal-to-noise Ratio - odstup signálu od šumu
PT	– Performance Tier - Stupeň výkonnosti
PTI	– Payload Type Indicator - identifikátor obsahu ATM buňky
PTM	– Point-to-Multipoint - označení mnohabodové sítě
PTP	– Point-to-Point - síť typu bod-bod
QoE	– Quality of Experience - kvalita prožitku ze služby
QoS	– Quality of Service - kvalita služeb
RAM	– Random Access Memory - paměť s náhodným přístupem
RF	– Radio Frequency - rádiová frekvence
RTP	– Real-time Transport Protocol - protokol standardizující paketové doručování zvukových a obrazových dat po internetu
SFP+	– Small Form-factor Pluggable - výměnný modul optického vysílače a přijímače v optických jednotkách s propustností až 10 Gbit/s
SLA	– Service Level Agreement - smlouva mezi poskytovatelem služeb a uživatelem obsahující dojednané parametry
SNI	– Service Node Interface - rozhraní mezi přístupovou a páteří sítí
SOA	– Semiconductor Optical Amplifier - optický polovodičový zesilovač – Splitter - optický rozbočovač
SRAM	– Static Random Access Memory - označení polovodičové paměti typu RAM
SR-DBA	– Status Reporting DBA - varianta DBA se zasíláním informací o aktuálním stavu jednotky
SSD	– Solid-state Drive - typ polovodičového disku
T-CONT	– Transmission Container - označení datového rámce ve směru vzestupném v GPON
TCP	– Transmission Control Protocol - jeden z přenosových protokolů na transportní vrstvě Ethernetu
TDM	– Time Division Multiplex - časové dělení (multiplex)

TM-DBA	<ul style="list-style-type: none"> - Traffic Monitoring DBA - varianta DBA s monitorováním provozu jednotky - triple play - pojmenování kombinace tří komunikačních služeb - televize, internet a hlasových služeb
TWDM PON	<ul style="list-style-type: none"> - Time Wavelength Division PON - označení koncepce hybridních WDM-TDM PON sítí, které kombinují aplikaci WDM multiplexování a časového sdílení TDM
UDP	<ul style="list-style-type: none"> - User Datagram Protocol - jeden z přenosových protokolů na transportní vrstvě Ethernetu
UNI	<ul style="list-style-type: none"> - User Network Interface - rozhraní mezi přístupovou a lokální sítí koncového uživatele - unicast - komunikace, kdy datagramy jsou přenášeny pouze mezi dvěma body - Upstream - vzestupný směr přenosu
VDSL	<ul style="list-style-type: none"> - Very High Speed Digital Subscriber Line - vysokorychlostní digitální účastnická přípojka
VDSL2	<ul style="list-style-type: none"> - Very High Speed Digital Subscriber Line 2 - vysokorychlostní digitální účastnická přípojka 2. generace
VHCN	<ul style="list-style-type: none"> - Very High Capacity Networks - sítě s velmi vysokou kapacitou
VLAN	<ul style="list-style-type: none"> - Virtual LAN - logicky nezávislá síť v rámci jednoho nebo několika zařízení
VLC	<ul style="list-style-type: none"> - multiplatformní přehrávač
VoIP	<ul style="list-style-type: none"> - Voice Over IP - telefonie v IP sítích
WAN	<ul style="list-style-type: none"> - Wide Area Network - síť pokrývající rozlehlou oblast
WDM	<ul style="list-style-type: none"> - Wavelength Division Multiplex - vlnové dělení (multiplex)
WiFi	<ul style="list-style-type: none"> - Wireless Fidelity - bezdrátová datová technologie
XAMPP	<ul style="list-style-type: none"> - Cross-platform Apache MariaDB PHP Perl - multiplatformní softwarový balíček
XG-PON	<ul style="list-style-type: none"> - X Gigabit PON - 10gigabitová PON varianta dle ITU-T G.987
XGS-PON	<ul style="list-style-type: none"> - X Gigabit Symmetric PON - symetrická 10gigabitová varianta dle ITU-T G.9807

Kapitola 1

Úvod

S postupně klesající cenou optických komponent a vláken se měnil také charakter jejich využití v telekomunikacích. Ještě nedávno byla doménou optických sítí především páteřní telekomunikační síť. Za posledních zhruba deset let se ale výhody optického vlákna postupně přibližují koncovým uživatelům. S ohledem na stále častější využití multimediálních služeb, sloužících k přenosům videa a zvuku ve vysoké kvalitě, přibývá nároků na propustnost sítí, ale i odezvy a nízké ztrátovosti paketů. Hlavními překážkami rozvoje optických přístupových sítí jsou vysoké náklady na instalaci a položení optických kabelů. Pokud je tato překážka překonána, jsou pasivní optické sítě vhodnou alternativou pro telekomunikace. V rámci přístupových sítí je výrazně menší míra sdílení nákladů ve srovnání s metropolitními sítěmi, čímž jsou zvýšeny náklady pro platícího účastníka. V důsledku toho musí technologie přístupových sítí udržovat nízké náklady na instalaci, čehož lze dosáhnout využitím stávajících měděných kabelů s omezenou šířkou pásma, takže vznikají hybridní fotonické sítě.[1][2]

Kapitola 2

Gigabitové pasivní optické sítě

2.1 GPON

2.1.1 Úvod do GPON

GPON (Gigabit Passive Optical Network - gigabitová pasivní optická síť) je definována doporučením ITU-T (International Telecommunication Union–Telecommunication Standardization Sector – mezinárodní telekomunikační unie – telekomunikační standardizační sektor) řady G.984.1 až G.984.7. O první návrh GPON se postarala společnost FSAN (Full Service Access Network) v září 2002 a následně byla standardizována ITU-T v březnu 2003. Jednotlivé řady standardů G.984 definují obecné charakteristiky GPON.[3][4]

- G.984.1 Základní charekteristiky
- G.984.2 Specifikace vrstvy PMD
- G.984.3 Specifikace přenosové konvergenční vrstvy
- G.984.4 Specifikace rozhraní ONT pro správu a ovládání
- G.984.5 Rozšíření pásma
- G.984.6 Rozšíření dosahu
- G.984.7 Dlouhý dosah

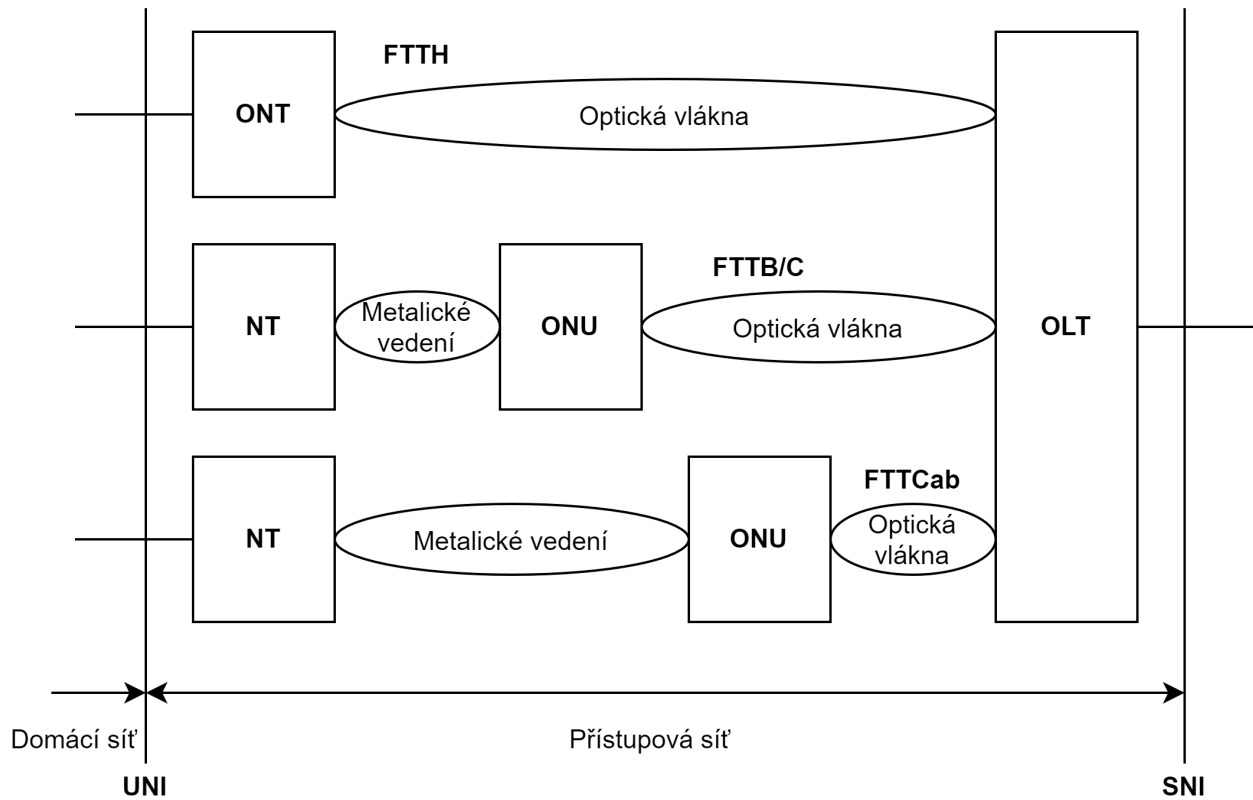
GPON dokáže přenášet různé typy provozu, kromě Ethernetu se jedná také o ATM (Asynchronous Transfer Mode - asynchronní přenosový mód), čehož je schopna dosáhnout používanou enkapsulační metodou GEM (GPON Encapsulation Mode - přenosový protokol ve variantě GPON).[3][4]

2.1.2 Síťová architektura

Optická část systému LAN (Local Area Network - označení pro lokální datové sítě) může být aktivní nebo pasivní a její architektura může být buďto PTP (Point-to-Point - síť typu bod-bod), nebo PTM (Point-to-Multipoint - označení mnohabodové sítě). Na obrázku 2.1 můžeme vidět základní možnosti architektur optických přístupových sítí OAN (Optical Access Network - soubor optických

distribučních sítí ODN).[5][6]

Obrázek 2.1 znázorňuje logickou síťovou architekturu s různými možnostmi FTTx.



Obrázek 2.1: FTTx síťová architektura[3]

Možnosti FTTx (Fiber To The x - označení koncepce dělení optických přípojek) architektury [5][6]:

- FTTH (Fibre to the Home - optické přípojky se zakončením u uživatele – v bytě, rodinném domě) znamená, že optická vlákna jsou vedena až do prostor zákazníka a jeho domácí nebo privátní sítě. Toto zapojení poskytuje maximální šířku pásma, ale jeho zavedení je nákladné, především pokud se jedná o starší síť. Nahrazování stávající architektury není výhodné především pro vlastníka sítě. Tato architektura se dnes používá především pro nové projekty a novostavby.
- FTTB (Fibre to the Building - optické přípojky se zakončením v budově) je optické vlákno, které dosahuje hranice budovy, například suterén v bytové jednotce. Koncové připojení k jednotlivým obytným prostorům se provádí pomocí alternativních prostředků, například pomocí metalických kabelů. FDT (Fiber Distribution Terminals - vláknové distribuční terminály) jsou použity k jednotlivému připojení zákaznických NT (Network Termination - síťové zakončení)

do FDH (Fiber Distribution Hub - vláknový rozvaděč). Skříň FDH, která obsahuje rozbočovače a propojovací panely, je připojena k centrální kanceláři.[5][6]

- FTTC (Fibre to the Curb - optické přípojky se zakončením ve venkovním rozvaděči) je architektura, ve které je vlákno z centrální kanceláře přivedeno do distribučního bodu, kterým může být například venkovní sloup s krytem, nebo skříň poblíž obytné oblasti. Tyto distribuční body se nacházejí v blízkosti skupiny obytných budov, ale přesto dále, než v případě FTTB. V distribučním bodě je prováděn převod mezi optickými a elektrickými signály a také multiplexování a demultiplexování. Z distribučních bodů jsou pak vedeny metalické kabely k jednotlivým zákazníkům a jejich NT.
- FTTCab (Fibre to the Cabinet - optické přípojky se zakončením ve venkovním rozvaděči) tato architektura je velmi podobná architektuře FTTC, s tím rozdílem, že distribuční bod je umístěn ještě dále od bytových jednotek v pouliční skříni a slouží pro větší množství koncových uživatelů, bytů, domů, než FTTC.

Síťová architektura GPON se skládá z aktivních a pasivních prvků [7][8][9][10]:

- ODN (Optical Distribution Network - optická distribuční síť) je soubor optických přenosových prostředků, které se nacházejí mezi OLT (Optical Line Termination - optické linkové zakončení) a jednotlivými koncovými jednotkami. ODN je tradiční „all passive” síť, neobsahuje tedy žádné aktivní prvky, které vyžadují napájení a řízení, s výjimkou GPON sítě s prodlouženým dosahem, které obsahují zesilovače a regenerátory. Kromě těchto aktivních prvků se ODN sestává z čistě pasivních prvků, kterými jsou optická vlákna, rozbočovače (splitter), optické konektory, spojky, svary, vlnové filtry, optické panely a podobně.
- OAN je sada přístupových prostředků, které sdílejí stejná rozhraní na síťové straně a jsou podporovány optickými přenosovými systémy. OAN může obsahovat několik ODN připojených ke stejnému OLT.
- OLT je aktivní prvek, který je umístěn na straně operátora PON (Passive Optical Network - pasivní optická síť) sítě. OLT poskytuje funkce správy a údržby pro jednotlivé ODN, ONU (Optical Network Unit - optická síťová jednotka) a ONT (Optical Network Termination - optické síťové zakončení). OLT zajišťuje také funkce síťového rozhraní mezi sítěmi telekomunikačních služeb a optickou přístupovou sítí. Toto zařízení řídí signály přenášené v sestupném (Downstream - sestupný směr přenosu) a vzestupném (Upstream - vzestupný směr přenosu) směru. Signál přenášený v sestupném směru, se vysílá do každé koncové jednotky sdílené s vláknem. Signály přenášené ve směru vzestupném jsou kombinovány s použitím protokolů pro více přístupů, a to vždy s časovým dělením pro více přístupů TDMA (Time Division Multiple Access - vícenásobný přístup s časovým dělením). OLT je připojeno k přepínací síti prostřednictvím standardizovaných rozhraní. Na distribuční straně poskytuje optické přístupové

rozhraní přenosové rychlosti, napájecí rozpočet, kolísání zpoždění a podobně.

OLT se skládá ze tří hlavních částí:

- funkce rozhraní servisního portu
 - funkce křížového připojení
 - rozhraní optické distribuční sítě
- ONT je koncová optická jednotka. Jedná se o speciální případ ONU, které zahrnuje funkci uživatelského rozhraní a lze jej považovat za součást vybavení zákazníka. Hlavní úlohou této jednotky je adaptace komunikačních protokolů mezi PON sítí a lokální sítí koncového uživatele. Tato jednotka slouží v podstatě jako opticko-metalický konvertor pro připojení uživatelského zařízení s rozhraním Ethernet.
 - ONU poskytuje přímo, nebo vzdáleně, uživatelské rozhraní OAN a je připojena k ODN. Vzhledem k tomu, že prostřednictvím ONU mohou běžet služby pro více než jednoho zákazníka, můžeme toto zařízení považovat za součást sítě operátora. ONU značí v podstatě obecný název pro koncové zařízení na uživatelské straně PON sítě a zajišťuje velmi podobné funkce jako ONT, ale používá k tomu navazující metalické, nebo bezdrátové sítě a může fungovat pro více zákazníků.

2.1.3 Základní charakteristiky

Standard G.984 z roku 2003 definuje tyto přenosové rychlosti pro přenášení v sestupném a vzestupném směru v rámci GPON.

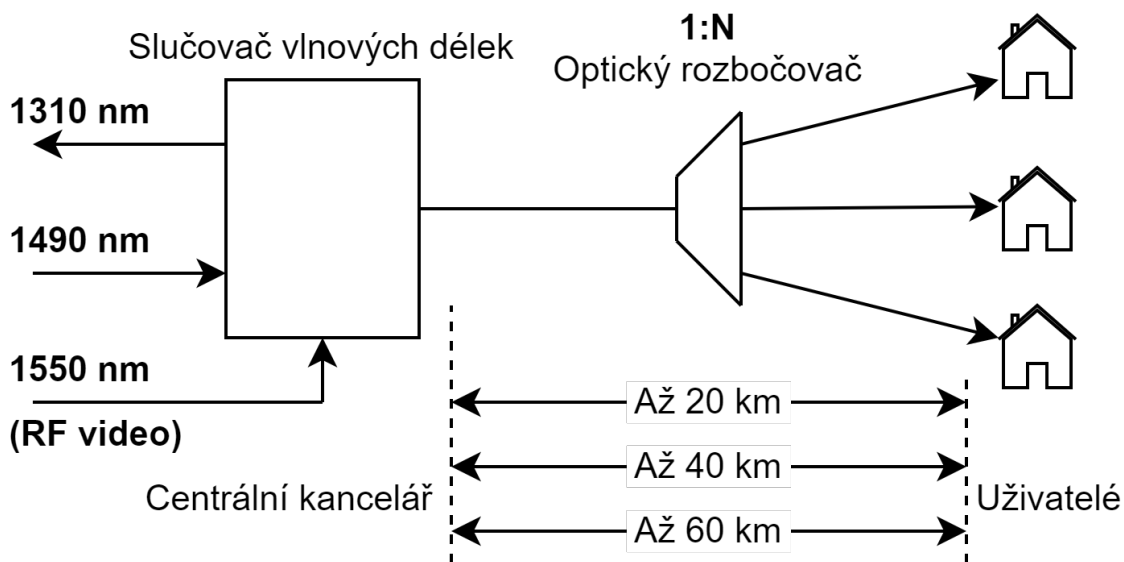
Tabulka 2.1: Bitová rychlost GPON[3]

Směr přenosu	Bitová Rychlost
Sestupný směr	1244,16 Mbit/s
	2488,32 Mbit/s
Vzestupný směr	155,52 Mbit/s
	622,08 Mbit/s
	1244,16 Mbit/s
	2488,32 Mbit/s

Poněvadž 1244,16 Mbit/s pro vzestupný směr se ukázalo jako dostatečná rychlost, nebylo 2488,32 Mbit/s pro vzestupný směr nikdy specifikováno a označuje se jako FFS (for future study - pro budoucí studium). Poskytovatelé pak nejčastěji nabízejí 1,2 Gbit/s ve vzestupném směru a 2,4 Gbit/s ve směru sestupném. [3][9]

V doporučení ITU-T G.984 byla provozní vlnová délka GPON specifikována na pásmo pro vzestupný směr 1260-1360 nm a pásmo pro sestupný směr 1480-1500 nm. Následným příchodem nových variant XG-PON (X Gigabit PON - 10gigabitová PON varianta dle ITU-T G.987) a XGS-PON (X Gigabit Symmetric PON - symetrická 10gigabitová varianta dle ITU-T G.9807) bylo upravováno pásmo pro vzestupný směr GPON na nejprve 1290-1330 nm a následně konečných 1300-1320 nm. Kromě pásem pro vzestupný a sestupný směr může být ještě použit rozsah vlnových délek 1550-1560 nm a to konkrétně pro distribuci RF (Radio Frequency - rádiová frekvence) videa v sestupném směru. Konkrétní používaná vlnová délka je pak pro sestupný směr 1490 nm a pro vzestupný směr 1310 nm.[3][8][9]

Obrázek 2.2 popisuje typickou architekturu GPON sítě. Z centrální kanceláře je vyvedeno optické vlákno do optického rozbočovače, který může mít dělicí poměr od 1:2 až do 1:128. V prvním verzích byl maximální rozbočovací poměr pouze 1:64, ale s rozšířením GPON sítí se navýšil až na 1:128 v rámci jedné ODN. Z optického rozbočovače jsou pak vyvedeny jednovláknová vlákna ke každému uživateli.[3][11][12]



Obrázek 2.2: Typická architektura GPON[3]

Během prvních doporučení byl maximální fyzický dosah stanoven na 20 kilometrů. Následně byl však tento dosah navýšen v rámci doporučení G.984.6 a G.984.7 prvně na 40 kilometrů a pak až na konečných 60 kilometrů. Zároveň je nutné dodat, že rozdíl, mezi jednotlivými koncovými jednotkami nesmí být větší, než 20 kilometrů.[3][11][12]

2.1.4 Funkce

2.1.4.1 Opravné kódování

FEC (Forward Error Correction - typ oprávněného kódování) je matematická technika zpracování signálů, která je používána transportní vrstvou v komunikačních systémech a je založena na přenosu dat v kódovaném tvaru. Kódování zavádí redundanci, která umožňuje dekodéru detekovat a opravovat chyby přenosu. Použitím tohoto kódování lze dosáhnout přenosu dat s nízkou chybovostí a je zabráněno opakovaným přenosům. FEC pomáhá zvýšit útlumovou bilanci o přibližně 3 až 4 dB. Proto může být podporována vyšší bitová rychlost a delší vzdálenost od OLT k ONT a také vyšší počet rozdělení v rámci rozbočovače. FEC je založeno na Reed-Solomonovu kódování, což je blokový kód, který přebírá datový blok konstantní velikosti a na konci přidává další paritní bajty, čímž vytváří kódované slovo. Pomocí těchto přidávaných bajtů zpracovává dekodér FEC datový proud, ve kterém zjistí a opraví chyby, případně obnoví původní data. Nejběžnějším Reed-Solomonovým kódem je RS(255,239), ve kterém se 255 bajtové kódové slovo skládá z 239 datových bajtů a 16 paritních bajtů. Při použití tohoto typu opravného kódování lze zpracovat data, i když druhá strana nepodporuje FEC, stačí proto ignorovat paritní bajty a původních 239 bajtů zpracovat. Toto kódování je v GPON implementováno pro oba směry provozu, tedy sestupný, i vzestupný.[8]

2.1.4.2 Bezpečnost

Jednou ze základních funkcí GPON je, že data v sestupném směru jsou vysílána broadcastem (vše-směrový síťový provoz) do všech ONT. Každá koncová jednotka má pak přidělený čas, kdy přijímá data, v rámci této funkce by mohl nějaký uživatel přeprogramovat své ONT a zachytit všechna sestupně vysílaná data patřící ke všem ONT připojeným k danému OLT. Ve vzestupném směru používá GPON spojení typu point-to-point, takže je všechen provoz zabezpečený před odposlechem. Doporučení GPON G.984.3 tedy popisuje použití mechanismu zabezpečení informací k zajištění toho, aby uživatelé měli přístup pouze k datům, které jsou pro ně určeny. V rámci tohoto zabezpečení se používá šifrovací algoritmus AES (Advanced Encryption Standard - druh symetrické blokované šifry). AES je schopen přijímat 128, 192 a 256 bitové klíče, kterými je pak zabezpečena komunikace proti odposlouchávání. Tento klíč se pak pravidelně mění bez jakéhokoliv narušení toku dat, pro zvýšení bezpečnosti.[3][8]

2.1.4.3 Metoda dynamického přidělování přenosové kapacity

DBA (Dynamic Bandwidth Allocation - metoda dynamického přidělování přenosové kapacity) je proces, kterým OLT přerozděluje možnosti provozu jednotlivých ONT jednotek ve vzestupném směru na základě dynamické indikace stavu jejich aktivity. Tato indikace stavu aktivity může být buď explicitní prostřednictvím hlášení stavu vyrovnávací paměti, nebo implicitní prostřednictvím přenosu nečinných rámců GEM. Ve srovnání se statickým přiřazením přenosové kapacity zlepšuje

mechanismus DBA využití vzestupné přenosové kapacity tím, že adaptivně reaguje na narušení provozu ONT. Praktickou výhodou je, že operátoři sítě mohou přidat více zákazníků do PON sítě z důvodu efektivnějšího využití šířky pásma.[3][8]

V závislosti stavu obsazenosti vyrovnávací paměti ONT rozlišujeme dvě metody DBA [8]:

- SR-DBA (Status Reporting DBA - varianta DBA se zasíláním informací o aktuálním stavu jednotky), které je založeno zprávách osazení vyrovnávací paměti, které jsou vyžádány OLT a odeslány z ONU.
- TM-DBA (Traffic Monitoring DBA - varianta DBA s monitorováním provozu jednotky) je založeno na pozorování nečinných GEM rámců a jejich porovnávání s odpovídajícími mapovanou přenosovou kapacitou.

OLT by mělo podporovat kombinaci těchto metod TM a SR DBA a být schopno na stejné PON efektivně vykonávat funkce DBA v rámci jednotlivých ONT.[3][8]

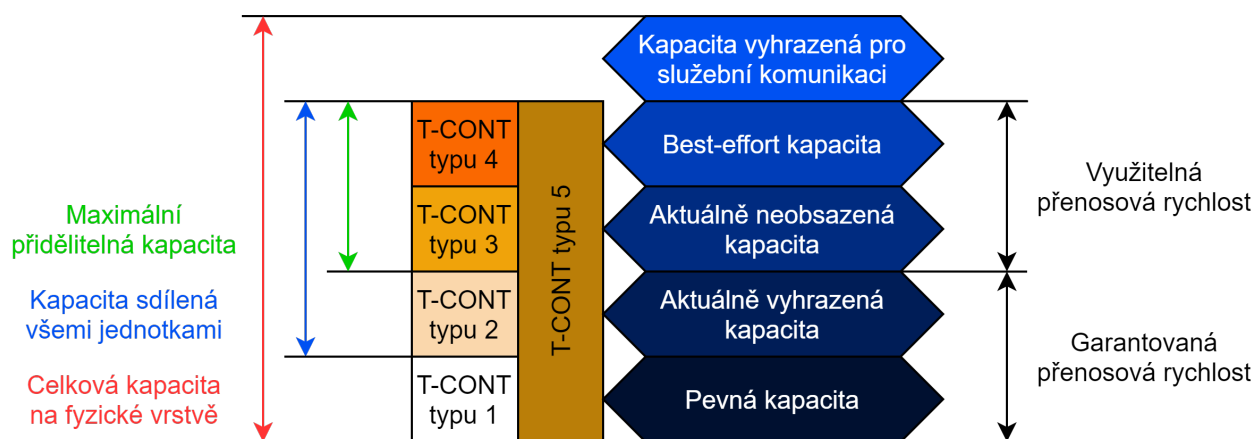
2.1.4.4 Přenosové kontejnery

T-CONT (Transmission Container - označení datového rámce ve směru vzestupném v GPON) je objekt ONT představující skupinu logických připojení, která se objevují jako jedna entita pro účely přiřazení šířky pásma na PON. Pro každé jednotlivé ONT je počet podporovaných přenosových kontejnerů pevně daný. ONT vytváří všechny podporované instance T-CONT během své aktivace, nebo při resetu OMCI (Optical Network Unit Management and Control Interface - rozhraní pro řízení a správu optických jednotek v síti GPON). OLT používá OMCC (Optical Network Unit Management and Control Channel - komunikační kanál v GPON vyhrazený pro přenos služebních zpráv) k určení počtu instancí T-CONT podporovaných daným ONT a k následné správě těchto T-CONT. Pro přenášení vzestupného uživatelského provozu musí OLT vytvořit mapování mezi instancí T-CONT a Alloc-ID (Allocation Identifier - identifikátor vyhrazených vysílacích okamžiků v GPON, XG-PON a dále), které bylo dříve přiřazeno danému ONT prostřednictvím kanálu pro zasílání zpráv PLOAM (Physical Layer Operations and Maintenance - označení služebních ATM buněk pro řízení a správu v ITU-T sítích PON). Mapování T-CONT na Alloc-ID se provádí také pomocí OMCC. Jakékoliv Alloc-ID přiřazené ONT, včetně výchozího Alloc-ID, lze přiřadit maximálně k jednomu uživatelskému provozu T-CONT. Pokud se OLT pokusí namapovat více než jeden uživatelský provoz T-CONT na Alloc-ID, ONT odmítne druhé mapování chybovou zprávou.[3][8]

Typy T-CONT dle přidělované kapacity [3][8]:

- T-CONT typu 1 se vyznačuje především pevně přiřazenou přenosovou kapacitou a není přizpůsoben na sdílení přebytečné přenosové kapacity. Je vhodný k přenosu provozu s pevně danou přenosovou rychlostí a k přenosu služeb, které jsou citlivé na zpoždění a kolísání zpoždění, například VoIP (Voice Over IP - telefonie v IP sítích).

- T-CONT typu 2 je specifický svou garantovanou přenosovou kapacitou a také není přizpůsoben na sdílení přebytečné přenosové kapacity. Je vhodný pro provoz typu on-off s předem definovanou rychlostí, která nemá velké požadavky na zpoždění a kolísání zpoždění.
- T-CONT typu 3 zajišťuje přenosovou kapacitu, která nebyla pevně vyhrazena a může se podílet na sdílení nezajištěné přenosové kapacity. Používá se pro přenos nárazového provozu, který vyžaduje záruku průměrné přenosové rychlosti.
- T-CONT typu 4 je charakterizován tím, že dokáže sdílet přenosovou kapacitu a je určen pro přenos v rámci best-effort (metoda přenosu datových jednotek bez garance doručení) provozu. Je vhodný pro přenos nárazového provozu s proměnnou rychlostí, který není citlivý na zpoždění a ztrátovost.
- T-CONT typu 5 je univerzální sloučení všech předchozích typů T-CONT. Lze jej použít na většinu obecných provozních datových toků.



Obrázek 2.3: Rozložení tříd a rámců T-CONT dle využití kapacity na sdíleném médiu[9]

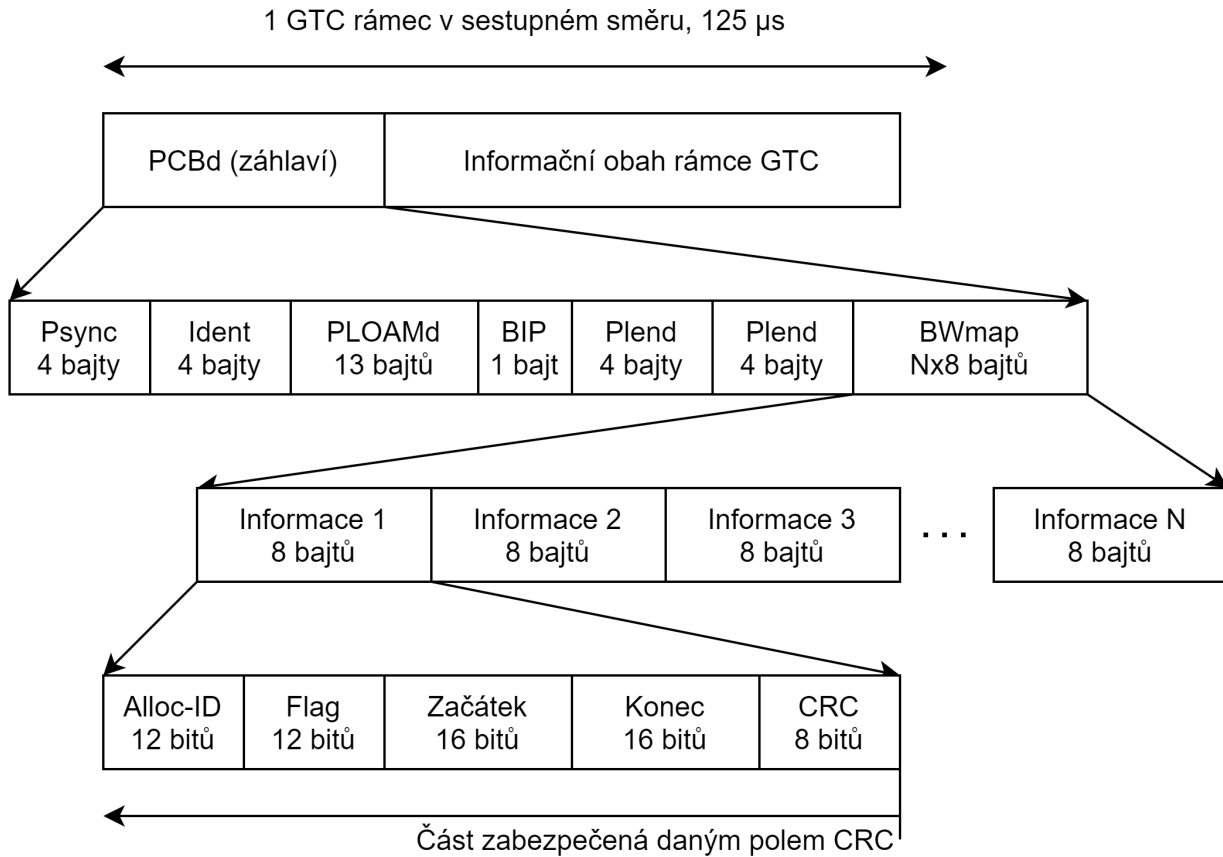
Koncept přenosových kontejnerů je zaveden z důvodu zjednodušení odkazování na jednotlivé deskriptory provozu Alloc-ID. Hodnota typu T-CONT není kódována a není zobrazena na PON rozhraní. Systém GPON zpracovává Alloc-ID na základě zřízených parametrů deskriptoru provozu a ne na základě typu T-CONT.[3][8]

2.1.5 Přenosové vlastnosti

GTC (GPON Transmission Convergence - adaptační podvrstva ve vrstevném modelu GPON) je adaptační podvrstva, která je umístěna mezi PMD (Physical Medium Dependent - podvrstva fyzické vrstvy ATM) vrstvy a klienty GPON. Tato podvrstva je schopna fragmentovat a defragmentovat uživatelské data pomocí GPON zapouzdřovací metody GEM.[8]

2.1.5.1 Formát rámců GTC ve směru sestupném

Každý GTC rámec ve směru sestupném má délku 125 μ s. Jeho velikost pak závisí na přenosové rychlosti v sestupném směru. Pro 2,48832 Gbit/s má rámec velikost 38880 bajtů, v případě rychlosti 1,24416 Gbit/s má rámec polovinu velikosti a tedy 19940 bajtů.[8]



Obrázek 2.4: Formát rámce GTC v sestupném směru[8][9]

Jednotlivá pole rámce GTC v sestupném směru [8][9]:

- PCBd (Physical Control Block downstream - označení služebního záhlaví GTC rámců ve směru sestupném) je záhlaví GTC rámce v sestupném směru, které obsahuje několik dalších polí, které budou popsány níže. OLT vysílá PCBd broadcastem a každá ONT jednotka přijímá celé PCBd záhlaví a dle příslušných informací obsažených v jednotlivých polích jedná. Toto záhlaví nemá pevně definovanou velikost.
- Psync je pevné 32 bitové pole, kterým začíná každé záhlaví PCBd. ONT jednotky dle tohoto pole určují, kde je začátek dalšího rámce. Toto pole není zakódováno.
- Ident je 32 bitové pole, které se používá k označení jednotlivých GTC rámců. Toto pole se dále dělí na tři části:

- FEC Ind značí, zda se v tomto směru využívá FEC. Je to první bit v rámci pole Ident.
 - Rezerva je jednobitové pole, které prozatím není využito. Tento bit je druhý v poli Ident.
 - Čítač GTC rámců (Superframe counter) je zbývajících 30 bitů sloužících k označování jednotlivých GTC rámců v sestupném směru, při každém GTC rámcu je zvýšena hodnota tohoto pole a při dosažení maximální hodnoty se čítač nastaví na hodnotu 0.
- PLOAM podporuje funkce správy vrstev PON, včetně aktivace ONT, založení OMCC, konfigurace šifrování, správy klíčů a signalizace alarmů. Toto pole má 13 bajtů.
 - BIP je 8 bitové paritní pole. Příjímač počítá bitovou paritu na všech bajtech přijatých od posledního BIP, s výjimkou parity FEC a po provedení korekce FEC svůj výsledek porovná s vyslaným BIP, čímž určí počet chyb.
 - Plend je pole, které určuje délku následující části BWmap. Toto pole se posílá dvakrát, aby nedošlo k zbytečným chybám. Koncové jednotky pak využívají to pole, které má méně chybných bitů, nejlépe bezchybné. 4 bajty tohoto pole se dělí na:
 - Blen, což je prvních 12 bitů, které omezuje počet alokací, které je možné udělat v jakémkoliv časovém období 125 μ s, na 4095. Skutečná délka pole BWmap je pak 8·Blen bajtů.
 - Alen je následujících 12 bitů, které by měly obsahovat pouze nuly, poněvadž se přenos skrze ATM buňky v praxi již nepoužívá.
 - Posledních 8 bitů pole Plend se skládá z CRC-8 (Cyclic Redundancy Check - cyklický kód, metoda detekce a korekce chyb), které poskytuje zabezpečení předešlých polí pomocí detekce a případné korekce chybných bitů.
 - BWmap je pole 8 bajtových alokačních struktur. Každá položka v tomto poli představuje alokaci jedné přenosové kapacity konkrétnímu T-CONT. Délka BWmap byla uvedena v poli Plend. OLT je povinné přenášet všechny BWmap na jednotlivé ONT ve vzestupném pořadí podle času zahájení vysílání. Jednotky ONT by měly být schopny podporovat až 8 alokačních struktur v každé jednotlivé BWmap a volitelně i více. Maximální omezení velikosti BWmap v rámci ONT by mělo být alespoň 256 alokačních struktur, přičemž jsou volitelně podporovány i větší BWmap. Každé jednotlivé 8 bajtové pole v rámci BWmap se skládá z:
 - Alloc-ID, které obsahuje 12 bitové číslo, které označuje příjemce přidělené přenosové kapacity, neboli konkrétní T-CONT nebo OMCC ve vzestupném směru v rámci ONT. Toto 12 bitové pole je obecně nestrukturované, ale platí zde pár konvencí. Nejprve se používá nejnižších 254 hodnot ID. První Alloc-ID dané ONT se označuje jako výchozí ID a je stejné jako číslo ONU-ID (ONU Identifier - identifikátor koncové jednotky ONU, ONT v síti GPON, XG-PON a dalších) používané v PLOAM zprávách. Pokud jsou třeba

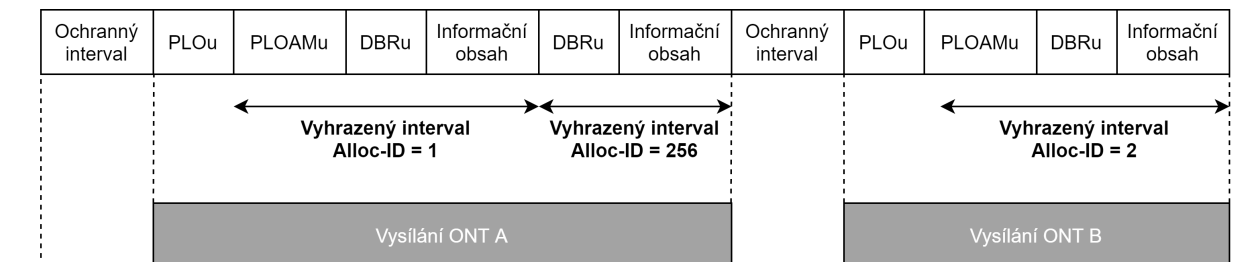
další hodnoty Alloc-ID, měly by být následně převzaty z hodnot nad 255. Alloc-ID = 254 je aktivační Alloc-ID ONT a Alloc-ID = 255 je nepřirazené a používá se k označení, že žádný T-CONT nemůže být použit.

- Flag je 12 bitové pole, které obsahuje 4 samostatné zprávy, dle kterých se mohou řídit určité funkce přidruženého provozu ve vzestupném směru. Jedná se o ovlivnění používání FEC, odeslání PLOAMu, nebo odeslání DBRu (Dynamic Bandwidth Report upstream - zpráva o dynamické šířce pásma ve vzestupném směru).
- Začátek intervalu je 16 bitové číslo, které označuje začátek vyhrazeného intervalu ve kterém je možné odeslat ve směru vzestupném uživatelské data, či záhlaví.
- Konec intervalu je také 16 bitové číslo, které označuje konec tohoto vyhrazeného intervalu.
- CRC je 8 bitové pole, které zabezpečuje celé 8 bajtové pole BWmap.

Okamžitě po poslední sekci pole BWmap následuje informační obsah rámce GTC. Tato sekce může obsahovat více GEM rámců. Délka informačního obsahu rámce GTC se rovná délce rámce GTC po odečtení délky bloku PCBd. Tok rámce GEM je filtrován v ONT na základě 12 bitového pole Port-ID (identifikátor spojení v sítích GPON, XG-PON a dalších) obsaženého v záhlaví každého rámce GEM. Každá ONT jednotka je nakonfigurována tak, aby rozpoznala, která Port-ID k ní patří a rámce GEM, které patří do ONT jsou předávány klientskému procesu GEM.[8]

2.1.5.2 Formát rámců GTC ve směru vzestupném

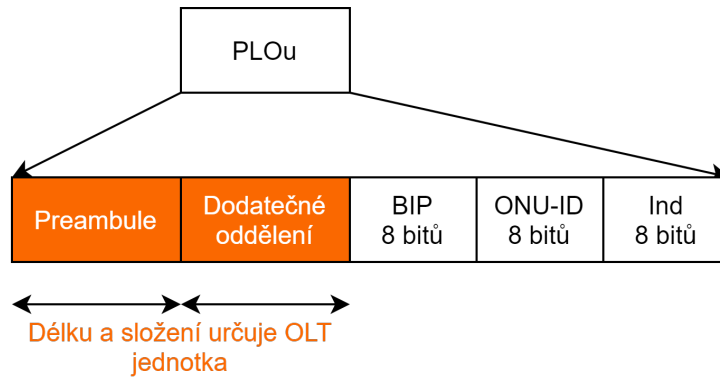
Délka trvání jednotlivých GTC rámců ve směru vzestupném je taktéž 125 μ s. Velikost tohoto rámce v systému GPON s rychlostí 1,24416 Gbit/s je 19440 bajtů. Každý rámeček ve vzestupném směru obsahuje řadu přenosových burstů (burst - dávka (dávkový provoz), opak kontinuálního režimu) pocházejících z jedné nebo více ONT jednotek. Každý burst ve vzestupném směru obsahuje záhlaví PLOu (Physical Layer Overhead - režie fyzické vrstvy) a následně OLT jednotka v poli Flag v části BWmap určí, zda chce po ONT jednotce zaslat celé záhlaví PLOAMu, nebo zkrácené záhlaví DBRu. OLT by mělo požadovat poslání celého záhlaví PLOAMu pouze v alokačních intervalech, kde je Alloc-ID v rozmezí 0-253. Při Alloc-ID 256-4095 se obvykle po ONT jednotce nevyžaduje zaslání celého záhlaví PLOAMu, ale stačí pouze zkrácené záhlaví DBRu.[8][9]



Obrázek 2.5: Formát rámce GTC ve vzestupném směru[8][9]

Jednotlivá pole rámce GTC ve vzestupném směru [8][9]:

- PLOu záhlaví se odesílá na začátku každého přenosového burstu ONT. Dále obsahuje tato pole:
 - Preamble je bitová posloupnost, dle které OLT jednotka určuje správnou identifikaci každého začátku nového GTC rámce.
 - Dodatečné oddělení je pomocné pole sloužící pro oddělení rámců vysílaných ve vzestupném směru od ONT jednotek.
 - BIP je 8 bitové pole, které obsahuje bitovou paritu všech bajtů přenášených od určité ONT jednotky od posledního BIP pole kromě bajtů preamble, dodatečného oddělení a FEC.
 - ONU-ID je také 8 bitové pole, které obsahuje jedinečný ONU-ID identifikátor jednotlivých koncových jednotek ONU, ONT, které odesílají tento daný přenos. Před přiřazením ONU-ID zapisuje každá ONT jednotka do tohoto pole hodnotu 255, která značí nepřirazenost. OLT pak porovnává tuto hodnotu se svými alokačními záznamy a zjišťuje, zda vysílá správná ONT jednotka.
 - Ind poskytuje zprávy adresované OLT, které obsahují informace o stavu ONT v reálném čase.
- PLOAMu je záhlaví, které má 13 bajtů a obsahuje tyto pole:
 - ONU-ID - 1 bajt
 - Message-ID (Identifikátor zprávy) - 1 bajt
 - Obsah vlastní zprávy - 10 bajtů
 - CRC - 1 bajt
- DBRu je typ záhlaví, které obsahuje pouze DBA a CRC. Odesílá se když jsou nastaveny konkrétní příznaky v příslušné alokační struktuře rámce BWmap.

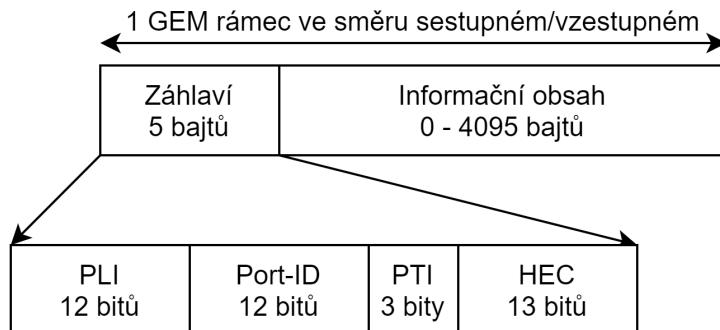


Obrázek 2.6: Záhlaví PLOu[8][9]

2.1.5.3 Formát GEM rámců

Formát GEM rámců tvoří tato pole [8]:

- PLI je 12 bitové pole, které udává celkovou velikost L informační části GEM rámců. Celková velikost 12 bitů, umožňuje poslat až 4095 bajtů, tedy maximální velikost informační části GEM rámce. Pokud má být maximální velikost větší než 4095 bajtů, je nutné informační část rozdělit neboli fragmentovat.
- Port-ID se používá k poskytování 4096 jedinečných identifikátorů provozu na PON za účelem poskytování multiplexování provozu.
- PTI (Payload Type Indicator - identifikátor obsahu ATM buňky) je 3 bitové pole, které slouží k označení typu obsahu GEM rámce.
- HEC poskytuje funkce detekce chyb a zabezpečení záhlaví.



Obrázek 2.7: Formát rámce GEM a jeho záhlaví[8]

2.1.6 Útlumová bilance

Kromě již dosud známých útlumových tříd A, B a C byly definovány dvě nejnovější útlumové třídy B+ a C+, které vyplňují prostor mezi třídami B a C a zároveň navyšují hodnoty minimálního a maximálního překlenutelného útlumu. V rámci maximálního fyzického dosahu a maximální rozdílové vzdálenosti mezi jednotlivými ONT to pak znamená, že třída B+ dosahuje až 40 km při maximální rozdílové vzdálenosti 40 km a třída C+ dosahuje až 60 km, při maximální rozdílové vzdálenosti 40 km.[9][13]

Na obrázku můžeme vidět zobrazení jednotlivých útlumových tříd PON variant.

Útlumová třída $A_{\min} - A_{\max}$	Podporované varianty PON		
Třída A: 5-15 dB	APON	BPON	GPON
Třída B: 10-25 dB			
Třída C: 15-30 dB			
Třída B+: 13-28 dB			
Třída C+: 17-32 dB			
Typ 1: 5-20 (19,5) dB	EPON		
Typ 2: 10-24 (23,5) dB	EPON		
PR10, PRX10: 5-20 dB	10GEPON		
PR20, PRX20: 10-24 dB	10GEPON		
PR30, PRX30: 15-29 dB	10GEPON		
Základní 1: 14-29 dB	XG-PON		
Základní 2: 16-31 dB	XG-PON		
Rozšířená 1: 18-33 dB	XG-PON		
Rozšířená 2: 20-35 dB	XG-PON		

Obrázek 2.8: Útlumové třídy PON variant[41]

2.2 XG-PON

Základním požadavkem XG-PON je nabídnout vyšší kapacity než u GPON a zároveň maximalizovat opětovné použití protokolů, komponent a infrastruktury. XG-PON se následně dělí na dvě varianty s odlišným přístupem. NG-PON1 (Next-Generation Passive Optical Network 1 - označení vývojového směru sítí PON v rámci standardizace ITU-T) je skupina sítí, jejímž hlavním úkolem

bylo zachovat zpětnou kompatibilitu s variantou GPON a zároveň rozšířit kapacitu sítí. Oproti tomu NG-PON2 (Next-Generation Passive Optical Network 2 - označení vývojového směru sítí PON v rámci standardizace ITU-T) je skupina sítí, která není vázána na zpětnou kompatibilitu, ale především na vývoj vyšší kapacity. Tato varianta by měla představovat první hybridní PON síť, která kombinuje časové i vlnové multiplexování, tedy TWDM PON (Time Wavelength Division PON - označení koncepce hybridních WDM-TDM PON sítí, které kombinují aplikaci WDM multiplexování a časového sdílení TDM (Time Division Multiplex - časové dělení (multiplex))).[9][14]

2.2.1 NG-PON1

NG-PON1 byla schválena v doporučení ITU-T G.987. U této varianty byl použit protokol XGEM (XG-PON Encapsulation Mode - přenosový protokol ve variantě XG-PON a dalších) a využívá skramblovaný NRZ (Non Return to Zero - typ linkového kódu bez návratu k nule) linkový kód. Maximální přenosová rychlost ve směru vzestupném je 2.48832 Gbit/s a maximální přenosová rychlost ve směru sestupném je 9,95328 Gbit/s. Pro koexistenci s GPON v obou směrech se využívá odlišné pásmo vlnových délek a tedy pro vzestupný směr 1260-1280 nm a pro sestupný směr 1575-1580 nm. Základní rozsah překlenutelné vzdálenosti je 20 km, ale jako v případě GPON byl tento rozsah navýšen na 40, nebo 60 km. Základní maximální počet koncových uživatelů je 64, ale taktéž byl později navýšen na 128 nebo až 256.[9][15]

2.2.2 XGS-PON

XGS-PON, neboli symetrická varianta NG-PON1 je dána doporučením ITU-T G.9807. Její základní vlastností, kterou se liší od varianty NG-PON1 je maximální přenosová rychlost ve směru vzestupném až 9,95328 Gbit/s. Tato varianta kombinuje veškeré doposud standardizované ITU-T PON varianty a mělo by se jednat o univerzální TDM PON síť, její úkolem je převzít a nahradit většinu nynějších variant FTTx přípojek. Dalším rozdílem této varianty je, že využívá dvě pásma pro vzestupný i sestupný směr. První pásmo je totožné s variantou NG-PON1 a označuje se jako základní. Druhé pásmo je označováno jako volitelné a jedná se o 1300-1320 nm pro vzestupný směr a 1480-1500 pro sestupný směr. Volitelné pásmo je zde z důvodu koexistence NG-PON1 a XGS-PON u jednoho operátora.[9][16]

2.2.3 NG-PON2

NG-PON2 je první řešení WDM-PON sítě, které je popsáno v doporučení ITU-T G.989. Hlavním rozdílem této varianty je, že není zpětně kompatibilní s žádnou předešlou variantou, přesto ale umožňuje koexistenci, protože využívá jiné pásma vlnových délek. Základními vlastnostmi této varianty jsou, že používá XGEM jako přenosový protokol a skramblovaný NRZ linkový kód. Rozdílem oproti ostatním variantám je zde možnost využití 4 vlnových délek WDM (Wavelength Division Multiplex - vlnové dělení (multiplex)) pro vzestupný i sestupný směr. doporučení G.989 však počítá s využitím

až 8 vlnových délek, tedy v budoucnu se očekává zvýšení. Jednotlivé pásma pro vzestupný směr jsou pak 1524-1544 nm nebo 1528-1540 nm nebo 1532-1540 a pro sestupný směr je to pásmo 1596-1603 nm. Pro každou vlnovou délku je pak maximální přenosová rychlost ve vzestupném i sestupném směru 2,48832 nebo 9,95328 Gbit/s, s tím, že u vzestupného směru lze využít obě tyto rychlosti zároveň, takzvaný dvourychlostní režim. Sestupný směr nepodporuje tento dvourychlostní režim, takže musí být rychlost pevně dána. Šířky kanálu ve vzestupném směru jsou pro NG-PON2 200, 100 a 50 GHz a pro sestupný směr pouze 100 GHz. Maximální počet koncových uživatelů by měl být dle útlumových tříd až 256 ONT jednotek, tedy rozbočovací poměr 1:256. Maximální fyzický dosah pak je 40 km a logický až 60 km.[9][17]

Kapitola 3

Digitální účastnické přípojky

DSL (Digital Subscriber Line - digitální účastnická přípojka) je skupina přístupových technologií, které využívají telefonní linku k poskytování služeb širokopásmového přístupu. Zatímco zvukový signál, neboli hlas, přenášený telefonním systémem se pohybuje v rozmezí 300 až 3400 Hz, kroucená dvoulinka spojující uživatele s ústřednou je schopna přenášet mnohem vyšší frekvence. V závislosti na délce a kvalitě kroucené dvoulinky může horní hranice dosahovat až desítek MHz. DSL využívá této nevyužitě šířky pásma a přenáší data pomocí více frekvenčních kanálů. Některé typy DSL tedy umožňují současné používání telefonu a širokopásmového přístupu na stejném krouceném páru. Princip fungování spočívá v tom, že v ústředně se nachází DSLAM (Digital Subscriber Line Access Multiplexer - digitální účastnický multiplexor), který posílá data jednotlivým uživatelům skrze kanály v sestupném směru. Na straně uživatele se nachází DSL modem, který funguje jako modulátor/demodulátor. Tento DSL modem přijímá data od jednotky DSLAM a zároveň moduluje data pro přenos ve vzestupném směru.[18]

3.1 ADSL

ADSL (Asymmetric Digital Subscriber Line - asymetrická digitální účastnická přípojka) je varianta DSL s asymetrickým přenosem. Typický poměr asymetrie provozu je přibližně 2:1 až 3:1 a tedy ADSL je velmi oblíbená volba pro širokopásmový přístup. Vzhledem k tomu, že signál ve vzestupném směru je slabý na zašuměném konci DSLAM jednotky, technicky dává smysl mít nižší bitovou rychlost pro přenos ve vzestupném směru, než v sestupném. V závislosti na délce a kvalitě, jako je například SNR (Signal-to-Noise Ratio - odstup (poměr) výkonu signálu od výkonu šumu) kroucené dvoulinky může být přenosová rychlost v sestupném směru až desetkrát vyšší než přenosová rychlost ve vzestupném směru. Maximální dosah ADSL je 5500 metrů. Zatímco ADSL1 může podporovat přenosovou rychlost v sestupném směru až 8Mb/s a přenosovou rychlost ve vzestupném směru až 896 kb/s. Rozšířením základní ADSL1 bylo ADSL2, které podporuje až 15 Mb/s v sestupném směru

a ve směru vzestupném až 3,8 Mb/s. V tomto rozšíření je zachován maximální dosah, který je tedy opět 5500 metrů.[18]

3.2 VDSL

VDSL (Very High Speed Digital Subscriber Line - vysokorychlostní digitální účastnická přípojka) je standard, který byl vyvinut pro podporu vyšších přenosových rychlostí. Tento standard může dosahovat rychlostí až 50 Mb/s pro sestupný směr a 30 Mb/s pro vzestupný směr, bohužel je zde omezený maximální dosah, kvůli kterému je možné dosáhnout těchto vyšších přenosových rychlostí a ten je u VDSL1 omezen na 1500 metrů.[18]

3.3 VDSL2

VDSL2 (Very High Speed Digital Subscriber Line 2 - vysokorychlostní digitální účastnická přípojka 2. generace) má zlepšit stávající technologii VDSL za účelem podpory širokého nasazení triple play (pojmenování kombinace tří komunikačních služeb - televize, internet a hlasových služeb) služeb, jako jsou hlas, video, data a HDTV. VDSL2 je spektrálně kompatibilní se stávajícími službami a umožňuje tak multimodální provoz se službou ADSL a ADSL2. VDSL2 lze nasadit z centrálních kanceláří, z rozvaděčů s napájením v blízkosti objektů zákazníka, nebo v budovách na krátké vzdálenosti. Profil 17a může podporovat přenos ve vzestupném i sestupném směru s rychlostí až 100 Mbit/s skrze kroucené dvoulinky. VDSL2 používá modulaci DMT (Discrete MultiTone Modulation - modulace s více nosnými MCM pro přenos digitálních dat) pro komunikaci po jednotlivých drátech. Modulace DMT rozděluje frekvenčně selektivní kanál na mnoho úzkopásmových dílčích kanálů a každý dílčí kanál může přenášet maximálně 15bitů/Hz s kanálovým rozestupem 4,3125 kHz.[19]

V doporučení ITU-T G.993.2 má VDSL2 širokou škálu nastavení pro různé parametry, jako je šířka pásma a výkon vysílače, které by mohly být potenciálně podporovány vysílačem. Existuje devět profilů pro VDSL2, které jsou 8a, 8b, 8c, 8d, 12a, 12b, 17a, 30a a nejnovější 35b. Níže v tabulce můžeme vidět jednotlivé parametry profilů:

Tabulka 3.1: Parametry VDSL2 profilů[19]

VDSL2 profily	Maximální provozní frekvence [MHz]	Frekvenční rozestupy [kHz]	Vysílací výkon [dBm]	Počet kanálů
8a	8,8320	4,3125	+17,5	2048
8b	8,8320	4,3125	+20,5	2048
8c	8,5000	4,3125	+11,5	1972
8d	8,8320	4,3125	+14,5	2048
12a	12,000	4,3125	+14,5	1783
12b	12,000	4,3125	+14,5	1783
17a	17,664	4,3125	+14,5	4096
30a	30,000	8,86250	+14,5	3479
35b	35,324	4,3125	+17,0	8192

Možnost nastavení více profilů umožňuje výrobcům zařízení řídit složitost implementace a také aplikovat specifické cílové požadavky na služby podle poskytovatele služeb. Vysílač VDSL2 musí splňovat alespoň jeden z výše uvedených profilů a zároveň podporovat alespoň jednu ze tří příloh (A, B nebo C) dostupných ve standardu ITU-T, který poskytuje specifické plány pásem podle požadavků regionů. Příloha A je určena pro Severní Ameriku, příloha B pro Evropu a příloha C pro Japonsko.[19]

3.4 Problémy v DSL

Přes schopnost poskytovat vysoké přenosové rychlosti existují důležité faktory, které omezují rychlost přenosu dat v technologii DSL. Je to například šum, vzdálenost a kvalita měděného kabelu. Při přenosu dat existuje mnoho typů šumu, ale pokud jde o kroucenou dvoulinku, šum je vždy spojen s přeslechy. Tento scénář nastane, když jsou páry blízko sebe ve svazku kabelů. Rychlost přenosu dat klesne, protože zvýšený šum sníží kapacitu kanálu a protože kapacita kanálu je omezena, SNR nebude dostatečný k tomu, aby takový komunikační systém mohl přenášet větší šířku pásma. Přeslechy měřené v decibelech nastávají, když signál přenášený vodičem ve svazku kabelů indukuje magnetické pole, které také indukuje elektrický proud do sousedního vodiče. Přeslechy mezi kabely nabývají náhodných hodnot, protože v běžné praxi jsou kroucené páry uvnitř svazku rozmístěny náhodně.[20]

3.4.1 FEXT

FEXT (Far-end crosstalk - přeslech na vzdáleném konci), neboli přeslech na vzdáleném konci znamená, že rušení, nebo vazba mezi vysílačem a přijímačem je na opačném konci páru.[20]

3.4.2 NEXT

NEXT (Near-end crosstalk - přeslech na blízkém konci), neboli přeslech na blízkém konci je rušení mezi vysílačem a přijímačem na stejném konci páru.[20]

3.4.3 Vectoring

Vektorování je přenosová metoda, která využívá koordinaci linkových signálů pro snížení úrovně přeslechů a zlepšení výkonu. Stupeň zlepšení závisí na charakteristikách kanálu. Vektorování může sloužit ve prospěch jednoho nebo více uživatelů. Tato metoda je specificky omezena na zrušení přeslechu FEXT v sestupném a vzestupném směru. Toto zrušení probíhá mezi velmi vysokobitovými digitálními přijímači VDSL2 linek, ne nutně stejného profilu.

Techniky rušení vlastního FEXT jsou zvláště přínosné u krátkých délek kabelů (< 1 km) a při omezeném přeslechu NEXT, hluku pozadí a FEXT ze systémů, které nejsou součástí vektorové skupiny (cizí hluk). Úroveň zdrojů hluku bez vlastního FEXT v poměru ke zdrojům vlastního FEXT určuje stupeň, do kterého může snížení vlastního FEXT zlepšit výkon. Dalším významným faktorem je stupeň, do kterého má systém rušení vlastního FEXT přístup k rušivým párům kabelu. Maximálních zisků je dosaženo, pokud má systém rušení vlastního FEXT přístup ke všem párům kabelu, který přenáší širokopásmové signály. U vícepárových kabelů jsou významné zisky možné, pokud systém rušení vlastního FEXT má přístup ke všem párům skupiny, ve kterých je nasazen, a má schopnost zrušit alespoň většinu dominantních FEXT rušivých párů v rámci pořadače.[21]

3.4.4 Bonding

xDSL bonding funguje na principu zdvojení metalických vedení do jednoho. S využitím této metody lze začít využívat až dvojnásobnou přenosovou rychlost v koncových domácnostech. Toto zdvojené metalické vedení se musí sloučit v zařízení od poskytovatele internetu. Je to technické řešení, které nabízí vyšší přenosové rychlosti stávajícím zákazníkům, kteří mají bonding dostupný.[22]

Kapitola 4

Optické zesilovače

Optické zesilovače jsou aktivními prvky, které přímo nepatří do PON sítí, ale s vývojem rozšíření dosahu u jednotlivých GPON sítí je nutné tyto aktivní prvky využívat. Jak signály cestují v optických komunikačních systémech, jsou zeslabovány vlastnostmi optických vláken a po určité vzdálenosti mohou být příliš slabé, na to, aby byly detekovány. Jedním z možných způsobů, jak se této situaci vyhnout, je použití optických zesilovačů. Optické zesilovače mohou především zvýšit amplitudu jednotlivých signálů a tedy učinit tak signál lépe detekovatelný na koncových detektorech. Optický zesilovač je optické zařízení pro zesilování signálů šířících se několika kanály v optickém vláknu pro kompenzaci jejich ztráty během šíření. Výhodou optických zesilovačů je rovněž to, že nepřevádí signál na elektrický a pak zase zpátky, ale zesilují amplitudu rovnou v rámci optického signálu.[23]

Zesilovače dělíme dle způsobu použití a umístění v optických trasách na [9][23]:

- Mezilehlý zesilovač (In-line), který se používá pro zvýšení výkonu v místech, kde je to potřeba.
- Předzesilovač (Pre-amplifier) slouží k zvýšení přijímaného výkonu na koncovém přijímači, tedy umísťuje se před koncové fotodetektory, kde by signál nedosahoval minimální úrovně citlivosti.
- Kompenzátor se využívá k zvýšení přenášeného výkonu v místech, kde je vložen nějaký pasivní optický článek, například pasivní rozbočovač, který do trasy vnese velké vložné útlumové ztráty a tedy bezprostředně před tímto prvkem je třeba zvýšit přenášený výkon.
- Výkonový zesilovač (Booster) bývá umístěn přímo za optickými vysílači, aby zvýšil výstupní výkon.

Klíčové vlastnosti optických zesilovačů [24]:

- Zisk je poměr výstupního výkonu ke vstupnímu výkonu (dB).
- Účinnost zisku je zisk jako funkce vloženého výkonu (dB/mW).

- Šířka pásma je frekvenční funkce.
- Šířka pásma zisku je rozsah frekvencí, ve kterých je zesilovač účinný.
- Saturační zisk je maximální výstupní výkon zesilovače, který nejde překročit, ani při zvýšení vstupního výkonu.
- Šum je přirozenou vlastností optických zesilovačů. V optických zesilovačích je to způsobeno spontánní světelnou emisí excitovaných iontů.
- Polarizační citlivost je závislost zisku optických zesilovačů na polarizaci signálu.
- Výstupní saturační výkon je definován jako výstupní výkon, pro který poklesl zisk zesilovače o 3 dB.

Další dělení optických zesilovačů vyplývá z formy dodávané energie, kterou zesilovač produkuje. Toto dělení bude popsáno níže v rámci samostatných podkapitol.[24]

4.1 SOA

SOA (Semiconductor Optical Amplifier - optický polovodičový zesilovač) zesilovače jsou založeny na konvenčních principech pevnolátkového laseru, tedy aktivní vlnovodná oblast vložená mezi oblasti P a N. Když je na něj aplikováno předpětí, excituje ionty v oblasti a vytváří páry elektron-díra. Poté, jak se specifické světelné vlnové délky spojí v aktivním vlnovodu, dojde ke stimulaci a způsobí, že se páry elektron-díra rekombinují a vytvoří fotony (stejně vlnové délky jako optický signál). Excitace a rekombinace procesu elektron-díra je popsána rychlostními rovnicemi. Rychlost generování elektron-děr a rychlost rekombinace musí být vyvážené pro trvalou amplifikaci. To do značné míry závisí na materiálu aktivní oblasti, předpětí, hustotě a životnosti nosičů.[24]

Hlavní charakteristiky SOA jsou [9][24]:

- vysoký zisk 25-30 dB
- výstupní saturační výkon v rozsahu 5 až 13 dBm
- nelineární zkreslení
- šířka pásma na 3 dB je přibližně 60-70 nm
- šumové číslo se pohybuje okolo 5-8 dB
- použitelné pásmo vlnových délek je 1280-1650 nm
- jsou vyrobeny z InGaAsP a jsou to malé, kompaktní polovodiče, které jsou snadno integrovatelné s jinými polovodičovými a optickými součástkami

- účinnost je přibližně 28 dB/mA

Hlavními výhodami SOA zesilovačů jsou především jejich nízká cena a široké pásmo vlnových délek. Oproti tomu nevýhody těchto zesilovačů tvoří výrazná závislost na polarizaci, nízký zisk oproti ostatním zesilovačům a nelineární jevy.[9][24]

4.2 EDFA

EDFA (Erbium-Doped Fiber Amplifier - typ optického zesilovače na bázi erbiem dopovaného vlákna) zesilovače jsou silně dopovány jedním, nebo více prvky vzácných zemin. Dopanty absorbují optickou energii v jednom spektrálním rozsahu a emitují optickou energii v jiném spektrálním rozsahu. Každý prvek má však své vlastní absorpčně emisní charakteristiky. Některé prvky vzácných zemin užitečné při zesílení DWDM jsou ty, jejichž spektrální zisk odpovídá spektru minimálních vláknových ztrát.[24]

Nejpopulárnější OFA je erbiem dopovaný vláknový zesilovač EDFA. Erbium je excitováno několika optickými frekvencemi, 514, 532, 667, 800, 980 a 1480 nm a produkuje stimulovanou emisi v rozsahu 1530 - 1565 nm, tedy přes použité C pásmo DWDM. Nejkratší vlnové délky excitují ionty erbia na vysoké energetické hladiny, odkud excitované atomy klesnou na jednu ze čtyř středních metastabilních úrovní, přičemž vyzařují fotony. Z nejnižší metastabilní úrovně nakonec klesnou na počáteční (přízemní) úroveň emitující fotony o vlnové délce asi 1550 nm. Nejdelší vlnová délka 1480 nm excituje atomy přímo na nejnižší metastabilní úroveň. Z této úrovně klesají stimulované atomy erbia na úroveň zemské energie a emitují fotony. Dvě nejvhodnější excitační vlnové délky pro EDFA jsou 980 a 1480 nm.[24]

Hlavní charakteristiky EDFA zesilovačů [9][24]:

- velmi vysoký zisk přesahující 50 dB
- šířka pásma na 3 dB je 30 nm
- šumové číslo je 4 dB
- použitelné pásmo vlnových délek se pohybuje okolo 1530-1565 nm
- účinnost je přibližně 11 dB/mA

Hlavní výhodou EDFA zesilovačů je velmi vysoký zisk, dále je to také necitlivost na polarizaci. Nevýhodami jsou pak omezené pásmo vlnových délek a zesílení bývá jen pro diskrétní vlnové délky.[9][24]

4.3 Ramanův

Uvažujme zdroj laseru s kontinuální vlnou, středním výkonem a pumpou, to vše napojené na běžné jednovláknové vlákno. Kvůli nelinearitě ve vláknitém médiu budou atomy excitovány. Nyní, pokud excitované atomy nejsou stimulovány, pak po krátké době spontánně klesnou na střední energetickou hladinu a uvolní světelnou energii o vlnové délce delší, než je zdroj pumpy. Nakonec všechny atomy na střední úrovni klesnou na svou původně nízkou energetickou hladinu uvolněním zbývající energie ve formě fotonů. Toto je známé jako stimulovaný Ramanův rozptyl. Ramanův rozptyl se vyskytuje v obou směrech vlákna. Pokud jsou excitované atomy stimulovány fotony slabého optického signálu, který je na vlnové délce posunutý o 70 až 100 nm od vlnové délky pumpy, pak jsou excitované atomy stimulovány a emitují fotony stejné vlnové délky se stimulujícím zdrojem. Slabý signál je tedy zesílen. Ramanova zesílení využívá běžné nedopované jednovláknové vlákno a využívá výhody nelinearity vlákna v přítomnosti vysokého výkonu pumpy.[24]

Hlavní charakteristiky Ramanových zesilovačů [9][24]:

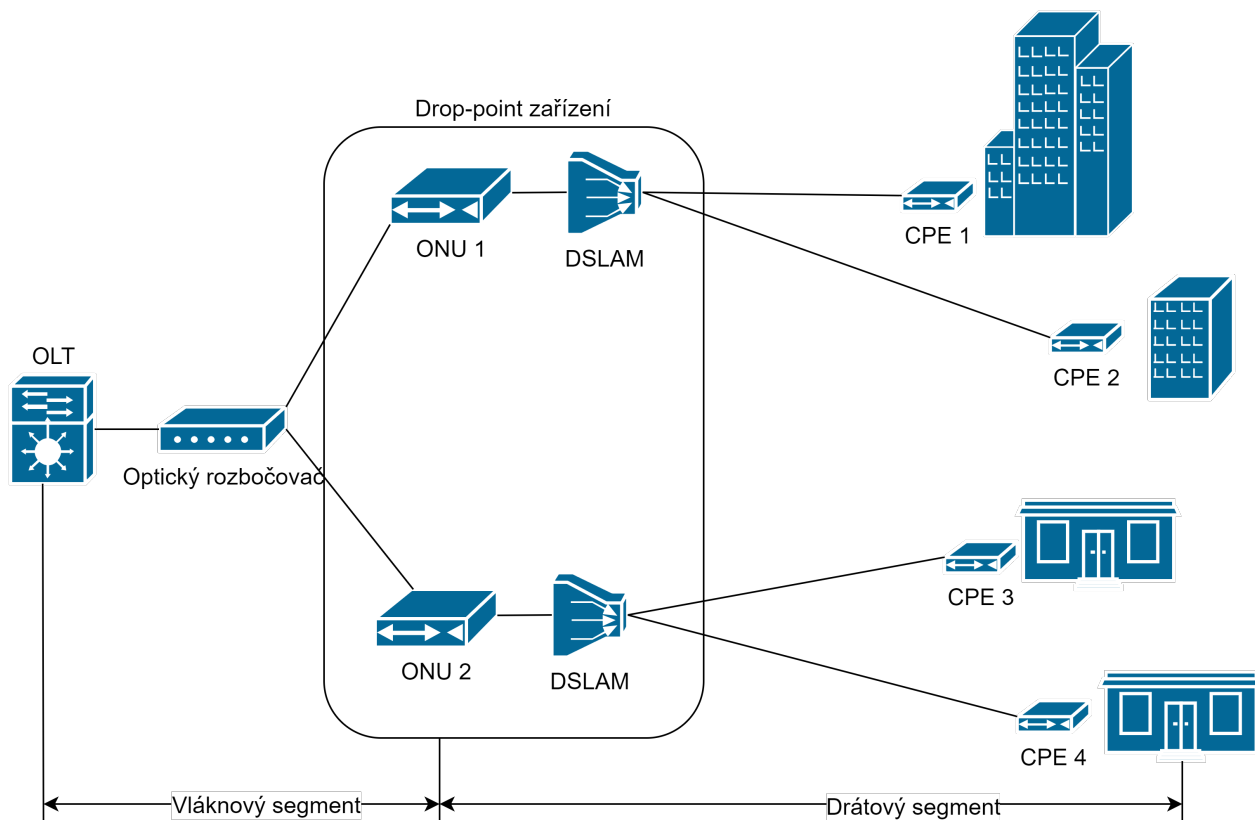
- vysoký zisk pohybující se do 40 dB
- šířka pásma na 3 dB je 10 nm
- šumové číslo je 4 dB
- použitelné pásmo vlnových délek je 1280-1650 nm
- účinnost je přibližně 0,08 dB/mA

Výhodou Ramanových zesilovačů je široké pásmo laditelnosti a vyšší zisk než mají SOA zesilovače. Oproti tomu pak ale nevýhodami jsou vysoká cena, nízká účinnost čerpání, polarizační závislost a omezený frekvenční rozsah.[9][24]

Kapitola 5

Hybridní fotonické sítě

Přístupové sítě jsou komunikační sítě, které propojují soukromé lokální sítě, jako jsou sítě v domácnostech jednotlivých uživatelů, s veřejnými metropolitními sítěmi, jako jsou sítě vybudované poskytovateli internetového připojení. Soukromé lokální sítě často využívají vysokorychlostní kabelové a bezdrátové komunikační technologie, jako je IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers - Institut pro elektrotechnické a elektronické inženýrství) 802.3 Ethernet (až 1 Gbit/s) a IEEE 802.11 WiFi (Wireless Fidelity - bezdrátová datová technologie) (až 600 Mbit/s). Tyto vysokorychlostní komunikační technologie jsou v soukromých lokálních sítích nákladově efektivní vzhledem ke krátkým vzdálenostem a následným nízkým nákladům na instalaci. Veřejné metropolitní sítě využívají celou řadu komunikačních technologií, které zahrnují technologie DWDM (Dense WDM - husté vlnové dělení) přes optické přenosové kanály (až 1 Tbit/s). Tyto vysokorychlostní komunikační technologie jsou nákladově efektivní vzhledem ke sdílení nákladů na mnoho platících účastníků. Přístupové sítě vyžadují výrazně vyšší náklady na instalaci ve srovnání se soukromými lokálními sítěmi vzhledem k delším vzdálenostem, které musí být pokryty. Přístupové sítě mají zároveň menší míru sdílení nákladů ve srovnání s veřejnými metropolitními sítěmi, čímž se zvyšují náklady na platícího účastníka. V důsledku toho musí technologie přístupových sítí udržovat nízké náklady na instalaci, čehož lze dosáhnout využitím stávajících měděných drátů s omezenou šířkou pásma nebo sdílených optických vláken. Hybridní přístupové sítě využívají měděný drát a sdílené optické vlákno. Sdílené optické vlákno se táhne od ústředny poskytovatele služeb až k takzvanému drop-point bodu, kde je posledních několik set metrů dovedeno pomocí měděného drátu ke koncovým uživatelům.[2]



Obrázek 5.1: Hybridní xPON/xDSL topologie[2]

Hybridní architektura přístupové sítě xPON/xDSL se skládá z pasivní optické sítě připojené k více digitálním účastnickým přípojkám DSL. PON OLT se připojuje k takzvaným drop-point zařízením, což je kombinace PON ONU jednotky a DSL multiplexoru DSLAM. Prostřednictvím DSLAM se každé drop-point zařízení připojuje k vícero DSL modemům na straně uživatele, takzvaným CPE (Customer Premise Equipment - zařízení na straně zákazníka).[2]

Segment optických vláken této hybridní přístupové sítě je organizován jako sdílená pasivní optická síť, kdy více optických síťových jednotek (ONU) sdílí jedno optické vlákno připojené k OLT v ústředně poskytovatele služeb. Měděné segmenty začínají u každé ONU, kdy je vlákno upuštěno a stávající měděné dráty jsou využívány prostřednictvím přenosové technologie DSL, aby se dostaly ke každému předplatiteli. Každá ONU je spojena s DSL přístupovým multiplexerem (DSLAM) v místě upuštění vláken. Toto tzv. zařízení pro upuštění je aktivní, a proto ke svému provozu vyžaduje elektrickou energii. Poskytovatelé služeb však chtějí, aby tato zařízení zachovala vlastnost umístění kdekoli (deploy-anywhere) optického rozbočovače/slučovače v typické PON síti. Pro zachování této vlastnosti je každé zařízení pro upuštění zpětně napájeno pomocí zdroje napájení předplatitele. Z tohoto důvodu je kriticky důležité snížit spotřebu energie tohoto zařízení pro upuštění.[2]

Datová paměť obvykle představuje významnou část spotřeby energie síťového uzlu, a je proto důležitým aspektem snaha o snížení spotřeby energie. Vzhledem k nesouladu přenosové rychlosti mezi DSL linkou a PON je velikost požadované vyrovnávací paměti v místě poklesu poměrně velká (v řádu desítek megabajtů), má-li být dosaženo přiměřeně malých ztrát paketů bez mechanismů řízení toku. Tyto velké požadavky na vyrovnávací paměť obvykle vyžadují velkou off-chip (paměť není na stejném čipu jako CPU) dynamickou paměť s náhodným přístupem (DRAM - Dynamic Random Access Memory - druh počítačové paměti, která uchovává data v podobě elektrického náboje v kondenzátoru) nebo pokročilé techniky pro vložení velké paměti na čip. Mechanismy řízení toku mohou vyrovnávací paměť zpětně vtlačit buď do OLT v sestupném směru, nebo do zařízení zákazníka DSL (CPE) ve vzestupném směru. Konkrétně zkoumáme několik takzvaných upstream polling strategií pro řízení toku ve vzestupném směru dat z každého CPE do jeho přidruženého zařízení v místě poklesu. Tyto strategie řízení toku dosahují velmi nízké nebo nulové ztráty paketů pro podstatně sníženou kapacitu vyrovnávací paměti v místech drop-point zařízení (řádově v desítkách kilobajtů). Tyto malé vyrovnávací paměti mohou být snadno poskytovány statickou pamětí on-chip (paměť je na stejném čipu jako CPU) SRAM (Static Random Access Memory - označení polovodičové paměti typu RAM) nebo malými DRAM (on-chip nebo off-chip). Implementace on-chip SRAM umožňuje řízení toku, zjednodušuje vyrovnávací paměť paketů a zabraňuje energeticky náročným rozhraním pro off-chip DRAM. Pro off-chip DRAM implementaci jsou podstatně snižené požadavky na vyrovnávací paměť s řízením toku vyžadují úměrně méně paměťových bank a tím snižují spotřebu paměťové energie.[2]

Kapitola 6

Sítě s velmi vysokou kapacitou

NGA (Next Generation Access - obecné označení moderních přístupových technologií) s plánovaným zvýšením rychlosti na 1 Gbps v sestupném směru - se takzvané VHCN (Very High Capacity Networks - sítě s velmi vysokou kapacitou) stávají klíčovým prvkem budoucnosti multimediálních služeb. Jejich další rozvoj je v souladu s národními i evropskými strategickými prioritami.[25]

Realizaci přístupových sítí nové generace podporuje Evropská komise i vlády jednotlivých států. V České republice byla tato činnost podpořena vypracováním a zveřejněním takzvaného Národního rozvojového plánu.[25]

Výkon sítě lze považovat za obdobný bez ohledu na to, zda se vnímání koncového uživatele liší v důsledku různých charakteristik, kterými je síť nakonec připojena ke koncovému bodu sítě.[25]

Pokyny sdružení BEREC pro VHCN specifikují parametry zvláště pro pevné a bezdrátové sítě. Pro každou z těchto sítí existují dvě kritéria, z nichž alespoň jedno musí být splněno [25]:

- Kritérium 1 - optické vlákno je přivedeno do budovy
- Kritérium 2 - optické vlákno je přivedeno k základnové stanici
- Kritérium 3 - parametry pevného připojení:
 - Přenosová rychlost v sestupném směru ≥ 1000 Mbps
 - Přenosová rychlost ve vzestupném směru ≥ 200 Mbps
 - Ztrátovost IP paketů (Y.1540) $\leq 0,0025$ %
 - Chybovost IP paketů (Y.1540) $\leq 0,05$ %
 - RTT ≤ 10 ms (odchylka ≤ 2 ms)
 - Dostupnost 99,9 %

- Kritérium 4 - parametry bezdrátového připojení:
 - Přenosová rychlost v sestupném směru ≥ 150 Mbps
 - Přenosová rychlost ve vzestupném směru ≥ 50 Mbps
 - Chybovost IP paketů (Y.1540) $\leq 0,01$ %
 - RTT ≤ 25 ms (odchylka ≤ 6 ms)

V rámci VHCN sítí je třeba si definovat několik parametrů, které by měl poskytovatel internetu plnit [25]:

- Prvním parametrem, který zaručuje základní využitelnost služby, je minimální rychlost, tedy nejnižší rychlost, kterou operátor koncovému uživateli zaručuje. To znamená, že by skutečná rychlost neměla klesnout pod tuto hranici, s výjimkou přerušení služby.
- Maximální rychlost je obvykle parametrem, který zákazník považuje za nejzajímavější. Ve skutečnosti je to rychlost, kterou může koncový uživatel očekávat alespoň v některých časových obdobích.
- Inzerovaná rychlost (tedy rychlost, kterou operátor používá v obchodních sděleních) by neměla překročit maximální rychlost.
- Běžně dostupná rychlost je rychlost, kterou může koncový uživatel očekávat po většinu času, zejména v určených obdobích dne, jako jsou špičky, a měla by být v přiměřeném poměru k maximální rychlosti.

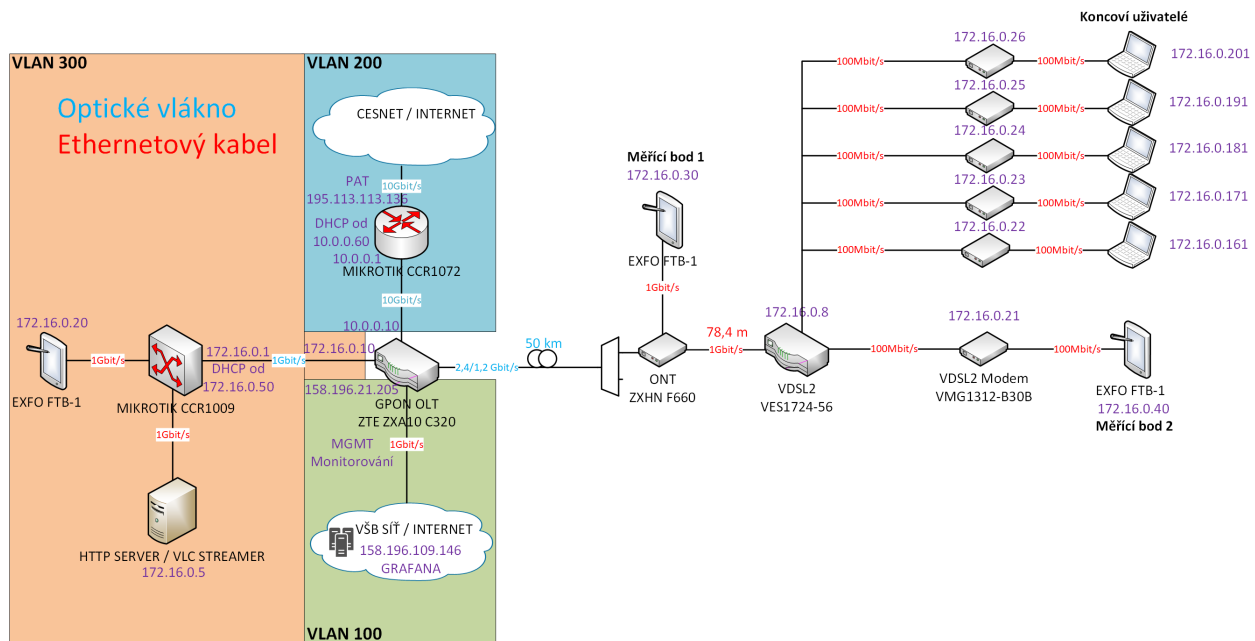
Kapitola 7

Realizace reálného zapojení hybridní fotonické sítě v rámci laboratoří

Realizace reálného zapojení hybridní fotonické sítě probíhalo v rámci laboratoří POREB316, POREB215 a POREB211. V laboratoři POREB316 se nachází MikroTik CCR1009, HTTP server / VLC streamer, GPON OLT, MikroTik CCR1072, optické trasy, optické rozbočovače a koncové ONT jednotky. Do laboratoře POREB215 byl umístěn rozbočovač 1:32 s 10 ONT jednotkami pro možnost využití dalších počítačů v rámci laboratoře, laboratoř POREB316 a POREB215 jsou propojeny jak optickým vláknem, tak metalickým kabelem. Z laboratoře POREB211 bylo využito DSLAM VDSL2 a jednotlivé VDSL2 modemy, pro připojení do této laboratoře bylo nutné použít mezi propoj z laboratoře POREB316 do POREB215 a odtud do POREB211, celá tato trasa je metalická.

7.1 Topologie hybridní fotonické sítě

Topologie hybridní fotonické sítě se skládá z OLT, jakožto centrální jednotky, která dle nastavení konkrétní VLAN (Virtual LAN - logicky nezávislá síť v rámci jednoho nebo několika zařízení), může přiřadit svým koncovým jednotkám specifické služby. Pod VLAN 200 z pohledu OLT se nachází směrovač MikroTik CCR1072, který provádí překlad privátních adres za veřejnou adresu s čísly portů a umožňuje tak přístup do internetu. Oproti tomu při přiřazení VLAN 300 dostane ONT jednotka k dispozici přístup na server, na kterém je možné stahovat data a také dívat se na spuštěné vysílání IPTV. VLAN 100 slouží pro OLT pouze jako management a monitorování sítě. Dále je připojena konkrétní trasa s rozbočovačem, končící u ONT jednotky. Při hybridní fotonické síti se zde nachází takzvaný drop-point bod a je odsud nutné vyvézt kabel do uplink rozhraní VDSL2 a vytvořit takto hybridní GPON/VDSL2 síť, kdy DSLAM VDSL2 distribuuje jednotlivé služby ke svým modemům a koncovým uživatelům.



Obrázek 7.1: Topologie hybridní fotonické sítě

Měřicí bod 1 je bod, ve kterém bylo umístěno měřicí zařízení při měření pouze optické části sítě. Tedy zařízení se nachází za ONT jednotkou.

Měřicí bod 2 je bod, ve kterém bylo umístěno měřicí zařízení při měření hybridní fotonické sítě. Tedy zařízení se nachází za VDSL Modemem.

7.2 Popis použitých zařízení

7.2.1 MikroTik CCR1009-7G-1C-1S+

MikroTik CCR1009 je plně gigabitový směrovač s devíti jádrovým procesorem TILERA. Má redundantní zdroj a přehledný, barevný LCD (Liquid Crystal Display - Displej z kapalných krystalů) displej. Disponuje jedním Combo rozhraním a jedním SFP+(Small Form-factor Pluggable - výměnný modul optického vysílače a přijímače v optických jednotkách s propustností až 10 Gbit/s) rozhraním pro připojení do optické trasy. Kapacita zařízení by měla být přibližně 18 Gbit/s.[26][27]



Obrázek 7.2: MikroTik CCR1009[27]

7.2.2 Windows server

Pro topologii byl, jako server, použitý počítač s Windows 10. Procesor počítače je Intel(R) Core (TM) i7-3930K CPU @ 3.20 GHz. Dále disponuje RAM (Random Access Memory - paměť s náhodným přístupem) o velikosti 16 GB, má 64 bitový operační systém a bylo využité SSD (Solid-state Drive - typ polovodičového disku) úložiště. Tento server byl v topologii využitý především pro vysílání v rámci VLC (multiplatformní přehrávač), dále na něm byl vytvořen HTTP (Hypertext Transfer Protocol - internetový protokol určený pro komunikaci s WWW servery) server v podobě modulu Apache pod XAMPP (Cross-platform Apache MariaDB PHP Perl - multiplatformní softwarový balíček).[28]

7.2.3 GPON OLT ZTE ZXA10 C320

ZXA10 C320 je multi-servisní optický přístupový systém, který je ideálním řešením pro PON síť malého rozsahu nabízející kvalitní triple play služby. Je plně kompatibilní se všemi servisními kartami, včetně GPON, EPON (Ethernet PON - PON síť založená na protokolu Ethernet) a PTP. Jedná se o OLT zařízení, na které, v případě připojení GPON karet s 8 PON porty, lze připojit až 1024 uživatelů při sdílení 1:64 nebo až 2048 koncových uživatelů při sdílení 1:128. Šasi disponuje výkonnou sběrnici o kapacitě 420 Gbit/s, která je propojena s řídicími kartami o přepínací kapacitě 84 Gbit/s. Dále zařízení poskytuje síťové služby obsahující FTTH, FTTB a FTTC. Sjednocená platforma umožňuje koexistenci GPON, EPON a XG-PON a podporuje vylepšení na vyžádání.[1]



Obrázek 7.3: GPON OLT ZTE ZXA10 C320[1]

7.2.4 Linux server

Server s Ubuntu 18.04.5 slouží v topologii k monitorování aktivních prvků sítě, jako jsou OLT a všechny ONT jednotky. Na tomto virtuálním serveru, který se nachází ve školní síti běží Grafana, což je multiplatformní webová aplikace pro analytiku a interaktivní vizualizaci.

7.2.5 MikroTik CCR1072-1G-8S+

CCR1072 je jeden z nejvýkonnějších směrovačů od firmy MikroTik. Je určený pro datová centra a firmy s vysokými nároky na výkon sítě. Směrovač má 16 GB ECC RAM a dokáže zpracovat přes 120 milionů paketů za sekundu. Směrovač je dodáván se dvěma zdroji, které se v případě výpadku automaticky přepnou, opět má barevný LCD displej, na kterém lze nastavit základní parametry. Dále disponuje osmi SFP+ rozhraními a jedním RJ-45 rozhraním. Směrovač má procesor Tileru Tile-Gx72 s frekvencí 1 GHz a 72 jádry a 16 GB RAM.[29]



Obrázek 7.4: MikroTik CCR1072[29]

7.2.6 ONT ZXHN F660

ZXHN F660 je optické síťové zakončení, které se používá především v zapojení FTTH. Použitím technologie GPON je pro domácí uživatele k dispozici velmi širokopásmový přístup. Model F660 nabízí čtyři 10/100/1000 Mbit/s rozhraní a jedno rozhraní SC/APC. Citlivost zařízení je -28 dBm

a může fungovat v režimech Bridge, Router a AP. Díky svým funkcím je ideální pro služby triple play.[1][30]



Obrázek 7.5: ONT ZXHN F660[31]

7.2.7 ONT ZXHN F601

ZXHN F601 je optické síťové zakončení, které disponuje jedním účastnickým rozhraním 10/100/1000 Mbit/s a jedno rozhraní SC/APC. Citlivost zařízení je -28 dBm a může fungovat pouze v režimu Bridge.[32]



Obrázek 7.6: ONT ZXHN F601[33]

7.2.8 VDSL2 DSLAM VES1724-56

DSLAM VES1724-56 poskytuje kompaktní VDSL2 technologie v souladu s doporučeními ITU-T G.993.2, G.997.1 a G.994.1. Tento DSLAM podporuje profily 8a,b,c,d, 12a,b 17a a 30a. Toto zařízení disponuje dvěma 1 Gbit/s uplink rozhraními RJ-45 a dvaceti čtyřmi 100 Mbit/s downlink rozhraními RJ-11. Podporuje také IGMP (Internet Group Management Protocol - označení pro

rozšíření původní IP verze 4 o možnost přeposílání datagramů z jednoho zdroje více koncovým stanicím) snooping, aby se zabránilo zbytečnému předávání vícesměrového vysílání všem předplatitelům a tím optimalizuje využití šířky pásma pro multicast (režim, kdy datagramy z jednoho zdroje jsou rozesílány více koncovým stanicím) aplikace jako vysílání videa.[34]



Obrázek 7.7: VDSL2 DSLAM VES1724-56[34]

7.2.9 VDSL2 Modem VMG1312-B30B

Použitý VDSL2 modem obsahuje jedno RJ-11 rozhraní pro ADSL2/VDSL2 a čtyři RJ-45 rozhraní pro LAN.[35]



Obrázek 7.8: VDSL2 Modem VMG1312-B30B[35]

7.2.10 Windows PC

V rámci testování a vytěžování sítě byly použity koncové počítače s Windows 10. Procesor počítače je Intel(R) Core(TM) i3-3110M CPU @ 2.4 GHz. Dále disponuje RAM o velikosti 8 GB, má 64 bitový operační systém a úložiště typu SSD.

7.3 Popis použitých pasivních zařízení

7.3.1 Optická trasa

Optické trasy použité v této práci se nachází na učebně POREB316 a skládají se z cívek s jednovidovými vlákny G 652 D a cívek s jednovidovými vlákny G 657-A1.

- Vlákna G 652 D mají mít, dle ITU-T, maximální měrný útlum v rozpětí vlnových délek 1310 až 1625 nm přibližně 0,4 dB/km a v rozpětí vlnových délek 1530 až 1565 nm maximálně 0,3 dB/km.[36]
- Vlákna G 657 A1 mají mít dle, ITU-T, maximální měrný útlum v rozpětí vlnových délek 1310 až 1625 nm přibližně 0,4 dB/km a na vlnové délce 1550 nm maximálně 0,3 dB/km.[37]

Vlákna G.657 jsou navržena tak, aby byly kompatibilní s vlákny G.652, ale jsou méně citlivé na ohyb, což znamená, že díky ohybům vytváří nižší úroveň útlumu.[38]

7.3.2 Optický rozbočovač 1:2

Optický rozbočovač 1:2 má, dle katalogového listu, operační vlnovou délku v rozmezí 1260 až 1620 nm, operační teplotu v rozmezí -40 až 85 °C a typ použitých vláken je G 657 A1 s konektory typu SC/APC. Útlum rozbočovače na výstupním kanálu 1 je pak 4,01 dB na vlnové délce 1310 nm a 3,98 dB na vlnové délce 1550 nm. Na výstupním kanálu 2 je útlum rozbočovače 3,93 dB na vlnové délce 1310 nm a 4,07 dB na vlnové délce 1550 nm.

7.3.3 Optický rozbočovač 1:16

Optický rozbočovač 1:16 má, dle katalogového listu, operační vlnovou délku v rozmezí 1260 až 1620 nm, operační teplotu v rozmezí -40 až 85 °C a typ použitých vláken je G 657 s konektory typu SC/APC. Průměrný útlum rozbočovače na výstupních kanálech je pak 13,35 dB na vlnové délce 1310 nm, 13,34 dB na vlnové délce 1490 nm a 13,35 dB na vlnové délce 1550 nm.

7.3.4 Optický rozbočovač 1:32

Optický rozbočovač 1:32 má, dle katalogového listu, operační vlnovou délku v rozmezí 1260 až 1620 nm, operační teplotu v rozmezí -40 až 85 °C a typ použitých vláken je G 657 A1 s konektory typu

SC/APC. Průměrný útlum rozbočovače na výstupních kanálech je pak 16,25 dB na vlnové délce 1310 nm, 16,24 dB na vlnové délce 1490 nm a 16,27 dB na vlnové délce 1550 nm.

7.4 Popis použitých měřících zařízení

7.4.1 EXFO PPM-350C a EXFO PPM-350B-EG

PPM (PON Power Meter - měřič úrovně optických signálů optimalizovaný pro použití v PON) funguje jako průchozí zařízení, které umožňuje souběžné měření a zobrazení všech PON signálů - hlasu, dat a videa. Tato technologie usnadňuje testování aktivace a odstraňování problémů.[1]



Obrázek 7.9: EXFO PPM-350C[1]

7.4.2 EXFO FTB-1

FTB-1 je lehká kompaktní platforma, která umožňuje terénním technikům provádět speciální optické, ethernetové, multiservisní a rádiové testovací aplikace. Je vybavena 10/100/1000 Mbit/s LAN RJ45 porty, dvěma USB porty a slotem pro Micro SD kartu. Díky operačnímu systému Windows je tato platforma uživatelsky přívětivá.[1]



Obrázek 7.10: EXFO FTB-1[1]

7.4.3 EXFO FTB-880v2 NetBlazer

Tento modul řady NetBlazer obsahuje široké spektrum víceúčelových aplikací a je kompatibilní s platformou FTB-1. Slouží k měření skutečné přenosové rychlosti TCP (Transmission Control Protocol - jeden z protokolů na transportní vrstvě Ethernetu) založené na doporučení RFC 6349 pro nesporné vynucení SLA (Service Level Agreement - smlouva mezi poskytovatelem služeb a uživatelem obsahující dojednané parametry) pro ethernetové služby. Slouží také k obousměrnému testování UDP (User Datagram Protocol - jeden z přenosových protokolů na transportní vrstvě Ethernetu) provozu podle standardu ITU-T Y.1564. V rámci tohoto měřicího modulu je možné využít i výkonný IPTV (přenos TV vysílání prostřednictvím IP) analyzátor EXpert IPTV Test Tools.[1][39]

7.4.4 EXFO FTB-500

FTB-500 je modulární platforma s masivním výkonem zpracování obsahující 8 slotů, do kterých je možné umístit samotné měřicí moduly.[1]



Obrázek 7.11: EXFO FTB-500[1]

7.4.5 FTB-5240BP

OSA (Optical Spectrum Analyzer - analyzátor optického spektra) je určen k měření optického výkonu a poměru optického signálu k šumu. Analyzátor optického spektra nabízí přenosnou spektrální charakterizaci, pro uvedení sítě DWDM do provozu, a také měření poměru signálů a šumu v pásmu in-band. 5240B je OSA s vysokým rozlišením určené pro přesné spektrální měření. Jedná se o tříslotový model s řadičem polarizace pro automatizované testování v pásmu a lepší optický výkon.[1]

7.4.6 FTB-7400E

OTDR (Optical Time Domain Reflectometry - metoda analýzy optických vláken založená na vyhodnocování zpětných rozptylů a odrazů) modul optimalizovaný pro testování jednovidových a vícevidových optických vláken umožňuje charakterizovat optická vlákna a úseky optických vláken spojené svary a konektory. OTDR poskytuje vnitřní pohled na vlákno a může vypočítat délku vlákna, útlum, přerušení, celkovou ztrátu a zpětné vazby.[1]

7.4.7 FTB-5800

Modul FTB-5800 nabízí rychlost, přesnost a vysoký výkon, kterých je potřeba k zajištění vysoce kvalitních služeb. Tento modul se vkládá do platformy FTB-500 a slouží k testování CD (Chromatic Dispersion - chromatická disperze). Architektura analyzátoru umístí volič vlnových délek do přijímače, což zabraňuje nutnosti komunikace mezi přijímačem a zdrojem. To umožní provádět měření, i když je zdroj kilometry vzdálený, aniž by byla rušena přesnost výsledku.[1]

7.4.8 FTB-5500B

Modul FTB-5500B slouží ke měření PMD (Polarisation Mode Dispersion - polarizační vidová disperze) a využívá interferometrickou metodu, která nabízí rychlou a odolnou jednotku, která

zvládne téměř každou situaci. Tento modul nabízí dynamický rozsah vyšší než 50 dB pro aplikace na dlouhé vzdálenosti, schopnost vícenásobného měření pro dlouhodobé monitorování a odhad PMD druhého řádu pro certifikaci vláken systému DWDM.[1]

7.4.9 EXFO FLS-5834A

FLS-5834A je doplňkem analyzátoru FTB-5800, jehož technologie je založena na metodě fázového posunu. Tato dvě zařízení umožňují provádět měření chromatické disperze prostřednictvím zesilovačů. FLS-5834A se také používá s analyzátozem FTB-5500B, kde slouží jako vysoce polarizovaný zdroj pro měření PMD.[1]



Obrázek 7.12: EXFO FLS-5834A[1]

7.4.10 EXFO MaxTester OLTS MAX-945

Zařízení jsou multifunkční a jsou schopné testovat OLTS (Optical Loss Test Set - souprava pro testování optického útlumu), tedy vložný útlum, útlum odrazu a délku vlákna na dvou vlnových délkách. Zařízení jsou určena pro měření přímou metodou, kterou jsou schopny proměřit vlákno obousměrně a velmi rychle.[40]



Obrázek 7.13: EXFO MaxTester OLTS MAX-945[40]

7.4.11 EXFO LTB-8

Je měřicí platforma, na které je možné měřit parametry telekomunikačních a datakomunikačních sítí. Pokrývá širokou škálu rozhraní s přenosovými rychlostmi až 100 Gbit/s. Tento měřicí přístroj patří ČTÚ (Český telekomunikační úřad) a pro tuto práci bylo možné oproti němu proměřit WAN (Wide Area Network - síť pokrývající rozlehlou oblast) konektivitu sítě dle normy ITU-T Y.1564 a doporučení RFC 6349.[42]



Obrázek 7.14: EXFO LTB-8[42]

7.5 Popis použitých programů

7.5.1 Multimediální přehrávač VLC

VLC je svobodný multiplatformní multimediální přehrávač s otevřeným zdrojovým kódem. Přehraje většinu multimediálních souborů, DVD, zvukových CD a různých proudových protokolů. VLC je původně linuxový přehrávač. Má velmi dobrou sadu funkcí přes video, synchronizaci titulků a audio filtry.[1]

7.5.2 EXpert IPTV Test Tools

Aplikace EXpert IPTV je dostupná pod platformou FTB-1 a umožňuje měření IPTV služeb. Dokáže emulovat set-top-box a zobrazit náhled videa v reálném čase. Aplikace může dále analyzovat až deset video streamů současně a lze dle ní vyhodnotit QoE (Quality of Experience - kvalita prožitku ze služby). Aplikace podporuje IGMP verzi 2 i 3 a následující typy video kodeků: MPEG2, H.264, Mediaroom/MS-IPT.[39]

7.6 Konfigurace jednotlivých zařízení

7.6.1 MikroTik CCR1009

Toto zařízení slouží v rámci sítě jako přepínač, do jednotlivých rozhraní je připojen Windows server a EXFO FTB-1 pro jednotlivé testování. Na přepínači je nakonfigurováno DHCP pro LAN síť, aby jednotliví koncoví uživatelé, kteří se připojí, dostali privátní adresu ze sítě 172.16.0.0/24, která byla vyhrazena pro LAN síť. V rámci bridge rozhraní bylo nutné nakonfigurovat IGMP snooping, pro správné fungování IGMP protokolu a nešíření multicastu na všechna rozhraní bez žádosti.

7.6.2 Windows server

Na tomto serveru bylo nutné nakonfigurovat HTTP server, pro vytěžování koncových jednotek pomocí stahování dat ze serveru. HTTP server je nakonfigurován pomocí modulu Apache od XAMPP a zpřístupňuje složku se soubory pro koncové uživatele.

7.6.3 GPON OLT

OLT je centrální jednotka v rámci sítě, která určuje, zda uživatelé budou využívat internetových, nebo interních služeb. Toto rozhodnutí záleží na přidělené VLAN, kterou dostane koncová ONT/ONU jednotka. Pro tyto účely byly na OLT vytvořeny tři VLAN, 100 pro management síť a monitorování, 200 pro internetový přístup a 300 pro privátní služby. Jednotlivé VLAN jsou pak přiřazeny na uplink rozhraní.

1. Konfigurace VLAN a VLAN rozhraní

```
vlan 100
  name VLAN100
  description VSB_MGMT
!
vlan 200
  name VLAN200
  description INTERNET
!
vlan 300
  name VLAN300
  description Privatni sluzby
  multicast-packet drop-unknown

interface vlan 100
  ip address 158.196.21.205 255.255.255.0
!
interface vlan 200
  ip address 10.0.0.10 255.255.255.0
!
interface vlan 300
  ip address 172.16.0.10 255.255.255.0
```

2. Jednotlivé VLAN se následně přiřadí uplink rozhraním, jejichž konfigurace je následovná. Rozhraní 1/4/1 je připojeno k přepínači MikroTik v rámci LAN sítě, rozhraní 1/4/2 je připojeno ke směrovači MikroTik v rámci WAN sítě a rozhraní 1/4/3 je připojeno do školní sítě.
-

```
interface gei_1/4/1
  no shutdown
  hybrid-attribute fiber
  negotiation auto
  linktrap enable
  switchport mode hybrid
  switchport default vlan 300
!
interface xgei_1/4/2
  phy-attribute lan
  no shutdown
```

```

hybrid-attribute fiber
no negotiation auto
speed 10000
duplex full
linktrap enable
switchport mode hybrid
switchport default vlan 200
!
interface gei_1/4/3
no shutdown
hybrid-attribute copper
negotiation auto
linktrap enable
switchport mode hybrid
switchport default vlan 100

```

3. V konfiguraci OLT rozhraní bylo nutné specifikovat vzdálenost koncových jednotek, toto se dělá příkazem range-mode, kdy 400 600 udává rozpětí, ve kterém se ONT jednotky budou nacházet v 100 metrových jednotkách. Dále je třeba zaregistrovat jednotlivé ONT jednotky včetně jejich typu a sériového čísla. Do výpisu dávám pouze jednu jednotku, ale dohromady jich bylo zaregistrováno 20.

```

interface gpon-olt_1/1/1
no shutdown
linktrap disable
range-mode 400 600
onu 1 type ZTEG-F660V5.2 sn ZTEGC85630C1

```

4. Konfigurace gpon-onu rozhraní je možné udělat v rámci příkazové řádky, nebo ve webovém GUI Ikarus. Tato konfigurace říká, že první ONT jednotka bude využívat T-CONT s pořadovým číslem 1 s gemporem 1 a přenosovou rychlostí 1 Gbit/s ve směru vzestupném i sestupném. Číslo u T-CONTu nespecifikuje jeho typ, ale pouze pořadové číslo. Typ T-CONTu je pak specifikován pod konfigurací gpon, tedy typu 4 - Best-effort - pro nejlepší simulování internetových služeb, protože v internetu nelze spoléhat na QoS (Quality of Service - kvalita služeb).

```

interface gpon-onu_1/1/1:1
sn-bind enable sn
tcont 1 name INTERNET profile TCONT-1G

```

```
gempport 1 name INTERNET tcont 1
gempport 1 traffic-limit upstream 1G downstream 1G
service-port 1 vport 1 user-vlan 300 vlan 300
!
gpon
profile tcont TCONT-1G type 4 maximum 1000000
```

5. Pro správné fungování IGMP, bylo nutné nakonfigurovat pracovní mód snooping pro VLAN 300 a povolit konkrétní verze IGMP protokolu. V této práci byl využit pouze IGMP verze 3. A následná konfigurace příchozího a odchozího IGMP rozhraní.

```
igmp enable
igmp mvlan 300
igmp mvlan 300 work-mode snooping
igmp mvlan 300 version-mode v1 accept
igmp mvlan 300 version-mode v2 accept
igmp mvlan 300 version-mode v3 accept
!
igmp mvlan 300 source-port gei_1/4/1
igmp mvlan 300 receive-port gpon-onu_1/1/1:1 vport 1
```

6. Zbývající OLT konfigurace sestává ze zabezpečení ve formě ACL (Access Control List - seznam pravidel, řídicích přístup k objektům) a směrování, které bylo pouze statické. ACL povolují přístup ze školní sítě a z veřejné adresy směrovače a následně zakazují jakýkoliv provoz na MGMT IP adresu 158.196.21.205. Směrování je řešeno pouze do školní sítě, zbývající provoz je směrován defaultně na privátní adresu směrovače.

```
acl extended number 100
rule 10 permit ip 195.113.113.136 0.0.0.0 any
rule 20 permit icmp any any
rule 30 permit ip 158.196.0.0 0.0.255.255 any
rule 40 deny ip any 158.196.21.205 0.0.0.0
rule 50 permit ip any any
!
ip route 158.196.0.0 255.255.0.0 158.196.21.1
ip route 0.0.0.0 0.0.0.0 10.0.0.1
```

7.6.4 Linux server

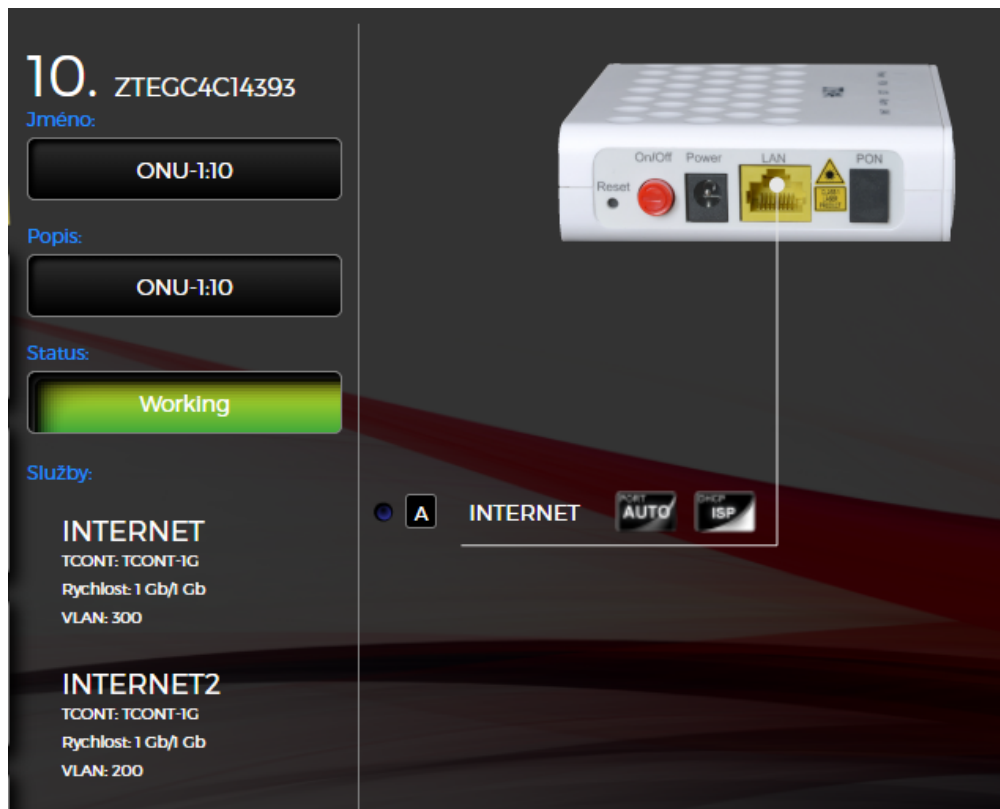
Virtuální server slouží pro monitorování sítě. Server využívá veřejnou školní IP adresu 158.196.109.146, aby měl konektivitu s veřejnou management adresou od OLT. Na serveru je nainstalována open-source platforma pro monitorování, analýzu a vizualizaci dat Grafana. Grafana ke svému fungování dále potřebuje InfluxDB, což je databáze, ve které jsou uloženy získané data. Grafana se k této databázi připojí a získává z ní informace pro vytváření jednotlivých grafů. Dále je třeba mít na serveru nainstalovaného agenta Telegraf, který sbírá informace skrze SNMP z monitorovaného zařízení, v tomto případě OLT. Veškeré informace získané agentem jsou vkládány do databáze InfluxDB. Celé toto monitorování je možné jen díky tomu, že OLT má informace o propustnosti svých rozhraní, včetně koncových jednotek ve svém SNMP a pomocí konkrétních OID, je možné tyto informace získat.[45]

7.6.5 MikroTik CCR1072

Zařízení sloužící jako směrovač v rámci sítě pro přístup do internetu a překlad síťových adres. Směrovač má nakonfigurovaný PAT (Port Address Translation - překlad pomocí jedné adresy a čísel zdrojových portů) zdrojových adres, tedy překlad privátních adres sítě 10.0.0.0/24 na veřejnou adresu 195.113.113.136 a využívá k tomu čísla portů. V rámci omezených možností jsem měl dostupnou tuto jednu adresu a 10 Gbit/s optickou linku připojenou do internetu mimo sdílenou školní infrastrukturu, abychom se vyhnuli sdílení kapacity s veškerými FEI (Fakulta elektrotechniky a informatiky) uživateli a zařízeními. Výchozí brána směrovače je na adresu 195.113.113.129 přes kterou je směrován veškerý provoz do internetu. Samozřejmostí tohoto zařízení jsou takzvané ACL, které bylo nutné implementovat především pro provoz z internetu a zabránit tak útokům a nechtěným pokusům o připojení do mé sítě pro zajímavost bylo nasbíráno za pouhých pár týdnů 236 496 zahozených paketů na zabezpečujícím pravidle pro příchozí provoz z internetu. Směrovač má rovněž nakonfigurováno DHCP, aby koncový uživatelé, kteří budou přiřazeni v rámci OLT do VLAN 200, mohli dostat adresu ze sítě 10.0.0.0/24 a měli tak přístup k internetu. V rámci této konfigurace byl použit rekurzivní DNS server od Google na adrese 8.8.8.8.

7.6.6 ONT

V této práci byly použity ONT jednotky dvojího typu. Rozdíl mezi těmito jednotkami kromě počtu rozhraní je především ve funkčnosti. ZXHN F660 mohou fungovat v režimu Router, zatímco F601 pouze v režimu Bridge. Pro ulehčení byly veškeré koncové jednotky nastaveny do režimu Bridge a v rámci konfigurace jim pouze byla přidělena konkrétní VLAN, dle služby, která byla testována.



Obrázek 7.15: Přiřazení služby na koncovou jednotku

7.6.7 VDSL2

Konfigurace VDSL2 bude popsána pouze pro využívání LAN sítě, tedy VLAN 300, protože na této síti byla prováděna většina měření. Pro využití internetových služeb bylo třeba DSLAM překonfigurovat. V počátcích práce nebylo jasné, zda budou testovány LAN i WAN služby, proto jsem přistoupil ke konfiguraci statických adres pro zařízení jako jsou DSLAM, nebo VDSL2 Modemy, pokud bych práci dělal znovu, určitě bych zde využil možnost dynamického přiřazování adres, aby nebylo třeba překonfigurovat zařízení.

IP Setup

Domain Name Server: 0.0.0.0

Default Management: In-band Out-of-band

In-band Management IP Address

DHCP Client

DHCP Option 12: DSLAM VES1724-56

DHCP Option 60: DSLAM 5cf4-ab9f-d23

Static IP Address

IP Address: 172.16.0.8

IP Subnet Mask: 255.255.255.0

Default Gateway: 172.16.0.10

VID: 1

Out-of-band Management IP Address

IP Address: 192.168.0.1

IP Subnet Mask: 255.255.255.0

Default Gateway: 0.0.0.0

Apply Cancel

Obrázek 7.16: DSLAM IP konfigurace

DSLAMu byla přiřazena adresa z nerozdávané části adres v rámci DHCP, tedy 172.16.0.8 pro testování konektivity a výchozí brána adresa OLT VLAN 200 172.16.0.10. Management adresu jsem nechal 192.168.0.1 od počátečního nastavení.

Multicast Setting Multicast Status IGMP Snooping VLAN IGMP Filtering Profile MVR

Active None Snooping Proxy

Enable MLD

IGMP Action

Host Timeout: 260

Leave Timeout: 2

802.1p Priority: No-Change

IGMP Filtering

Proxy

MGMDv3 Mode

Unknown Multicast Frame Flooding Drop

Reserved Multicast Group Flooding Drop

Obrázek 7.17: DSLAM multicast konfigurace

V rámci nastavení multicast bylo opět nutné nakonfigurovat mód snooping, aby nebyly rozeseřlané nechtěné multicast zprávy na všechna rozhraní.

VDSL Line Setup			
Port	Primary Template	Fallback Template	Alarm Template
1	17a ▾	17a ▾	DEFVAL ▾
2	17a ▾	17a ▾	DEFVAL ▾
3	17a ▾	17a ▾	DEFVAL ▾
4	17a ▾	17a ▾	DEFVAL ▾
5	17a ▾	17a ▾	DEFVAL ▾
6	17a ▾	17a ▾	DEFVAL ▾

Obrázek 7.18: VDSL konfigurace

Konfigurace VDSL sestávala z přiřazení konkrétního profilu na jednotlivé rozhraní. V tomto případě byl použitý profil 17a pro všech 6 rozhraní, ke kterým byly připojeny modemy. Uplink rozhraní, které vedlo k ONT jednotce bylo pak nakonfigurováno do módu trunk, aby byly přenášeny tagované VLAN.

VDSL Line Profile Setup		Template	ChanProfile	InmProfile
Name	17a			
VDSL2 Profile	<input type="checkbox"/> 30a <input checked="" type="checkbox"/> 17a <input type="checkbox"/> 12a <input type="checkbox"/> 12b <input type="checkbox"/> 8a <input type="checkbox"/> 8b <input type="checkbox"/> 8c <input type="checkbox"/> 8d			
	DownStream		UpStream	
Max SNR Margin	31.0 dB <input type="checkbox"/> noLimit	31.0 dB <input type="checkbox"/> noLimit		
Target SNR Margin	6.0 dB	6.0 dB		
Min SNR Margin	0.0 dB	0.0 dB		
Bitswap	<input checked="" type="radio"/> On <input type="radio"/> Off	<input checked="" type="radio"/> On <input type="radio"/> Off		
Max Rx Power		14.5 dBm <input type="checkbox"/> noLimit		
Max Tx Power	14.5 dBm	14.5 dBm		
Min Overhead Rate	16 kbps	16 kbps		
Limit PSD Mask	Transmission Mode: G.993.2 Annex A ▾ ADSL/VDSL Protocol: Modify Class Mask: 998 ▾ Limit Mask: D-32 ▾ US0 Mask: EU-32 ▾ Compatible Mode: None ▾			
	<input type="radio"/> Auto <input type="radio"/> Override <input checked="" type="radio"/> Disable			
UPBOKL	0.0 dB			

Obrázek 7.19: VDSL konfigurace profilu 17a

Konfigurace profilu 17a byla ponechána ve výchozím nastavení, které můžeme vidět na obrázku.

7.6.8 VDSL2 Modem

Koncový modem měl pevně přiřazenou adresu z LAN sítě a bylo třeba na něm opět povolit IGMP snooping. Maximální propustnost tohoto profilu byla 97,77 Mbit/s ve směru sestupném a 39,362 Mbit/s ve směru vzestupném.

Pokročilé nastavení --- LAN

Na této stránce můžete nastavit IP adresu a masku sítě směrovače. GroupName

IP adresa

Maska Podsítě

Povolit IGMP snooping

Standardní režim

Blokovací mód

Obrázek 7.20: Konfigurace modemu - LAN

Kromě tohoto nastavení, bylo ještě třeba vytvořit WAN službu, která v tomto případě byla typu Bridge, aby procházel multicast provoz.

Pokročilé nastavení --- WAN služby

Zvolte Přidat, Odebrat nebo Upravit pro konfiguraci WAN služby přes zvolené rozhraní

Rozhraní	Popis	Typ	Vlan8021p	VlanMuxId	Igmp	NAT	IPv6	Mld	Odebrat	Upravit
ptm0.2	br_0_1_1	Bridge	N/A	N/A	Enabled	Disabled	Disabled	Disabled	<input type="checkbox"/>	<input type="button" value="Upravit"/>

Obrázek 7.21: Konfigurace modemu - WAN

7.7 Měření optických parametrů sítě

Měření optických parametrů sítě bylo děláno pro dvě trasy. První trasa byla 30 km, tedy maximální délka, kdy bylo aktivních všech dvacet koncových jednotek při rozbočování 1:2, dělí se na 1:16 a 1:32. Druhá trasa byla 50 km, tedy maximální dosah, kdy byla aktivní alespoň jedna koncová jednotka při rozbočování 1:2.

7.7.1 Měření výkonových úrovní

Měření výkonových úrovní probíhalo pomocí dvou PPM přístrojů, kdy jeden byl umístěn za OLT, označme jej pro tyto účely PPM1 a druhý před koncovou ONT jednotku, který označme PPM2. Výsledné hodnoty můžeme vidět v tabulce 7.1

Tabulka 7.1: Výkonové úrovně bez přidaných zesilovačů

Délka [km]	Optický výkon [dBm]				Útlum [dB]	
	PPM1		PPM2		Útlum [dB]	
	1310 nm	1490 nm	1310 nm	1490 nm	1310 nm	1490 nm
30	-29,2	2,7	2,1	-27,2	31,3	29,9
50	-33	2,7	2,9	-25,4	35,9	28,1

7.7.2 Měření přímou metodou

V rámci zjišťování konkrétních parametrů jednotlivých optických tras bylo použito mimo jiné i měření přímou metodou. Měření bylo prováděnou přímou metodou 1c, pro kterou je charakteristické, že využívá tří referenčních vláken. Tyto vlákna se připojí k optickému vysílači a přijímači, udělá se kalibrace a následně se odpojí prostřední vlákno a místo něj připojí měřená trasa. Optický vysílač je v tomto případě i optickým přijímačem, proto je možné provést měření oboustranně. Výsledky tohoto měření můžeme vidět v tabulce 7.2.

Tabulka 7.2: Výsledky měření tras přímou metodou

Výsledná délka [km]	Útlum [dB]			
	A -> B		B -> A	
	1310 nm	1490 nm	1310 nm	1490 nm
30,326	15,16	12,58	15,23	12,51
50,681	28,22	22,28	28,12	22,26

Přímou metodou byly taktéž proměřeny jednotlivé rozbočovače, výsledky z těchto měření se nacházejí v tabulce 7.3

Tabulka 7.3: Výsledky měření rozbočovačů přímou metodou

Rozbočovače	Útlum [dB]			
	A->B		B->A	
	1310 nm	1490 nm	1310 nm	1490 nm
1:2	3,8	3,62	3,75	3,58
1:16	14,14	13,73	14,1	13,71
1:32	14,98	15,08	15,09	15,2

7.7.3 Měření optické reflektometrie OTDR

Metoda zpětného rozptylu, která je nazývána optickou reflektometrií OTDR, je založena na periodickém vysílání velmi krátkých optických impulzů do vlákna. V důsledku Rayleighova rozptylu na mikronehomogenitách v jádru optického vlákna se část optického výkonu odráží zpět k začátku vlákna. Pomocí Fresnelova odrazu je možné dobře lokalizovat hrubé nehomogenity způsobené například nekorektními konektorovými propojeními, svary, případně přerušením optického vlákna. Tato metoda nám umožňuje zjistit délku měřeného vlákna, útlum vlákna, útlum určitých úseků, svarů a konektorů.[1]

Tabulka 7.4: Výsledky měření první trasy pomocí OTDR

Vlnová délka [nm]	Útlum [dB]	Měrný útlum [dB/km]	Výsledná délka [km]
1310	14,956	0,494	30,3032
1383	13,252	0,437	30,3291
1550	11,556	0,381	30,2996
1625	16,463	0,543	30,3027

Tabulka 7.4 zobrazuje výsledné hodnoty měření pomocí metody OTDR první optické trasy, která se skládá ze dvou desetikilometrových cívek a dvou pětikilometrových cívek vláken G 657-A1.

7.7.3.1 Obecné vyhodnocení všech tras měřených OTDR

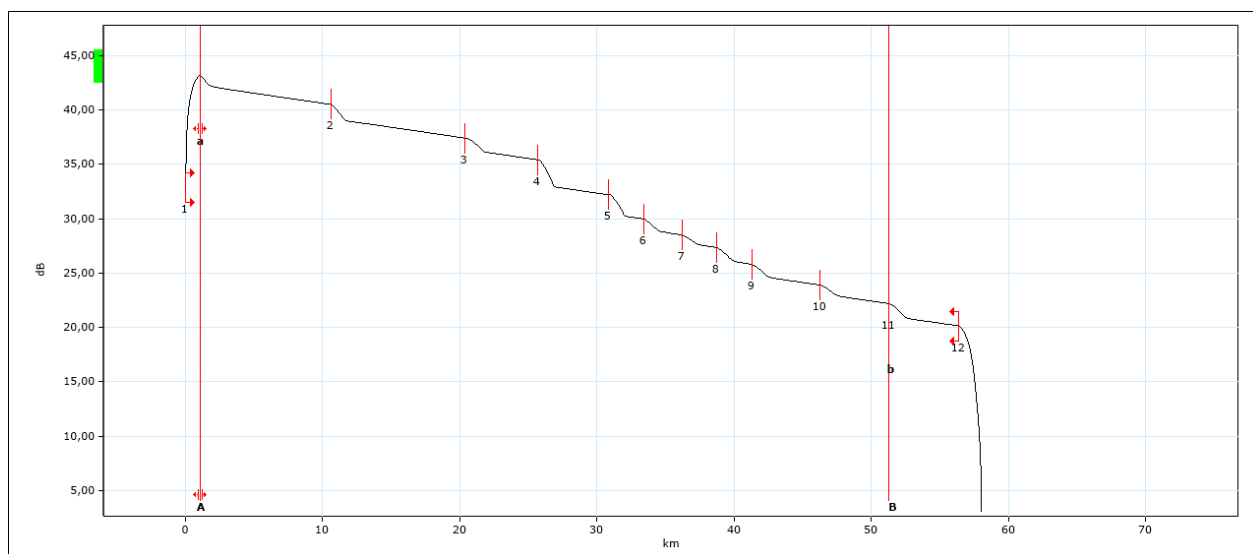
Z hodnot měrného útlumu můžeme vidět, že neodpovídá maximálním hodnotám dle normy ITU-T vypsanych v 7.3.1. Je to však způsobeno tím, že jednotlivá vlákna jsou vždy spojena několika spojkami a vyvedeny do spojky v panelu. Pro jednodušší přístup a snadnější manipulaci není do panelu vyvedeno přímo optické vlákno, ale je zde ještě mezi vlákno, aby při případném poškození mohlo být nahrazeno pouze toto mezi vlákno se spojkami na obou koncích. Při svařování jednotlivých pigtailů byla snaha o co nejlepší hodnoty, ale i toto může mít vliv na výsledný měrný útlum. Nehledě na to, že spojky a mezi vlákno se mohou při výuce zanést špínou a není v možnostech vždy pročistit celou trasu včetně spojek mezi vlákna.

Tabulka 7.5: Výsledky měření druhé trasy pomocí OTDR

Vlnová délka [nm]	Útlum [dB]	Měrný útlum [dB/km]	Výsledná délka [km]
1310	28,203	0,560	50,3529
1383	25,339	0,505	50,1667
1550	20,979	0,418	50,1771
1625	26,330	0,523	50,2976

Tabulka 7.5 zobrazuje výsledné hodnoty měření pomocí metody OTDR druhé optické trasy, která se skládá ze dvou 10 kilometrových cívek, dvou 5 kilometrových cívek, čtyř 2,5 kilometrových vláken G 657-A1 a dvou 5 kilometrových cívek vláken G 652 D. Zde znovu můžeme vidět, že hodnoty měrného útlumu nejsou vyhovující normám, důvodem tohoto nevyhovění je implementace v rámci školní laboratoře, která je popsána v 7.7.3.1.

Na obrázku 7.22 můžeme vidět druhou trasu a její složení z jednotlivých cívek. Pro měření bylo použito předřadné vlákno i zařadné vlákno a od bodu A do bodu B můžeme vidět celý obraz druhé trasy v rámci vlnové délky 1550 nm. Mezi body A a 5 se pak nachází obraz první trasy.



Obrázek 7.22: OTDR druhé trasy na vlnové délce 1550 nm

Tabulka 7.6: Výsledky měření rozbočovačů pomocí OTDR

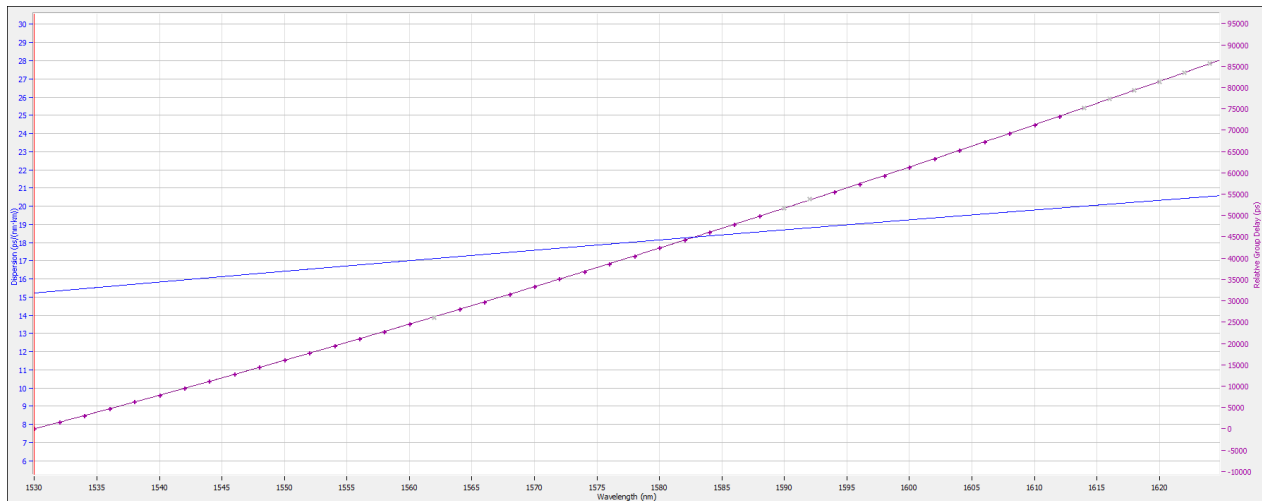
Rozbočovač:	Útlum [dB]					
	1:2		1:16		1:32	
Vlnová délka [nm]	1 ->n	n ->1	1 ->n	n ->1	1 ->n	n ->1
1310	4,607	6,029	13,451	12,217	15,985	17,576
1383	4,638	5,808	13,368	12,742	16,155	17,191
1550	4,316	5,339	13,315	12,542	16,354	18,029
1625	4,220	5,148	13,055	12,436	16,858	17,688

Z výsledků měření rozbočovačů můžeme vidět, že rozbočovač 1:2 má vyšší hodnoty útlumu na všech vlnových délkách, než udává katalogový list v 7.3.2. Rozbočovač 1:16 má v tomto ohledu vyhovující hodnoty dle katalogového listu v 7.3.3. Hodnoty rozbočovače 1:32 se velmi blíží hodnotám

udávaných v katalogovém listu v 7.3.4. Vyšší hodnoty mohou být způsobeny nepřesným umístěním bodů v aplikaci FastReporter3.

7.7.4 Měření chromatické disperze

Chromatická disperze vzniká ve všech typech optických vláken. Tato disperze je způsobena tím, že zdroje světla mají konečnou šířku pásma. Dále také tím, že index lomu závisí na vlnové délce světla. Se vzrůstající vlnovou délkou index lomu klesá a v tom případě se jednotlivé spektrální složky šíří vláknem rozdílnou rychlostí. Chromatická disperze se skládá z materiálové a vlnovodné disperze. Materiálová disperze je zapříčiněna rozdílnou rychlostí šíření paprsků o různých vlnových délkách. Vlnovodná disperze je způsobena rozdílnou rychlostí šíření světla v jádře a plášti vlákna.[1]

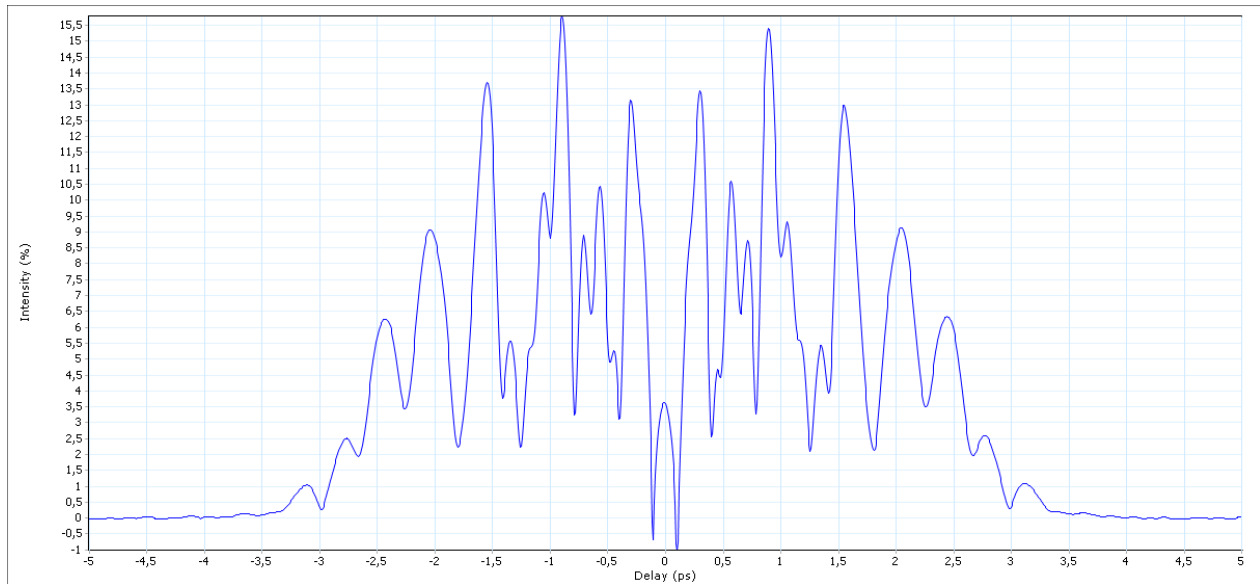


Obrázek 7.23: Chromatická disperze druhé trasy o délce 50 km

Měření chromatické disperze dosahovalo na první trase hodnoty 494,687 ps/nm na vlnové délce 1550 nm, což odpovídá hodnotě 16,326 ps/(nm·ps). Měření na druhé trase dosahovalo hodnoty 832,478 ps/nm na vlnové délce 1550 nm, což odpovídá hodnotě 16,42 ps/(nm·ps).

7.7.5 Měření polarizační vidové disperze

Polarizační vidová disperze je lineární efekt. V ideálním kruhově symetrickém vlákně mají dva ortogonálně polarizované režimy stejné skupinové zpoždění. Ve skutečnosti však vlákna vykazují určité množství dvojlomů v důsledku nedokonalostí výrobního procesu. PMD způsobuje různá zpoždění pro různé polarizace, a když se rozdíl ve zpožděních blíží významnému zlomku bitové periody, vede ke zkreslení pulsu.[1]



Obrázek 7.24: Polarizačně vidová disperze druhé trasy o délce 50 km

Měření polarizačně vidové disperze probíhalo na vlnové délce 1526,11 - 1619,9 nm. Pro první trasu byla průměrná hodnota PMD 1,2851 ps a průměrný koeficient PMD byl v tomto případě 0,2335 ps/km^{1/2}. Pro druhou trasu byla pak průměrná hodnota PMD 1,6486 ps a průměrný koeficient PMD byl 0,2315 ps/km^{1/2}.

7.8 Měření integrity sítě

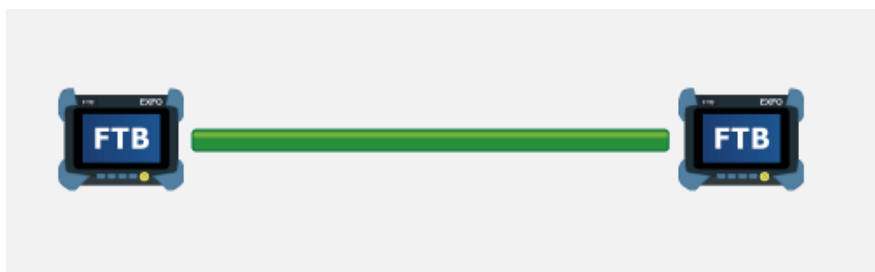
V rámci měření integrity sítě byly zvoleny dva měřící body, které můžeme vidět na obrázku 7.1. První měřící bod byl za ONT jednotkou, pro testování pouze optické části sítě, abychom mohli ověřit, co vstupuje do uplink rozhraní od VDSL DSLAM. Druhý měřící bod byl umístěn za VDSL2 Modemem, pro testování koncových služeb v hybridní fotonické síti. Oba tyto body byly měřeny při zapojení druhé trasy, tedy 50 km, což je nejdelší možná přidaná trasa při zapojení bez zesilovačů.

V grafickém uživatelském rozhraní Ikarus lze vidět, že hodnota vzdálenosti, kterou vidí OLT ze svého SNMP neodpovídá naměřeným hodnotám z přímé metody a OTDR. Tuto hodnotu si OLT počítá pomocí výkonu a času, za který s ním komunikují ONT jednotky, proto nemusí být naprosto přesná, ale můžeme vidět, že odhad takovýchto hodnot, jako je vzdálenost, signál na OLT, signál na ONU, nebo teplotu je možné vyčíst z webového uživatelského rozhraní. Pokud by nám toto rozhraní nevyhovovalo, je možné využít jiných monitorovacích prostředků, protože veškeré hodnoty jsou uloženy pod konkrétními OID (Object Identifier - identifikátor objektu v SNMP) v SNMP. V této práci bylo využito monitorovací platformy Grafana, kvůli nutnosti číst konkrétní hodnoty propustnosti sítě dle přesně specifikovaných časových intervalů.

Obrázek 7.25: Grafické zobrazení vzdálenosti ONT jednotky v GUI Ikarus

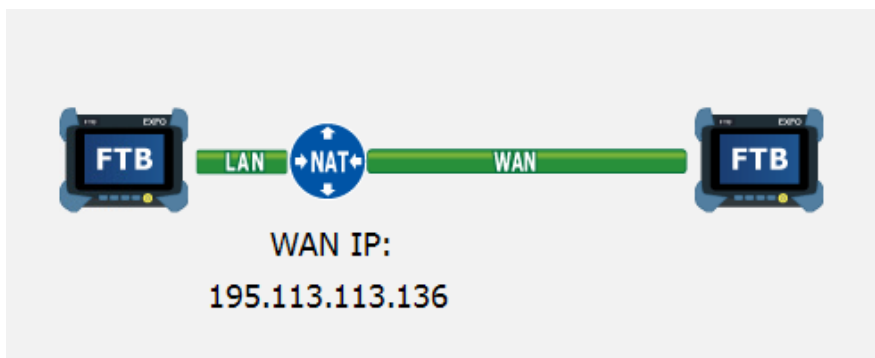
Veškeré měření probíhalo v rámci testování LAN a WAN sítí.

- LAN síť byla měřena pomocí dvou měřících přístrojů FTB-1 s moduly Netblazer. Jeden měřící přístroj byl umístěn v již dříve zmiňovaném měřícím bodě a druhý měřící přístroj byl připojen k přepínači MikroTik, aby byla proměřena lokální síť v rámci VLAN 300.



Obrázek 7.26: Jednoduché schéma měření LAN sítě

- WAN síť byla měřena pomocí jednoho měřícího přístroje FTB-1 s modulem Netblazer a vzdáleného měřícího serveru LTB-8 od ČTÚ, aby byla proměřena WAN síť v rámci VLAN 200 a sdíleného prostředí Internet.



Obrázek 7.27: Jednoduché schéma měření WAN sítě

Při měření multimediálních služeb je důležité brát v potaz parametry jako jsou zpoždění, kolísání zpoždění a ztrátovost. K vysílání videa v reálném čase se používá protokol RTP (Real-time Transport Protocol - protokol standardizující paketové doručování zvukových a obrazových dat po internetu), který využívá protokolu UDP a tedy není zaručeno, že vyslané pakety budou doručeny k cíli. Kvůli této vlastnosti UDP protokolu je nutné dbát na nízké hodnoty výše uvedených parametrů. K vyhodnocení těchto parametrů bude využito specifikace Metro Ethernet fóra - dokumentu MEF 23.1.

Tento dokument definuje různé rozsahy parametrů dle vzdálenosti, v tomto případě musíme brát v potaz PT1 (Performance Tier - Stupeň výkonnosti), neboli Metro PT se vzdálenostmi do 250 km pro LAN síť a PT2, neboli Regional PT se vzdálenostmi do 1200 km. Dále dokument udává takzvanou přísnost nastavených kritérií, která se dělí na tyto CoS (Class of service -úrovně služeb) [45]:

- H - High - Vysoká úroveň
- M - Medium - Střední úroveň
- L - Low - Nízká úroveň

Tabulka 7.7: MEF 23.1[45]

MEF 23.1		CoS - H	CoS - M	CoS - L
PT 1	Zpoždění rámců [ms]	≤ 10	≤ 20	≤ 37
	Kolísání zpoždění [ms]	≤ 3	≤ 8	-
	Ztrátovost rámců [%]([-])	$\leq 0,01 \sim (10^{-4})$	$\leq 0,01 \sim (10^{-4})$	$\leq 0,1 \sim (10^{-3})$
PT 2	Zpoždění rámců [ms]	≤ 25	≤ 75	≤ 125
	Kolísání zpoždění [ms]	≤ 8	≤ 40	-
	Ztrátovost rámců [%]([-])	$\leq 0,01 \sim (10^{-4})$	$\leq 0,01 \sim (10^{-4})$	$\leq 0,1 \sim (10^{-3})$

7.8.1 Vysvětlení pojmů statistické indukce

Při většině měření neodpovídaly data normálnímu rozdělení dle Shapirova-Wilkova testu a tedy byla prováděna statistická indukce pro medián dle Wilxonova testu. Data, která se nachází v tabulkách statistické indukce obsahují tyto pojmy [46]:

n - je počet provedených měření.

Minimum, Maximum - je minimum a maximum z naměřených hodnot.

Medián - je hodnota, která dělí řadu vzestupně seřazených výsledků na dvě stejně velké početné poloviny. Odpovídá také 50% kvantilu, tedy 50% hodnot je menších nebo rovných mediánu.

IQR - je mezikvartilové rozpětí. Tedy rozmezí, mezi dolním a horním kvartilem. V tabulkách se nachází pod IQR dolní kvartil ; horní kvartil hodnot.

Dolní kvartil Q1 - je 25% kvantil a vyjadřuje, že 25% hodnot je menších nebo rovných dolnímu kvartilu.

Horní kvartil Q3 - je 75% kvantil a vyjadřuje, že 75% hodnot je menších nebo rovných dolnímu kvartilu.

95% IO mediánu - je intervalový odhad mediánu dle Wilcoxonova testu, tedy 95% naměřených hodnot se nachází v tomto intervalu.

90% IO mediánu - je intervalový odhad mediánu dle Wilcoxonova testu, tedy 90% naměřených hodnot se nachází v tomto intervalu. Tento odhad je proveden u řádků s *. Tyto řádky měly mnoho opakujících se hodnot, tedy nebylo možné vypočítat 95% odhad.

- nemožnost vypočítat intervalový odhad mediánu je značeno pomlčkou, plyne to z toho, že všechny hodnoty vyšly stejně / velmi podobně a s touto přesností měření, bez jakýchkoliv odchylek, není možné IO vypočítat.

7.8.2 Měření dle normy ITU-T Y.1564

Norma ITU-T Y.1564 neboli EtherSAM definuje metodiku testování, která může být použita při hodnocení správné konfigurace a výkonu ethernetové sítě pro poskytování služeb. Metodika testování se vztahuje na konektivitu PTP i PTM. Hlavní výhodou tohoto testování je široké spektrum měřených parametrů a charakteristik, mezi které patří propustnost (Throughput), ztráta a poškození rámců při přenosu (Frame Loss), zpoždění při přenosu (Latency) a kolísání zpoždění (Jitter). Tato měření umožňují vyhodnocení výkonnostních kritérií na základě smlouvy SLA mezi operátorem a uživatelem. Velkou výhodou tohoto doporučení je, že umožňuje test konfigurace služeb, což znamená testování každé jednotlivé služby zvlášť, a test výkonnosti služeb, což znamená testování všech nastavených služeb najednou. Měření probíhá pomocí protokolu UDP.

CIR (Committed Information Rate - horní limit garantované přenosové kapacity pro danou službu).

Propustnost vyjadřuje objem dat, které je možné přenést za dobu jedné sekundy.

Ztrátovost je vyjádřena v měření bezrozměrná hodnota, ze které při vynásobení stovkou můžeme získat procenta. Tato hodnota spočívá ve vyslání určitého počtu testovacích rámců o definované velikosti, přičemž na přijímací straně se počítá, kolik rámců je úspěšně přijato.

Zpoždění určuje časovou prodlevu mezi vysláním daného rámce a jeho přijetím na místě určení.

Kolísání zpoždění vzniká při obecně různě dlouhému zpoždění při přenosu jednotlivých rámců.[1]

Veškeré testování probíhalo obousměrně, tedy první test lokální zařízení proti vzdálenému zařízení (L->R) a druhý test vzdálené zařízení proti lokálnímu zařízení (R->L). V rámci normy ITU-T Y.1564 byly testovány především multimediální služby, které byly doplněny daty, proto se v tabulkách a grafech nachází porovnání pouze směru R->L, tedy běžného vysílacího směru těchto služeb.

Tabulka 7.8: Nastavení měření dle ITU-T Y.1564 v měřicím bodě 1

Služba	Kodek	Velikost rámců [B]	Horní limit přenosové kapacity [Mbit/s]
SDTV	MPEG-2	1374	198,613
HDTV	MPEG-2	1374	204,439
HDTV	MPEG-4	1374	211,854
DATA	-	Náhodná	385,093

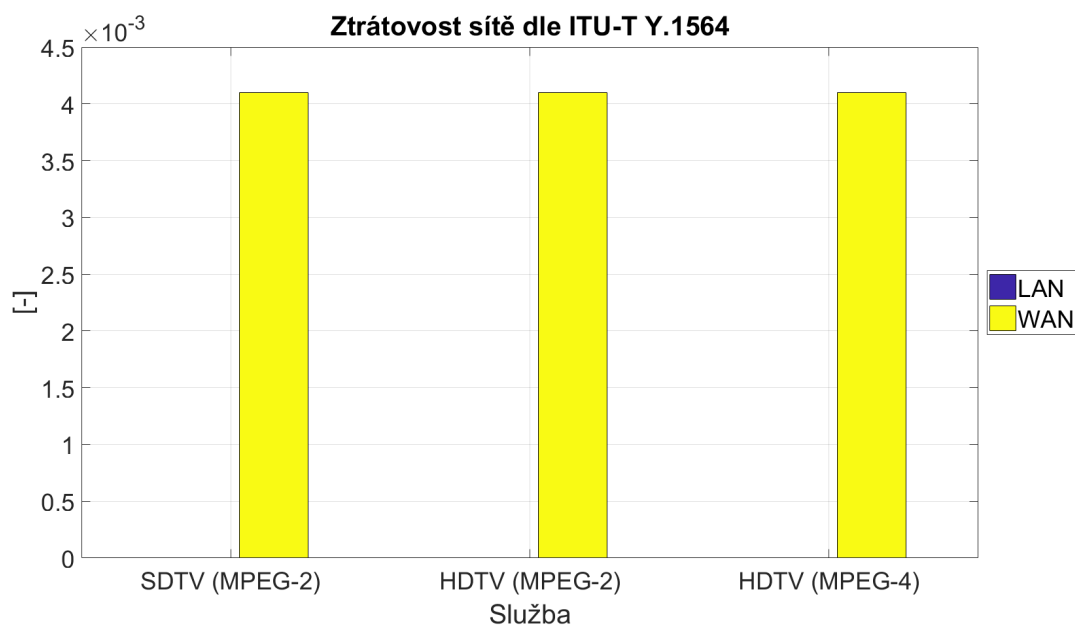
Při nastavení jednotlivých služeb, bylo dbáno na to, aby jednotlivé multimediální služby využívaly přibližně 20 procent celkové propustnosti linky, bylo tedy nastaveno 50 kanálů SDTV při kodeku MPEG-2, 10 kanálů HDTV při kodeku MPEG-4, 20 kanálů HDTV při kodeku MPEG-4 a zbytek kapacity linky byl doplněn daty o náhodné velikosti rámců. Konkrétní hodnoty můžeme vidět v tabulce 7.9. V tabulce se nachází průměry a mediány vypočítané z 10 nezávislých měření testu výkonnosti služeb, tedy testu, který měří všechny služby zároveň. Parametry kolísání zpoždění, zpoždění a propustnost jsou v rámci tabulky vyhodnoceny z maximálních hodnot naměřených testem dle normy ITU-T Y.1564. Průměry a mediány těchto hodnot jsou tedy výsledkem 10 maximálních hodnot jednotlivých testů.

Tabulka 7.9: Výsledky testu výkonnosti služeb dle normy ITU-T Y.1564 v měřicím bodě 1

Test výkonnosti služeb									
Služba	Testovaná síť	Ztrátovost [-]		Kolísání zpoždění [ms]		Zpoždění [ms]		Propustnost [Mbit/s]	
		Průměr	Medián	Průměr	Medián	Průměr	Medián	Průměr	Medián
SDTV (MPEG-2)	LAN	6,20E-08	0	0,227	0,076	1,555	1,336	198,612	198,612
	WAN	4,08E-03	4,10E-03	4,080	5,860	92,097	82,504	197,754	197,755
HDTV (MPEG-2)	LAN	6,00E-08	0	0,227	0,076	1,555	1,336	204,438	204,438
	WAN	4,09E-03	4,10E-03	4,081	5,859	103,614	89,067	203,555	203,560
HDTV (MPEG-4)	LAN	8,70E-08	0	0,227	0,076	1,555	1,336	211,853	211,853
	WAN	4,10E-03	4,10E-03	4,078	5,861	93,147	83,926	210,928	210,925
DATA	LAN	2,00E-02	2,00E-02	0,221	0,076	1,555	1,336	381,478	381,478
	WAN	1,93E-03	1,90E-03	4,079	5,874	103,193	90,090	384,044	384,040

Tabulka 7.10: Statistická indukce ztrátovosti dle normy ITU-T Y.1564 v měřícím bodě 1

Ztrátovost [-]					
Služba	Testovaná síť	n	Minimum, Maximum	Medián (IQR)	95% IO mediánu
SDTV (MPEG-2)	LAN	10	0 ; 3,1E-07	0 (0 ; 0)	-
	WAN	10	3,9E-03 ; 4,3E-03	4,1E-03 (4,0E-03 ; 4,1E-03)	4,0E-03 ; 4,2E-03
HDTV (MPEG-2)	LAN	10	0 ; 3,0E-07	0 (0 ; 0)	-
	WAN	10	3,8E-03 ; 4,3E-03	4,1E-03 (4,0E-03 ; 4,2E-03)	3,9E-03 ; 4,2E-03
HDTV (MPEG-4)	LAN	10	0 ; 2,9E-07	0 (0 ; 2,2E-07)	-
	WAN	10	4,0E-03 ; 4,2E-03	4,1E-03 (4,0E-03 ; 4,2E-03)	4,0E-03 ; 4,2E-03

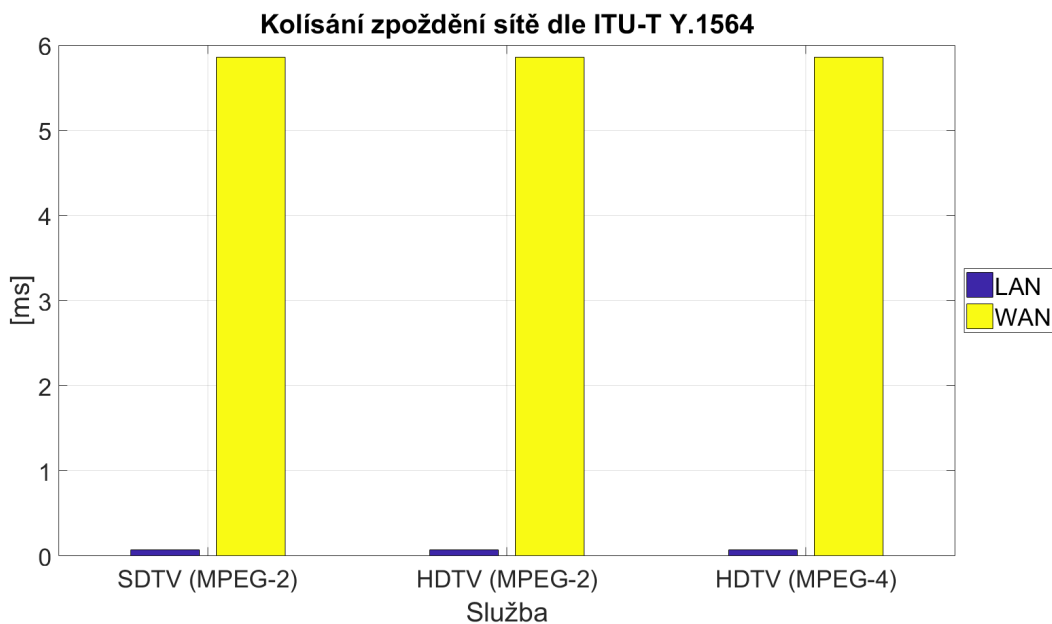


Obrázek 7.28: Ztrátovost sítě dle ITU-T Y.1564 v měřícím bodě 1

Ze statistické indukce 7.10 a grafu 7.28 v měřícím bodě 1 lze přesně určit, že na LAN síti se ztrátovost sítě blíží nule, což odpovídá vysoké úrovni služeb, oproti tomu na WAN síti dosahuje velmi vysokých hodnot, řádově až 0,41 %, což je nevyhovující dle 7.7 - MEF 23.1. Z výsledků WAN sítě se dá přihlédnout k tomu, že internet je sdílené prostředí, kde neplatí žádné QoS záruky a proto nelze zaručit vyhovující hodnoty.

Tabulka 7.11: Statistická indukce kolísání zpoždění dle normy ITU-T Y.1564 v měřícím bodě 1

Kolísání zpoždění [ms]					
Služba	Testovaná síť	n	Minimum, Maximum	Medián (IQR)	95% IO mediánu
SDTV (MPEG-2)	LAN	10	0,044 ; 0,754	0,076 (0,073 ; 0,393)	0,062 ; 0,415
	WAN	10	0,844 ; 6,322	5,860 (1,124 ; 6,177)	1,136 ; 6,143
HDTV (MPEG-2)	LAN	10	0,044 ; 0,754	0,076 (0,073 ; 0,394)	0,062 ; 0,415
	WAN	10	0,842 ; 6,315	5,859 (1,147 ; 6,168)	1,155 ; 6,134
HDTV (MPEG-4)	LAN	10	0,045 ; 0,754	0,076 (0,073 ; 0,394)	0,062 ; 0,415
	WAN	10	0,846 ; 6,317	5,861 (1,131 ; 6,174)	1,137 ; 6,135

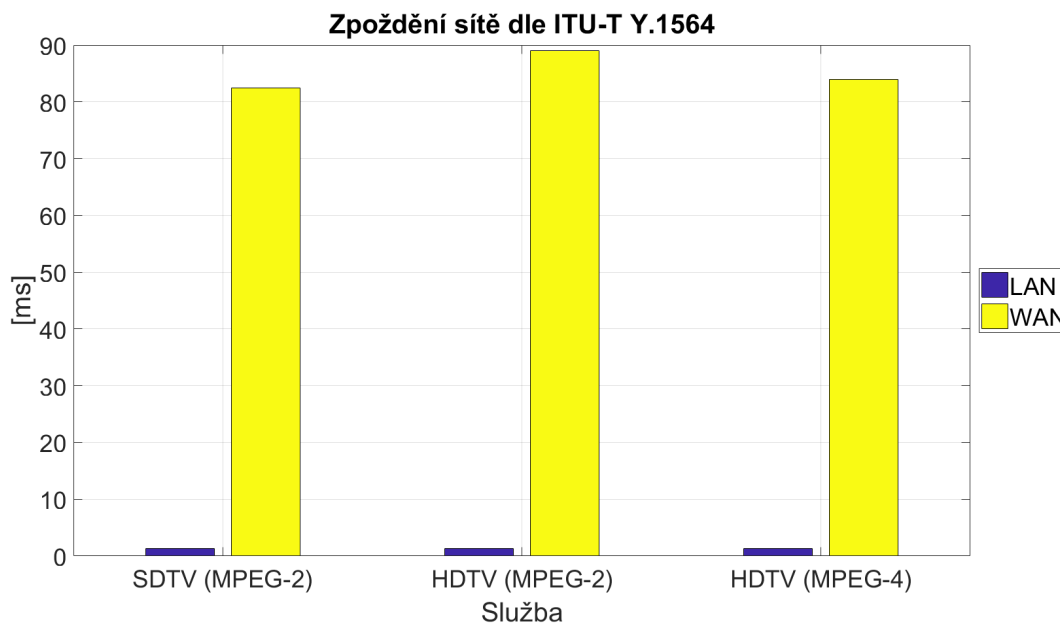


Obrázek 7.29: Kolísání zpoždění sítě dle ITU-T Y.1564 v měřícím bodě 1

Ze statistické indukce 7.11 a grafu 7.29 v měřícím bodě 1 lze přesně určit, že maximální kolísání zpoždění sítě měřené dle normy ITU-T Y.1564 nabývalo mnohem vyšších hodnot na WAN síti. I přes toto výrazné zvýšení jsou hodnoty v tomto měřícím bodě, tedy pouze na optické síti, vyhovující podle 7.7. Konkrétně splňují hodnoty měřené na LAN i WAN vysokou úroveň služeb - CoS - H pro kolísání zpoždění MEF 23.1.

Tabulka 7.12: Statistická indukce zpoždění dle normy ITU-T Y.1564 v měřícím bodě 1

Zpoždění [ms]					
Služba	Testovaná síť	n	Minimum, Maximum	Medián (IQR)	95% IO mediánu
SDTV (MPEG-2)	LAN	10	1,299 ; 2,139	1,336 (1,321 ; 1,890)	1,315 ; 1,735
	WAN	10	74,850 ; 150,003	82,504 (78,165 ; 90,795)	77,843 ; 114,044
HDTV (MPEG-2)	LAN	10	1,299 ; 2,139	1,336 (1,321 ; 1,890)	1,315 ; 1,735
	WAN	10	78,520 ; 164,253	89,067 (84,707 ; 114,396)	83,085 ; 124,697
HDTV (MPEG-4)	LAN	10	1,299 ; 2,139	1,336 (1,321 ; 1,890)	1,315 ; 1,735
	WAN	10	77,390 ; 150,187	83,926 (78,741 ; 90,780)	79,344 ; 114,163



Obrázek 7.30: Zpoždění sítě dle ITU-T Y.1564 v měřícím bodě 1

Ze statistické indukce 7.12 a grafu 7.30 v měřícím bodě 1 lze znovu s jistotou říci, že maximální zpoždění sítě měřené dle normy ITU-T Y.1564 nabývalo mnohem vyšších hodnot na WAN síti. Pro LAN síť se dosažené maximální hodnoty vlezou do vysoké úrovně služeb - CoS - H, podle 7.7, oproti tomu na WAN síti dosahují maximální hodnoty zpoždění pouze nízké úrovně služeb - CoS - L. Vyhodnocování bylo prováděno dle MEF 23.1.

Tabulka 7.13: Nastavení měření dle ITU-T Y.1564 v měřicím bodě 2

Služba	Kodek	Velikost rámců [B]	Horní limit přenosové kapacity [Mbit/s]
SDTV	MPEG-2	1374	19,861
HDTV	MPEG-2	1374	20,443
HDTV	MPEG-4	1374	21,185
DATA	-	Náhodná	38,510

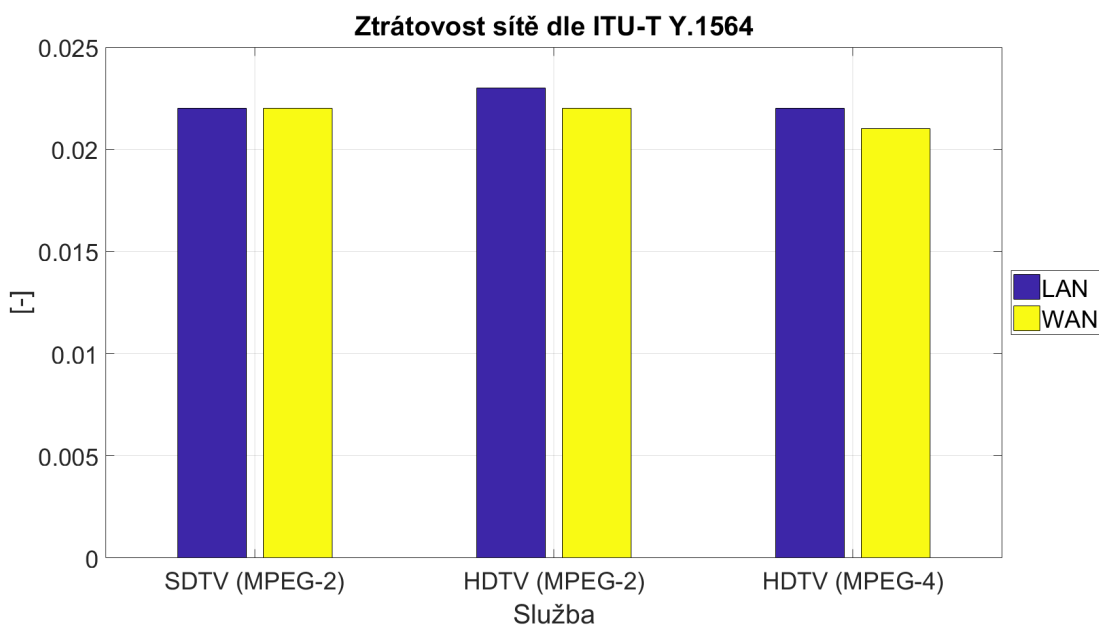
Nastavení jednotlivých služeb bylo opět provedeno tak, aby jednotlivé multimediální služby využívaly přibližně 20 procent celkové propustnosti linky, poněvadž v měřicím bodě 2 již máme maximální propustnost v sestupném směru pouze 100 Mbit/s, tak bylo nastaveno 5 kanálů SDTV při kodeku MPEG-2, 1 kanál HDTV při kodeku MPEG-4, 2 kanály HDTV při kodeku MPEG-4 a zbytek kapacity linky byl doplněn daty o náhodné velikosti rámců. Konkrétní hodnoty můžeme vidět v tabulce 7.13. V tabulce se nachází průměry a mediány vypočítané z 10 nezávislých měření testu výkonosti služeb, tedy testu, který měří všechny služby zároveň.

Tabulka 7.14: Výsledky testu výkonosti služeb dle normy ITU-T Y.1564 v měřicím bodě 2

Test výkonosti služeb									
Služba	Testovaná síť	Ztrátovost [-]		Kolísání zpoždění [ms]		Zpoždění [ms]		Propustnost [Mbit/s]	
		Průměr	Medián	Průměr	Medián	Průměr	Medián	Průměr	Medián
SDTV (MPEG-2)	LAN	2,20E-02	2,20E-02	5,392	5,396	125,712	125,713	19,407	19,407
	WAN	2,16E-02	2,20E-02	5,309	5,309	132,540	133,379	19,402	19,400
HDTV (MPEG-2)	LAN	2,29E-02	2,30E-02	5,327	5,342	125,769	125,735	19,967	19,967
	WAN	2,20E-02	2,20E-02	5,291	5,291	132,477	133,386	19,965	19,965
HDTV (MPEG-4)	LAN	2,20E-02	2,20E-02	5,339	5,325	125,728	125,637	20,702	20,702
	WAN	2,14E-02	2,10E-02	5,843	5,283	132,707	133,465	20,700	20,700
DATA	LAN	2,27E-02	2,30E-02	5,338	5,340	125,640	125,579	37,617	37,617
	WAN	2,20E-02	2,20E-02	5,888	5,317	132,555	133,397	37,609	37,610

Tabulka 7.15: Statistická indukce ztrátovosti dle normy ITU-T Y.1564 v měřícím bodě 2

Ztrátovost [-]					
Služba	Testovaná síť	n	Minimum, Maximum	Medián (IQR)	95% IO mediánu
SDTV (MPEG-2)	LAN	10	2,2E-02 ; 2,2E-02	2,2E-02 (2,2E-02 ; 2,2E-02)	-
	WAN	10	2,1E-02 ; 2,2E-02	2,2E-02 (2,1E-02 ; 2,2E-02)	2,1E-02 ; 2,2E-02
HDTV (MPEG-2)	LAN	10	2,2E-02 ; 2,3E-02	2,3E-02 (2,3E-02 ; 2,3E-02)	2,3E-02 ; 2,3E-02*
	WAN	10	2,2E-02 ; 2,2E-02	2,2E-02 (2,2E-02 ; 2,2E-02)	-
HDTV (MPEG-4)	LAN	10	2,2E-02 ; 2,2E-02	2,2E-02 (2,2E-02 ; 2,2E-02)	-
	WAN	10	2,1E-02 ; 2,2E-02	2,1E-02 (2,1E-02 ; 2,2E-02)	2,1E-02 ; 2,2E-02

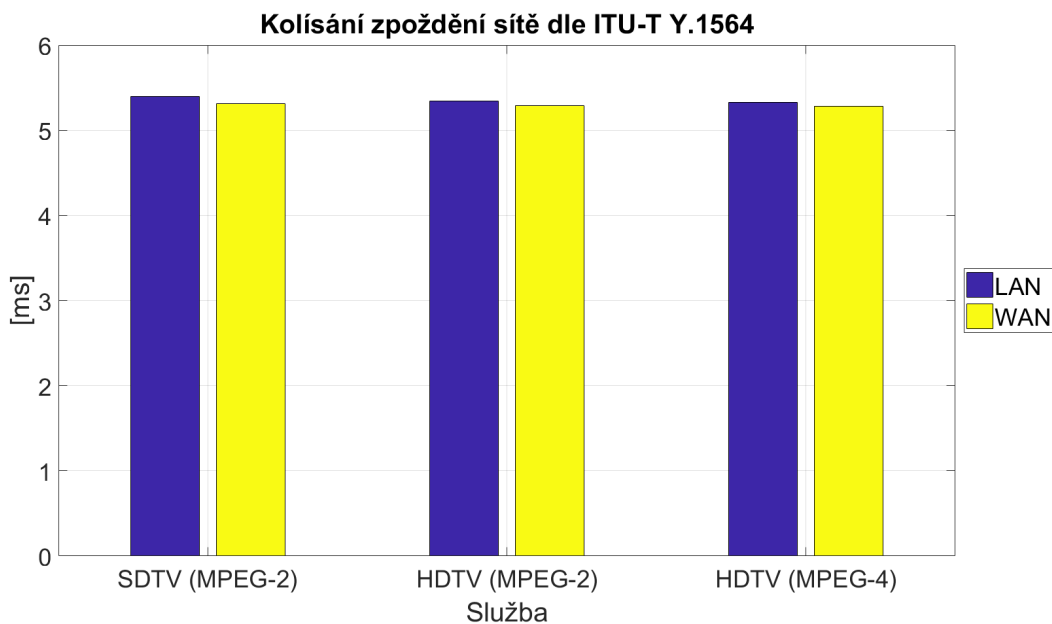


Obrázek 7.31: Ztrátovost sítě dle ITU-T Y.1564 v měřícím bodě 2

Oproti měření v měřícím bodě 1 se v měřícím bodě 2 ztrátovost velmi zvedla. Tento jev je dán přidáním VDSL2 a tedy celkovou hybridní fotonickou sítí. Ztrátovost na této hybridní fotonické síti převyšuje 2%, což je příliš vysoká hodnota na to, aby vyhověla 7.7 - MEF 23.1. V rámci LAN sítě by pro dosažení lepších hodnot muselo být implementováno určitých QoS nástrojů, bez nich tato hybridní fotonická síť nevyhovuje standardům.

Tabulka 7.16: Statistická indukce kolísání zpoždění dle normy ITU-T Y.1564 v měřícím bodě 2

Kolísání zpoždění [ms]					
Služba	Testovaná síť	n	Minimum, Maximum	Medián (IQR)	95% IO mediánu
SDTV (MPEG-2)	LAN	10	5,339 ; 5,456	5,396 (5,366 ; 5,413)	5,367 ; 5,417
	WAN	10	5,245 ; 5,367	5,309 (5,284 ; 5,334)	5,284 ; 5,337
HDTV (MPEG-2)	LAN	10	5,269 ; 5,376	5,342 (5,305 ; 5,344)	5,305 ; 5,348
	WAN	10	5,234 ; 5,345	5,291 (5,255 ; 5,334)	5,256 ; 5,325
HDTV (MPEG-4)	LAN	10	5,263 ; 5,416	5,325 (5,309 ; 5,377)	5,302 ; 5,374
	WAN	10	5,228 ; 10,781	5,283 (5,253 ; 5,333)	5,254 ; 8,006

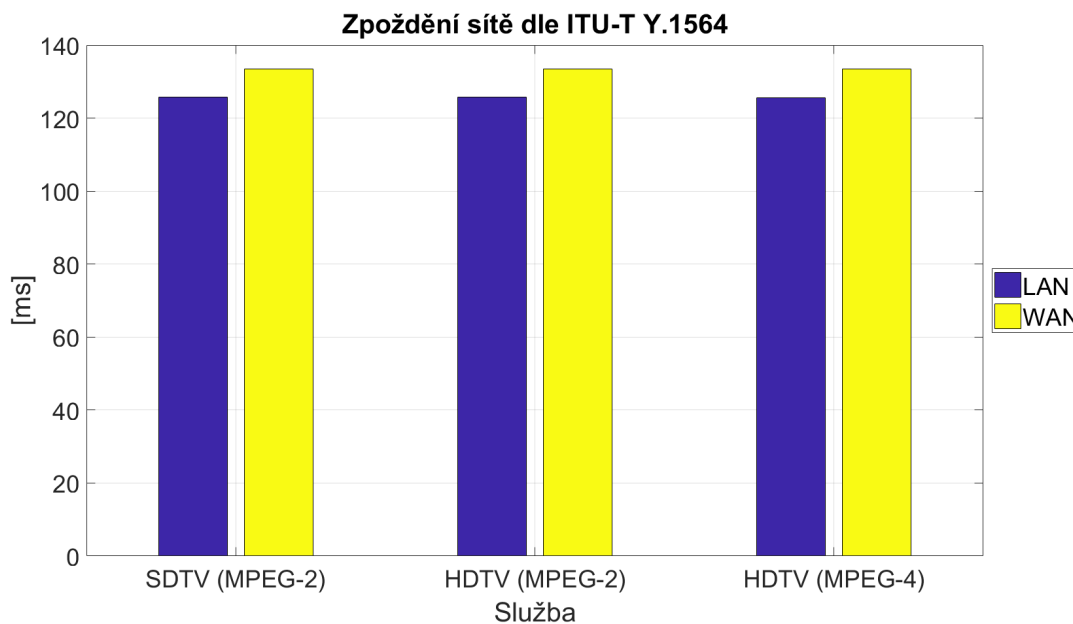


Obrázek 7.32: Kolísání zpoždění sítě dle ITU-T Y.1564 v měřícím bodě 2

V měřícím bodě 2, tedy za VDSL modemem můžeme ze statistické indukce 7.16 a grafu 7.32 vidět, že maximální hodnoty měřené na LAN a WAN síti jsou si velmi podobné. Poněvadž se ale vyhodnocuje LAN síť podle PT 1 a WAN síť podle PT 2, tak lze z těchto hodnot říci, že dle MEF 23.1 - 7.7 vyhovuje hybridní fotonická síť LAN střední úrovni služeb, tedy CoS - M a hybridní fotonická síť WAN vysoké úrovni služeb, tedy CoS - H.

Tabulka 7.17: Statistická indukce zpoždění dle normy ITU-T Y.1564 v měřícím bodě 2

Zpoždění [ms]					
Služba	Testovaná síť	n	Minimum, Maximum	Medián (IQR)	95% IO mediánu
SDTV (MPEG-2)	LAN	10	125,338 ; 126,183	125,713 (125,571 ; 125,741)	125,518 ; 125,945
	WAN	10	129,622 ; 135,083	133,379 (130,188 ; 134,361)	130,313 ; 134,431
HDTV (MPEG-2)	LAN	10	125,464 ; 126,293	125,735 (125,597 ; 125,899)	125,612 ; 125,945
	WAN	10	129,527 ; 135,277	133,386 (130,082 ; 134,306)	130,087 ; 134,335
HDTV (MPEG-4)	LAN	10	125,456 ; 126,261	125,637 (125,540 ; 125,856)	125,539 ; 125,931
	WAN	10	129,654 ; 135,361	133,465 (130,846 ; 134,339)	131,156 ; 134,306



Obrázek 7.33: Zpoždění sítě dle ITU-T Y.1564 v měřícím bodě 2

V měřícím bodě 2 bylo maximální zpoždění sítě dle statistické indukce a grafu mnohem vyšší, než udává 7.7 pro všechny služby. Proto lze říci, že síť LAN ani WAN nevyhovely předpokladům dle MEF 23.1. Tento jev způsobilo přidání VDSL do sítě a tedy měření celé hybridní fotonické sítě. Zároveň je vidět, že zpoždění bylo vyšší na WAN síti. Zde můžeme vidět, že i přestože kolísání zpoždění v měřícím bodě 2 vyhovělo předpokladům MEF 23.1, tak zpoždění vyhovět nemusí.

7.8.3 Měření dle doporučení RFC 6349

Doporučení RFC 6349 provádí měření na transportní (L4) vrstvě ISO/OSI modelu s využitím protokolu TCP pro přenos dat. Dle RFC 6349 je doporučeno provádět test propustnosti v obou směrech nezávisle na sobě a poté testy spustit v obou směrech současně. V doporučení slouží jako reference práh 5% ztráty paketů a Jitter s hodnotou 150 ms. Pokud jsou podle tohoto doporučení naměřené hodnoty vyšší, naznačuje to poruchový nebo mimořádný stav sítě. Podle doporučení RFC 6349 lze měřit aktuální L4 propustnost, TCP efektivitu a zpoždění Bufferu.

Velikost okna je údaj o tom, kolik a jak velkých oken se pošle, aniž by se čekalo na doručení potvrzení od přijímací strany. Udává se v KiB (Kibibyte - Kibibajt - jednotka kapacity paměťových médií), kdy 1 KiB = 1024 bajtů.

Aktuální L4 propustnost vyjadřuje objem dat na transportní vrstvě ISO/OSI modelu, které je možné přenést za dobu jedné sekundy.

Zpoždění Bufferu vyjadřuje zpoždění vyrovnávací paměti.

RTT udává časový rozdíl mezi odesláním prvního bitu zprávy příjemci a potvrzením posledního doručeného bitu této zprávy, tedy zprávou TCP Acknowledgment odeslanou příjemcem vysílací straně.[1][9]

Měření dle doporučení RFC 6349 v měřicím bodě 1 probíhalo obousměrně a v nastavení byl specifikován pouze horní limit přenosové kapacity na 1000 Mbit/s a velikost MTU (Maximum Transmission Unit - maximální velikost paketu (datové jednotky) pro daný přenosový spoj) 1500 bajtů. V tabulkách se nachází průměry a mediány vypočítané z 10 nezávislých měření v obou směrech zároveň. Poněvadž ale většina hodnot neměla dle Shapirova-Wilkova testu normální rozdělení, byly další testy a počítání provedeny na medián. Do jednotlivých grafů byl pak také použitý medián hodnot.

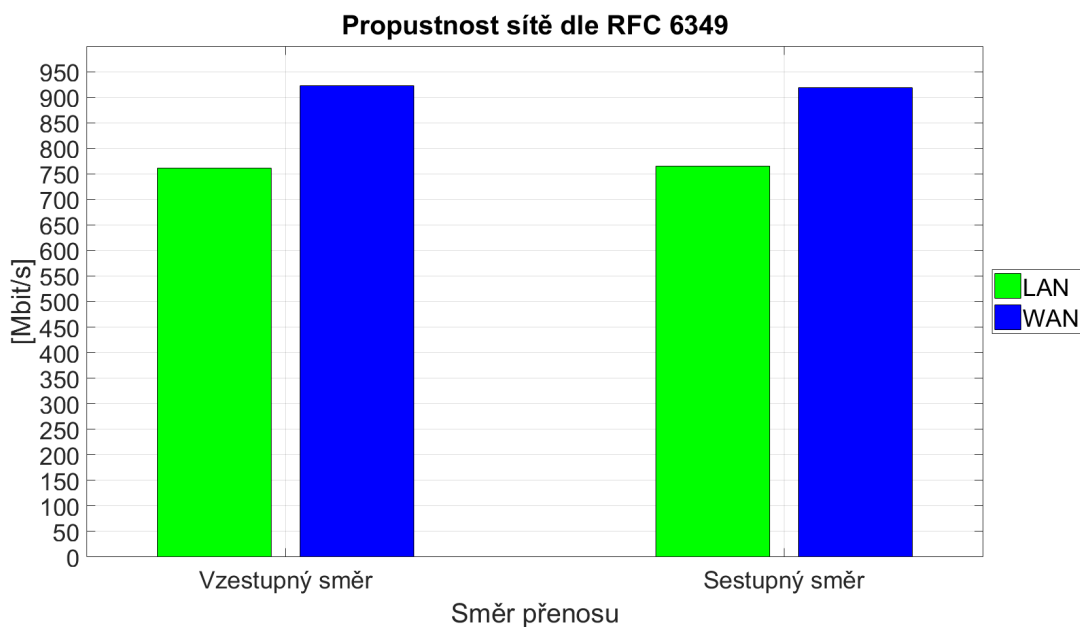
Tabulka 7.18: Výsledné hodnoty RFC 6349 v měřicím bodě 1

Směr přenosu	Testovaná síť	Velikost okna [KiB]		Aktuální propustnost [Mbit/s]		Zpoždění bufferu [%]		Minimální RTT [ms]	
		Medián	Průměr	Medián	Průměr	Medián	Průměr	Medián	
Vzestupný směr	LAN	72 (2 spojení po 36)	760,700	761,050	26,984	25,194	0,632	0,632	
	WAN	1136 (16 spojení po 71)	917,540	921,950	1,536	1,420	9,870	9,878	
Sestupný směr	LAN	72 (2 spojení po 36)	765,390	765,650	17,360	17,360	0,632	0,632	
	WAN	1136 (16 spojení po 71)	913,590	919,300	4,085	4,635	9,870	9,878	

Vysvětlení pojmů statistické indukce se nachází v sekci 7.8.1

Tabulka 7.19: Statistická indukce propustnosti dle RFC 6349 v měřícím bodě 1

Propustnost [Mbit/s]					
Směr přenosu	Testovaná síť	n	Minimum, Maximum	Medián (IQR)	95% IO mediánu
Vzestupný směr	LAN	10	756,500 ; 762,200	761,050 (760,400 ; 761,750)	759,200 ; 761,750
	WAN	10	901,100 ; 930,700	921,950 (905,225 ; 926,625)	907,850 ; 927,800
Sestupný směr	LAN	10	764,500 ; 766,100	765,650 (765,025 ; 765,800)	765,000 ; 765,800
	WAN	10	894,600 ; 926,300	919,300 (903,825 ; 922,150)	904,450 ; 922,600



Obrázek 7.34: Propustnost sítě dle RFC 6349 v měřícím bodě 1

Z tabulek 7.18, 7.19 a grafu 7.34 můžeme vidět, že během testování WAN sítě v měřícím bodě 1 byla vyšší propustnost v obou směrech. Tento jev lze vysvětlit tím, že pro WAN síť byla zvolena vhodnější velikost okna, v závislosti na RTT. Pro LAN síť se volila velikost okna na základě velmi nízkého RTT, ale tento fakt pak navýšil zpoždění bufferu, což je nežádoucí.

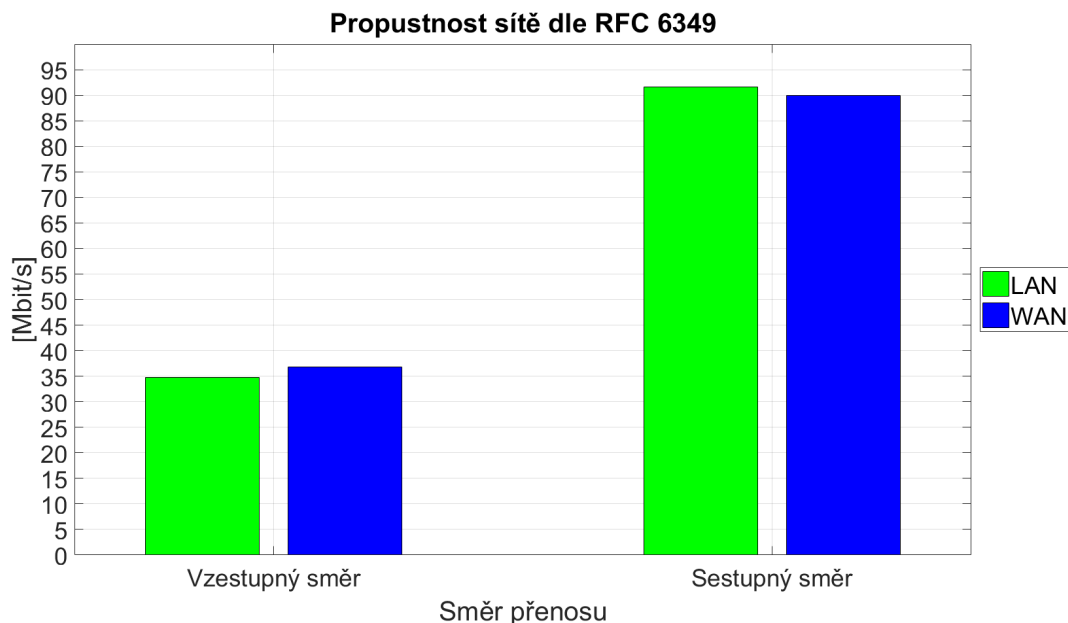
Měření dle doporučení RFC 6349 v měřícím bodě 2 probíhalo obousměrně a v nastavení byl specifikován pouze horní limit přenosové kapacity na 100 Mbit/s a velikost MTU 1500 bajtů. V tabulkách se nachází průměry a mediány vypočítané z 10 nezávislých měření v obou směrech zároveň. Poněvadž ale většina hodnot neměla dle Shapirova-Wilkova testu normální rozdělení, byly další testy a počítání provedeny na medián. Do jednotlivých grafů byl pak také použitý medián hodnot.

Tabulka 7.20: Výsledné hodnoty RFC 6349 v měřícím bodě 2

Směr přenosu	Testovaná síť	Velikost okna [KiB]		Aktuální propustnost [Mbit/s]		Zpoždění bufferu [%]		Minimální RTT [ms]	
		Medián	Průměr	Medián	Průměr	Medián	Průměr	Medián	
Vzestupný směr	LAN	118 (2 spojení po 59)	34,310	34,700	69,766	65,570	10,347	10,353	
	WAN	220 (4 spojení po 55)	36,800	36,800	153,849	155,380	19,085	19,184	
Sestupný směr	LAN	118 (2 spojení po 59)	91,590	91,600	7,079	7,440	10,347	10,353	
	WAN	220 (4 spojení po 55)	89,630	90,000	8,156	7,830	19,085	19,184	

Tabulka 7.21: Statistická indukce propustnosti dle RFC 6349 v měřícím bodě 2

Propustnost [Mbit/s]					
Směr přenosu	Testovaná síť	n	Minimum, Maximum	Medián (IQR)	95% IO mediánu
Vzestupný směr	LAN	10	31,400 ; 36,700	34,700 (32,975 ; 36,000)	33,000 ; 35,800
	WAN	10	36,800 ; 36,800	36,800 (36,800 ; 36,800)	-
Sestupný směr	LAN	10	91,500 ; 91,600	91,600 (91,600 ; 91,600)	91,600 ; 91,600*
	WAN	10	87,200 ; 90,900	90,000 (89,225 ; 90,100)	88,650 ; 90,400



Obrázek 7.35: Propustnost sítě dle RFC 6349 v měřícím bodě 2

Z tabulek 7.20, 7.21 a grafu 7.35 můžeme vidět, že v měřícím bodě 2 jsou dosažené přenosové rychlosti mnohem vyrovnanější, mezi LAN a WAN sítí. Plyne to z maximální přenosové rychlosti pro profil 17a, která byla na L1 97,77 Mbit/s ve směru sestupném a 39,362 Mbit/s ve směru vzestupném, což odpovídá při MTU 1500 přenosové rychlosti na L4 94,039 Mbit/s ve směru sestupném a 37,86 Mbit/s ve směru vzestupném.

7.9 Měření multimediálních služeb

Měření multimediálních vlastností probíhalo pomocí aplikace EXpert IPTV na platformě FTB-1. Měřicí zařízení bylo umístěno do měřících bodů a na serveru byl nastaven RTP přenos pomocí přehrávače VLC. Pro testování multimediálních služeb bylo použito jedno video o délce 5 minut a 13 vteřin, které bylo v těchto formátech:

Tabulka 7.22: Testované video formáty

	MP4		MPEG-2	
Formát	Video kodek	Zvukový kodek	Video kodek	Zvukový kodek
SD	H264	MPEG2AAC	MPEG2	MP2
HD	H264	MPEG2AAC	MPEG2	MP2
Full HD	H264	MPEG2AAC	MPEG2	MP2

Všechny vytvořené video formáty měly stejnou délku a různé bylo tedy pouze rozlišení videa a jeho video a zvukového kodeku, aby bylo možné nejlepší porovnání mezi sebou.

The screenshot displays the 'Expert IPTV Test Tools' application window. The interface includes a 'Test Log' on the left showing a test on '224.1.1.1 - Channel1'. The main area is divided into several sections:

- STB Channels:** A table listing two channels: Channel1 (224.1.1.1) and Channel2 (232.0.6.1).
- Interface Status:** Shows the network interface is 'Up' with an IP address of 172.16.0.75, a downstream rate of 4,008 kbits/s, and an upstream rate of 0 kbits/s.
- Video Description Information:** A detailed list of video parameters:
 - IP Source Address: 172.16.0.5
 - IP Destination Address: 224.1.1.1
 - Source Port: 53803
 - Destination Port: 5004
 - Protocols: UDP, RTP, MP2TS
 - Codec Type: H264
 - Group Of Picture Type: IBBPBB
 - Current GOP Length [frames]: 198
 - Average GOP Length [frames]: 198
 - Max GOP Length [frames]: 198
 - Avg Gap Of I Frames [frames]: 143
 - Frame Width [pixels]: 1280
 - Frame Height [pixels]: 720
 - Frame Rate [frames/s]: n/a
 - Interlaced: No
 - Avg Number Of Slices In I-frame: 45
 - Reference Clock Rate [Hz]: 90 000
 - Avg Video Bandwidth [Mbits/s]: 2,66
 - Average Packet Size [B]: 1 370
- Summary:** A table of performance metrics:
 - Measurement Time: 00:00:20
 - Average Audio/Video MOS: 4,32 (green checkmark)
 - Max PCR Jitter [ms]: 4,06 (green checkmark)
 - Video Packets Loss Ratio [%]: 0,00 (green checkmark)
 - TR 101 290 Errors: priority 2 (yellow warning triangle)
 - IGMP Latency [ms]: 15 (yellow warning triangle)

Obrázek 7.36: Měření pomocí aplikace EXpert IPTV

Pro hodnocení kvality videa a zvuku se využívá stupnice MOS (Mean Opinion Score - Průměrné vyhodnocení skóre) definovaná doporučením ITU-T P.800.1. Tato stupnice může nabývat hodnot 1,0 až 5,0 a dělí se na [47][48]:

- 1 - Špatná kvalita
- 2 - Nízká kvalita
- 3 - Průměrná kvalita
- 4 - Dobrá kvalita
- 5 - Vynikající kvalita

Aplikace EXpert IPTV umí vyhodnocovat jak MOS-V, tedy video kvalitu, tak MOS-A, tedy zvukovou kvalitu. Oboje vyhodnocení se provádí v takzvaném absolutním MOS, které berou do úvahy parametry jako kvalitu, snímkovou frekvenci, nebo i progresivní, nebo prokládané skenování. Vysvětlení veličin měřených dle aplikace EXpert IPTV [39]:

MOS Průměrná absolutní hodnota MOS je hodnota, která měří vliv video kodeku, rozlišení obrazu, frekvenci snímků, ztrát paketů a kvalitu zobrazení.

EPSNR je odhadovaný poměr odstupu signálu od šumu vyjádřený v dB (PSNR - Peak Signal-to-noise Ratio - odstup signálu od šumu). Jedná se o odhad zkreslení, ke kterému došlo mezi zdrojovým a výstupním video vysíláním.

Průměrné snímkové kolísání zpoždění je udáváno v milisekundách a počítá se vzhledem k očekávanému času příchodu snímku na základě snímkové frekvence.

Průměrné snímkové zpoždění je udáváno v milisekundách.

Šířka pásma videa udává průměrnou šířku pásma, která byla využita pro přenos videa.

Šířka pásma zvuku udává průměrnou šířku pásma, která byla využita pro přenos zvuku.

Při měření v obou měřících bodech bylo provedeno nejdříve měření bez zatížení sítě a následně se zatížení sítě. Zatížení sítě v měřícím bodě 1 bylo vytvořeno přidáním koncové jednotky za rozbočovač 1:2 a spuštěním stahování dat z HTTP serveru.

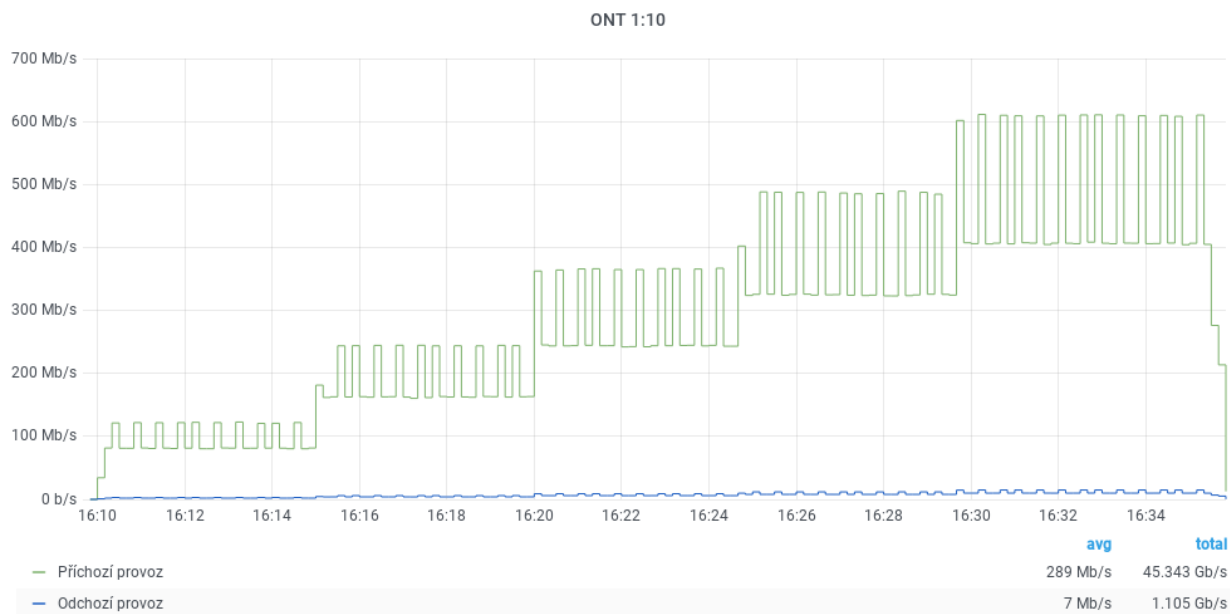
Tabulka 7.23: Měření video parametrů H.264 pomocí EXpert IPTV v měřícím bodě 1

Formát videa		MOS	EPSNR [dB]	Kolísání zpoždění [ms]	Zpoždění [ms]	Šířka pásma [Mbit/s]
SD	Nezatížená síť	4,10	45,9	0,16	30	0,60
	Zatížená síť	4,10	45,9	0,18	32	0,56
HD	Nezatížená síť	4,47	48,8	0,08	16	2,52
	Zatížená síť	4,47	49,8	0,14	15	2,51
Full HD	Nezatížená síť	4,60	48,4	0,09	16	4,44
	Zatížená síť	4,60	49,4	0,05	17	4,43

Tabulka 7.24: Měření video parametrů MPEG-2 pomocí EXpert IPTV v měřicím bodě 1

Formát videa		MOS	EPSNR [dB]	Kolísání zpoždění [ms]	Zpoždění [ms]	Šířka pásma [Mbit/s]
SD	Nezatížená síť	4,09	40,6	0,05	33	6,22
	Zatížená síť	4,09	44,3	0,41	31	5,99
HD	Nezatížená síť	4,40	38,9	0,04	17	14,37
	Zatížená síť	4,40	38,7	0,04	19	13,65
Full HD	Nezatížená síť	4,18	33,3	0,04	16	15,36
	Zatížená síť	4,40	34,5	0,05	18	15,30

Při měření v měřicím bodě 2 bylo vytvářeno postupné zatížení sítě počítači připojenými k modemům. Dohromady bylo k dispozici 6 modemů, tedy za jedním byl měřicí přístroj a dalších 5 modemů postupně vytěžovalo síť stahováním dat z HTTP serveru. Toto postupné vytěžování můžeme vidět na obrázku 7.37.



Obrázek 7.37: Postupné vytěžování sítě pomocí stahování zobrazené na monitorovacím nástroji Grafana

Při každém přidání stahování bylo provedeno měření pomocí EXpert IPTV, poněvadž byly ale hodnoty velmi podobné, bylo do tabulek zaneseno pouze měření s maximálním vytížením. Kvůli nedostatku koncových modemů nebylo možné takto vytvořenou síť vytížit na maximum a vzhledem k relativně malé šířce pásma, kterou potřebuje video pro přenesení nenastávaly v měření žádné velké odchylky od nezatížené sítě.

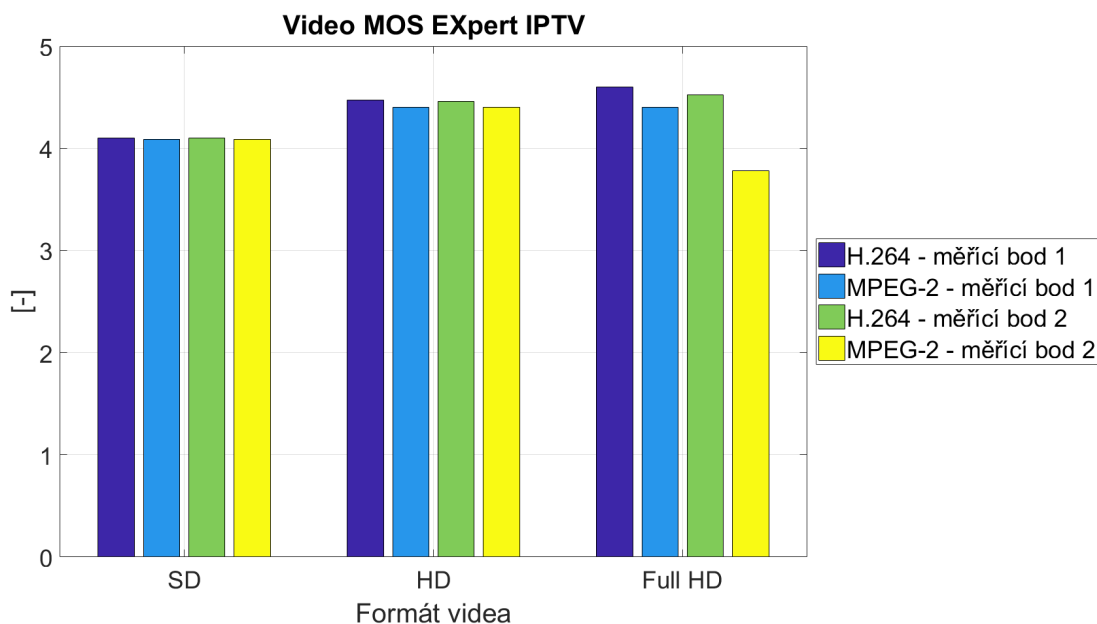
Tabulka 7.25: Měření video parametrů H.264 pomocí EXpert IPTV v měřicím bodě 2

Formát videa		MOS	EPSNR [dB]	Kolísání zpoždění [ms]	Zpoždění [ms]	Šířka pásma [Mbit/s]
SD	Nezatížená síť	4,10	42,4	0,04	31	0,56
	Zatížená síť	4,10	42,4	0,03	31	0,56
HD	Nezatížená síť	4,40	44,2	0,03	16	2,53
	Zatížená síť	4,46	44,2	0,04	16	2,52
Full HD	Nezatížená síť	4,52	45,0	0,11	16	4,41
	Zatížená síť	4,52	43,6	0,36	17	4,46

Tabulka 7.26: Měření video parametrů MPEG-2 pomocí EXpert IPTV v měřicím bodě 2

Formát videa		MOS	EPSNR [dB]	Kolísání zpoždění [ms]	Zpoždění [ms]	Šířka pásma [Mbit/s]
SD	Nezatížená síť	4,09	42,1	0,13	33	5,84
	Zatížená síť	4,09	42,1	0,14	35	5,84
HD	Nezatížená síť	4,40	41,7	0,32	16	13,89
	Zatížená síť	4,40	40,4	0,08	17	13,68
Full HD	Nezatížená síť	3,83	33,5	0,05	17	15,32
	Zatížená síť	3,78	33,7	0,20	19	15,34

V grafu jsou zobrazeny hodnoty při měření na zatížené síti. Z tabulek můžeme vidět, že při většině video stop nebyl velký rozdíl mezi nezatíženou a zatíženou sítí, což bude důsledkem vlastností UDP protokolu a zároveň relativně malou šířkou pásma, kterou video stopy potřebují k přenesení.



Obrázek 7.38: Porovnání MOS jednotlivých videí

V grafu pak lze vidět porovnání MOS jednotlivých videí, kdy vidíme, že všechny formáty videa při obou kodecích a v obou měřicích bodech se pohybují kolem MOS hodnoty 4, což znamená, že

dosahují dobré kvality. Dále je zde vidět trend, že video formátu SD má stabilnější hodnoty MOS, ale oproti novějším a používanějším formátům videí nižší hodnoty až na případ MPEG-2 v měřicím bodě 2, kde je hodnota nejnižší ze všech naměřených hodnot a nedosahuje dobré kvality. Z tabulek a grafů lze pak také s jistotou říci, že video kodek H.264 dosahuje vyšších MOS i EPSNR hodnot, než video kodek MPEG-2. Tato vlastnost se váže k velikosti videa a potřebné šířce pásma. Veškeré videa s kodekem MPEG-2 potřebují k přenesení větší šířku pásma a i proto mohou mít horší hodnoty MOS a EPSNR. Jednotlivé hodnoty kolísání zpoždění byly u všech kodeků v obou měřicích bodech velmi nízké. Hodnoty zpoždění pak vyhovují dle 7.7 - MEF 23.1 pro SD videa s oběma kodeky, v obou měřicích bodech nízké úrovni služeb - CoS - L a HD a Full HD videa s oběma kodeky, v obou měřicích bodech vyhovují střední úrovni služeb - CoS - M.

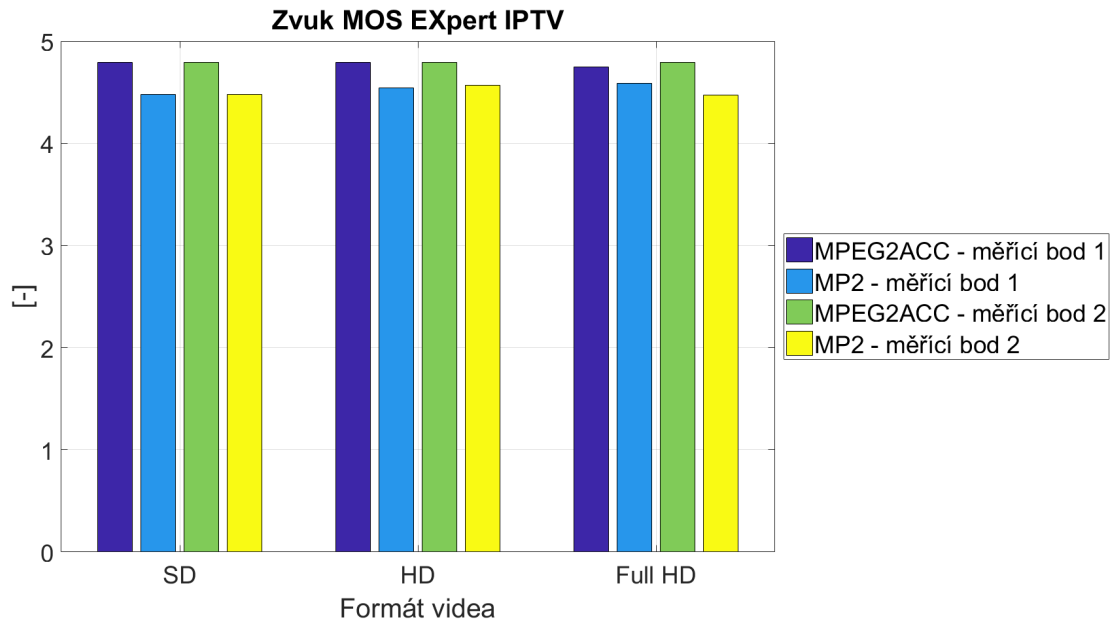
Tabulka 7.27: Měření zvukových parametrů pomocí EXpert IPTV v měřicím bodě 1

Formát videa		MPEG2ACC		MP2	
		MOS	Šířka pásma [kbit/s]	MOS	Šířka pásma [kbit/s]
SD	Nezatížená síť	4,77	192	4,65	250
	Zatížená síť	4,79	193	4,48	250
HD	Nezatížená síť	4,79	193	4,54	229
	Zatížená síť	4,79	193	4,54	222
Full HD	Nezatížená síť	4,79	193	4,47	249
	Zatížená síť	4,75	192	4,59	249

Tabulka 7.28: Měření zvukových parametrů pomocí EXpert IPTV v měřicím bodě 2

Formát videa		MPEG2ACC		MP2	
		MOS	Šířka pásma [kbit/s]	MOS	Šířka pásma [kbit/s]
SD	Nezatížená síť	4,79	193	4,47	250
	Zatížená síť	4,79	193	4,48	250
HD	Nezatížená síť	4,79	193	4,54	225
	Zatížená síť	4,79	193	4,57	223
Full HD	Nezatížená síť	4,79	193	4,47	249
	Zatížená síť	4,79	193	4,47	249

V grafu jsou zobrazeny hodnoty při měření na zatížené síti. Z tabulek můžeme vidět, že při většině zvukových stop nebyl velký rozdíl mezi nezatíženou a zatíženou sítí, což bude důsledkem vlastností UDP protokolu a zároveň velmi malou šířkou pásma, kterou zvukové stopy potřebují k přenesení.



Obrázek 7.39: Porovnání MOS jednotlivých zvukových stop

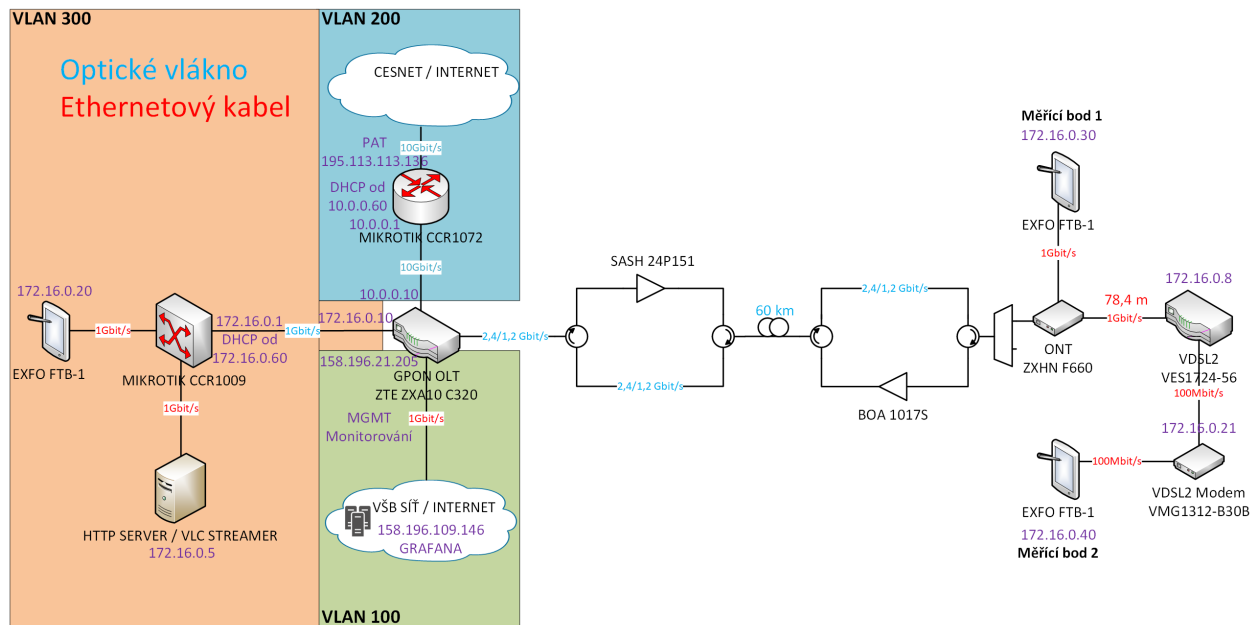
Kvalita zvuku se napříč všemi formáty pohybuje mezi dobrou a vynikající kvalitou dle MOS tabulky. Z grafu pak lze dále vidět i to, že kodek MPEG2ACC dosahuje lepších hodnot oproti kodeku MP2, nehledě na bod, ve kterém bylo měřeno. Zároveň lze s jistotou říci, že zvukový kodek MPEG2ACC potřebuje nižší šířku pásma, oproti zvukovému kodeku MP2, ale obě tyto hodnoty se pohybují v nižších stovkách kbit/s.

Kapitola 8

Implementace optických zesilovačů do hybridní fotonické sítě

8.1 Topologie hybridní fotonické sítě s implementací zesilovačů

Topologie hybridní fotonické sítě s implementací zesilovačů je totožná s topologií bez zesilovačů, pouze s rozdílem použití právě zesilovačů a cirkulátorů. Pro větší přehlednost obrázku nebyly zakresleni koncoví uživatelé, ale pouze hlavní body sítě. Mezi OLT a rozbočovačem se nyní nachází 4 optické cirkulátory a 2 zesilovače, jeden pro sestupný směr a jeden pro vzestupný směr. Pomocí této implementace bylo možné dosáhnout o 10 km delší trasy.



Obrázek 8.1: Topologie hybridní fotonické sítě s implementací zesilovačů

8.2 Popis použitých zařízení

8.2.1 Zesilovač SASH 24P151

Tento zesilovač je vyroben společností Aeon a využívá se pro zesílení O pásma. Zesilovač má operační vlnovou délku 1470,0 nanometrů, operační proud 390 mA, saturační výstupní výkon 11,6 dBm, maximální zisk 29,4 dB a průměrný přidaný šum 7,0 dB.[43]

8.2.2 Zesilovač BOA 1017S

Tento zesilovač je vyroben společností Thorlabs a využívá se pro zesílení S pásma. Zesilovač má operační vlnovou délku 1319,1 nanometrů, operační proud 600 mA, saturační výstupní výkon 16,9 dBm, maximální zisk 30,3 dB a průměrný přidaný šum 6,5 dB.[43]

8.3 Popis použitých pasivních zařízení

Při topologii se zapojením zesilovačů bylo nutné využít navíc oproti topologii bez zesilovačů optických cirkulátorů. Cirkulátory jsou pasivní optické součástky, které vkládají útlum. Tento útlum je vkládán systematicky tak, aby z Portu 1 na Port 2 a z Portu 2 na Port 3 byl minimální, oproti tomu z Portu 2 na Port 1 a z Portu 3 na Port 2 byl velmi vysoký. Tímto umožňují například odbočit vzestupný a sestupný směr provozu, tak aby veškerý provoz sestupným směrem procházel skrze zesilovač SASH 24P151, ale dále neprocházel skrze zesilovač BOA 1017S. Opačným směrem to pak funguje naprosto stejně a díky tomuto bylo možné dosáhnout nejlepších hodnot, tedy oba zesilovače byly použity jako takzvané Boostery, jak lze vidět v obrázku 8.1.

8.3.1 Optický cirkulátor

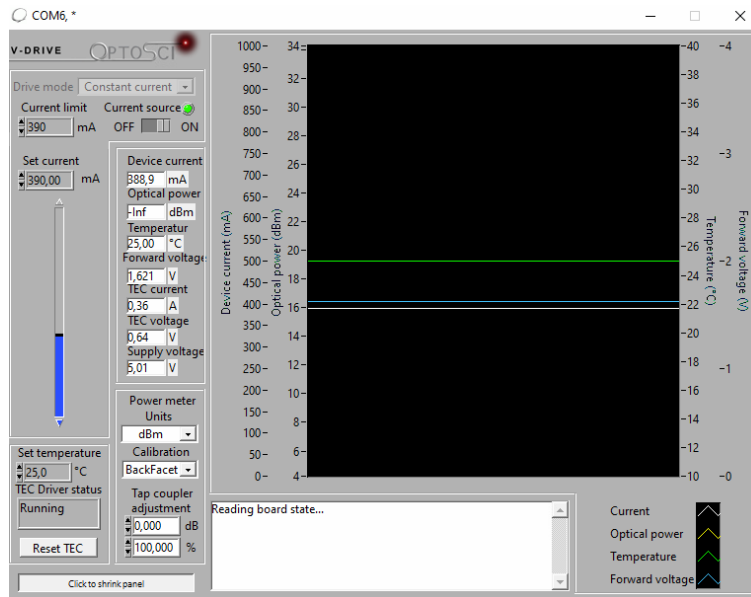
Optické cirkulátory použité při zapojení mají dle katalogového listu rozsah operační vlnové délky 1460 až 1620 nm, operační teplotu v rozmezí 0 až 70 °C a konektory typu SC/APC.

	Vložný útlum [dB]			
	Port1 ->Port2	Port2 ->Port3	Port2 ->Port1	Port3 ->Port2
Průměrná hodnota	0,8425	0,8325	37,25	37

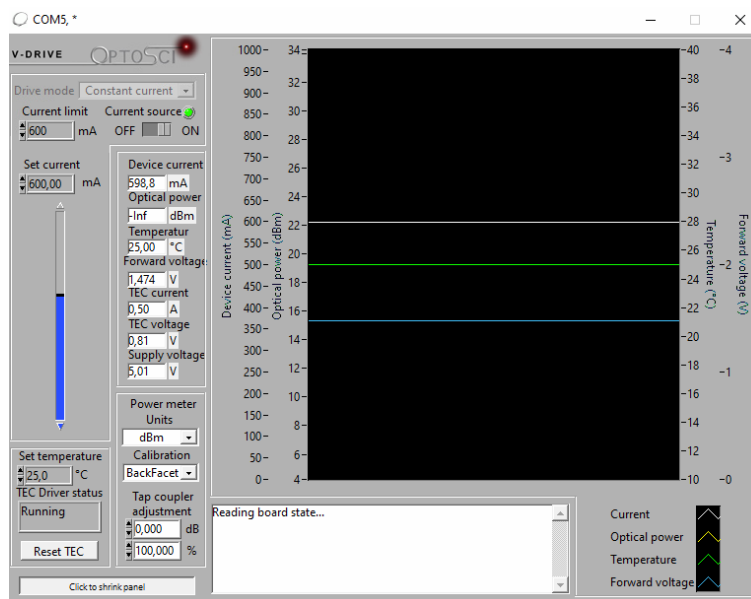
V tabulce se nachází průměrná hodnota vložného útlumu v rámci jednotlivých portů všech 4 použitých cirkulátorů, mezi hodnotami jednotlivých cirkulátorů se totiž nenacházely velké odchylky, takže pro představu je vypsána pouze tato průměrná hodnota.

8.4 Konfigurace jednotlivých zařízení

Konfigurace zařízení sestává pouze z nastavení obou zesilovačů, které byly nastaveny na maximální možný operační proud.



Obrázek 8.2: Konfigurace zesilovače SASH 24P151



Obrázek 8.3: Konfigurace zesilovače BOA 1017S

8.5 Měření optických parametrů sítě

Měření optických parametrů sítě bylo děláno pro dvě trasy. V pořadí třetí trasa byla dlouhá 33 km, tedy maximální délka s použitím zesilovačů, kdy bylo aktivních všech dvacet koncových jednotek při rozbočování 1:2, dělí se na 1:16 a 1:32. V pořadí čtvrtá trasa byla dlouhá 60 km, tedy maximální dosah s použitím zesilovačů, kdy byla aktivní alespoň jedna koncová jednotka při rozbočování 1:2.

8.5.1 Měření výkonových úrovní

Tabulka 8.1: Výkonové úrovně s přidanými zesilovači

Délka [km]	Optický výkon [dBm]				Útlum [dB]	
	PPM1		PPM2			
	1310 nm	1490 nm	1310 nm	1490 nm	1310 nm	1490 nm
33	-16,5	2,7	2,3	-19,1	18,8	21,8
60	-30,4	2,7	2,7	-21	33,1	23,7

V tabulce můžeme vidět, že i přestože se jednotlivé hodnoty zlepšily oproti hodnotám z tabulky 7.1, tak delší trasy bylo dosaženo pouze minimálně. V případě nutnosti dostupnosti všech 20 koncových jednotek předpokládám, že nastal problém v TDMA, tedy špatné synchronizaci času mezi OLT a jednotlivými ONT. V průběhu realizace práce nebyl velký prostor pro testování pouze na optické síti s dostupností všech koncových jednotek, přesto předpokládám, že při správném nastavení zesilovačů, by bylo možné dosáhnout i delší překlenutelné vzdálenosti pro 20 koncových jednotek. Oproti tomu pro zapojení s jednou aktivní koncovou jednotkou a rozbočovačem 1:2, pro možnost přidání druhé koncové jednotky, a tedy možnost rozšíření o další VDSL síť, bylo dosaženo fyzického maxima GPON sítě s použitím zesilovačů.

8.5.2 Měření přímou metodou

Třetí a čtvrtá trasa byla opět proměřena přímou metodou 1c a to znovu oboustranně. Výsledky měření můžeme vidět v tabulce 8.2. Výsledky měření rozbočovačů přímou metodou jsou stejné jako bez použití zesilovačů, proto se nachází v tabulce 7.3.

Tabulka 8.2: Výsledky měření tras přímou metodou

Výsledná délka [km]	Vložný útlum [dB]			
	A -> B		B -> A	
	1310 nm	1490 nm	1310 nm	1490 nm
32,897	17,65	14,67	17,68	14,61
60,763	35,19	27,32	34,87	27,17

8.5.3 Měření optické reflektometrie OTDR

Tabulka 8.3: Výsledky měření třetí trasy pomocí OTDR

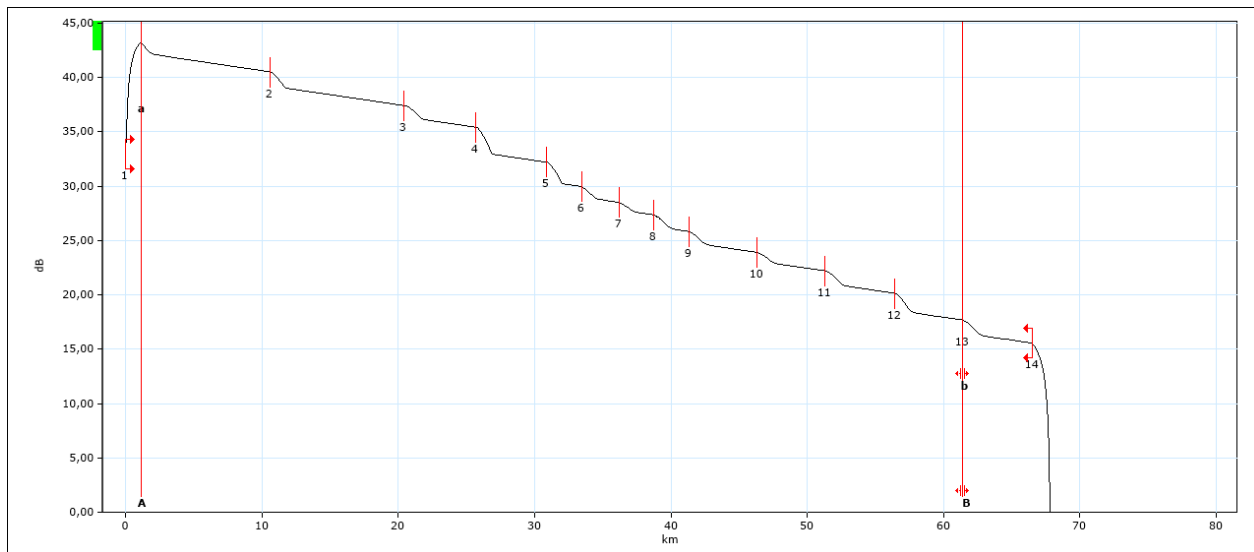
Vlnová délka [nm]	Útlum [dB]	Měrný útlum [dB/km]	Výsledná délka [km]
1310	17,585	0,535	32,8698
1383	15,642	0,475	32,9065
1550	13,658	0,415	32,8806
1625	Nerozeznatelný	Nerozeznatelný	Nerozeznatelná

Tabulka 8.3 zobrazuje výsledné hodnoty měření pomocí metody OTDR třetí optické trasy, která se skládá ze dvou desetikilometrových cívek, dvou pětikilometrových cívek a jedné 2,5 kilometrových cívek vláken G 657-A1. Zde opět můžeme vidět, že hodnoty měrného útlumu nejsou vyhovující normám, důvodem tohoto nevyhovění je implementace v rámci školní laboratoře, která je popsána v 7.7.3.1.

Tabulka 8.4: Výsledky měření čtvrté trasy pomocí OTDR

Vlnová délka [nm]	Útlum [dB]	Měrný útlum [dB/km]	Výsledná délka [km]
1310	34,661	0,576	60,2008
1383	30,993	0,515	60,1392
1550	25,469	0,423	60,2620
1625	31,323	0,522	60,0166

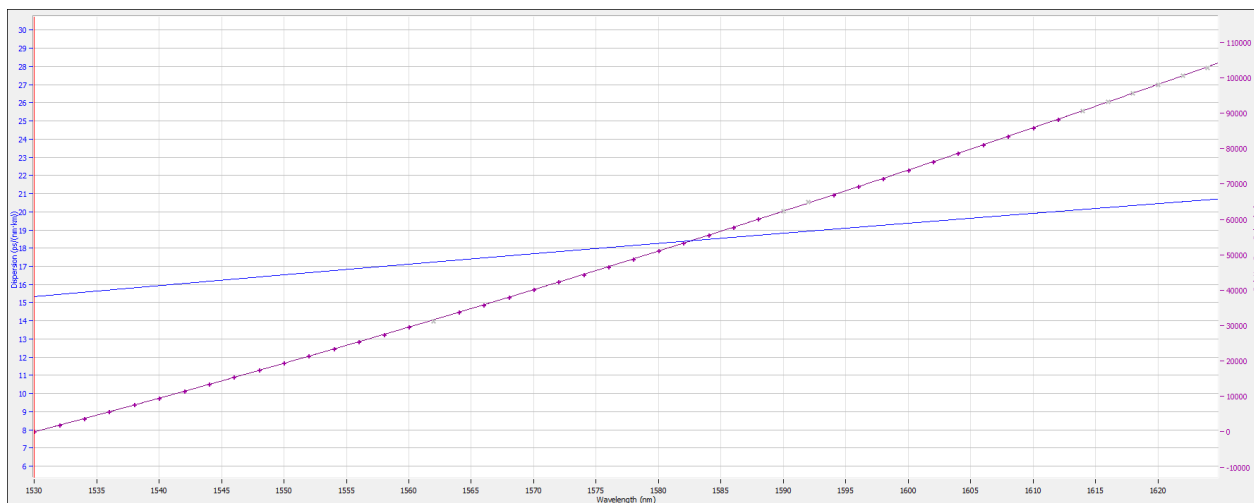
Tabulka 8.4 zobrazuje výsledné hodnoty měření pomocí metody OTDR čtvrté optické trasy, která se skládá ze dvou 10 kilometrových cívek, dvou 5 kilometrových cívek, čtyř 2,5 kilometrových vláken G 657-A1 a čtyř 5 kilometrových cívek vláken G 652 D. Zde znovu můžeme vidět, že hodnoty měrného útlumu nejsou vyhovující normám, důvodem tohoto nevyhovění je implementace v rámci školní laboratoře, která je popsána v 7.7.3.1.



Obrázek 8.4: OTDR čtvrté trasy na vlnové délce 1550 nm

Výsledky měření rozbočovačů se nachází v 7.6

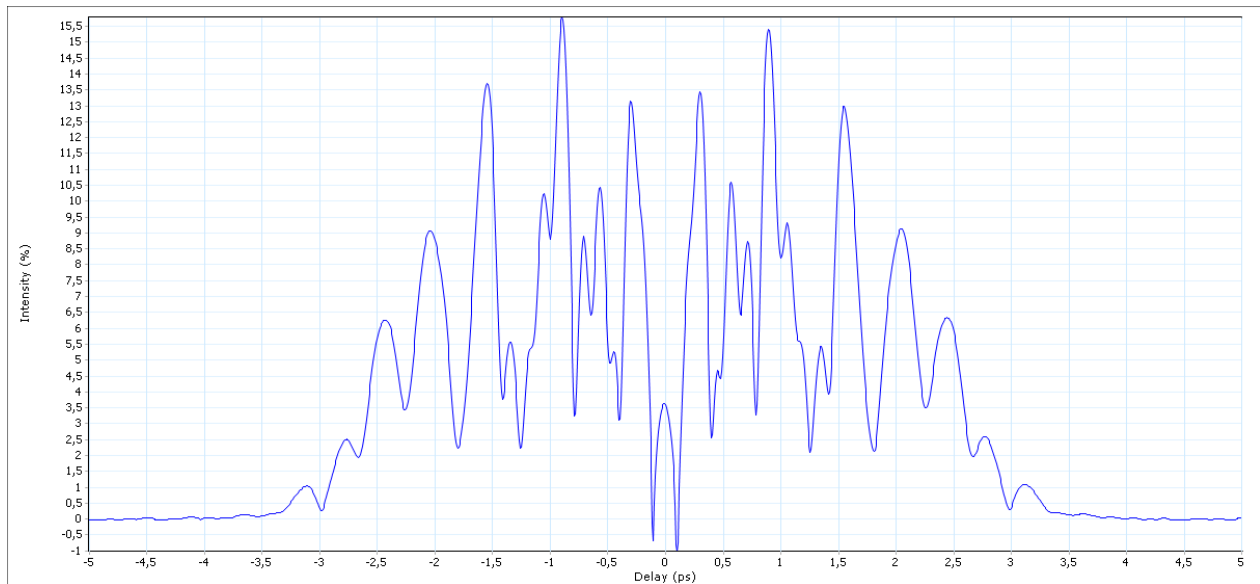
8.5.4 Měření chromatické disperze



Obrázek 8.5: Chromatická disperze čtvrté trasy o délce 60 km

Měření chromatické disperze dosahovalo na třetí trase hodnoty 536,374 ps/nm na vlnové délce 1550 nm, což odpovídá hodnotě 16,303 ps/(nm·ps). Měření na čtvrté trase dosahovalo hodnoty 1003,476 ps/nm na vlnové délce 1550 nm, což odpovídá hodnotě 16,532 ps/(nm·ps).

8.5.5 Měření polarizační vidové disperze



Obrázek 8.6: Polarizačně vidová disperze čtvrté trasy o délce 60 km

Měření polarizačně vidové disperze probíhalo na vlnové délce 1526,11 - 1619,9 nm. Pro třetí trasu byla průměrná hodnota PMD 1,3223 ps a průměrný koeficient PMD byl v tomto případě 0,2305 ps/km^{1/2}. Pro čtvrtou trasu byla pak průměrná hodnota PMD 1,3898 ps a průměrný koeficient PMD byl 0,1784 ps/km^{1/2}.

8.6 Měření integrity sítě

V rámci měření integrity sítě s implementací zesilovačů byly opět zvoleny dva měřící body, které můžeme vidět na obrázku 8.1. První měřící bod byl za ONT jednotkou, pro testování pouze optické části sítě, abychom mohli ověřit, co vstupuje do uplink rozhraní od VDSL DSLAM. Druhý měřící bod byl umístěn za VDSL2 Modemem, pro testování koncových služeb v hybridní fotonické síti s implementací zesilovačů. Oba tyto body byly měřeny při zapojení čtvrté trasy, tedy 60 km, což je nejdelší možná přidaná trasa při zapojení se zesilovači a zároveň logické maximum sítě.

Grafické zobrazení dosažených 60 km můžeme vidět na obrázku, tato hodnota je opět jiná oproti naměřeným hodnotám z přímé metody a OTDR, protože je brána z SNMP OLT.



Obrázek 8.7: Grafické zobrazení vzdálenosti ONT jednotky v GUI Ikarus

Při měření integrity sítě s implementací zesilovačů se opět testuje na LAN i WAN síti. Širší popsání tohoto měření se nachází v kapitole 7.8.

8.6.1 Měření dle normy ITU-T Y.1564

Popis měření dle normy ITU-T Y.1564 se nachází v 7.8.2. Toto měření po přidání zesilovačů do trasy probíhalo opět dle stejného nastavení, tedy znovu byl měřen pouze směr sestupný z pohledu koncového uživatele a nastavení v měřícím bodě 1 bylo provedeno dle tabulky 7.8.

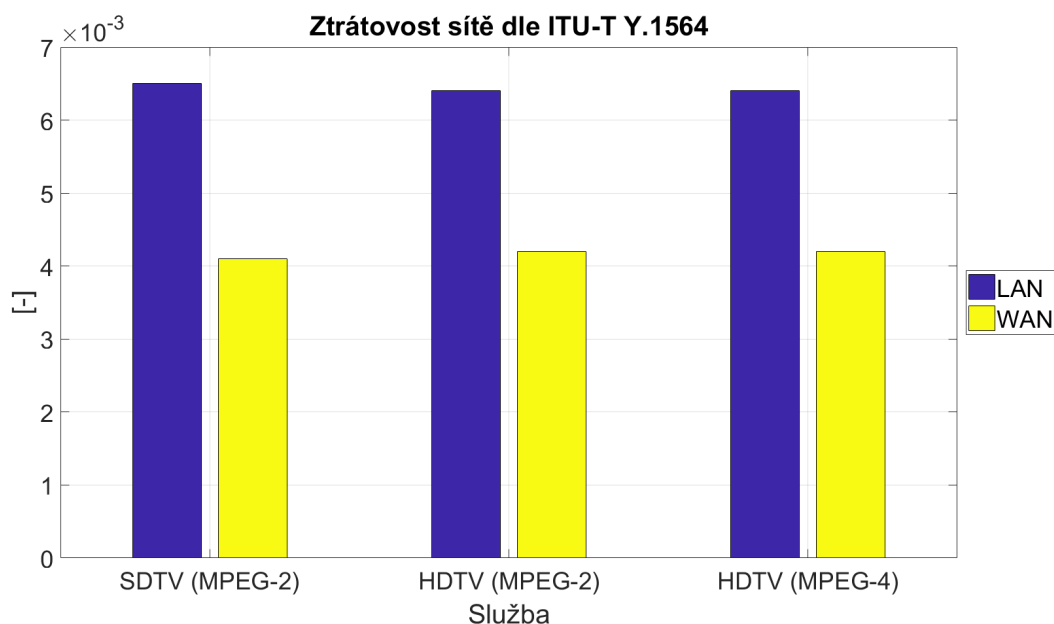
Tabulka 8.5: Výsledky testu výkonnosti služeb dle normy ITU-T Y.1564 v měřícím bodě 1

Test výkonnosti služeb									
Služba	Testovaná síť	Ztrátovost [-]		Kolísání zpoždění [ms]		Zpoždění [ms]		Propustnost [Mbit/s]	
		Průměr	Medián	Průměr	Medián	Průměr	Medián	Průměr	Medián
SDTV (MPEG-2)	LAN	6,38E-03	6,45E-03	0,073	0,057	1,427	1,408	197,313	197,320
	WAN	4,13E-03	4,10E-03	5,158	6,128	137,885	125,632	197,738	197,750
HDTV (MPEG-2)	LAN	6,34E-03	6,40E-03	0,073	0,057	1,427	1,408	203,101	203,111
	WAN	4,18E-03	4,15E-03	5,156	6,129	134,435	123,214	203,529	203,540
HDTV (MPEG-4)	LAN	6,38E-03	6,40E-03	0,073	0,057	1,427	1,408	210,465	210,467
	WAN	4,18E-03	4,20E-03	5,157	6,124	134,427	123,099	210,916	210,920
DATA	LAN	2,42E-02	2,40E-02	0,066	0,054	1,427	1,408	379,625	379,628
	WAN	1,98E-03	1,90E-03	5,144	6,110	135,670	123,245	384,018	384,040

V tabulce můžeme vidět výsledky testu výkonnosti služeb, kdy se zde nachází průměr i medián z deseti měření maximálních hodnot. Dále byl zpracován pouze medián, protože naměřené výsledky nesplňovaly normální rozdělení dle Shapirova-Wilkova testu. Další tabulky obsahují statistickou indukci mediánu, popis těchto hodnot lze najít v kapitole 7.8.1.

Tabulka 8.6: Statistická indukce ztrátovosti dle normy ITU-T Y.1564 v měřícím bodě 1

Ztrátovost [-]					
Služba	Testovaná síť	n	Minimum, Maximum	Medián (IQR)	95% IO mediánu
SDTV (MPEG-2)	LAN	10	6,9E-04 ; 1,7E-02	6,5E-03 (3,2E-03 ; 7,1E-03)	3,4E-03 ; 1,0E-02
	WAN	10	3,9E-03 ; 4,4E-03	4,1E-03 (4,1E-03 ; 4,2E-03)	4,0E-03 ; 4,2E-03
HDTV (MPEG-2)	LAN	10	6,5E-04 ; 1,7E-02	6,4E-03 (3,2E-03 ; 7,0E-03)	3,4E-03 ; 1,0E-02
	WAN	10	3,9E-03 ; 4,5E-03	4,2E-03 (4,1E-03 ; 4,3E-03)	4,0E-03 ; 4,3E-03
HDTV (MPEG-4)	LAN	10	6,7E-04 ; 1,7E-02	6,4E-03 (3,3E-03 ; 7,1E-03)	3,3E-03 ; 1,0E-02
	WAN	10	3,9E-03 ; 4,6E-03	4,2E-03 (4,1E-03 ; 4,2E-03)	4,0E-03 ; 4,3E-03

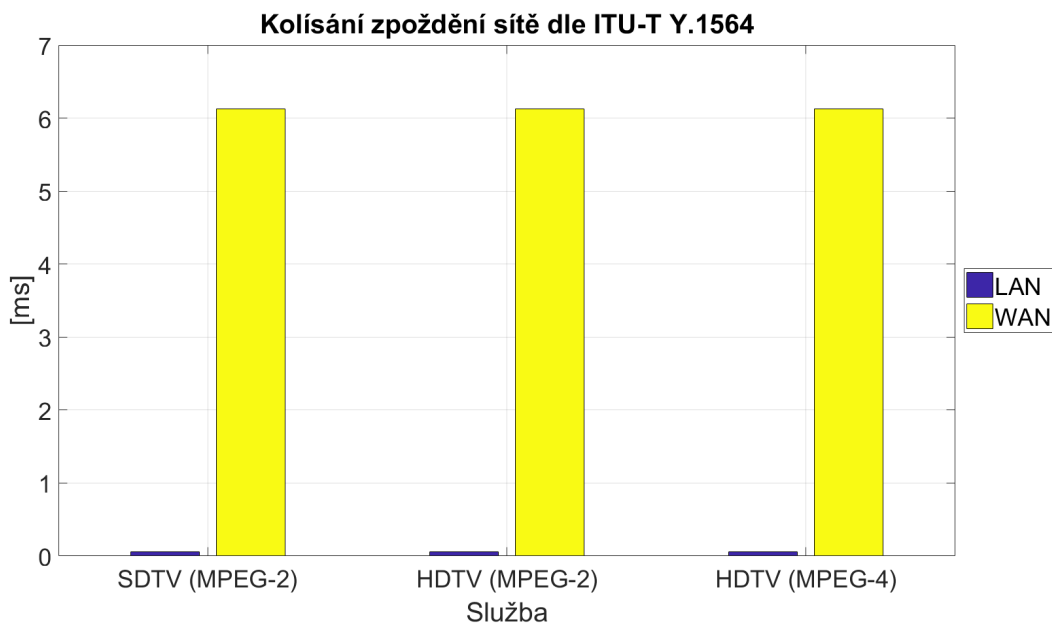


Obrázek 8.8: Ztrátovost sítě dle ITU-T Y.1564 v měřícím bodě 1

Hodnoty ze statistické indukce 8.6 a grafu 8.8, tedy hodnoty po přidání zesilovačů do sítě, jsou opět velmi vysoké. Ztrátovost v tomto měřícím bodě se pohybuje kolem 0,4 % na WAN síti a 0,65 % na LAN síti. Tyto hodnoty nevyhovují dle 7.7 - MEF 23.1 ani jedné úrovni služeb. Proto by opět pro dosažení lepších hodnot muselo být implementováno určitých QoS nástrojů.

Tabulka 8.7: Statistická indukce kolísání zpoždění dle normy ITU-T Y.1564 v měřícím bodě 1

Kolísání zpoždění [ms]					
Služba	Testovaná síť	n	Minimum, Maximum	Medián (IQR)	95% IO mediánu
SDTV (MPEG-2)	LAN	10	0,029 ; 0,221	0,057 (0,044 ; 0,078)	0,043 ; 0,129
	WAN	10	0,951 ; 6,358	6,128 (6,001 ; 6,285)	3,563 ; 6,282
HDTV (MPEG-2)	LAN	10	0,029 ; 0,220	0,057 (0,044 ; 0,079)	0,043 ; 0,128
	WAN	10	0,944 ; 6,354	6,129 (6,007 ; 6,287)	3,548 ; 6,284
HDTV (MPEG-4)	LAN	10	0,029 ; 0,220	0,057 (0,044 ; 0,078)	0,044 ; 0,128
	WAN	10	0,945 ; 6,361	6,124 (6,007 ; 6,289)	3,557 ; 6,285

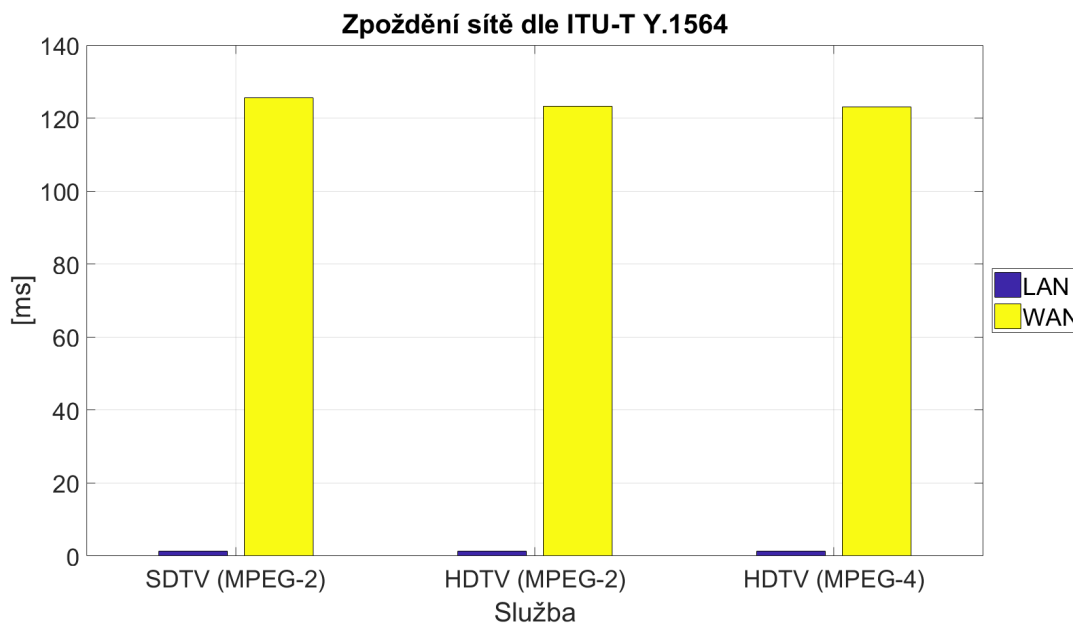


Obrázek 8.9: Kolísání zpoždění sítě dle ITU-T Y.1564 v měřícím bodě 1

Po přidání zesilovačů do trasy můžeme ze statistické indukce 8.7 a grafu 8.9 v měřícím bodě 1 přesně určit, že maximální kolísání zpoždění sítě měřené dle normy ITU-T Y.1564 nabývalo mnohem vyšších hodnot na WAN síti. I přes toto výrazné zvýšení jsou hodnoty v tomto měřícím bodě, tedy pouze na optické síti, vyhovující podle 7.7. Konkrétně splňují hodnoty měřené na LAN i WAN vysokou úroveň služeb - CoS - H pro kolísání zpoždění MEF 23.1.

Tabulka 8.8: Statistická indukce zpoždění dle normy ITU-T Y.1564 v měřícím bodě 1

Zpoždění [ms]					
Služba	Testovaná síť	n	Minimum, Maximum	Medián (IQR)	95% IO mediánu
SDTV (MPEG-2)	LAN	10	1,375 ; 1,537	1,408 (1,389 ; 1,434)	1,392 ; 1,468
	WAN	10	87,370 ; 252,089	125,632 (118,623 ; 151,390)	108,676 ; 173,484
HDTV (MPEG-2)	LAN	10	1,375 ; 1,537	1,408 (1,389 ; 1,433)	1,392 ; 1,468
	WAN	10	87,310 ; 251,673	123,214 (118,601 ; 134,775)	107,388 ; 173,228
HDTV (MPEG-4)	LAN	10	1,375 ; 1,537	1,408 (1,389 ; 1,434)	1,392 ; 1,468
	WAN	10	87,374 ; 251,876	123,099 (118,493 ; 134,729)	107,454 ; 173,418



Obrázek 8.10: Zpoždění sítě dle ITU-T Y.1564 v měřícím bodě 1

Ze statistické indukce 8.8 a grafu 8.10 v měřícím bodě 1 lze znovu s jistotou říci, že maximální zpoždění sítě měřené dle normy ITU-T Y.1564 nabývalo mnohem vyšších hodnot na WAN síti. Pro LAN síť se dosažené maximální hodnoty vlezou do vysoké úrovně služeb - CoS - H, podle 7.7, oproti tomu na WAN síti přesahuje medián maximálních hodnot zpoždění i nízké úrovně služeb - CoS - L pro SDTV (MPEG-2) a pro HDTV (MPEG-2) a HDTV (MPEG-4) jen tak tak vyhovuje nízké úrovni služeb - CoS - L. Pokud se podíváme na 95% intervalový odhad mediánu, tak se budeme pohybovat mezi vyhovujícími a nevyhovujícími hodnotami.

Měření v měřicím bodě 2 s přidáním zesilovačů do trasy probíhalo opět podle stejného nastavení, jako bez přidání zesilovačů. Byl znovu byl měřen pouze směr sestupný z pohledu koncového uživatele a nastavení v tomto měřicím bodě bylo provedeno dle tabulky 7.13.

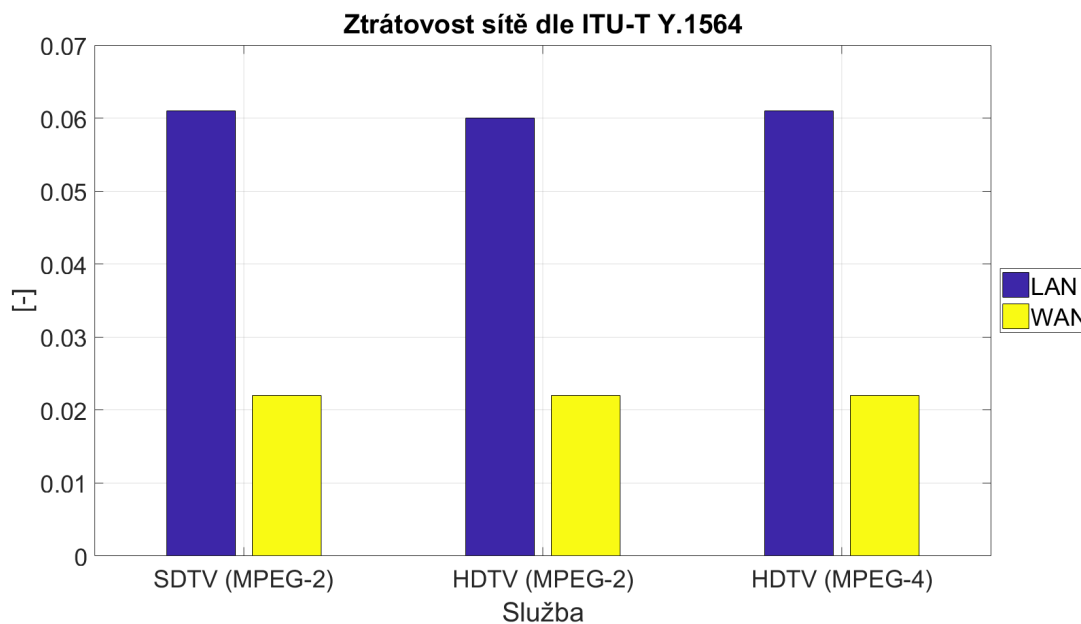
Tabulka 8.9: Výsledky testu výkonnosti služeb dle normy ITU-T Y.1564 v měřicím bodě 2

Test výkonnosti služeb									
Služba	Testovaná síť	Ztrátovost [-]		Kolísání zpoždění [ms]		Zpoždění [ms]		Propustnost [Mbit/s]	
		Průměr	Medián	Průměr	Medián	Průměr	Medián	Průměr	Medián
SDTV (MPEG-2)	LAN	6,57E-02	6,10E-02	0,714	0,668	116,977	117,098	18,519	18,620
	WAN	2,18E-02	2,20E-02	5,332	5,325	132,789	134,137	19,403	19,400
HDTV (MPEG-2)	LAN	6,55E-02	6,00E-02	0,682	0,660	116,971	116,998	19,069	19,178
	WAN	2,19E-02	2,20E-02	5,287	5,289	132,850	134,141	19,965	19,965
HDTV (MPEG-4)	LAN	6,58E-02	6,10E-02	0,669	0,660	116,945	116,986	19,761	19,873
	WAN	2,18E-02	2,20E-02	5,288	5,287	132,733	134,218	20,700	20,700
DATA	LAN	7,12E-01	3,55E-02	0,714	0,710	116,952	117,028	36,592	36,757
	WAN	2,20E-02	2,20E-02	5,318	5,323	132,817	134,178	37,609	37,610

V tabulce můžeme vidět výsledky testu výkonnosti služeb, kdy se zde nachází průměr i medián z deseti měření maximálních hodnot. Dále byl zpracován pouze medián, protože naměřené výsledky nesplňovaly normální rozdělení dle Shapirova-Wilkova testu. Další tabulky obsahují statistickou indukci mediánu, popis těchto hodnot lze najít v kapitole 7.8.1.

Tabulka 8.10: Statistická indukce ztrátovosti dle normy ITU-T Y.1564 v měřícím bodě 2

Ztrátovost [-]					
Služba	Testovaná síť	n	Minimum, Maximum	Medián (IQR)	95% IO mediánu
SDTV (MPEG-2)	LAN	10	3,9E-02 ; 1,1E-01	6,1E-02 (4,3E-02 ; 8,8E-02)	4,2E-02 ; 8,7E-02
	WAN	10	2,1E-02 ; 2,2E-02	2,2E-02 (2,2E-02 ; 2,2E-02)	2,2E-02 ; 2,2E-02*
HDTV (MPEG-2)	LAN	10	3,8E-02 ; 1,1E-01	6,0E-02 (4,2E-02 ; 8,8E-02)	4,2E-02 ; 8,6E-02
	WAN	10	2,1E-02 ; 2,2E-02	2,2E-02 (2,2E-02 ; 2,2E-02)	2,2E-02 ; 2,2E-02*
HDTV (MPEG-4)	LAN	10	3,9E-02 ; 1,1E-01	6,1E-02 (4,2E-02 ; 8,9E-02)	4,2E-02 ; 8,7E-02
	WAN	10	2,1E-02 ; 2,2E-02	2,2E-02 (2,2E-02 ; 2,2E-02)	2,2E-02 ; 2,2E-02*

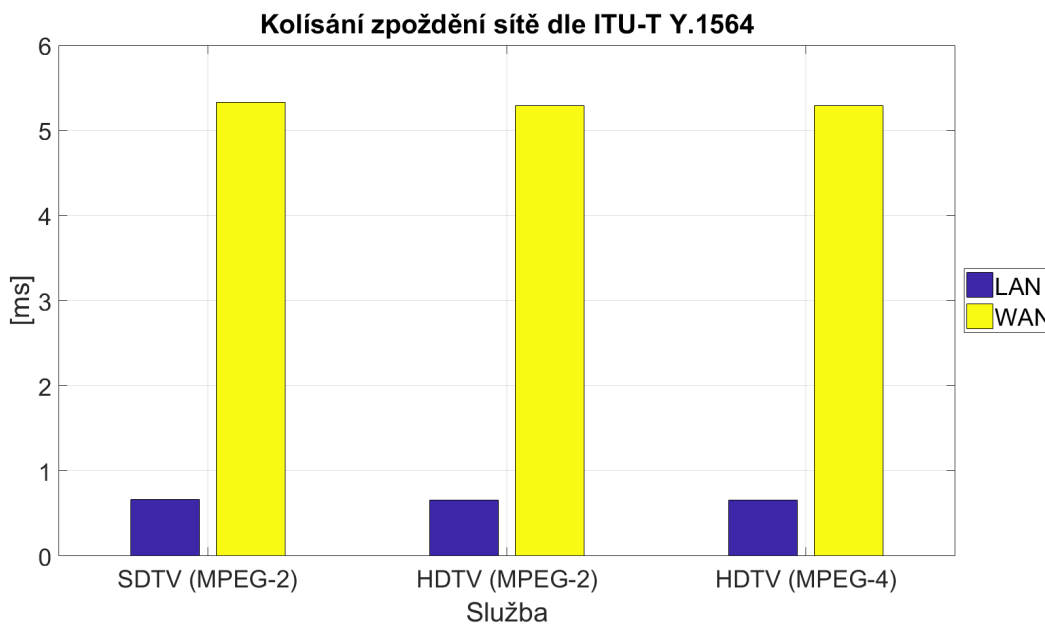


Obrázek 8.11: Ztrátovost sítě dle ITU-T Y.1564 v měřícím bodě 2

Měření v měřícím bodě 2 se opět zvedla ztrátovost oproti měřícímu bodu 1. Po přidání VDSL2 a tedy vytvoření hybridní fotonické sítě se tato ztrátovost pohybuje v tak vysokých hodnotách, že je neakceptovatelná. Na LAN síti byla až 6%, což v žádném případě nemůže vyhovět dle 7.7 - MEF 23.1 ani jedné z úrovní služeb. Na WAN síti tato ztrátovost byla nižší oproti LAN síti, ale přesto velmi vysoká, v hodnotách kolem 2,2%, což je opět nevyhovující. Znovu by pro takovou síť muselo být využito QoS nástrojů, aby vyhověla doporučením.

Tabulka 8.11: Statistická indukce kolísání zpoždění dle normy ITU-T Y.1564 v měřícím bodě 2

Kolísání zpoždění [ms]					
Služba	Testovaná síť	n	Minimum, Maximum	Medián (IQR)	95% IO mediánu
SDTV (MPEG-2)	LAN	10	0,613 ; 0,986	0,668 (0,639 ; 0,741)	0,639 ; 0,812
	WAN	10	5,280 ; 5,395	5,325 (5,291 ; 5,370)	5,293 ; 5,369
HDTV (MPEG-2)	LAN	10	0,559 ; 0,896	0,660 (0,606 ; 0,678)	0,609 ; 0,775
	WAN	10	5,247 ; 5,343	5,289 (5,264 ; 5,303)	5,266 ; 5,304
HDTV (MPEG-4)	LAN	10	0,564 ; 0,823	0,660 (0,614 ; 0,711)	0,605 ; 0,735
	WAN	10	5,229 ; 5,399	5,287 (5,261 ; 5,297)	5,260 ; 5,323

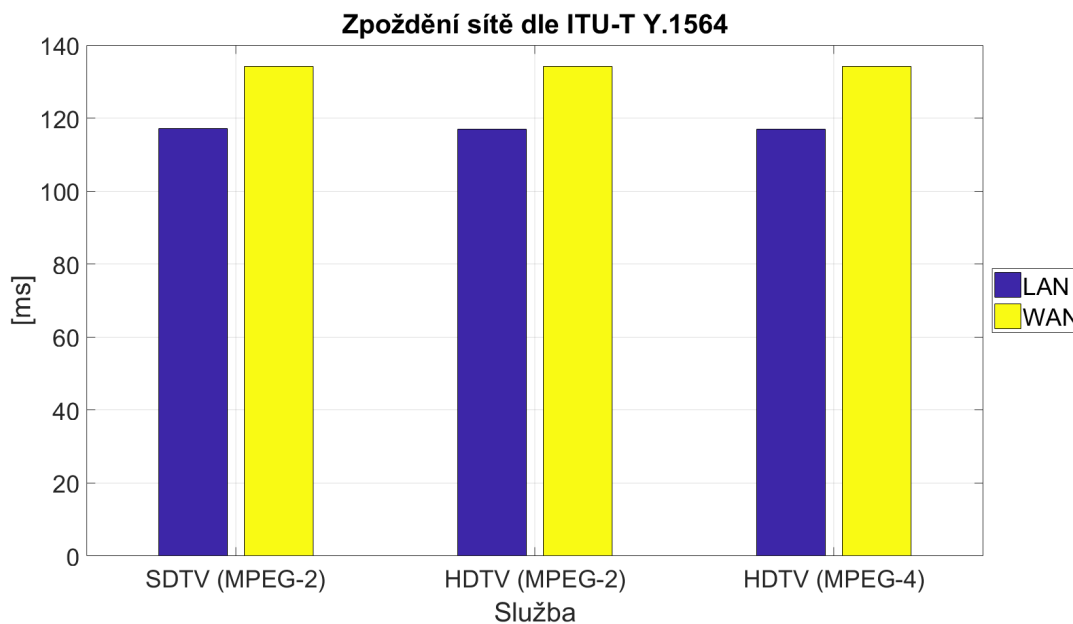


Obrázek 8.12: Kolísání zpoždění sítě dle ITU-T Y.1564 v měřícím bodě 2

V měřícím bodě 2, tedy za VDSL modemem s přidáním zesilovačů můžeme ze statistické indukce 8.11 a grafu 8.12 vidět, že maximální hodnoty na WAN síti jsou opět větší, než na LAN síti. Vyhodnocení těchto hodnot dle 7.7 - MEF 23.1 vyhovuje hybridní fotonická síť LAN i WAN vysoké úrovní služeb, tedy CoS - H.

Tabulka 8.12: Statistická indukce zpoždění dle normy ITU-T Y.1564 v měřícím bodě 2

Zpoždění [ms]					
Služba	Testovaná síť	n	Minimum, Maximum	Medián (IQR)	95% IO mediánu
SDTV (MPEG-2)	LAN	10	116,396 ; 117,473	117,098 (116,654 ; 117,223)	116,736 ; 117,248
	WAN	10	129,042 ; 135,661	134,137 (130,395 ; 134,826)	130,398 ; 134,878
HDTV (MPEG-2)	LAN	10	116,468 ; 117,337	116,998 (116,733 ; 117,224)	116,766 ; 117,220
	WAN	10	129,472 ; 135,824	134,141 (130,082 ; 135,016)	130,119 ; 134,929
HDTV (MPEG-4)	LAN	10	116,405 ; 117,270	116,986 (116,707 ; 117,247)	116,701 ; 117,228
	WAN	10	129,266 ; 135,607	134,218 (130,057 ; 134,596)	130,069 ; 134,741



Obrázek 8.13: Zpoždění sítě dle ITU-T Y.1564 v měřícím bodě 2

V měřícím bodě 2 bylo maximální zpoždění hybridní fotonické sítě dle statistické indukce a grafu mnohem vyšší, než udává 7.7 pro všechny služby. Proto lze říci, že síť LAN ani WAN nevyhovely předpokladům dle MEF 23.1. Tento jev způsobilo přidání VDSL do sítě a tedy měření celé hybridní fotonické sítě. Zároveň je vidět, že zpoždění bylo vyšší na WAN síti. Zde můžeme vidět, že i přestože kolísání zpoždění v měřícím bodě 2 vyhovelo předpokladům MEF 23.1, tak zpoždění vyhovět nemusí.

8.6.2 Měření dle doporučení RFC 6349

Veškeré informace k měření dle doporučení RFC 6349 se nachází v kapitole 7.8.3. V této kapitole se nachází tabulky a grafy z měření s připojením SOA zesilovačů a se zvýšením optické trasy z 50 na 60 km.

Měření dle doporučení RFC 6349 v měřicím bodě 1 probíhalo znovu obousměrně a v nastavení byl specifikován pouze horní limit přenosové kapacity na 1000 Mbit/s a velikost MTU 1500 bajtů. V tabulkách se nachází průměry a mediány vypočítané z 10 nezávislých měření v obou směrech zároveň. Poněvadž ale většina hodnot neměla dle Shapirova-Wilkova testu normální rozdělení, byly další testy a počítání provedeny na medián. Do jednotlivých grafů byl pak také použitý medián hodnot.

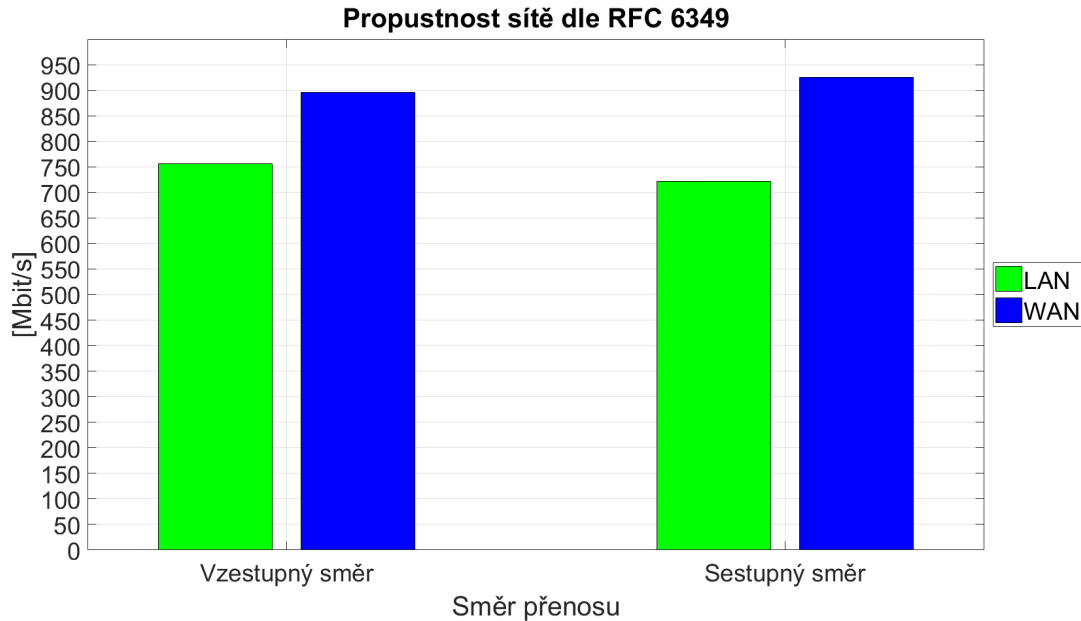
Tabulka 8.13: Výsledné hodnoty RFC 6349 v měřicím bodě 1

Směr přenosu	Testovaná síť	Velikost okna [KiB]	Aktuální propustnost [Mbit/s]		Zpoždění bufferu [%]		Minimální RTT [ms]	
			Průměr	Medián	Průměr	Medián	Průměr	Medián
Vzestupný směr	LAN	83 (2 spojení po 41)	753,820	755,450	25,010	25,025	0,730	0,730
	WAN	1124 (16 spojení po 70)	834,080	895,850	1,609	1,695	9,837	9,822
Sestupný směr	LAN	83 (2 spojení po 41)	699,180	721,900	16,357	16,335	0,730	0,730
	WAN	1124 (16 spojení po 70)	917,910	924,750	3,919	4,035	9,837	9,822

Následující tabulky obsahují statistickou indukci mediánu, popis těchto hodnot lze najít v kapitole 7.8.1.

Tabulka 8.14: Statistická indukce propustnosti dle RFC 6349 v měřicím bodě 1

Propustnost [Mbit/s]						
Směr přenosu	Testovaná síť	n	Minimum, Maximum	Medián (IQR)	95% IO mediánu	
Vzestupný směr	LAN	10	741,700 ; 759,800	755,450 (751,550 ; 757,200)	749,900 ; 757,400	
	WAN	10	515,000 ; 924,500	895,850 (878,325 ; 909,050)	712,950 ; 910,900	
Sestupný směr	LAN	10	595,100 ; 756,600	721,900 (650,650 ; 739,600)	662,450 ; 742,750	
	WAN	10	886,400 ; 924,700	924,750 (915,575 ; 926,300)	906,200 ; 926,200	



Obrázek 8.14: Propustnost sítě dle RFC 6349 v měřicím bodě 1

Z tabulek 8.13, 8.14 a grafu 8.14 můžeme vidět, že se opět potvrdil trend s vyšší propustností na WAN síti. A opět je to v závislosti zvolení velikosti okna a zpoždění bufferu.

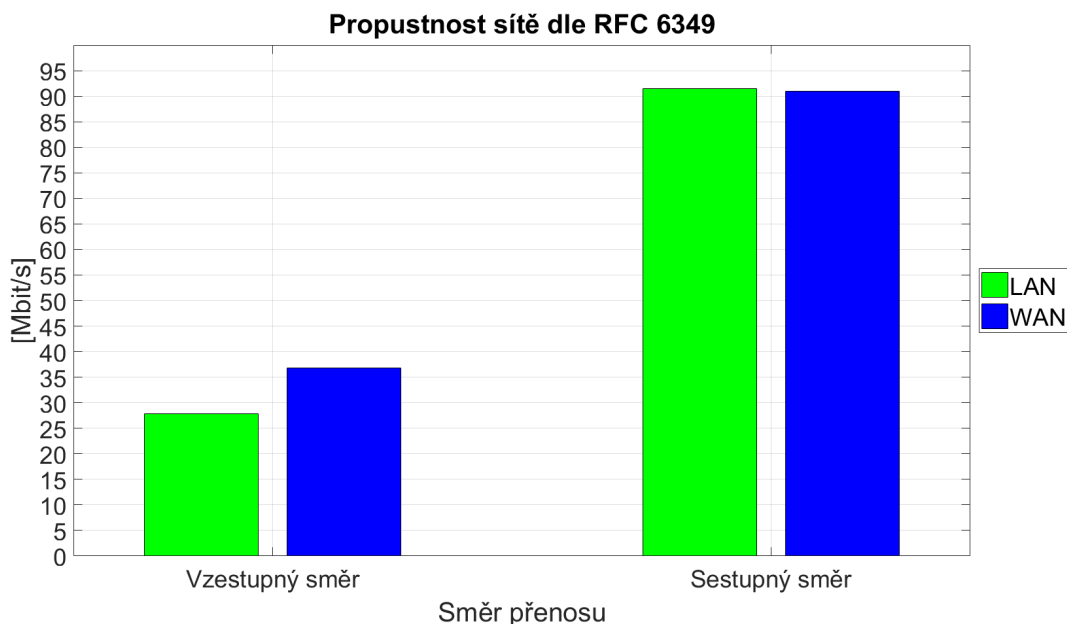
Měření dle doporučení RFC 6349 v měřicím bodě 2 probíhalo opět obousměrně a v nastavení byl specifikován pouze horní limit přenosové kapacity na 100 Mbit/s a velikost MTU 1500 bajtů. V tabulkách se nachází průměry a mediány vypočítané z 10 nezávislých měření v obou směrech zároveň. Poněvadž ale většina hodnot neměla dle Shapirova-Wilkova testu normální rozdělení, byly další testy a počítání provedeny na medián. Do jednotlivých grafů byl pak také použitý medián hodnot.

Tabulka 8.15: Výsledné hodnoty RFC 6349 v měřicím bodě 2

Směr přenosu	Testovaná síť	Velikost okna [KiB]	Aktuální propustnost [Mbit/s]		Zpoždění bufferu [%]		Minimální RTT [ms]	
			Průměr	Medián	Průměr	Medián	Průměr	Medián
Vzestupný směr	LAN	118 (2 spojení po 59)	25,060	27,900	25,102	25,360	10,361	10,366
	WAN	220 (4 spojení po 55)	36,800	36,800	158,802	160,150	19,198	19,200
Sestupný směr	LAN	118 (2 spojení po 59)	91,640	91,500	6,954	7,330	10,361	10,366
	WAN	220 (4 spojení po 55)	90,900	91,000	5,959	5,675	19,198	19,200

Tabulka 8.16: Statistická indukce propustnosti dle RFC 6349 v měřícím bodě 2

Propusnost [Mbit/s]					
Směr přenosu	Testovaná síť	n	Minimum, Maximum	Medián (IQR)	95% IO mediánu
Vzestupný směr	LAN	10	10,000 ; 31,600	27,900 (24,175 ; 28,900)	19,050 ; 29,550
	WAN	10	36,800 ; 36,800	36,800 (36,800 ; 36,800)	-
Sestupný směr	LAN	10	91,500 ; 92,600	91,500 (91,500 ; 91,600)	91,500 ; 91,600*
	WAN	10	89,800 ; 91,500	91,000 (90,725 ; 91,475)	90,300 ; 91,450



Obrázek 8.15: Propusnost sítě dle RFC 6349 v měřícím bodě 2

Z tabulek 8.15, 8.16 a grafu 8.15 můžeme vidět, že v měřícím bodě 2 jsou nastal pokles na LAN pro měření vzestupného směru, to může být způsobeno použitými zesilovači a rozhozenému TDMA. Naměřené hodnoty pak vyplývají maximální přenosové rychlosti pro profil 17a, která byla na L1 97,77 Mbit/s ve směru sestupném a 39,362 Mbit/s ve směru vzestupném, což odpovídá při MTU 1500 přenosové rychlosti na L4 94,039 Mbit/s ve směru sestupném a 37,86 Mbit/s ve směru vzestupném.

8.7 Měření multimediálních služeb

Měření multimediálních služeb v topologii se zesilovači probíhalo stejně, jako při topologii bez zesilovačů pro nejlepší srovnání. Nastavení a popisy hodnot se nachází v kapitole 7.9.

Tabulka 8.17: Měření video parametrů H.264 pomocí EXpert IPTV v měřicím bodě 1

Formát videa		MOS	EPSNR [dB]	Kolísání zpoždění [ms]	Zpoždění [ms]	Šířka pásma [Mbit/s]
SD	Nezatížená síť	3,78	36,1	0,11	28	0,58
	Zatížená síť	4,10	45,4	0,20	32	0,58
HD	Nezatížená síť	4,40	48,1	0,14	15	2,54
	Zatížená síť	4,40	28,4	0,61	12	2,52
Full HD	Nezatížená síť	4,52	47,6	0,15	17	4,47
	Zatížená síť	4,52	47,7	0,15	17	4,47

Tabulka 8.18: Měření video parametrů MPEG-2 pomocí EXpert IPTV v měřicím bodě 1

Formát videa		MOS	EPSNR [dB]	Kolísání zpoždění [ms]	Zpoždění [ms]	Šířka pásma [Mbit/s]
SD	Nezatížená síť	4,09	43,3	0,26	35	6,02
	Zatížená síť	4,09	43,2	0,13	33	6,01
HD	Nezatížená síť	4,40	37,3	0,07	17	14,68
	Zatížená síť	4,40	38,3	0,09	16	13,74
Full HD	Nezatížená síť	4,33	34,0	0,11	17	15,35
	Zatížená síť	4,28	31,1	0,27	17	15,27

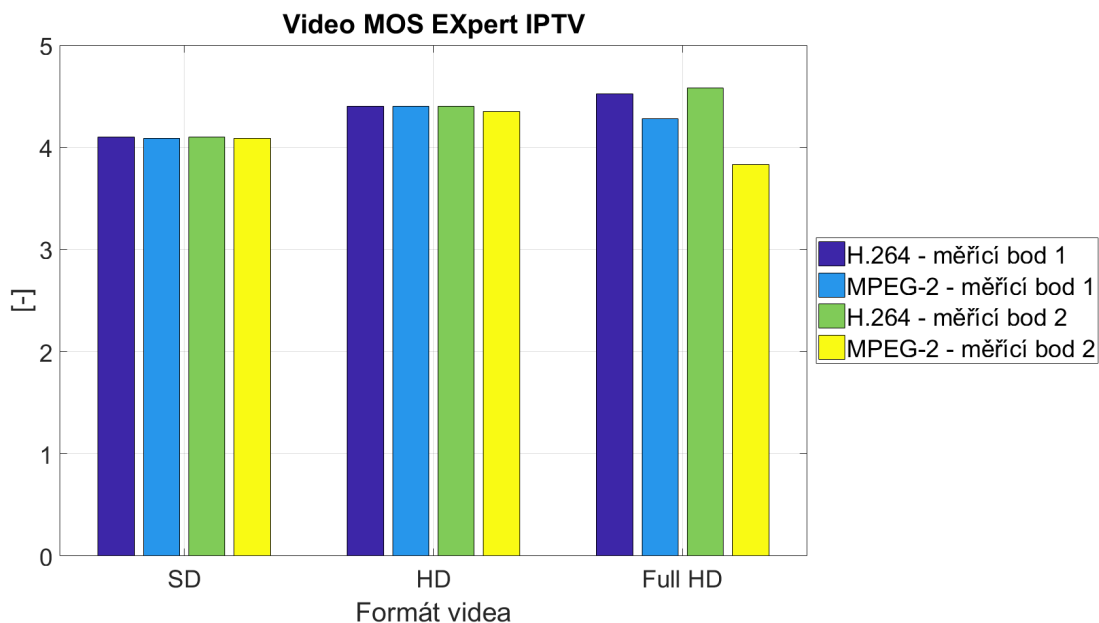
Tabulka 8.19: Měření video parametrů H.264 pomocí EXpert IPTV v měřicím bodě 2

Formát videa		MOS	EPSNR [dB]	Kolísání zpoždění [ms]	Zpoždění [ms]	Šířka pásma [Mbit/s]
SD	Nezatížená síť	4,10	42,4	0,08	34	0,56
	Zatížená síť	4,10	42,4	0,11	31	0,56
HD	Nezatížená síť	4,46	44,4	0,20	15	2,53
	Zatížená síť	4,40	44,2	0,03	15	2,53
Full HD	Nezatížená síť	4,52	44,2	0,05	17	4,46
	Zatížená síť	4,58	43,5	0,05	16	4,46

Tabulka 8.20: Měření video parametrů MPEG-2 pomocí EXpert IPTV v měřicím bodě 2

Formát videa		MOS	EPSNR [dB]	Kolísání zpoždění [ms]	Zpoždění [ms]	Šířka pásma [Mbit/s]
SD	Nezatížená síť	4,09	42,1	0,11	33	5,83
	Zatížená síť	4,09	41,8	0,23	35	5,83
HD	Nezatížená síť	4,35	42,5	0,05	18	13,78
	Zatížená síť	4,35	42,5	0,27	17	13,74
Full HD	Nezatížená síť	3,83	33,2	0,03	19	15,32
	Zatížená síť	3,83	33,2	0,03	19	15,32

V grafu jsou opět zobrazeny hodnoty při měření na zatížené síti. Z tabulek můžeme vidět, že při většině video stop nebyl velký rozdíl mezi nezatíženou a zatíženou sítí, což bude důsledkem vlastností UDP protokolu a zároveň relativně malou šířkou pásma, kterou video stopy potřebují k přenesení.



Obrázek 8.16: Porovnání MOS jednotlivých videí

V grafu pak lze vidět porovnání MOS jednotlivých videí, kdy opět vidíme, že všechny formáty videa při obou kodecích a v obou měřících bodech se pohybují kolem MOS hodnoty 4, což znamená, že dosahují dobré kvality. Dále je zde patrný trend, že video formátu SD má stabilní hodnoty MOS, video formátu HD má taktéž stabilní MOS a zároveň vyšší, než SD a video formátu Full HD dosahuje při kodeku H.264 nejlepších hodnot MOS, ale při kodeku MPEG-2 nikoliv. Veškeré videa s kodekem MPEG-2 potřebují k přenesení větší šířku pásma a i proto mohou mít horší hodnoty MOS a EPSNR. Jednotlivé hodnoty kolísání zpoždění byly u všech kodeků v obou měřících bodech velmi nízké. Hodnoty zpoždění pak vyhovují dle 7.7 - MEF 23.1 pro SD videa s oběma kodeky, v obou měřících bodech nízké úrovni služeb - CoS - L a HD a Full HD videa s oběma kodeky, v obou měřících bodech vyhovují střední úrovni služeb - CoS - M.

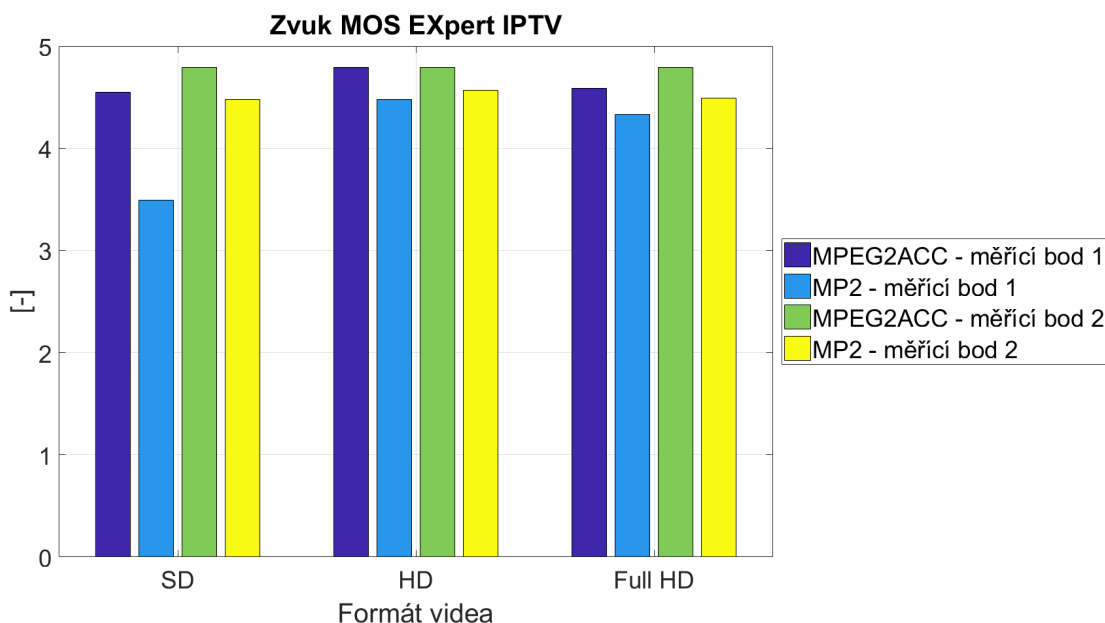
Tabulka 8.21: Měření zvukových parametrů pomocí EXpert IPTV v měřícím bodě 1

Formát videa		MPEG2ACC		MP2	
		MOS	Šířka pásma [kbit/s]	MOS	Šířka pásma [kbit/s]
SD	Nezatížená síť	4,55	193	4,65	250
	Zatížená síť	4,79	193	4,48	250
HD	Nezatížená síť	4,55	193	4,54	235
	Zatížená síť	3,49	192	4,59	225
Full HD	Nezatížená síť	4,57	193	4,59	249
	Zatížená síť	4,79	193	4,33	249

Tabulka 8.22: Měření zvukových parametrů pomocí EXpert IPTV v měřicím bodě 2

Formát videa		MPEG2ACC		MP2	
		MOS	Šířka pásma [kbit/s]	MOS	Šířka pásma [kbit/s]
SD	Nezatížená síť	4,79	193	4,47	250
	Zatížená síť	4,79	193	4,48	250
HD	Nezatížená síť	4,79	193	4,54	224
	Zatížená síť	4,79	193	4,57	223
Full HD	Nezatížená síť	4,79	193	4,47	249
	Zatížená síť	4,79	193	4,49	249

V grafu jsou opět zobrazeny hodnoty při měření na zatížené síti. Z tabulek můžeme vidět, že při většině zvukových stop nebyl velký rozdíl mezi nezatíženou a zatíženou sítí, což bude důsledkem vlastností UDP protokolu a zároveň velmi malou šířkou pásma, kterou zvukové stopy potřebují k přenesení.



Obrázek 8.17: Porovnání MOS jednotlivých zvukových stop

Kvalita zvuku se napříč všemi formáty pohybuje mezi dobrou a vynikající kvalitou dle MOS tabulky, až na SD zvukovou stopu při kodeku MP2 v měřicím bodě 1, zde byla naměřena hodnota mezi průměrnou a dobrou kvalitou. Z grafu pak lze dále vidět i to, že kodek MPEG2ACC dosahuje lepších hodnot oproti kodeku MP2, nehledě na bod, ve kterém bylo měřeno. Zároveň lze s jistotou říci, že zvukový kodek MPEG2ACC potřebuje nižší šířku pásma, oproti zvukovému kodeku MP2, ale obě tyto hodnoty se pohybují v nižších stovkách kbit/s.

Kapitola 9

Porovnání dosažených výsledků hybridní fotonické sítě bez a s implementací zesilovačů

V této kapitole se nachází pouze porovnání, mezi sítí bez zesilovačů a sítí se zesilovači. Jednotlivé vyhodnocení hodnot dle MEF 23.1 bylo provedeno v minulých kapitolách u statistických indukcí.

9.1 Porovnání měření dle normy ITU-T Y.1564

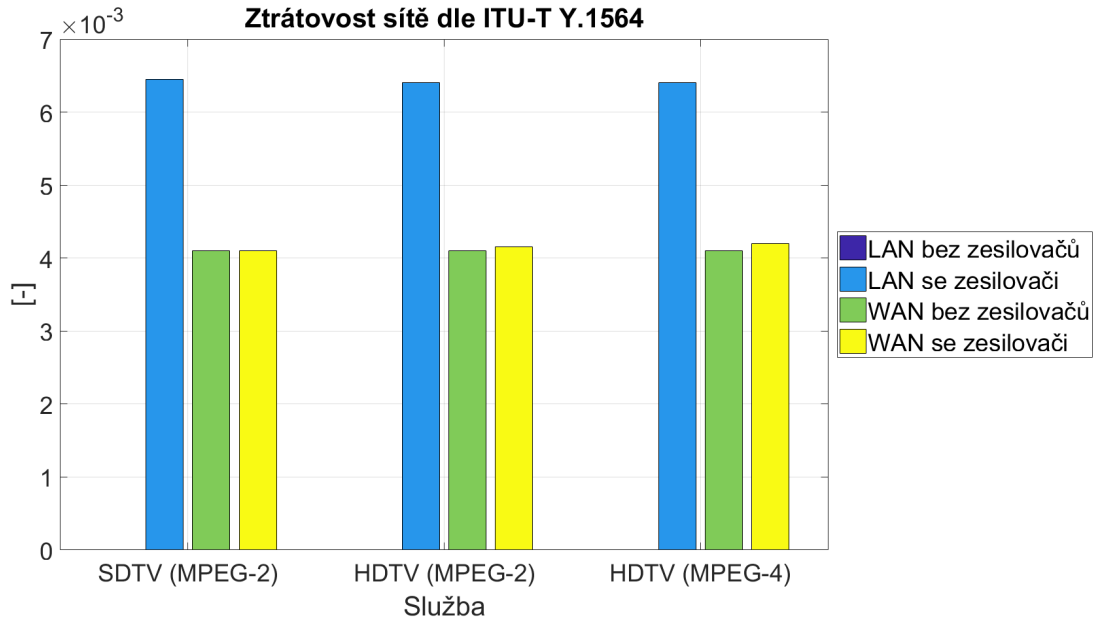
9.1.1 Měřící bod 1

V měřícím bodě 1 porovnávám pouze optickou část sítě, tedy GPON síť bez a s implementací zesilovačů. Na každé straně se nachází srovnávací graf, na kterém je vidět snadné porovnání, mezi sítěmi bez zesilovačů a se zesilovači. Dále pro konkrétnější analýzu hodnot byly vytvořeny hybridní krabicové grafy. Tyto grafy znázorňují na levé straně krabicový graf, kde je rozdělení dat do kvartilů a zvýrazněný medián a na pravé straně všech 10 jednotlivých měření a jejich bodové hodnoty. Pomocí těchto grafů je například možné odstranit odlehlá pozorování, která ale byla ponechána, pro jednotvárnost a stejný přístup ke každému měření a statistickým indukcím.

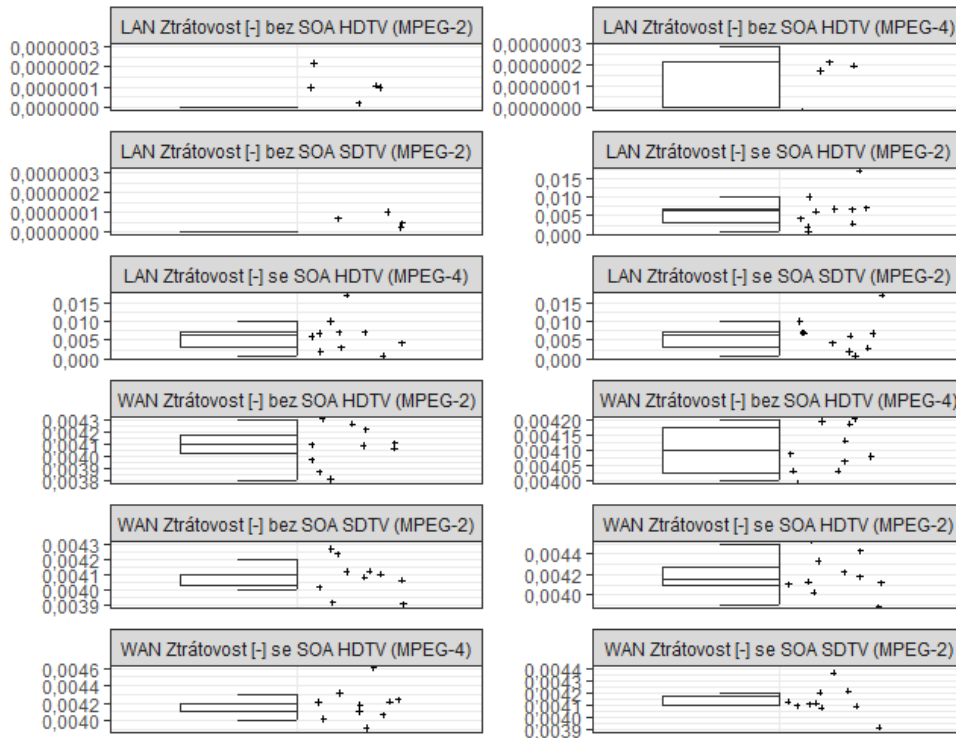
Ztrátovost sítě bez implementace zesilovačů dosahovala mnohem nižších hodnot, než síť s přidávanými zesilovači. Tuto zvýšenou ztrátovost si vysvětluji nepřesnou synchronizací TDMA mezi OLT a ONT. Poněvadž OLT je velmi komplexní zařízení, které si hlídá, jaký má vysílací výkon a taktéž přizpůsobuje vysílací výkon svůj, i jednotlivých ONT jednotek, tak při vložení zesilovačů do trasy může dojít k rozsynchronizaci a následným zhoršeným hodnotám. V některých krabicových grafech je možné vidět, že horní a dolní kvartil splývá s mediánem a tudíž nejde vidět klasický krabicový graf, to se stává při měřeních, kde je naměřeno vícero stejných hodnot.

Hodnoty kolísání zpoždění neprokázaly stejný trend, jako hodnoty ztrátovosti. U těchto hodnot je vidět, že nehledě na přidání zesilovačů do trasy bylo kolísání zpoždění na síti LAN velmi nízké a na síti WAN vyšší oproti LAN, ale pořád v nízkých hodnotách dle MEF 23.1.

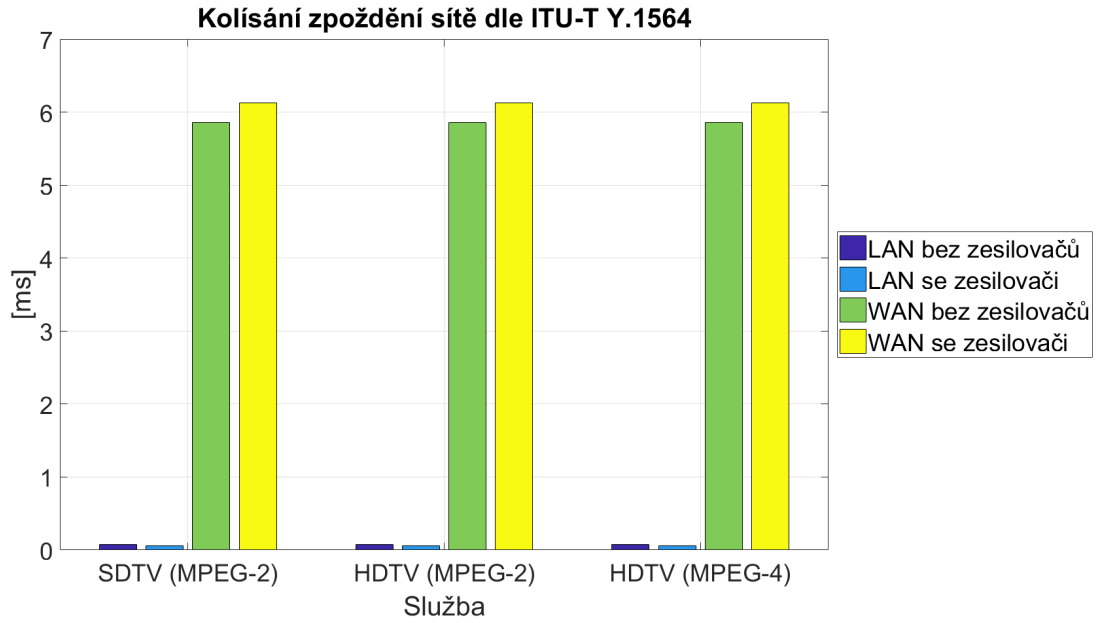
Zpoždění sítě opět ukazuje, že pro LAN síť nehrály přidané zesilovače žádnou roli. Oproti tomu na WAN síti si lze všimnout zvýšených hodnot po přidání zesilovačů do trasy. Na WAN síti to mohlo být opět způsobeno nesprávnou synchronizací mezi OLT a ONT, ale větší důraz přikládám k tomu, že tyto hodnoty jsou ovlivněny vytížeností sdílených internetových linek a tedy záleží i na čase, kdy je měření spuštěno a aktuální situací.



Obrázek 9.1: Porovnání ztrátovosti sítě v měřícím bodě 1



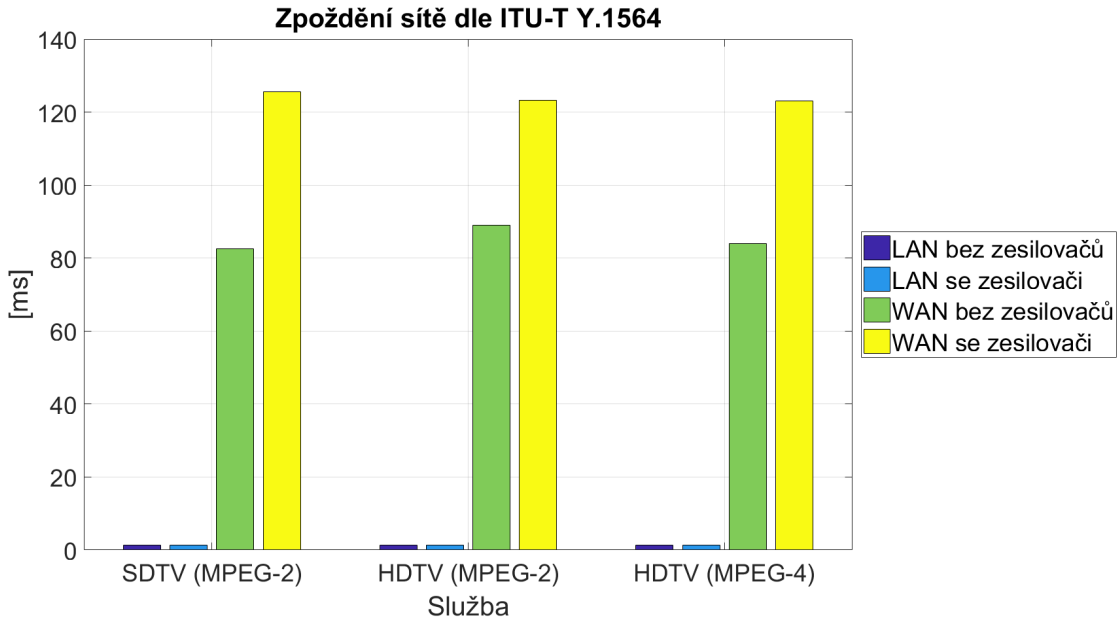
Obrázek 9.2: Hybridní krabicové grafy ztrátovosti sítě v měřícím bodě 1



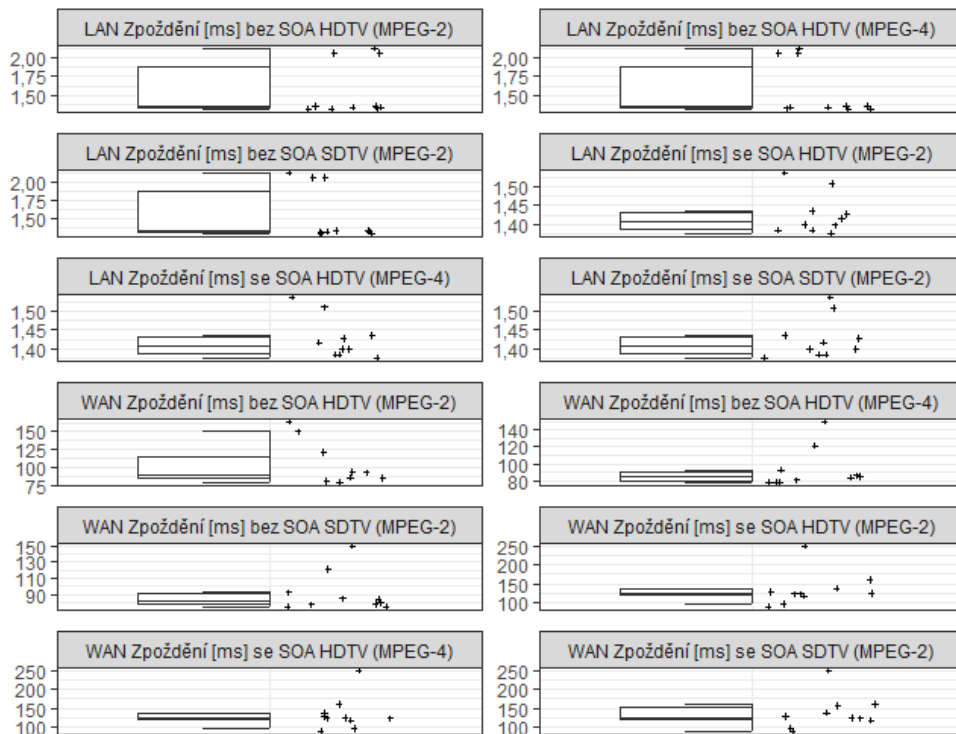
Obrázek 9.3: Porovnání kolísání zpoždění sítě v měřicím bodě 1



Obrázek 9.4: Hybridní krabicové grafy kolísání zpoždění sítě v měřicím bodě 1



Obrázek 9.5: Porovnání zpoždění sítě v měřícím bodě 1



Obrázek 9.6: Hybridní krabicové grafy zpoždění sítě v měřícím bodě 1

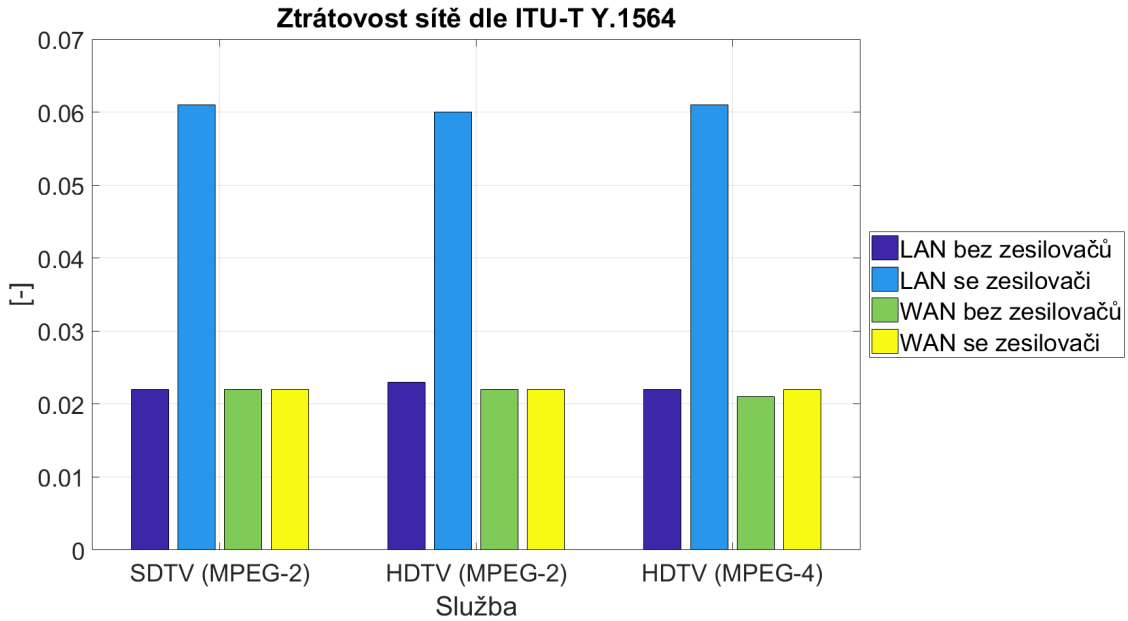
9.1.2 Měřící bod 2

V měřícím bodě 2 porovnávám hybridní fotonickou síť, tedy GPON/VDSL2 síť bez a s implementací zesilovačů. Opět se na každé straně se nachází srovnávací graf, na kterém je vidět snadné porovnání, mezi sítěmi bez zesilovačů a se zesilovači. Dále pro konkrétnější analýzu hodnot byly vytvořeny hybridní krabicové grafy. Tyto grafy znázorňují na levé straně krabicový graf, kde je rozdělení dat do kvartilů a zvládnutý medián a na pravé straně všech 10 jednotlivých měření a jejich bodové hodnoty. Pomocí těchto grafů je například možné odstranit odlehlá pozorování, která ale byla ponechána, pro jednotvárnost a stejný přístup ke každému měření a statistickým indukci.

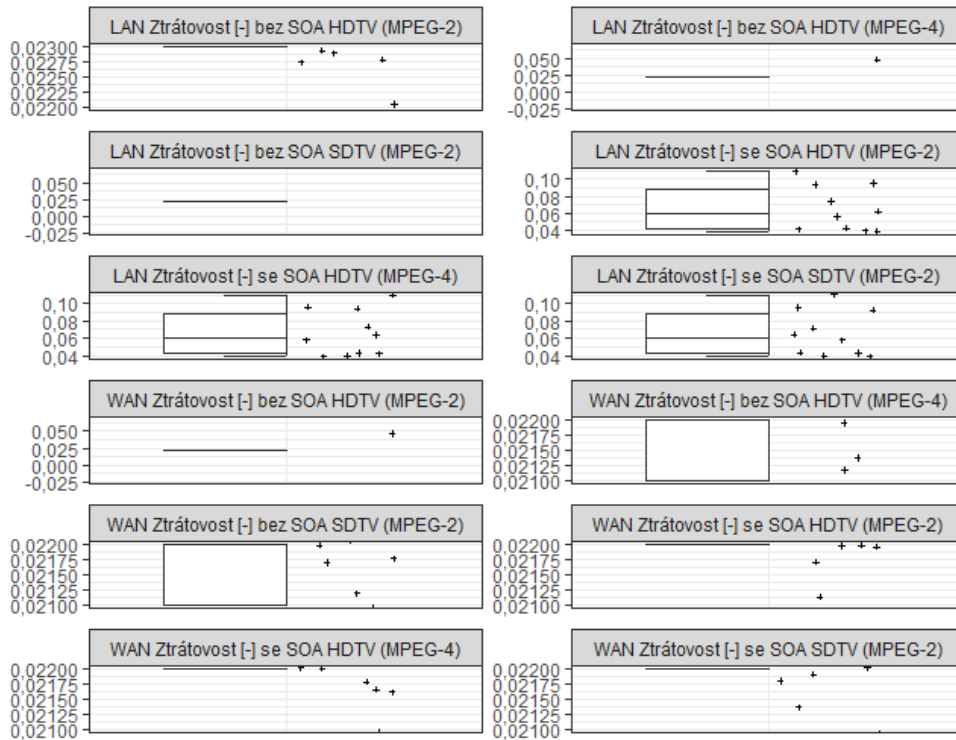
Ztrátovost sítě zde vykazuje konstantních hodnot pro LAN bez zesilovačů, WAN bez zesilovačů a WAN se zesilovači. Jediný rozdíl je pak v LAN se zesilovači, kde byla hodnota až trojnásobně vyšší. Znovu si tento jev vysvětluji nepřesnou synchronizací, mezi OLT a ONT, poněvadž měření na WAN síti probíhalo o několik týdnů později, mohla být útlumová bilance celé sítě lehce jiná v závislosti na nesprávně vyčištěných vláknech, hůře zacvaknutých vláknech do spojek a podobně, proto nakonec hodnoty ztrátovosti při WAN síti se zesilovači mohly dosahovat podobných hodnot, jako bez zesilovačů. Obecná hodnota ztrátovosti je však přesto velmi vysoká, 2% na takovéto hybridní fotonické síti nejsou akceptovatelné a pro UDP provoz jsou velmi poškozující.

Kolísání zpoždění dosahuje při všech konfiguracích velmi dobrých hodnot. Zvláštní hodnota kolísání zpoždění na LAN síti se zesilovači ve srovnání z nejvyšší ztrátovostí v tomto bodě je k zamyšlení, jestli tyto faktory nemohou mít mezi sebou souvislost. V krabicových grafech pak lze vidět, že hodnoty kolísání zpoždění jsou lépe statisticky zpracovatelné, než hodnoty ztrátovosti a nachází se zde více správných krabicových grafů. Mimo tyto jevy lze říct, že přidání zesilovačů do sítě nikterak nepoškodilo síť z pohledu kolísání zpoždění.

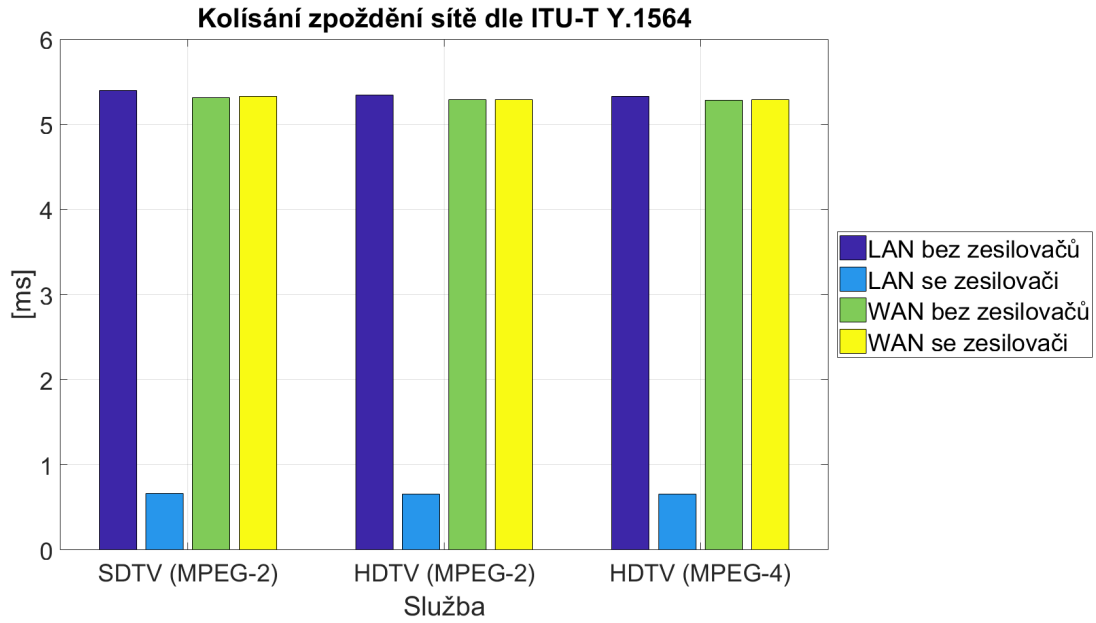
Oproti kolísání zpoždění se u zpoždění sítě nachází velmi vysoké hodnoty, které neodpovídají MEF 23.1, nehledě na zesilovače v trase. Při této hybridní fotonické síti by nebylo možné splnit odpovídající kvalitu vysílání a proto by muselo být dbáno na konfiguraci určitých QoS parametrů a tedy optimalizaci sítě.



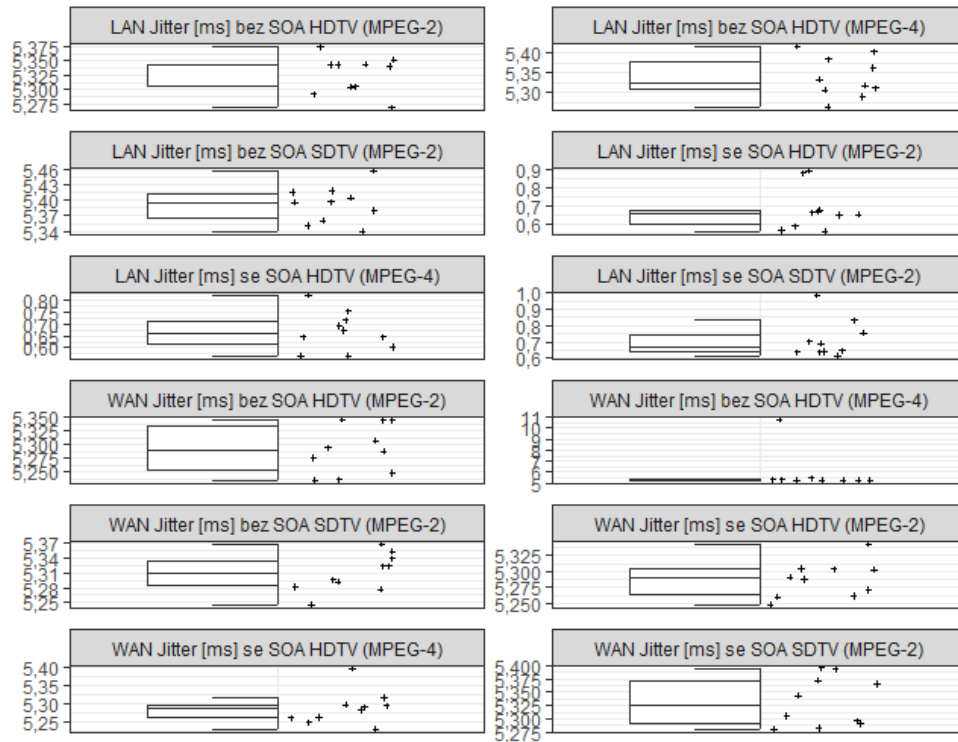
Obrázek 9.7: Porovnání ztrátovosti sítě v měřícím bodě 2



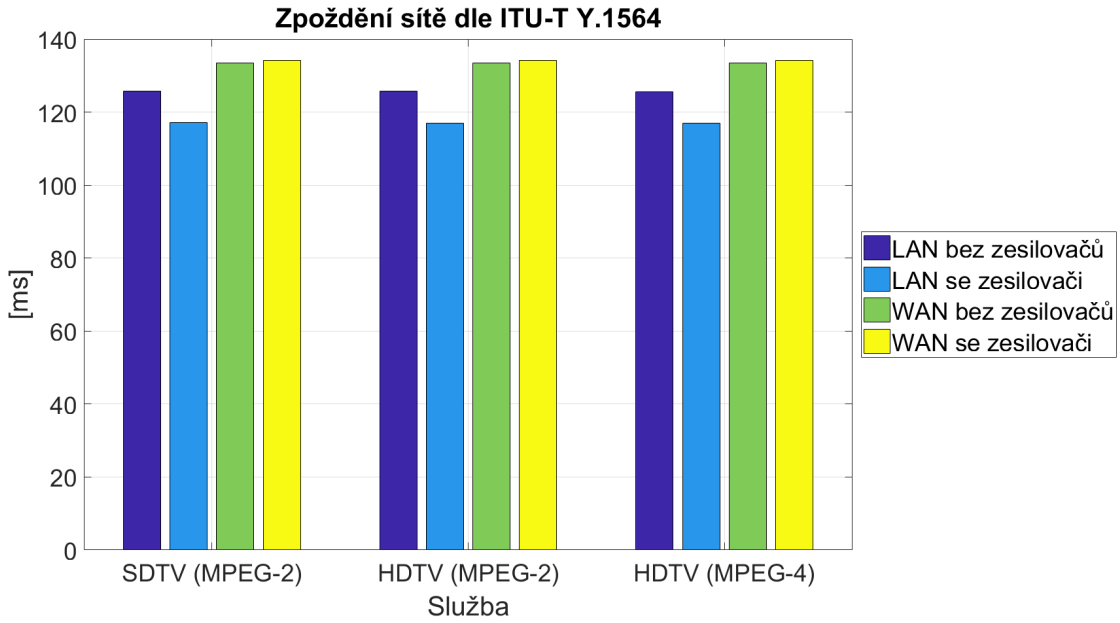
Obrázek 9.8: Hybridní krabicové grafy ztrátovosti sítě v měřícím bodě 2



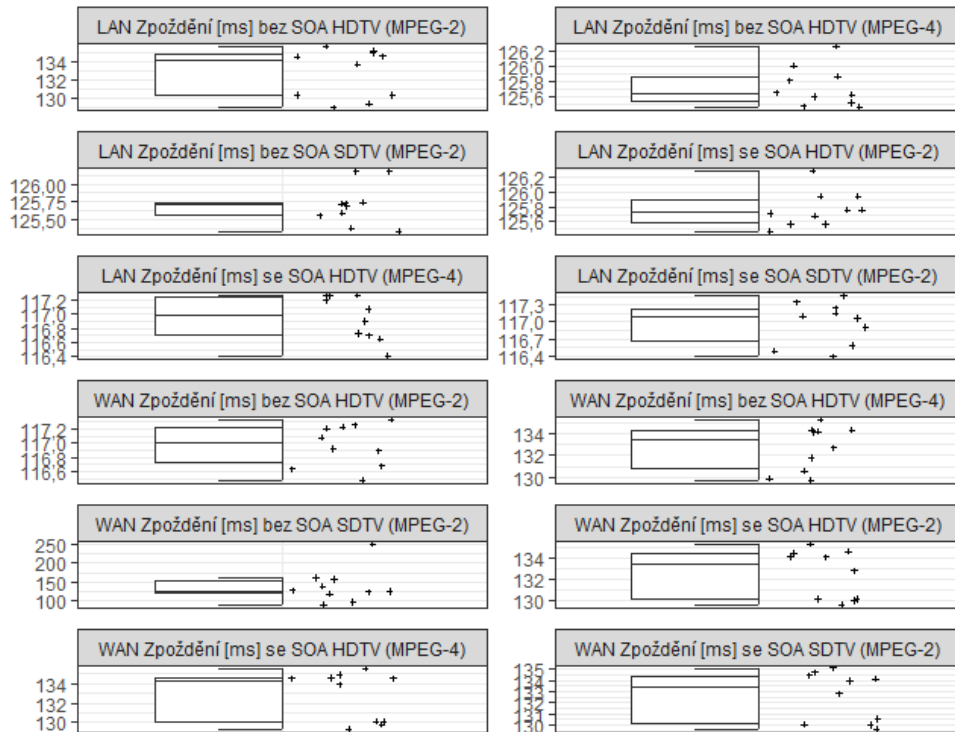
Obrázek 9.9: Porovnání kolísání zpoždění sítě v měřicím bodě 2



Obrázek 9.10: Hybridní krabicové grafy kolísání zpoždění sítě v měřicím bodě 2



Obrázek 9.11: Porovnání zpoždění sítě v měřícím bodě 2



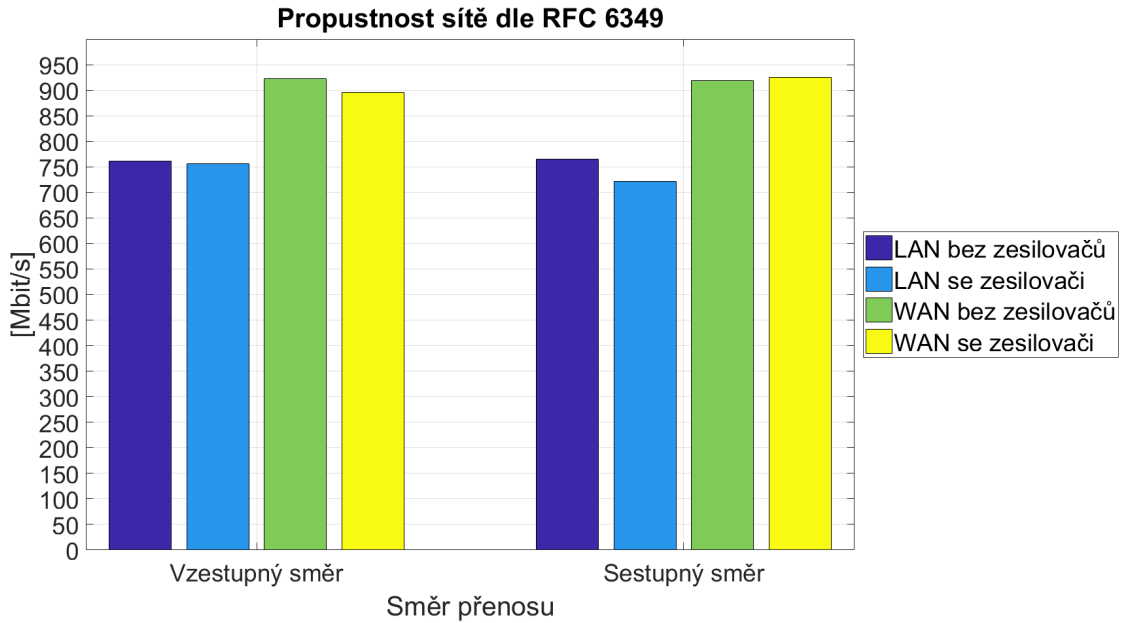
Obrázek 9.12: Hybridní krabicové grafy zpoždění sítě v měřícím bodě 2

9.2 Porovnání měření dle doporučení RFC 6349

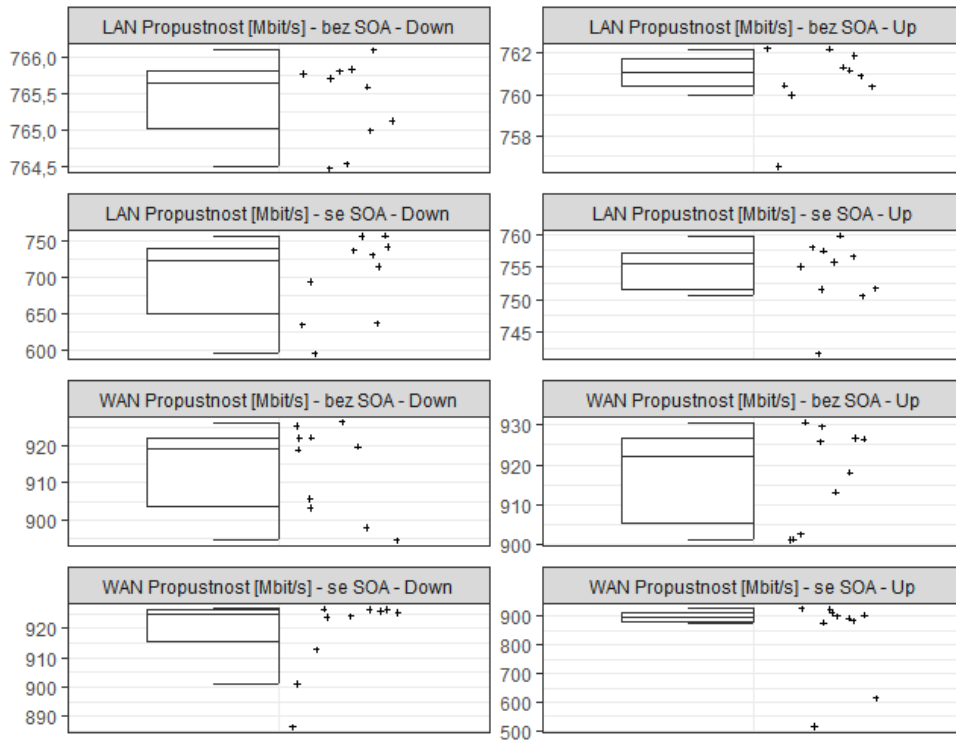
V porovnání měření, dle doporučení RFC 6349, se znovu na každé straně se nachází srovnávací graf, na kterém je vidět snadné porovnání, mezi sítěmi bez zesilovačů a se zesilovači. Dále pro konkrétnější analýzu hodnot byly vytvořeny hybridní krabicové grafy. Tyto grafy znázorňují na levé straně krabicový graf, kde je rozdělení dat do kvartilů a zvýrazněný medián a na pravé straně všech 10 jednotlivých měření a jejich bodové hodnoty. Pomocí těchto grafů je například možné odstranit odlehlá pozorování, která ale byla ponechána, pro jednotvárnost a stejný přístup ke každému měření a statistickým indukci.

Měření propustnosti sítě v měřicím bodě 1 nezaznamenalo žádné velké odchylky, mezi měřeními bez zesilovačů a se zesilovači. Na grafu a hybridních krabicových grafech můžeme vidět opět trend vyšší propustnosti sítě v rámci měření WAN, který byl způsoben tím, že ve WAN síti bylo větší RTT, což způsobilo vhodnější nastavení velikosti oken a následně nezpůsobovalo zpoždění bufferu, které bylo u měření na LAN síti. Vzestupný směr s a bez zesilovačů vykazuje o trochu lepší hodnoty v měření bez zesilovačů, toto může být způsobeno špatnou synchronizací OLT a ONT jednotky, lze ale konstatovat, že toto snížení rychlosti bylo zanedbatelné. U sestupného směru bylo na LAN síti vidět snížení u měření se zesilovači, ale na WAN síti lehké zvýšení, nelze tedy vyvodit konkrétní závěry. Hybridní krabicové grafy pak ukazují, že naměřené hodnoty propustnosti byly různorodé a neopakovaly se stále stejné hodnoty, proto lze z těchto grafů vidět, že horní a dolní kvartil nesplývá s mediánem.

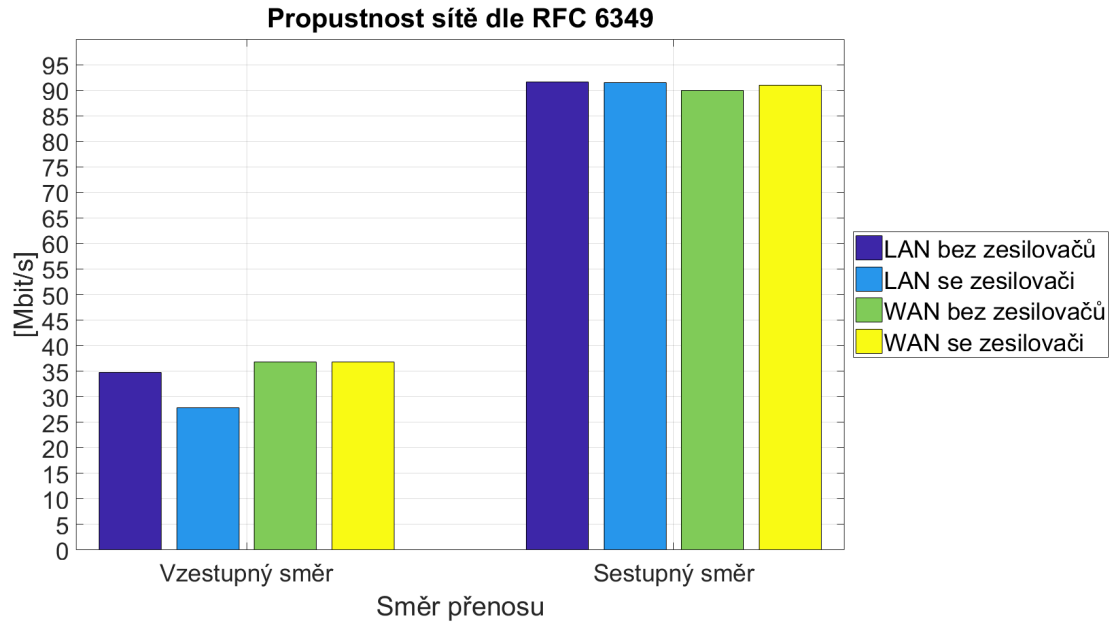
V měřicím bodě 2 byla propustnost sítě v sestupném směru velice podobná. To plyne z maximální možné propustnosti v sestupném směru na transportní vrstvě 94,039 Mbit/s, což při zanedbatelné zatíženosti sítě by mělo být dosaženo bez větších problémů, když před VDSL2 DSLAM zařízením se nachází hodnoty převyšující 700 Mbit/s. Z hybridních krabicových grafů lze pak vyčíst, že více měřených hodnot bylo totožných a v tu chvíli nemůže být vytvořen korektní krabicový graf, protože horní a dolní kvartil splývají s mediánem. Ve vzestupném směru nastalo snížení přenosové rychlosti v LAN síti po přidání zesilovačů. Maximální propustnost na transportní vrstvě by zde měla být 37,86 Mbit/s, k čemu se blíží hodnoty naměřené na WAN síti. U hodnot naměřených na LAN síti ve vzestupném směru je vidět pokles po přidání zesilovačů do sítě. Tento pokles opět mohl nastat nesprávnou synchronizací mezi OLT a ONT jednotkou.



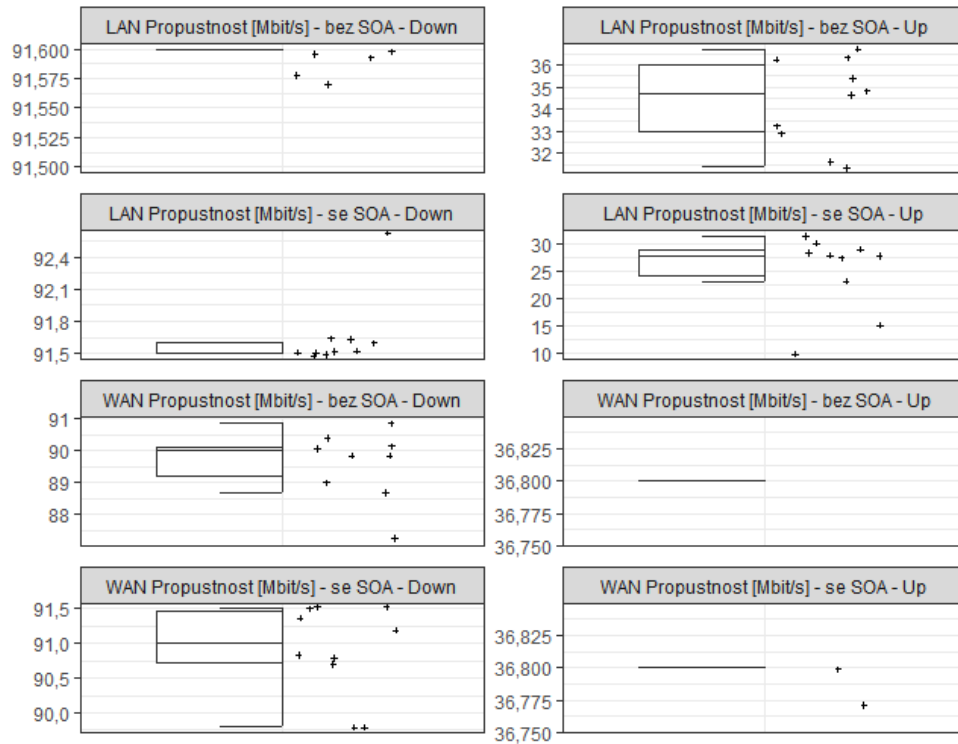
Obrázek 9.13: Porovnání propustnosti sítě v měřícím bodě 1



Obrázek 9.14: Hybridní krabicové grafy propustnosti sítě v měřícím bodě 1



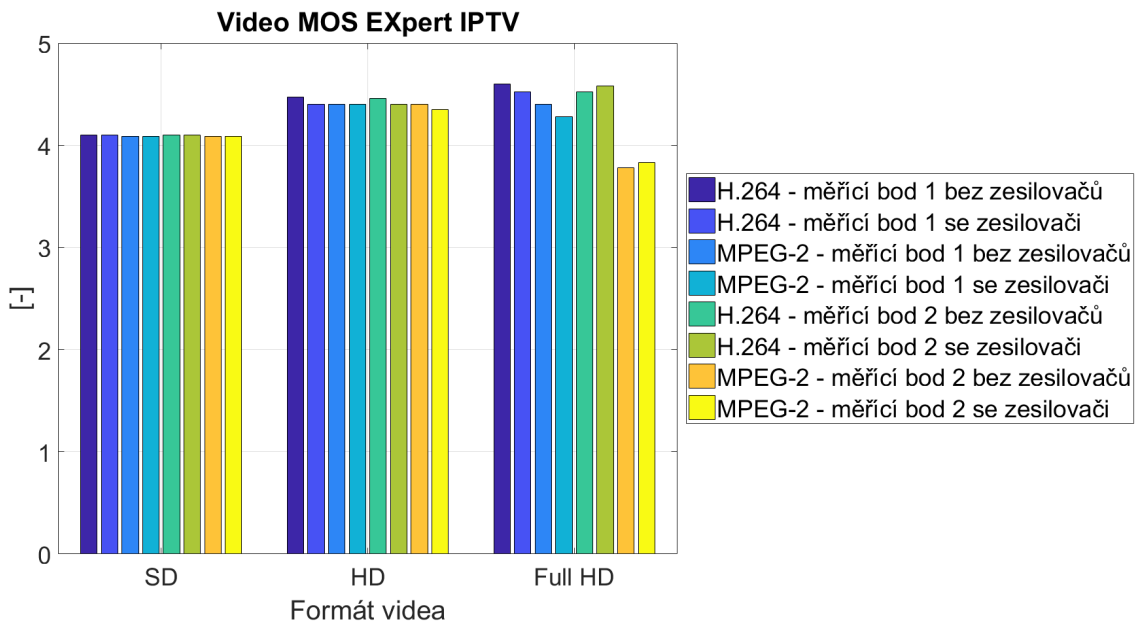
Obrázek 9.15: Porovnání propustnosti sítě v měřícím bodě 2



Obrázek 9.16: Hybridní krabicové grafy propustnosti sítě v měřícím bodě 2

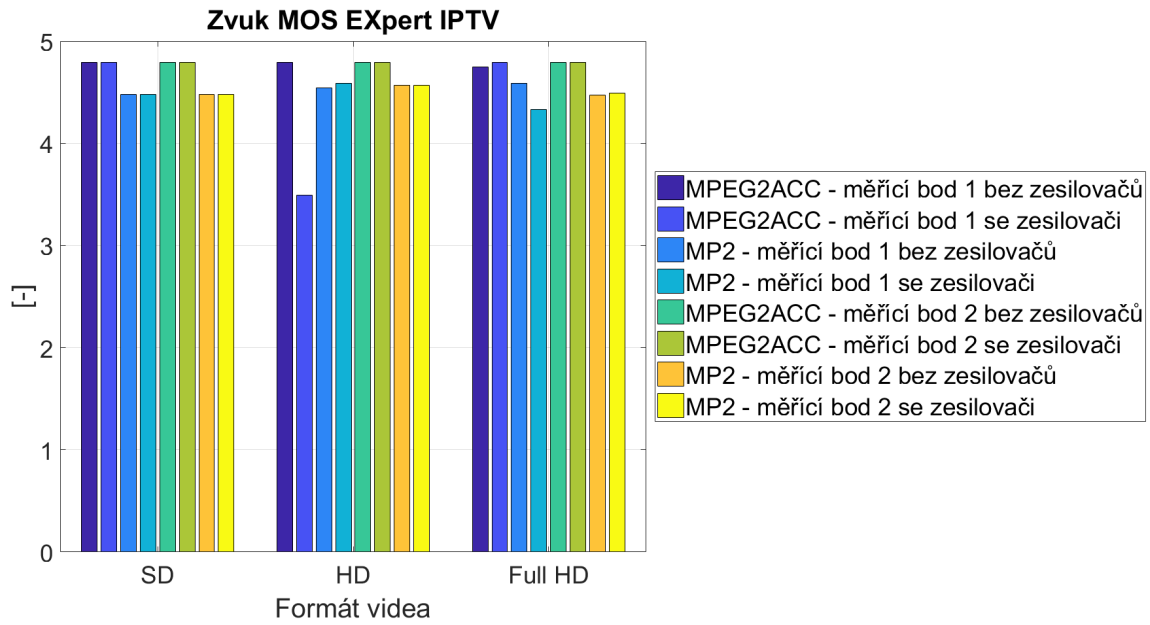
9.3 Porovnání měření multimediálních služeb

Při porovnávání multimediálních služeb, konkrétně parametru MOS u video stop, si lze na první pohled všimnout, že SD video, nehledě na měřící bod, kodek, nebo zesilovače vykazuje stále velmi podobnou, dle MOS stupnice dobrou, kvalitu. Při nahlédnutí na formát videa HD se již nachází větší odchylky, mezi jednotlivými MOS hodnotami a můžeme říci, že měření bez zesilovačů vykazovalo lehce lepší hodnoty, než měření se zesilovači a to především u kodeku H.264. Video s formátem Full HD vykazuje největší výkyvy a nestálost. U tohoto videa je možné dosáhnout nejlepších MOS výsledků, ale zároveň i nejhorsích. Na tento jev bude mít vliv to, že je video nejkvalitnější a pokud není zaznamenána ztrátovost, nebo zpoždění, bude hodnota nejvyšší, ale zároveň vidíme, že při kodeku MPEG-2 v měřícím bodě 2 nedosahuje na stupnici ani dobré kvality. I zde se ukazuje, že přidání zesilovačů do trasy ovlivnilo jednotlivé výsledky, ale nijak znatelně, protože se většina z nich drží nad dobrou kvalitou videa.



Obrázek 9.17: Porovnání MOS jednotlivých videí bez a s implementací zesilovačů

Při srovnávání zvukových stop a jejich MOS v rámci této práce je prokazatelné, že kodek MPEG2ACC vykazuje vyšších hodnot, než kodek MP2, až na jeden případ, který ale v porovnání s ostatními vypadá spíše jako odlehlé pozorování. Lepší kvalita kodeku MPEG2ACC může být způsobena nižší potřebnou šířkou pásma. Přidání zesilovačů do trasy nijak neovlivnilo zvukovou kvalitu u SD videa, u HD videa pouze jedním odlehlým pozorováním a u Full HD videa ovlivnění nastalo, ale není nikterak zásadní. Zvuková kvalita se stále nachází mezi dobrou a vynikající kvalitou, až na HD video MPEG2ACC kodek, který vykazuje nepředpokládanou hodnotu.



Obrázek 9.18: Porovnání MOS jednotlivých zvukových stop bez a s implementací zesilovačů

Kapitola 10

Závěr

Cílem diplomové práce bylo vybudovat reálné zapojení hybridní fotonické sítě v rámci laboratoří. Tato síť byla vybudována v laboratořích EB316, EB211 a EB215 na katedře telekomunikační techniky.

V teoretické části práce byly popsány gigabitové pasivní optické sítě a jejich následovníci v podobě desetigigabitových optických sítí. Dále zde byly popsány digitální účastnické přípojky, a to asymetrické i vysokorychlostní a témata, které se vyskytují v tomto odvětví v podobě přeslechů, vektorování a bondingu. Teoretická část práce se zabývá taktéž optickými zesilovači a jejich typy, protože bylo nutné porozumět optickým polovodičovým zesilovačům, které byly v práci použity. Další dvě kapitoly jsou pak věnovány hybridním fotonickým sítím a sítím s velmi vysokou kapacitou.

V praktické části práce byla v rámci laboratoří sestavena hybridní fotonická síť GPON/VDSL2 skládající se z těchto komponentů: HTTP server / VLC vysílač v podobě počítače, MikroTik fungující jako přepínač pro lokální síť s funkcí DHCP serveru, OLT jakožto centrální jednotka optické sítě, distribuující služby směrem ke koncovým uživatelům, MikroTik fungující jako směrovač pro připojení do sítě internet s funkcí DHCP serveru, virtuální linuxový server sloužící k monitorování sítě pomocí nástroje Grafana, optických tras a rozbočovačů, koncových ONT/ONU jednotek představující koncové body optické sítě, DSLAM zařízení představující začátek metalické sítě, koncových VDSL2 Modemů, sloužících jako koncové body pro připojení uživatelů pomocí počítačů.

Na této topologii pak proběhlo měření výkonu, útlumu, disperzí a rozsáhlé měření integrity sítě dle normy ITU-T Y.1564 a doporučení RFC 6349. Dále byly měřeny parametry multimediálních služeb SD, HD a Full HD videí, jako jsou MOS, EPSNR, kolísání zpoždění, zpoždění a ztrátovost. Měření integrity sítě a multimediálních služeb probíhalo ve dvou způsobech, a to na lokální síti, pomocí dvou měřících platforem FTB-1 s moduly FTB-880v2 NetBlazer, od firmy EXFO a poté měření na rozlehlé síti proti měřicímu přístroji LTB-8, který patří Českému telekomunikačnímu

úřadu. Napříč měřeními byly stanoveny dva měřící body, kdy jeden se nacházel za koncovou ONT jednotkou, pro proměření čistě optické sítě a druhý se nacházel za VDSL2 Modemem, pro proměření hybridní fotonické sítě.

Dalším bodem praktické části práce byla implementace optických zesilovačů do hybridní fotonické sítě. Pro implementaci těchto zesilovačů bylo nutné použít čtyři optické cirkulátory, pro odbočení vzestupného a sestupného směru, aby správně procházel výkon na konkrétních vlnových délkách skrze zesilovač, pracující na této vlnové délce. Veškeré měření bylo provedeno znovu a za stejných podmínek, aby bylo možné srovnat výsledky bez a s použitím zesilovačů.

V poslední části praktické práce byly porovnány dosažené výsledky ze všech měření pro navrženou hybridní fotonickou síť a to bez a s implementací zesilovačů.

V práci bylo dokázáno, že při správném použití optických zesilovačů, je možné dosáhnout delší překlenutelné vzdálenosti na hybridní fotonické síti. Tato vzdálenost se zvýšila z 50 kilometrů na 60 kilometrů, což je logické maximum pro tuto síť.

Pro ryze optickou lokální síť použití zesilovačů přineslo vyšší ztrátovost sítě v měření dle normy ITU-T Y.1564 a nižší propustnost sítě v měření dle doporučení RFC 6349. Hodnota MOS jednotlivých videí a zvukových stop nebyla přidáním zesilovačů na lokální síti výrazně zasažena, což je důsledek relativně nízké šířky pásma, které video potřebuje. Na vzdálené síti u měření proti serveru v internetu pak přidání zesilovačů nezpůsobilo velké odchylky ve ztrátovosti, kolísání zpoždění, ani zpoždění. Hodnoty propustnosti sítě byly taktéž velmi podobné a to platí i pro hodnoty MOS, měřených pro videa a zvukové stopy.

V hybridní fotonické síti GPON/VDSL2 byl opět vidět nárůst ztrátovosti na lokální síti při měření s přidáním zesilovači, oproti tomu parametr kolísání zpoždění dosahovala nižších hodnot, než při zapojení bez zesilovačů a zpoždění sítě bylo taktéž nižší při zapojení se zesilovači. Měření dle doporučení RFC 6349 vykazovalo opět mírného zhoršení propustnosti po přidání zesilovačů do sítě a to především ve vzestupném směru. V sestupném směru byly hodnoty velmi podobné. MOS hodnoty všech videí a zvukových stop neznají jasnou známku zhoršení kvality služeb po přidání zesilovačů do sítě při měření na lokální síti. Na vzdálené síti při měření proti LTB-8 jsou hodnoty ztrátovosti, kolísání zpoždění i zpoždění naměřené dle normy ITU-T Y.1564 velmi podobné a nelze tak zaznamenat zhoršení kvality služeb. Stejný závěr se týká propustnosti naměřené dle doporučení RFC 6349. A parametr MOS dosahuje opět velmi dobrých hodnot s malými odchylkami.

I přes to, že se jednotlivé hodnoty po přidání zesilovačů do trasy spíše neměnily, je zcela zřejmé, že čistě optická síť dosahuje mnohem lepších výsledků napříč všemi měřeními než hybridní fotonická síť

s VDSL2. Některé výsledky, například ztrátovosti, v hybridní fotonické síti jsou alarmující a nebylo by s nimi možné provozovat tyto multimediální služby s dostačující kvalitou pro koncového zákazníka. Řešení těchto problémů, přinejmenším v lokálních sítích jednotlivých poskytovatelů služeb, by byla implementace takzvaného QoS, neboli kvality služeb. V rámci gigabitové pasivní optické sítě nabízí tyto možnosti OLT a to v rámci přenosových T-CONT. V práci jsem měřil pouze s implementací T-CONT typu 4, tedy best-effort - metody, kdy je přenos datových jednotek bez garance doručení. V rámci další práce by bylo zajímavé sledovat, co se s jednotlivými hodnotami stane, když jim bude nastavena garantovaná přenosová rychlost. VDSL2 DSLAM také podporuje určitá nastavení kvality služeb a kombinace QoS na OLT a DSLAM by měla zaručit, že se výsledné hodnoty na lokální síti vylepší. Nastavení kvality služeb nelze provádět pro sdílenou infrastrukturu, jako je třeba internet, nebo datová centra, která sdílejí kapacitu pro více zákazníků, protože by nebylo možné zaručit všem zákazníkům konkrétní služby, které by chtěli a proto se v těchto prostředích používá pouze best-effort.

Veškerá měření byla prováděna v téměř ideálním prostředí a za vhodných podmínek, proto výsledné hodnoty, nacházející se v této práci, mohou sloužit jako hodnoty referenční pro následující testování.

Literatura

1. ŠTÍPAL, J. *Měření výkonnostních parametrů optické sítě GPON* [online]. Ostrava: VŠB, 2019 [cit. 2022-04-15]. Bakalářská práce. Dostupné z: <http://hdl.handle.net/10084/136378>
2. MERCIAN, A., GURROLA, E. I., AURZADA, F., MCGARRY, M. P. a REISSLEIN, M. a kol. *Upstream Polling Protocols for Flow Control in PON/xDSL Hybrid Access Networks* [online]. IEEE Transactions on Communications, 2016, s. 2971-2984 [cit. 2022-04-15]. DOI 10.1109/TCOMM.2016.2576450. ISSN 0090-6778. Dostupné z: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7484737>
3. CALE, I., SALIHOVIC, A. a IVEKOVIC, M. a kol. *Gigabit Passive Optical Network – GPON* [online]. 29th International Conference on Information Technology Interfaces, 2007, s. 679-684 [cit. 2022-04-15]. DOI 10.1109/ITI.2007.4283853. ISSN 1330-1012. ISBN 953-7138-09-7. Dostupné z: <https://ieeexplore.ieee.org/document/4283853>
4. ITU. *Transmission systems and media, digital systems and networks* [online]. [cit. 2022-04-15]. Dostupné z: <https://www.itu.int/rec/T-REC-G/en>
5. EXFO. *FTTx testing: Deploy and activate FTTx (FTTH, FTTA FTTB and FTTC) successfully - the first time - and maintaining networks effectively* [online]. [cit. 2022-04-15]. Dostupné z: <https://www.exfo.com/en/solutions/communication-service-providers/wireline/fttx-testing/>
6. The Open University. *FTTCab, FTTC, FTTB and hybrid coaxial fibre* [online]. [cit. 2022-04-15]. Dostupné z: <https://www.open.edu/openlearn/science-maths-technology/computing-ict/digital-communications/content-section-4.4.1>
7. ITU. *Recommendation ITU-T G.984.1: Gigabit-capable passive optical networks (GPON): General characteristics* [online]. Ženeva: ITU, 2009 [cit. 2022-04-15]. Dostupné z: <https://www.itu.int/rec/T-REC-G.984.1-200803-I/en>
8. ITU. *Recommendation ITU-T G.984.3: Gigabit-capable passive optical networks (G-PON): Transmission convergence layer specification* [online]. Ženeva: ITU, 2014 [cit. 2022-04-15]. Dostupné z: <https://www.itu.int/rec/T-REC-G.984.3-201401-I/en>

9. LAFATA, P. a VODRÁŽKA, J. *Optické přístupové sítě FTTx a NGA*. Praha: ČVUT, 2019. ISBN 978-80-01-06552-5.
10. ITU. *Recommendation ITU-T G.984.4: Gigabit-capable Passive Optical Networks (G-PON): ONT management and control interface specification* [online]. Ženeva: ITU, 2009 [cit. 2022-04-15]. Dostupné z: <https://www.itu.int/rec/T-REC-G.984.4-200802-I/en>
11. ITU. *Recommendation ITU-T G.984.6: Gigabit-capable passive optical networks (GPON): Reach extension* [online]. Ženeva: ITU, 2009 [cit. 2022-04-15]. Dostupné z: <https://www.itu.int/rec/T-REC-G.984.6-200803-I/en>
12. ITU. *Recommendation ITU-T G.984.7: Gigabit-capable passive optical networks (GPON): Long reach* [online]. Ženeva: ITU, 2010 [cit. 2022-04-15]. Dostupné z: <https://www.itu.int/rec/T-REC-G.984.7-201007-I/en>
13. ITU. *Recommendation ITU-T G.984.2: Gigabit-capable passive optical networks (GPON): Physical media dependent (PMD) layer specification* [online]. Ženeva: ITU, 2019 [cit. 2022-04-15]. Dostupné z: <https://www.itu.int/rec/T-REC-G.984.2-201908-I/en>
14. GUTIERREZ, Ll., GARFIAS, P., ANDRADE, M., CERVELLÓ-PASTOR, C. a SALLEN, S. Next Generation Optical Access Networks: from TDM to WDM [online]. In: BOURAS, Ch. J. *Trends in Telecommunications Technologies*. Barcelona: UPC, 2010 [cit. 2022-04-15]. DOI 10.5772/180. ISBN 978-953-51-5877-6. Dostupné z: <https://www.intechopen.com/chapters/9690>
15. ITU. *Recommendation ITU-T G.9807.1: 10-Gigabit-capable symmetric passive optical network (XGS-PON)* [online]. Ženeva: ITU, 2016 [cit. 2022-04-15]. Dostupné z: <https://www.itu.int/rec/T-REC-G.9807.1-201606-I/en>
16. ITU. *Recommendation ITU-T G.9807.2: 10 Gigabit-capable passive optical networks (XG(S)-PON): Reach extension* [online]. Ženeva: ITU, 2017 [cit. 2022-04-15]. Dostupné z: <https://www.itu.int/rec/T-REC-G.9807.2-201708-I/en>
17. ITU. *Recommendation ITU-T G.989: 40-Gigabit-capable passive optical networks (NG-PON2): Definitions, abbreviations and acronyms* [online]. Ženeva: ITU, 2016 [cit. 2022-04-15]. Dostupné z: <https://www.itu.int/rec/T-REC-G.989-201510-I/en>
18. KAZOVSKY, L. G., CHENG, N., SHAW, W., GUTIERREZ, D., WONG, S. *Broadband Optical Access Networks*. Hoboken: Wiley, 2011. ISBN 978-0-470-18235-2.
19. NORHAN, N., NURODDIN, A. C. M., ASROKIN, A. a kol. *VDSL2 capacity performance evaluation: Simulation vs measurement* [online]. IEEE Conference on Systems, Process and Control

- (ICSPC), 2017, s. 140-145 [cit. 2022-04-15]. DOI 10.1109/SPC.2017.8313036. ISBN 978-1-5386-0386-4. Dostupné z: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8313036>
20. MUSA, M. A. F., ZAMANI, N. S., ASROKIN, A., HASHIM, N., SAID W. M. I. a ABIDIN A. N. Z. a kol. *FEXT and NEXT analysis for VDSL2 technology on 50 twisted pairs TM copper cable* [online]. IEEE 12th Malaysia International Conference on Communications (MICC), 2015, s. 175-180 [cit. 2022-04-15]. DOI 10.1109/MICC.2015.7725429. ISBN 978-1-5090-0019-7. Dostupné z: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7725429>
 21. ITU. *Recommendation ITU-T G.993.5: Self-FEXT cancellation (vectoring) for use with VDSL2 transceivers* [online]. Ženeva: ITU, 2019 [cit. 2022-04-15]. Dostupné z: <https://www.itu.int/rec/T-REC-G.993.5-201902-I/en>
 22. DSL.cz. *O2 začne nabízet bonding: Rychlost DSL internetu zrychlí až na dvojnásobek* [online]. [cit. 2022-04-15]. Dostupné z: <https://www.dsl.cz/clanky/o2-zacne-nabizet-bonding-rychlost-dsl-internetu-zrychli-az-na-dvojnásobek>
 23. WARTAK, M. S. *Computational Photonics: An Introduction with MATLAB*. New York: Cambridge University Press, 2013. ISBN 978-1-107-00552-5.
 24. KARTALOPOULOS, S. *Next Generation Intelligent Optical Networks: From Access to Backbone*. New York: Springer, 2008. DOI 10.1007/978-0-387-71756-2. ISBN 978-0-387-71756-2.
 25. VODRÁŽKA, J., ZEMAN, T., HRAD, J. a kol. *NGA for a New Dimension of Distance Education* [online]. 30th Annual Conference of the European Association for Education in Electrical and Information Engineering (EAEEIE), 2021, s. 1-5 [cit. 2022-04-15]. DOI 10.1109/EAE-EIE50507.2021.9530964. ISSN 978-1-7281-9328-1. ISBN 978-1-7281-9327-4. Dostupné z: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9530964>
 26. MikroTik. *CCR1009-7G-1C-1S+* [online]. [cit. 2022-04-15]. Dostupné z: <https://mikrotik.com/product/CCR1009-7G-1C-1Splus#fndtn-specifications>
 27. i4wifi. *Router MikroTik Cloud Core CCR1009-7G-1C-1S+* [online]. [cit. 2022-04-15]. Dostupné z: <https://www.i4wifi.cz/cs/210751-router-mikrotik-cloud-core-ccr1009-7g-1c-1s>
 28. Apache Friends. *XAMPP Apache + MariaDB + PHP + Perl* [online]. [cit. 2022-04-15]. Dostupné z: <https://www.apachefriends.org/index.html>
 29. i4wifi. *MikroTik Cloud Core Router CCR1072-1G-8S+* [online]. [cit. 2022-04-15]. Dostupné z: <https://www.i4wifi.cz/cs/210642-mikrotik-cloud-core-router-ccr1072-1g-8s>
 30. OFA. *ZXHN F660: ONT* [online]. [cit. 2022-04-15]. Dostupné z: <http://www.ztegon.cz/index.php?page=660>

31. Normann Engineering. *ZTE F660* [online]. [cit. 2022-04-15]. Dostupné z: <https://www.normann-engineering.com/en/products/860/zte-f660/>
32. OFA. *ZXHN F601: ONT* [online]. [cit. 2022-04-15]. Dostupné z: <http://www.ztepon.cz/index.php?page=601>
33. Normann Engineering. *ZTE F601* [online]. [cit. 2022-04-15]. Dostupné z: <https://www.normann-engineering.com/en/products/859/f601/>
34. ZyXEL. *VES1724-56: 24-portový VDSL2 box DSLAM* [online]. [cit. 2022-04-15]. Dostupné z: <https://shop.zyxel.cz/produkt/zyxel-ves1724-56>
35. O2. *Nastavení a ovládání modemu ZyXEL VMG1312-B30B* [online]. [cit. 2022-04-15]. Dostupné z: <https://www.o2.cz/osobni/podpora/nastaveni-zyxel-vmg1312-b30b>
36. ITU. *Recommendation ITU-T G.652: Characteristics of a single-mode optical fibre and cable* [online]. Ženeva: ITU, 2017 [cit. 2022-04-15]. Dostupné z: <https://www.itu.int/rec/T-REC-G.652-201611-I>
37. ITU. *Recommendation ITU-T G.657: Characteristics of a bending loss insensitive single mode optical fibre and cable for the access network* [online]. Ženeva: ITU, 2007 [cit. 2022-04-15]. Dostupné z: <https://www.itu.int/rec/T-REC-G.657-200612-S>
38. FS. *Is G.652 Single Mode Fiber Your Right Choice?* [online]. [cit. 2022-04-15]. Dostupné z: <https://community.fs.com/blog/what-kind-of-single-mode-fiber-should-you-choose.html>
39. PROFiber. *EXFO TESTOVACÍ NÁSTROJE EXPERT IPTV* [online]. [cit. 2022-04-15]. Dostupné z: <https://www.profiber.eu/cz/merici-technika-transport-a-datakom/software-1/exfo-testovaci-nastroje-expert-iptv/>
40. EXFO. *MaxTester 940/945 - telco OLTS* [online]. [cit. 2022-04-15]. Dostupné z: <https://www.exfo.com/en/products/field-network-testing/optical-loss-test-kits/maxtester-940-945-telco-olts/>
41. VODRÁŽKA, J., LAFATA, P. *Analýza variant řešení optické přístupové sítě na hladině NN*. Praha: ČVUT, 2017.
42. PROFiber. *EXFO RACKMOUNT PLATFORMA LTB-8* [online]. [cit. 2022-04-15]. Dostupné z: <https://www.profiber.eu/cz/merici-platformy/rack-mount-platformy/exfo-rackmount-platforma-ltb-8/>
43. TKÁČIK, Michal. *Hybrid Access Network xPON/xDSL* [online]. Ostrava, VŠB, 2016 [cit. 2022-04-15]. Diplomová práce. Dostupné z: <http://hdl.handle.net/10084/115895>

44. TechExpert TIPS. *Grafana Monitoring SNMP Devices* [online]. [cit. 2022-04-15]. Dostupné z: <https://techexpert.tips/grafana/grafana-monitoring-snmp-devices/>
45. MEF. *Implementation Agreement MEF 23.1: Carrier Ethernet Class of Service – Phase 2* [online]. [cit. 2022-04-15]. Dostupné z: <https://www.mef.net/resources/mef-23-1-class-of-service-phase-2-implementation-agreement/>
46. LITSCHMANNOVÁ, M. *Máme data – a co dál?* [online]. Ostrava: VŠB, 2020 [cit. 2022-04-15]. Dostupné z: https://home1.vsb.cz/~lit40/PRASTA/Prezentace/STA_7_exploracni_analyza.pdf
47. ITU. *Recommendation ITU-T P.800.1: Mean opinion score (MOS) terminology* [online]. Ženeva: ITU, 2016 [cit. 2022-04-15]. Dostupné z: <https://www.itu.int/rec/T-REC-P.800.1-201607-I>
48. VOZŇÁK, M., MICHALEK, L. *Komunikační technologie pro integrovanou výuku VUT a VŠB-TUO* (skripta). Ostrava: VŠB, 2014. ISBN: 978-80-248-3447-4.