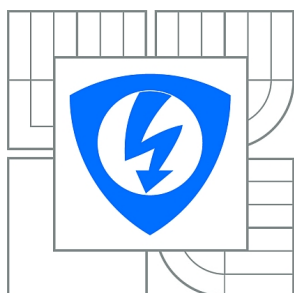


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



**FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ**
ÚSTAV TELEKOMUNIKACÍ

**FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF TELECOMMUNICATIONS**

SIMULACE A MĚŘENÍ SLUŽEB TRIPLE PLAY V SÍTÍCH FTTX

SIMULATION AND MEASUREMENT OF TRIPLE PLAY SERVICES IN FTTX NETWORKS

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

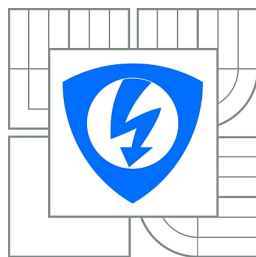
AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Bc. TOMÁŠ HORVÁTH

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

Ing. RADIM ŠIFTA

BRNO 2013



VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

Ústav telekomunikací

Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor
Telekomunikační a informační technika

Student: Bc. Tomáš Horváth

ID: 121024

Ročník: 2

Akademický rok: 2012/2013

NÁZEV TÉMATU:

Simulace a měření služeb Triple Play v sítích FTTx

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Cílem diplomové práce je podrobný popis optických přístupových sítí FTTx se zaměřením na testování služeb Triple Play. Práce bude detailně popisovat služby Triple Play a jednotlivé parametry související s přenosem. V simulačním prostředí optSim v5.2 bude vytvořen simulační model pasivní optické přístupové sítě EPON. Student provede sadu měření na pasivních optických sítích EPON realizovaných v laboratoři přenosových médií na ústavu telekomunikací VUT-FEKT. V rámci praktických měření i simulací budou provedeny kompletní akceptační testy PON sítí včetně měření parametrů kvality služeb.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] J. Maisonneuve, M. Deschanel, J. Heiles, H. Liu, R. Sharpe, Y. Wu. An overview of IPTV standards Development, in: IEEE Transactions on Broadcasting vol.55, no3, June 2009 pp.315-328.

[2] RSOFT DESIGN GROUP, Inc. OptSim: Application Notes and Examples. 5.2. Ossining, NY, 2010.

Termín zadání: 11.2.2013

Termín odevzdání: 29.5.2013

Vedoucí práce: Ing. Radim Šifta

Konzultanti diplomové práce:

prof. Ing. Kamil Vrba, CSc.

Předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

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

ABSTRAKT

Cílem této práce bylo seznámit se s měřicími metodami pasivních optických sítí a vytvoření simulačního modelu, který odpovídá měřené síti a porovnání jednotlivých výsledků. První kapitola se zabývá Triple Play službami, kde jsou rozebrány jednotlivé služby (přenos televizního signálu, přenos hlasu a přenos dat). Každá služba tvoří dílčí podkapitulu a přináší detailní popis s parametry související s přenosem. Druhou kapitolu teoretické části tvoří rozbor pasivních optických sítí podle způsobu zakončení optického vlákna FTTx. Dílčí část této kapitoly sestává z popisu standardů pasivních optických sítí APON, BPON, GPON a EPON. Přičemž standard EPON je detailně vysvětlen. Teoretickou část práce uzavírá popis aktivních prvků, které budou tvořit laboratorní měřenou síť.

V praktické části je provedeno testování navržené pasivní optické sítě. Samotné měření je rozděleno na dvě kapitoly. První kapitolu tvoří měření na „neživé síti“, jelikož nejsou v navržené síti žádné aktivní prvky. Měření této sítě proběhlo přímou měřicí metodou a reflektometrickou metodou. Druhá kapitola praktické části sestává z měření parametrů kvality služeb (QoS). Tato kapitola je rozdělená na podkapitoly, které jsou: měření pomocí standardu RFC 2544, měření pomocí standardu ITU-T Y.156 (EtherSam) a testování bitové chybovosti (BERT). Praktickou část zakončuje navržený simulační model sítě, který byl navržen v programu OptSim 5.2. Cílem simulačního modelu bylo, aby se maximálně podobal reálné síti, z důvodu porovnání dosažených výsledků.

KLÍČOVÁ SLOVA

Triple Play, FTTx, EPON, měření, OTDR, RFC 2544, EtherSam, simulace, OptSim.

ABSTRACT

The aim of this thesis was to ascertain with the measurement methods of passive optical networks and the creation of a simulation model that corresponds to the measured network and comparison of results. The first chapter deals with Triple Play services, which are focused on different services (transmission of television signals, voice and data transmission). Each service consists of a subchapter and presents a detailed description of the parameters associated with the transmission. The second chapter of the theoretical part consists of an analysis of passive optical networks according to termination method of FTTx optical fiber. Partial part of this chapter consists of description of standard passive optical networks APON, BPON, GPON and EPON. The EPON standard is explained in detail. The theoretical part of the thesis is concluded with a description of active elements that will form the laboratory measured network.

Testing of designed passive optical network is performed in the practical part of the thesis. The measurement is divided into two chapters. The first chapter consist of measuring of the „inanimate network“, as there are missing active elements in the nominated net. Network measurements were done by a direct measuring method and reflectometric method. The second chapter of the practical part consists of measuring the parameters of quality of service (QoS). This chapter is divided into subchapters, such as: the measurement using RFC 2544 standard, the measurement using ITU-T standard Y.156 (EtherSam) and bit error rate testing (BERT). The practical part ends with a designed simulation network model, which was proposed in OptSim 5.2. The aim of the simulation model was to maximally resemble a real network, due to result comparison

KEYWORDS

Triple Play, FTTx, EPON, measurement, OTDR, RFC 2544, EtherSam, simulation, OptSim.

PROHLÁŠENÍ

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

Jako autor uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této diplomové práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a/nebo majetkových a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

Brno

.....

(podpis autora)

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych poděkoval vedoucímu diplomové práce panu Ing. Radimu Šiftovi za odborné vedení, konzultace, trpělivost a podnětné návrhy k práci. Dále bych rád poděkoval své rodině za podporu při tvorbě této práce a také své přítelkyni, že mi byla oporou.

Brno

.....

(podpis autora)

PODĚKOVÁNÍ

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

Brno

.....
(podpis autora)

OBSAH

Úvod	15
1 Triple Play	16
1.1 Přenos televizního signálu	16
1.1.1 CATV	16
1.1.2 IPTV	20
1.1.3 Kódování obrazu	23
1.2 Přenos hlasu	27
1.2.1 Úvod	27
1.2.2 Použité kodeky	28
1.2.3 Ukázka výpočtů pro kodek G.711	30
1.2.4 Signalizační protokoly	32
1.3 Přenos dat	37
2 Optické přístupové sítě	38
2.1 Rozdělení optických přístupových sítí	39
2.2 FTTx	40
2.3 Standardy pasivních optických sítí	43
2.3.1 APON	43
2.3.2 BPON	43
2.3.3 GPON	43
2.3.4 EPON	44
2.4 Aktivní prvky pro měřenou síť	48
2.4.1 Parametry aktivních prvků	48
3 Měření na pasivní síti	50
3.1 Přímá metoda	50
3.2 OTDR	54
4 Měření parametrů kvality služeb	60
4.1 EtherSam	60
4.1.1 Nastavení služeb	60
4.1.2 Průběh testování	62
4.1.3 Dosažené výsledky pro aktivní prvky ZyXel	63
4.1.4 Dosažené výsledky pro aktivní prvky XDK	65
4.1.5 Dosažené výsledky pro aktivní prvky ZyXel (16,1 dB)	69
4.1.6 Dosažené výsledky pro aktivní prvky XDK (15,4 dB)	72
4.1.7 BERT	77

4.2	RFC 2544	80
4.2.1	Naměřené výsledky	82
5	Simulační model sítě	87
5.1	OptSim	87
6	Závěr	99
	Literatura	101
	Seznam symbolů, veličin a zkratk	104
	Seznam příloh	108
A	Obsah DVD	109

SEZNAM OBRÁZKŮ

1.1	Architektura IPTV.	21
1.2	Ukázka H.323 spojení.	33
1.3	Ukázka přímého spojení SIP protokolu z programu Wireshark.	35
2.1	Rozdělení přístupových optických sítí.	38
2.2	Princip přenosu typu Bod-Bod.	39
2.3	Princip přenosu typu Bod-Mnohobod.	40
2.4	Rozdělení FTTx metod.	41
2.5	Princip datového přenosu v sítích EPON.	44
2.6	Struktura EPON multirámce [16].	45
2.7	Formát MPMC rámce [16].	46
2.8	Formát MAC rámce přenášející data[16].	47
2.9	Zyxel OLT-1308S-22.	48
2.10	Jednotka OLT XDK 8110T.	49
3.1	Nastavení referenční hodnoty mezi měřicími přístroji FLS-600 a FPM-600.	50
3.2	Měření útlumu vlákna o délce 5 km.	51
3.3	Měření ve směru od OLT k ONU pomocí přímé měřicí metody.	52
3.4	Blokové schéma měřené sítě pomocí OTDR ve směru ONU→OLT.	54
3.5	Náměr OTDR ve směru ONU→OLT pro rozbočovač 1:8 na vlnové délce 1310 nm.	55
3.6	Náměr OTDR ve směru ONU→OLT pro rozbočovač 1:16 na vlnové délce 1550 nm.	56
3.7	Blokové schéma měřené sítě pomocí OTDR ve směru OLT→ONU.	57
3.8	Náměr OTDR ve směru OLT→ONU pro rozbočovač 1:8 na vlnové délce 1550 nm.	57
3.9	Náměr OTDR ve směru OLT→ONU pro rozbočovač 1:16 na vlnové délce 1310 nm.	59
4.1	Průběh testu pomocí standardu EtherSAM ITU-T Y.156.	62
4.2	Grafické srovnání kolísání zpoždění u přenosu hlasu na aktivních prvcích ZyXel a XDK.	68
4.3	Grafické srovnání zpoždění u přenosu hlasu na prvcích ZyXel a XDK.	68
4.4	Grafické srovnání kolísání zpoždění u přenosu hlasu s vloženými útlumy na prvcích ZyXel a XDK.	74
4.5	Grafické srovnání zpoždění u přenosu hlasu s vloženými útlumy na prvcích ZyXel a XDK.	75
4.6	Porovnání obou výsledků kolísání zpoždění pro zařízení ZyXel a XDK dle ITU-T Y.156.	75

4.7	Porovnání obou výsledků zpoždění pro zařízení ZyXel a XDK dle ITU-T Y.156.	76
4.8	Grafické srovnání obou výsledků BER testu při vloženém útlumu. . .	79
4.9	Topologie měřené sítě dle RFC 2544.	82
4.10	Závislost propustnosti na délce rámce dle RFC 2544.	84
4.11	Závislost zpoždění na délce rámce dle RFC 2544.	84
4.12	Závislost propustnosti na délce rámce a vloženého útlumu dle RFC 2544.	86
5.1	Ukázka prostředí simulačního programu OptSim 5.2.	88
5.2	Navržená simulační topologie odpovídající reálné měřené síti.	95
5.3	Schéma zapojení odpovídající jednotce OLT.	96
5.4	Schéma zapojení odpovídající jednotce ONU.	96
5.5	Diagram oka pro ZyXel ONU jednotku na 8. portu rozbočovače. . . .	96
5.6	Diagram oka pro ZyXel ONU jednotku na 8. portu rozbočovače 1:16 při hodnotě vloženého útlumu 16,1 dB.	97
5.7	Diagram oka pro XDK ONU jednotku na 8. portu rozbočovače. . . .	97
5.8	Diagram oka pro XDK ONU jednotku na 8. portu rozbočovače 1:16 při hodnotě vloženého útlumu 15,4 dB.	98

SEZNAM TABULEK

1.1	Závislost přenosové rychlosti na modulaci a šířce pásma jednoho kanálu, standardu DVB-C [1].	17
1.2	Srovnání přenosových rychlostí v závislosti na odstupu signálu od šumu [2].	17
1.3	Porovnání vlastností DVB-C a DVB-C2 [3].	18
1.4	Tabulka profilů využívající MPEG-2 [5].	24
1.5	Tabulka přenosových rychlostí v závislosti na použitém profilu [5]. . .	24
1.6	Stručný přehled parametrů standardů MPEG-1 a MPEG-2.	25
1.7	Přehled kodeků používaných pro přenos hlasu po datových sítích [6], [7], [8], [9], [10].	29
1.8	Přehled kodeků používaných pro přenos hlasu po datových sítích [6], [7], [8], [9], [10].	29
1.9	Velikost režijních dat pro jednotlivé vrstvy OSI modelu [11].	31
1.10	Doporučené parametry pro služby VoIP a přenos videa [12].	31
1.11	Rozsahy zpoždění pro hlasové služby v datových sítích dle ITU-T G.114 [13].	31
2.1	Vlastnosti dostupných variant EPON sítí.	44
3.1	Naměřené výsledky pro vlákno o délce 1 km a 5 km.	51
3.2	Přehled změřených a deklarovaných hodnot útlumů na rozbočovačích. .	52
3.3	Naměřené hodnoty útlumu ve směru od OLT k ONU.	53
3.4	Naměřené hodnoty útlumu ve směru od ONU k OLT.	53
3.5	Zjištěné parametry z OTDR náměru pro rozbočovač 1:8.	55
3.6	Zjištěné parametry z OTDR náměru pro rozbočovač 1:16.	56
3.7	Zjištěné parametry z OTDR náměru pro rozbočovač 1:8.	58
3.8	Zjištěné parametry z OTDR náměru pro rozbočovač 1:16.	59
4.1	Nastavení jednotlivých služeb pro testování živé sítě dle standardu ITU-T Y.156.	61
4.2	Nastavení jednotlivých služeb pro testování živé sítě dle standardu ITU-T Y.156.	61
4.3	Naměřené hodnoty pro službu VoIP dle standardu ITU-T Y.156. . . .	63
4.4	Naměřené hodnoty pro službu IPTV ve standardním rozlišení dle standardu ITU-T Y.156.	63
4.5	Naměřené hodnoty pro službu IPTV ve vysokém rozlišení dle standardu ITU-T Y.156.	64
4.6	Naměřené hodnoty pro službu přenos dat dle standardu ITU-T Y.156. .	64
4.7	Naměřené hodnoty ve výkonovém testu dle standardu ITU-T Y.156. .	64
4.8	Naměřené hodnoty pro službu VoIP dle standardu ITU-T Y.156. . . .	65

4.9	Naměřené hodnoty pro službu IPTV ve standardním rozlišení dle standardu ITU-T Y.156.	65
4.10	Naměřené hodnoty pro službu IPTV ve vysokém rozlišení dle standardu ITU-T Y.156.	66
4.11	Naměřené hodnoty pro službu přenos dat dle standardu ITU-T Y.156.	66
4.12	Naměřené hodnoty ve výkonovém testu dle standardu ITU-T Y.156.	66
4.13	Naměřené hodnoty pro službu VoIP při vloženém útlumu 16,1 dB dle standardu ITU-T Y.156.	69
4.14	Naměřené hodnoty pro službu IPTV ve standardním rozlišení při vloženém útlumu 16,1 dB dle standardu ITU-T Y.156.	70
4.15	Naměřené hodnoty pro službu IPTV ve vysokém rozlišení při vloženém útlumu 16,1 dB dle standardu ITU-T Y.156.	70
4.16	Naměřené hodnoty pro službu přenos dat při vloženém útlumu 16,1 dB dle standardu ITU-T Y.156.	71
4.17	Naměřené hodnoty pro službu přenos dat při vloženém útlumu 16,1 dB dle standardu ITU-T Y.156.	71
4.18	Naměřené hodnoty pro službu VoIP při vloženém útlumu 15,4 dB dle standardu ITU-T Y.156.	72
4.19	Naměřené hodnoty pro službu IPTV ve standardním rozlišení při vloženém útlumu 15,4 dB dle standardu ITU-T Y.156.	72
4.20	Naměřené hodnoty pro službu IPTV ve vysokém rozlišení při vloženém útlumu 15,4 dB dle standardu ITU-T Y.156.	73
4.21	Naměřené hodnoty pro službu přenos dat při vloženém útlumu 15,4 dB dle standardu ITU-T Y.156.	73
4.22	Naměřené hodnoty ve výkonovém testu při vloženém útlumu 15,4 dB dle standardu ITU-T Y.156.	73
4.23	Nastavené parametry pro vyhodnocení BERT testu.	77
4.24	Nastavení parametrů pro společnou komunikaci při BERT testu.	77
4.25	Výsledné hodnoty pro BERT test při vloženém útlumu 16,1 dB (ZyXeL).	78
4.26	Výsledné hodnoty pro BERT test při vloženém útlumu 15,4 dB (XDK).	78
4.27	Souhrn RFC výsledků bez vloženého útlumu pro zařízení ZyXeL.	83
4.28	Souhrn RFC výsledků bez vloženého útlumu pro zařízení XDK.	83
4.29	Souhrn RFC výsledků s vloženým útlumem 15,4 dB pro zařízení ZyXeL.	85
4.30	Souhrn RFC výsledků s vloženým útlumem 15,95 dB pro zařízení ZyXeL.	85
4.31	Souhrn RFC výsledků s vloženým útlumem 16,1 dB pro zařízení ZyXeL.	85
4.32	Souhrn RFC výsledků s vloženým útlumem 16,15 dB pro zařízení ZyXeL.	85

4.33	Přehled RFC výsledků s vloženým útlumem 15,4 dB v topologii se zařizeními XDK.	86
5.1	Hodnoty získané simulacemi pro zařízení ZyXel.	90
5.2	Hodnoty získané simulacemi pro zařízení XDK.	91
5.3	Porovnání obou výsledných hodnot pro hraniční hodnoty vloženého útlumu.	93

ÚVOD

Trendem v dnešních přístupových a distribučních sítích je nasazování optických vláken. Budování optické trasy s sebou přináší potřebu rozvahy nad tím, kde je tuto síť vhodné vybudovat. Obvyklý postup je například průzkum dané obydlené oblasti. Na základě průzkumu je pak poskytovatelem služeb rozhodnuto o způsobu ukončení optického vlákna.

Výběr správného zakončení optického vlákna není zárukou kvalitní optické sítě. Jednotlivé typy zakončení optického vlákna FTTX jsou popsány v teoretické části diplomové práce. Například ukončení optického vlákna v bytě zákazníka nabízí vysokou přenosovou rychlost, která je vykoupena vysokými investicemi do přivedení optického vlákna do bytu. Další možnost je přivedení optického vlákna do suterénu bytového domu a odtud vedení metalických kabelů. Dnešní metalické kabely lze využít i v sítích 10GBASE-T, tedy s přenosovou rychlostí až 10 Gb/s. Nevýhodou je však nutná konverze, která zanáší zpoždění. Výhodou naopak je hotová instalace kabelových rozvodů do jednotlivých bytů. Dostatečná přenosová šířka není zárukou kvalitní optické sítě, adekvátní zhodnocení sítě přináší její změření.

Diplomová práce přináší rozbor jednotlivých měřících metod na optických sítích. První část sestává z měření na neživé síti, tedy bez aktivních prvků pomocí přímé měřící metody a reflektometrické metody. Každá z uvedených metod přináší rozdílný pohled na síť. V druhé části diplomové práce probíhá měření na živé síti s aktivními prvky. První z měřících metod je měření dle standardu RFC 2544. Měření dle tohoto standardu je časově velmi náročné a dosažené výsledky postrádají měření kolísání zpoždění. EtherSam (ITU-TY.156) je novějším standardem pro testování sítí, který přináší oproti RFC 2544 hned několik výhod. Další část praktického měření tvoří testování bitové chybovosti (BERT). Dosažené výsledky budou porovnány s hodnotami, které udává norma.

Poslední podkapitolu diplomové práce tvoří navržený simulační model sítě v programu OptSim 5.2. Cílem je vytvořit model, který se bude maximálně podobat reálné síti. Výsledky simulace navržené topologie jsou porovnány s naměřenými parametry z testu bitové chybovosti. Hodnoty výsledků by se měly prakticky shodovat, ačkoli nebude výjimkou, pokud se výsledky simulace s náměry budou rozcházet.

1 TRIPLE PLAY

Samotná zkratka má význam spojení tří služeb, které poskytují ať už lokální ISP nebo globální. První službou je přenos obrazu/televizního signálu následuje přenos hlasu a skupinu služeb uzavírá přenos dat. Nejvyšší prioritu nese služba přenos hlasu, neboť je zcela nezbytné, aby komunikace probíhala v reálném čase. Druhou nejvyšší prioritu má přenos obrazu/televizního signálu. Nejméně významný je pak přenos dat. Není totiž zcela nejdůležitější stahovat data co „nejrychleji“, ale hlavní je přenos dokončit. Rychlost přenosu dat je tedy závislá na tom, kolik programů sleduje zákazník najednou a v jakém rozlišení. Přenos hlasu data nijak neomezuje (spotřeba šířky pásma je minimální). Jednotlivé služby Triple Play jsou rozebrány níže v dílčích kapitolách. Nově se ke službám Triple Play objevuje další rozšíření o mobilitu.

1.1 Přenos televizního signálu

1.1.1 CATV

Volně přeloženo kabelová televize, přesný význam zkratky Community Antenna Television, doslovně pak společná televizní anténa. První kabelový systém se datuje k roku 1969 v USA, nesoucí název „NUVUE“. Kabelové připojení v ČR se rozmáhalo spolu se společností Karneval Media s.r.o., dnes již dále UPC Česká republika s.r.o.. V počátcích byly přenosové soustavy pouze jednosměrné, vedly pouze k zákazníkům televizní signál. Kabely byly v drtivé většině pouze koaxiální, které umožnily vysoké přenosové rychlosti. K nabídnutí televizního přenosu spolu s datovým připojením byla potřeba zavést zpětný kanál. To vedlo k výměně většiny zařízení na přenosových trasách. K realizaci datového připojení je zapotřebí mít na straně klienta-zákazníka modem, který převádí signál na přenosovou cestu. Nejčastější realizace připojení zákazníků je dnes pomocí optického vlákna ukončeného metodou FTTC. Tato metoda využívá kabelové rozvody zavedené v panelových domech. Obvykle v patře umístěného vprostřed zástavby je umístěná rozvodná skříň, další skříň je pak v prostorech sklepů. Jednotlivé koaxiální kabely pak vedou do bytů k přípojkám, odkud jsou rozváděny dále například do set-top-boxu nebo modemu.

Distribuce televizního signálu je řešena simplexním způsobem obvykle při CATV standardem DVB-C či novější specifikací DVB-C2. Projekt DVB (Digital Video Broadcasting) byl založen v roce 1993 pro Evropu. Tento projekt podává návrhy a specifikace pro standardy ETSI či ISO.

Specifikace DVB jsou založeny na kódování a multiplexování dle specifikace ISO 13818 MPEG-2. Samotné standardy DVB jsou dále členěny podle zdroje signálu na DVB-T (Terestriální), DVB-S (Satelitní) a DVB-C (Kabelové).

Přenos signálu pomocí DVB-C jsou definovány různé modulační možnosti: od 16 QAM po 256 QAM. Digitální signály jsou přenášeny v kanálech, které mají šířku pásma 8 MHz (i jinou) a kapacitu 38,1 Mb/s pro 64 QAM a 50,9 Mb/s pro 256 QAM.

Tab. 1.1: Závislost přenosové rychlosti na modulaci a šířce pásma jednoho kanálu, standardu DVB-C [1].

Modulace	Šířka pásma jednoho kanálu [MHz]					
[QAM]	2	3,93	4	7,86	7,92	7,96
16	6,4	-	12,8	25,2	-	-
32	8	-	16	-	-	31,9
64	9,6	18,9	-	-	38,1	-

Tato dostupná šířka pásma umožňuje přenášet více kanálů ve standardní kvalitě v jednom kanále. Komprimované toky videa, audia a dat jsou umístěny do MPEG-2 PS (programového toku). Jeden nebo více programových toků je pak umístěno do transportního toku tzv. MPEG-2 TS¹. Tyto toky pak následně přijímají na straně zákazníka set-top-boxy.

Tab. 1.2: Srovnání přenosových rychlostí v závislosti na odstupu signálu od šumu [2].

Modulace/Standard	Odstup signálu od šumu SNR [dB]	Přenosová rychlost [Mb/s]	Šířka pásma jednoho kanálu [MHz]
64 QAM/DVB-C	23	38	8
256 QAM/DVB-C	29	50,9	8
256 QAM/DVB-C2	24	54	8
1024 QAM/DVB-C2	29	68	8
4096 QAM/DVB-C2	35	81	8

¹Transportní přenos je samostatně definován ve standardu ISO/IES 13818-1, kdežto kódování obrazových signálů popisuje standard ISO/IES 13818-2. Samotný transportní přenos tedy může přenášet cokoliv, video, audio nebo data. Tímto lze dosáhnout přenosu videa kódovaného například kodekem MPEG-4 AVC (ve vysokém rozlišení), pomocí MPEG-2 TS.

Tab. 1.3: Porovnání vlastností DVB-C a DVB-C2 [3].

	DVB-C	DVB-C2
Vstupní data	Jeden transportní tok	Několik transportních toků a obecný zapouzdřovací tok
Režimy	Konstantní kódování a modulace	Proměnné kódování a modulace, adaptivní kódování a modulace
Chybové zabezpečení	Reed Solomon	LDPC+BCH
Prokládání	Bitové	Bitové/časové a frekvenční prokládání
Modulační schéma	16–256 QAM	16–4096 QAM

Reed Solomonův opravný kód je hojně využíván, neboť dokáže pracovat jak s bity, tak se symboly. Používá se v bezdrátové a satelitní komunikaci, digitální televizi (DVB) atd.

Opravný kód LDPC (Low Density Parity Code) hlavní výhodou tohoto kódu je výkon a lineární čas dekódování pro náročné algoritmy.

BCH zkratka BCH vznikla z iniciálů jmen vynálezců, Hocquenghem, Bose a Ray-Chaudhuri. Výhodou tohoto kódu je velmi nízký nárok na hardware.

Přenos CATV

Původní princip šíření televizního signálu pro kabelovou televizi byl založen na principu sběrníkové topologie. Obecně lze tuto topologii nazvat jako nešťastnou. Zákazníci byli připojováni jeden po druhém „v řadě za sebou“. Tímto vzniklo mnoho nevýhod. Největší nevýhodou pro samotné zákazníky byla nemožnost sledování volitelného programu. Neboť každý zákazník na sběrnici musel sledovat program jako soused. Nevýhodou pro poskytovatele služby byla nemožnost odpojení jednotlivce, například za nezaplacené služby. Praktické využití této topologie bylo velmi malé. Sběrníkovou topologii následně nahradila topologie hvězdicová, která nedostatky odbourala. Každý zákazník tedy může být odpojen za nezaplacení služby a také má možnost sledování svého vybraného programu. Dnešní trend moderních vysokorychlostních sítí, tedy vysoké nasazování optických vláken má za následek přenos signálu pro kabelovou televizi po optické síti mnohdy na samostatné vlnové délce. Ukončení přenosu na straně zákazníka je pak realizováno pomocí koaxiálního kabelu, který vede do zákaznické zásuvky. Odkud pak dále vedou dva kabely, jeden

pro datový přenos do kabelového modemu a druhý pro příjem kabelové televize do set-top-boxu.

1.1.2 IPTV

Úvod

Se zvyšující se poptávkou po vyšších přenosových rychlostech se začala vyvíjet i nová nabídka. Klasické datové připojení bylo „nedostačující“ pro uspokojení zákazníků. Vznikem nových lokálních operátorů, poskytovatelů datových služeb, narůstal také konkurenční boj, kdo přijde s výhodnější nabídkou. První změnou v nabídkách poskytovatelů bylo, objevení se možnosti telefonování po internetu. Tato nabídka pak byla rozšířená o tzv. internetovou televizi, neboli IPTV. Jakožto první operátor, který v České republice spustil IPTV, pod názvem O2TV byla společnost Telefonica O2, přesněji v září 2006. Služba byla široce dostupná ve větších městech Ostrava, Brno, Praha, Olomouc, Plzeň, Liberec, České Budějovice a také i v okresních městech.

Výhody

Základní výhodou internetové televize je její vysoká interaktivita. Nejedná se pouze o šíření televizního signálu k zákazníkům bez možnosti zpětné vazby. Pomocí zpětného kanálu lze vytvořit cílenou reklamu přesně pro zákazníky, kterým by se mohla zdát nabídka lukrativní.

Vytvoření profilu zákazníka, například zákazník sleduje pouze sportovní kanály, případně jen dokumentární. Profil o zákazníkovi poskytuje cenné informace poskytovateli služeb, aby mohl danému zákazníkovi nabídnout například jen programy, které jej baví za zvýhodněnou cenu.

Doplňkové služby jako jsou nahrávání programu z televizoru, programový průvodce, uchovávání nahraných pořadů, video na vyžádání, shlédnutí pořadu po zaplacení a další.

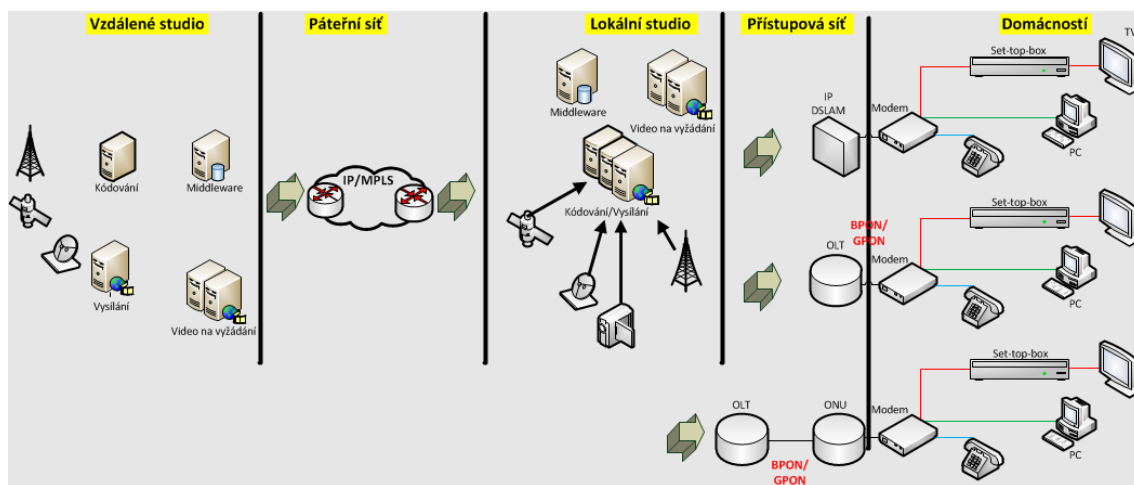
Teoreticky neomezené možnosti při distribuci kanálů a videa. Za předpokladu, že optické vlákno je zavedeno až do domu/bytu zákazníka, nemusí pocítovat poklesy přenosové rychlosti například při stahování souborů, byť je sledováno i více HD kanálů.

Nevýhody

Pokud má být poskytován opravdu kvalitní obsah (obraz nepodléhající artefaktům) je zapotřebí kvalitní přístupové sítě. Vybudování této přístupové sítě je mnohdy finančně velmi náročné. Proto je vhodné před samotným budováním infrastruktury zjistit poptávku po službách a zároveň uvažovat budoucí zájem koncových zákazníků.

Architektura

Samotnou architekturu IPTV (obr. 1.1) je vhodné rozdělit do jednotlivých podbloků. První částí je vzdálený zdroj, páteří síť, lokální zdroje a domácnosti. Vzdálené zdroje tvoří souhrnné servery, pomocí kterých je například získáváno, kódováno a přenášeno video. Zdroje pro televizní kanály mohou být různé, zpravidla se volí mezi pozemním DVB-T, kabelovým DVB-C nebo satelitním DVB-S šířením signálů. V této části architektury může docházet ke kódování videa, které bylo získání z jednoho z výše uvedených zdrojů. Pro standardní kvalitu videa je nejběžněji používán standard MPEG-2 viz kap. 1.1.3, pro video ve vysokém rozlišení je naopak vhodné použít MPEG-4, který poskytuje vyšší komprimační poměry. Někteří lokální operátoři již nakupují televizní signál, který je již kódován podle jednoho ze standardů MPEG viz kap. 1.1.3. Serverová farma poskytuje video na vyžádání a zároveň slouží k ukládání videa, které si nahrají samotní zákazníci. Poslední částí vzdálených zdrojů je pak middleware, poskytující softwarové vybavení pro uživatelsky orientované funkce a tarifikační činnost. V neposlední řadě middleware zajišťuje komunikaci mezi zařízeními jiných výrobců, neboť rozhraní pro zařízení různých výrobců se mohou lišit.



Obr. 1.1: Architektura IPTV.

Páteří síť, slouží jako distribuční síť pro přenos videa a zvuku obvykle ve formátu TS (Transport stream), který je určen pro přenos digitálního obrazu a zvuku v kabelových sítích, satelitních spojkách nebo v sítích založených na technologii IP [4].

Přístupová síť je velmi kritickým bodem celé architektury IPTV. Zde jsou kladeny velmi vysoké požadavky na šířku pásma, ztrátovost a jiné parametry důležité k přenosu signálu viz tab. 1.10. Trend doby vede k vysokému nasazování optických vláken na těchto sítích, čímž dochází ke splnění všech klíčových parametrů.

Domácnosti jsou koncovým bodem celé architektury. Domácnost je vybavena splitrem, bránou, set-top-boxem nebo jiným zařízením pro rozdělení signálů. Nejběžnější kombinací tvoří modem se set-top-boxem, případně brána se set-top-boxem.

Distribuce IPTV

Jak již samotný název služby napovídá, jedná se o přenos televizního signálu pomocí internetového protokolu na principu paketové sítě, ať už na optickém vlákně nebo metalickém vedení. Výhodou šíření po IP sítích je možnost využití multicastového toku, tedy šířit každý kanál pouze jednou a následně až na posledním aktivním prvku sítě kanál zduplikovat kolikrát je potřeba. Na straně zákazníka je pak buďto ukončeno optické vlákno nebo kabelové vedení v bráně, která má za úkol oddělit jednotlivé toky. Televizní tok-multicastový přenos do set-top-boxu, hlasové služby do VoIP telefonu a data do počítače. Nevýhodou je, že brána musí být obsažena v zákaznické části sítě, tedy doma, případně jedna společná brána pro domovní rozvody. Absence brány by měla za následek přenos televizního signálu jednotlivými toky. Tedy i stejný kanál pro více zákazníků by znamenalo právě tolik toků, kolik je diváků-uživatelů dané televizní stanice v síti daného operátora.

1.1.3 Kódování obrazu

Přenos videa v nekomprimované podobě by vyžadovalo vysoké nároky na přenosovou kapacitu, proto se video vhodně komprimuje. Nejběžněji pomocí kodeku MPEG (Moving Picture Experts Group), česky lze volně přeložit jako skupina expertů na měnící se obraz. Je skupina expertů zabývající se návrhy a tvorbou standardů pro měnící se obrazy, tedy audiovizuální díla. Každý ze standardů využívá kompresní ztrátovou kompresi. Pracovní skupina standardizovala 3 typy kodeků: MPEG-1, MPEG-2 a MPEG-4, přičemž MPEG-1 se dnes již nevyužívá.

MPEG-1

Samotné vydání tohoto standardů se datuje k roku 1992 (v praxi zaveden 1993). Byl standardem pro ztrátovou kompresi videa a zvuku, zejména videa z videokazet a hudebního CD, tak aby výsledná bitová rychlost byla menší než 1,5 Mb/s. Kompresní poměr dosažen tímto standardem se pohyboval od 20 do 30:1. MPEG-1 nepoužívá prokládané řádkování. Vstupní signál je převeden do formátu SIF 4:2:0 (formát SIF byl využíván pro vysokou kompresi). Zpracování probíhá pomocí makrobloků, signál SIF 4:2:0 obsahuje tedy 4 bloky 8×8 jasového signálu, jeden blok 8×8 chrominančního signálu C_B a jeden blok chrominančního signálu C_R .

Standard MPEG-1, vychází z kódování JPEG, avšak rozšiřuje tento způsob komprese o diferenční pulzní kódovou modulaci DPCM s predikcí a vektory pohybu. Výsledkem komprimace jsou pak snímky I, P a B. Snímky I tvoří Intra snímky, které tvoří základ pro predikci, stejně tak při přepnutí kanálu (u IPTV) jsou zcela nezbytné. Snímky P (Predicated), predikční snímky tvořené rozdílem aktuálního snímku P_n s předchozím snímkem I nebo P. V neposlední řadě snímky B (Bidirectional), tvořené aktuálním B snímkem s předcházejícím a následujícím snímkem I nebo P.

MPEG-2

Novější standard, jenž odstraňuje nedostatky svého předchůdce MPEG-1. Schválení MPEG-2 proběhlo v roce 1994 (v praxi zaveden 1995). Vznik standardu byl jistou reakcí na různé metody šíření televizního signálu (DVB-T, DVB-C a DVB-S), v různé kvalitě a s různým stupněm ochrany proti chybám v přenosu a rušení. MPEG-2 zahrnuje plnou podporu pro videa jak ve standardním rozlišení, tak plně vysokém rozlišení. Zpracování obrazu je definováno úrovněmi, od nejnižší v rozlišení 352×240 (případně 352×288 pro USA), po nejvyšší 1920×1080 (případně 1920×1152 pro USA). Profily jsou metody pomocí, kterých lze měnit kódovací metody[4]:

- Jednoduchý profil,

- hlavní profil,
- profil odstupňovaný podle poměru signálu k šumu,
- profil odstupňovaný podle prostorové rozlišovací schopnosti,
- vysoký profil.

Tab. 1.4: Tabulka profilů využívající MPEG-2 [5].

Úroveň / Profil	Jednoduchý profil	Hlavní profil	Odstupňo- vaný profil podle SNR	Prostorově odstupňovaný profil	Vysoký profil
Vysoká	—	1920×1152 1920×1080	— —	— —	1920×1152 1920×1080
Vysoká 1440	—	1440×1152 1440×1080	—	1440×1152 1440×1080	1440×1152 1440×1080
Hlavní	720×576 720×480	720×576 720×480	720×576 720×480	— —	720×576 720×480
Nízká	—	352×288 352×240	352×288 352×240	—	—

Tab. 1.5: Tabulka přenosových rychlostí v závislosti na použitém profilu [5].

Úroveň / Profil	Jednoduchý profil [Mb/s]	Hlavní profil [Mb/s]	Odstupňo- vaný profil podle SNR [Mb/s]	Prostorově odstupňovaný profil [Mb/s]	Vysoký profil [Mb/s]
Vysoká	—	80	—	—	100
Vysoká	—	60	—	60	80
Hlavní	15	15	15	—	20
Nízká	—	4	4	—	—

Standard MPEG-2 podporuje predikci stejně jako MPEG-1, avšak rozšiřuje predikci pomocí módů, a to celosnímkovou a půlsnímkovou predikce. Celosnímková predikce využívá makroblok, který je tvořen prostřídáním lichých a sudých řádků. Tato predikce je vhodná zejména pro statické obrazy. Půlsnímková predikce uvažuje každý půlsnímek jako jeden snímek, proto mohou být kódovány jako snímky I, P nebo B. Půlsnímková predikce přináší přesnější kompenzaci pohybu.

Celosnímkový a pulsnímkový mód je možno přepnout pouze po celých snímcích.

Tab. 1.6: Stručný přehled parametrů standardů MPEG-1 a MPEG-2.

Vlastnost	MPEG-1	MPEG-2	MPEG-4
Standardizován	1992	1994	2003
Hlavní využití	Digitální videa na médiích	Digitální TV (včetně HDTV)	HDTV DVB-H
Rozlišení	352×288	720×576 1440×1152 1920×1080	320×240 720×576 1920×1080
Počet snímku za sekundu	25–30	25–30 50–60	25–30 50–60
Bitová rychlost	1,5 Mb/s	4 Mb/s 20 Mb/s 80–100 Mb/s	192 kb/s 4–14 Mb/s 20–135 Mb/s

MPEG-4 part 10/AVC

Standard byl schválen v roce 2003. Různé literatury uvádějí různé názvy tohoto standardu, například MPEG-4 part 10 nebo AVC/H.264, jenž odpovídá označení dle ITU. Jedná se neustále o stejný standard. Cílem standardu MPEG-4 bylo stejně jako u standardu MPEG-2 přinést vyšší kompresi, než předchozí standard. Hlavní nasazení bylo předurčeno pro televizní vysílání ve vysoké kvalitě a hybridní vysílání (DVB-H). Kde je velký důraz na kvalitu obrazu při co nejmenších nárocích na šířku pásma.

Významná rozšíření oproti MPEG-2 standardu jsou:

- Různý tvar a velikost bloků pro pohybovou kompenzaci,
- interpredikce a intrapredikce,
- filtr pro potlačení blokové struktury.

Dalšími rozdíly jsou v definovaných profilech pro komprimaci:

- Základní profil – podpora inter a intra kódování,
- hlavní profil – podpora prokládané řádkování, inter kódování používá snímek typu B,
- rozšířený profil - bez podpory prokládaného videa.

Jednotlivé profily byly následně přiřazeny k různému využití. Základní profil pro telefonii s přenosem videa. Hlavní profil televiznímu vysílání a rozšířený profil pro streamované aplikace, kde je potřeba variabilní přenosová rychlost.

Interpredikce – vytvoření předpovědi pomocí několika snímků.

Intrapredikce – vytváření předpovědi kódovaného bloku ze vzorků sousedních, již kódovaných bloků.

1.2 Přenos hlasu

1.2.1 Úvod

Klasická telefonie fungující na principu přepínání okruhů, byla velmi oblíbená, neboť datové sítě s dnešním rozšířením se teprve rodily. Jakmile na trh s informačními technologiemi vstoupili i další operátoři, začaly se budovat lokální sítě, které byly základem pro připojení co nejvíce zákazníků.

Při vývoji technologií se přenosové rychlosti začaly navyšovat. Navýšení přenosových rychlostí byl základ pro realizaci více než jedné služby na stávajícím vedení (narůstající oblíbenost optických kabelů).

Pro přenos hlasu se začala používat datová síť, neboť poskytovala dostatečné parametry. Dnes přenos hlasu po IP protokolu známe pod zkratkou VoIP (Voice over Internet Protocol).

Samostatné označení VoIP však zahrnuje v sobě řadu technologií, které jsou použity pro hlasové aplikace, telefonování, odeslání hlasové zprávy nebo telekonference [6]. Dále pak definuje způsob přenosu hlasových dat a zapouzdření do paketu [6].

Pomocí technologie VoIP je možno uskutečnit hovor přímo z počítače i do veřejné telefonní sítě (PSTN). Signál je před dosažením svého cíle převeden na formát pro analogový telefon, tedy spojitý signál.

Výhody VoIP

- **Snížení nákladů** – při vedení strukturované kabeláže lze využít datových kabelů pro přenos - jak metalických tak optických, případně další technologie WiFi apod. Tímto lze VoIP zavést téměř všude. Dokud nebyly datové sítě tolik rozvinuté, snižovaly se náklady zavedením např. pobočkové ústředny, kterou však bylo taky nutno zakoupit, avšak spojení v rámci stejné sítě pak bylo bezplatné.
- **Flexibilita** – jednoduchá segmentace zákazníků z pohledu poskytovatele služeb.
- **Mobilita** – zákazník se může připojit prakticky všude, kde je např. bezdrátová síť. Dnes bezdrátové sítě lze najít téměř všude, v kavárnách, obchodních centrech, letištích atd.
- **Rozmanitost pokročilých funkcí** – pokročilé směrování hovorů, zabezpečení, systém jednotného odesílání zpráv nebo služby telefonních aplikací.
- **Telefonování zdarma** – v rámci sítě jednoho poskytovatele služeb si mohou volat zákazníci neomezeně a zdarma.

1.2.2 Použité kodeky

Při přenosu hlasu po datové síti je potřeba hlas kódovat. Není žádoucí, aby přenos hlasu zabíral velkou část přenosové šířky média a tím ubíral potřebnou kapacitu linky, například přenosu televize.

G.711 – označován také jako PCM (pulsně kódová modulace) tvoří signál o přenosové rychlosti 64 kb/s. Vzorkovací kmitočet pulsně kódové modulaci ve standardu G.711 je 8 kHz, rozšíření pak tvoří standard G.711.1 (schválen v roce 2008), který zvyšuje vzorkovací kmitočet na dvojnásob, tedy 16 kHz s datovým tokem 64, 80 nebo 96 kb/s. Dalším standardem z rodiny G.711 pak tvoří G.711.0, jenž poskytuje bezztrátovou komprimaci. Kodek nese označení G.711.0 LLC. Veškeré výše jmenované kodeky podporují podsady komprimace:

μ -law – tato sada je používána v telefonních sítích v Severní Americe a Japonsku.

a -law – tato sada je používána v telefonních sítích v Evropě a zbývajících částech světa.

G.726 – kodek G.726 se využívá při komprimaci hlasu od 300–3400 Hz, přičemž ke kódování je využito adaptivní pulsně kódová modulace (ADPCM). Tato modulace vychází z predikce, kdy je příchozí signál porovnáván s predikčním vzorkem, jestliže je predikce vhodně zvolena, rozdíl mezi vzorky je minimální, a tudíž pro kódování rozdílu stačí menší počet bitů. Tento kodek nahradil kodek G.723.

G.728 – komprimování řečového signálu probíhá pomocí LDCELP. Zpracování metodou LDCELP je podobné metodě CS-ACELP (bude vysvětleno dále).

G.729 – při kódování řeči pomocí standardu G.729 je použita komprimace CS-ACELP, výsledná přenosová rychlost je 8 kb/s. Přenosová rychlost může být nižší 6,4 kb/s, avšak silně na úkor kvality řeči. Při využití standardu G.729b je zahrnuta funkce VAD. Detekce aktivity hlasu zabraňuje přenosu „šumu“ kdy nikdo nehovoří. Proto může mít volaný pocit, že volající zavěsil, dochází však k úspoře šířky pásma. Například při Cisco směrovačích je testovaná aktivita hlasu každých 250 ms.

CS-ACELP

K vysvětlení principu komprimace CS-ACELP bude vhodnější příklad telefonování mezi dvěma účastníky. Jestliže při vedení konverzace se budou často vyskytovat slova obsahující slovo „ce“ (práce, konce a emoce). Místo digitalizace zvuku „ce“ dojde k vytvoření záznamu v takzvané knize kódů, kde bude popsáno, jak je zvuk „ce“ reprezentován (na obou komunikujících stranách). Při dalším vyslovení „ce“ nedojde k digitalizaci, ale odešle se pouze „odkaz“ na stránku a řádek v knize kódů, kde je zvuk „ce“ popsán reprezentací pomocí binárního kódu. Kniha kódů je sestavována

dynamicky po dobu hovoru. Přenos odkazu v knize pomáhá ušetřit potřebnou šířku pásma. Ovšem při velké knize kódů dochází ke zpoždění, než je nalezen odpovídající odkaz. Komprimace LDCELP také vytváří knihu kódů, avšak menší, než má CS-ACELP, čímž dojde ke zmenšení zpoždění, ovšem narůstá potřebná šířka pásma.

Tab. 1.7: Přehled kodeků používaných pro přenos hlasu po datových sítích [6], [7], [8], [9], [10].

Kodek	Šířka pásma [b/s]	Velikost vzorku [bajty]	Interval odebrání vzorku [ms]	MOS
G.711	64 000	80	10	4,1
G.723	6 300	24	30	3,9
G.723	5 300	20	30	3,8
G.726	24 000	15	5	3,62
G.726	32 000	20	5	3,85
G.728	16 000	10	5	3,61
G.729	8 000	10	10	3,92

Tab. 1.8: Přehled kodeků používaných pro přenos hlasu po datových sítích [6], [7], [8], [9], [10].

Kodek	Délka payload [ms]	Velikost payload [bajty]	Počet paketů za sekundu	Potřebná šířka pásma pro Ethernet [kb/s]	Celková velikost paketu [bajty]
G.711	20	160	50	87,2	218
G.723	30	24	33,3	21,525	82
G.723	30	20	33,3	20,67	78
G.726	20	60	50	47,2	118
G.726	20	80	50	55,2	138
G.728	30	60	33,3	31,46	118
G.729	20	20	50	31,2	78

1.2.3 Ukázka výpočtů pro kodek G.711

$$\text{Počet paketů za sekundu} = \frac{\text{rychlost kodeku}}{\text{velikost výplně}} \times 8$$

$$\text{Počet paketů za sekundu} = \frac{64\,000}{160} \times 8 = 50 \text{ paketů/s}$$

$$\text{Celková šířka pásma} = \frac{[\text{Režie 2.vrstvy} + \text{Režie}(\text{IP} + \text{UDP} + \text{RTP}) + \text{velikost výplně}]}{\text{velikost výplně}} \times \text{rychlost kodeku}$$

$$\text{Celková šířka pásma} = \frac{[18 + 20 + 8 + 12 + 160]}{160} \times 64\,000 = \frac{2180}{160} \times 64\,000 = 87,2 \text{ kb/s}$$

$$\text{Celková velikost paketu} = \text{Hlavička 2. vrstvy} + \text{Hlavičky (IP + UDP + RTP)} + \text{výplň}$$

$$\text{Celková velikost paketu} = 18 + (20 + 8 + 12) + 160 = 218 \text{ bajtů}$$

Tab. 1.9: Velikost režijních dat pro jednotlivé vrstvy OSI modelu [11].

Číslo vrstvy a protokol	Velikost režijních dat [bajty]
2. Ethernet	18
3. IP	20
4. UDP	8
4. RTP	12

Tab. 1.10: Doporučené parametry pro služby VoIP a přenos videa [12].

Služba	Ztrátovost [%]	Zpoždění [ms]	Kolísání zpoždění [ms]	Šířka pásma [kb/s]
VoIP	<1 %	<150	<30	20–90
IPTV	<1 %	<150	<30	600–8 000

Tab. 1.11: Rozsahy zpoždění pro hlasové služby v datových sítích dle ITU-T G.114 [13].

Zpoždění [ms]	Popis
0–150	Pro většinu aplikací zcela dostatečné zpoždění.
150–400	Přijatelné pokud si je správce vědom dopadu na kvalitu.
400	Nepřijatelné zpoždění.

1.2.4 Signalizační protokoly

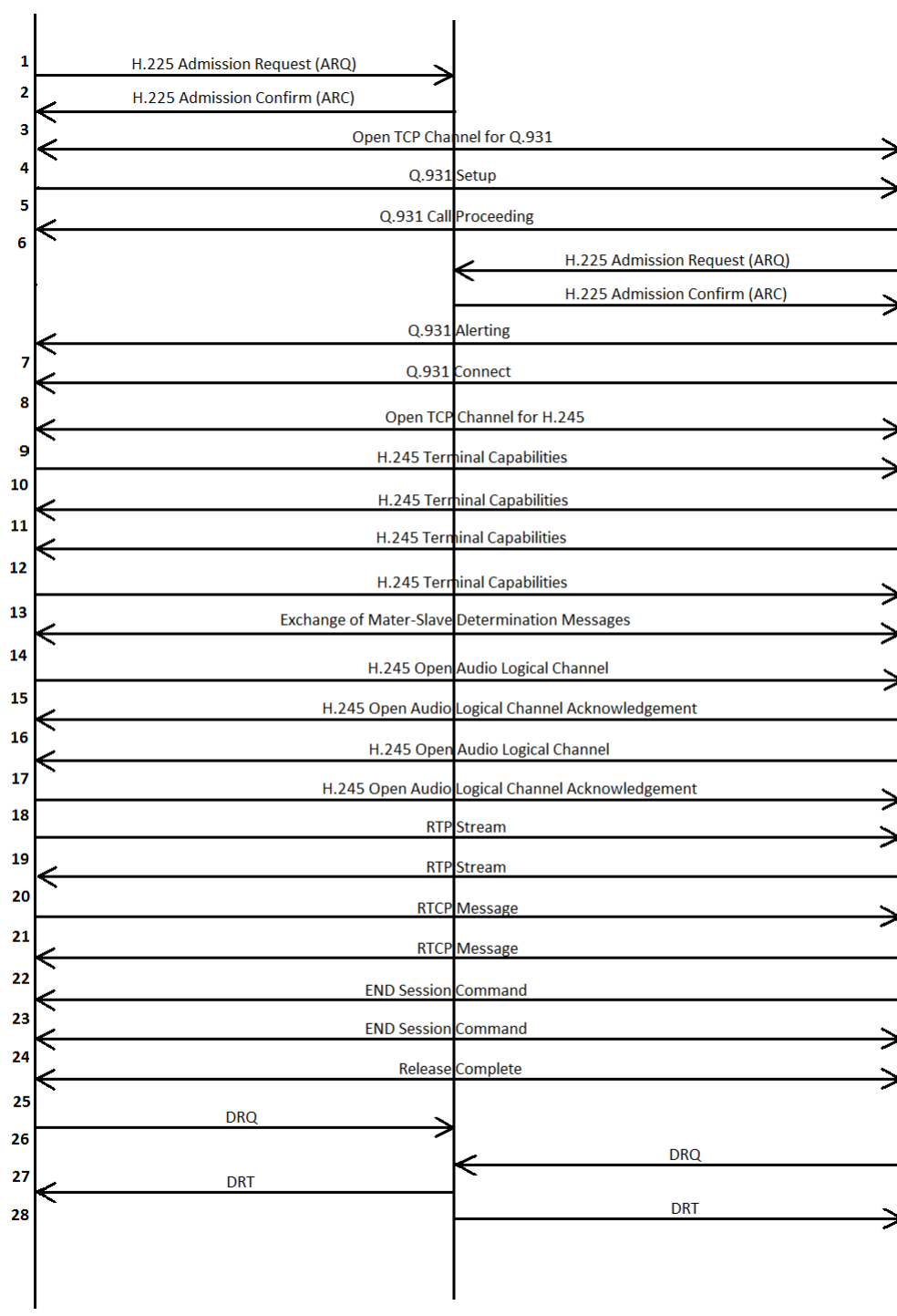
Pro technologie VoIP jsou použity následující řídicí a signalizační protokoly. Protokoly nejsou popsány zcela podrobně a vyžadují tedy jistou znalost čtenáře.

H.323

Je protokol, který pod sebou zařazuje další sadu protokolů pro přenos hlasu, videa a dat v paketové síti.

Architektura H.323 se skládá z povinných i nepovinných prvků.

- **H.323 terminály** – jsou jedinou povinnou částí systému H.323,
- **„Vrátný“** – nepovinný, avšak doporučený komponent v síti s architekturou H.323 (v síti zabezpečuje řízení spojení, překlady adres, řízení přístupu, řízení přenosové kapacity atd.),
- **H.323 brány** – umožňují komunikovat se sítěmi rozdílných technologií, převádějí signalizaci, uživatelské informace a komunikují s ostatními brány (mediální bránou a signalizační bránou),
- **H.323 mnohobodová kontrolní jednotka** – zajišťující konferenční spojení.



Obr. 1.2: Ukázka H.323 spojení.

Popis spojení

1. Koncový bod 0 pošle zprávu H.225-RAS ARQ (Admission Request) jako žádost o povolení přístupu.

2. Gatekeeper potvrzuje přístup zprávou H.225 ACF (Admission Confirm).
3. Mezi koncovými body se vytvoří kanál pro přenos informací o spojení.
4. Volající odešle signalizační zprávu SETUP k sestavení spojení.
5. Volaný odpovídá zprávou CALL PROCEEDING
6. a) Volaný odesílá zprávu H.225-RAS ARQ (Admission Request) jako žádost o povolení přístupu.
b) Gatekeeper potvrzuje přístup zprávou H.225 ACF (Admission Confirm).
c) Koncový bod 1 signalizuje volajícímu založení spojení zprávou ALERTING.
7. Zároveň potvrzuje založení spojení pomocí zprávy CONNECT.
8. Nyní je vytvořen mezi komunikujícími stranami TCP kanál pro přenos informací.
9. Následuje vytvoření kontrolního kanálu H.245 mezi koncovými body.
10. Opačná strana oznámení přijímá.
11. Volající oznamuje volanému podporované audio/video kodeky.
12. Volaný oznamuje volanému podporované audio/video kodeky.
13. Výměna zpráv, která ze stanic bude master nebo slave.
14. Volající otevře kanál pro přenos médií zprávou H.245 OpenLogicalChannel.
15. Volaný potvrzuje vytvoření logického kanálu a odpovídá zprávou H.245 OpenLogicalChannelAck, která zároveň obsahuje přidělenou transportní adresu.
16. Volaný otevře kanál pro přenos médií zprávou H.245 OpenLogicalChannel.
17. Volající potvrzuje vytvoření logického kanálu a odpovídá zprávou H.245 OpenLogicalChannelAck, která zároveň obsahuje přidělenou transportní adresu.
18. Volající začíná přenášet data.
19. Volaný přenáší data.
20. Volající odesílá řídicí zprávu RCTP.
21. Volaný odesílá řídicí zprávu RCTP.
22. Volaný inicializuje rozpad spojení zprávou END Session Command.
23. Volající ruší spojení a potvrzuje zrušení volanému zprávou END Session Command.
24. Volající dokončuje zrušení spojení zprávou H.255 Release Complete.
25. Účastník se odpojuje od gatekeeperu zprávou RAS DRQ (Disengage Request).
26. Účastník se odpojuje od gatekeeperu zprávou RAS DRQ (Disengage Request).
27. Gatekeeper potvrzuje uvolnění zprávou DCF (Disengage Confirm).
28. Gatekeeper potvrzuje uvolnění zprávou DCF (Disengage Confirm).

SIP

Signalizační protokol pro navazování, udržování a řízení multimediálního spojení. Protokol je textově orientovaný, proto umožňuje jednoduché řešení případných potíží. Součástí architektury SIP jsou:

- „**SIP uživatelský agent**“ - koncové zařízení (obsahující user agent klient/server),
- „**SIP proxy server**“ - přijímá žádosti od agentů a proxy serverů, dále řídí předávání signalizace,
- „**Přesměrovací server**“ - zjišťuje aktuální adresy pro zasílání žádosti,
- „**Správní server**“ - registrace SIP agenta,
- „**Lokální server**“ - server uchovává databázi o uživateli a serverech,
- „**Brána**“ - řeší konverzi mezi různými technologiemi (ISDN, GSM, ...).

192.168.110.65	192.168.110.33	Comment
(SIP/SDP) Request: INVITE sip:1002@192.168.110.33	(SIP/SDP) Request: INVITE sip:1002@192.168.110.33, with session description	SIP/SDP: Request: INVITE sip:1002@192.168.110.33, with session description
(SIP) Status: 401 Unauthenticated	(SIP) Status: 401 Unauthorized	SIP: Status: 401 Unauthorized
(SIP) Request: ACK sip:1002@192.168.110.33	(SIP) Request: ACK sip:1002@192.168.110.33	SIP: Request: ACK sip:1002@192.168.110.33
(SIP/SDP) Request: INVITE sip:1002@192.168.110.33	(SIP/SDP) Request: INVITE sip:1002@192.168.110.33, with session description	SIP/SDP: Request: INVITE sip:1002@192.168.110.33, with session description
(SIP) Status: 100 Trying	(SIP) Status: 100 Trying	SIP: Status: 100 Trying
(SIP) Status: 180 Ringing	(SIP) Status: 180 Ringing	SIP: Status: 180 Ringing
(SIP/SDP) Status: 200 OK, with session description	(SIP/SDP) Status: 200 OK, with session description	SIP/SDP: Status: 200 OK, with session description
(SIP) Request: ACK sip:1002@192.168.110.33	(SIP) Request: ACK sip:1002@192.168.110.33	SIP: Request: ACK sip:1002@192.168.110.33
(SIP) Request: BYE sip:1002@192.168.110.33	(SIP) Request: BYE sip:1002@192.168.110.33	SIP: Request: BYE sip:1002@192.168.110.33
(SIP) Status: 200 OK	(SIP) Status: 200 OK	SIP: Status: 200 OK

Obr. 1.3: Ukázka přímého spojení SIP protokolu z programu Wireshark.

Popis spojení

1. Volající posílá volanému zprávu INVITE, za účelem pozvání k hovoru.
2. Volaný odpoví zprávou 401 Unauthorized s podporovanými protokoly a kodeky.
3. Volající zprávu potvrdí.
4. Odešle potvrzovací zprávu, že se svými podporovanými protokoly a kodeky.
5. Nyní volaný odešle zprávu typu 100 Trying, kterou informuje o přijetí žádosti.
6. Zpráva 180 Ringing znamená, že volající slyší zvuk zvonění.
7. Po přijetí hovoru se odešle zpráva 200 OK.
8. Probíhá přenos dat.
9. Data jsou potvrzována.
10. Následně volající hovor ukončí, čímž dojde k odeslání zprávy BYE.
11. Zpráva je potvrzena 200 OK.

MGCP

Je protokol pro řízení bran, umožňující jejich centralizovanou správu [6]. Samotné informace o vytáčecím plánu jsou uloženy v agentu volání [6]. Přenos probíhá v podobě prostého textu. Brána MGCP umožní zprostředkování spojení mezi veřejnou telekomunikační sítí a VoIP, provádí tedy konverzi. Příklady koncových bodů jsou analogová linka, E1 kanál, DS0 kanál atd.

1.3 Přenos dat

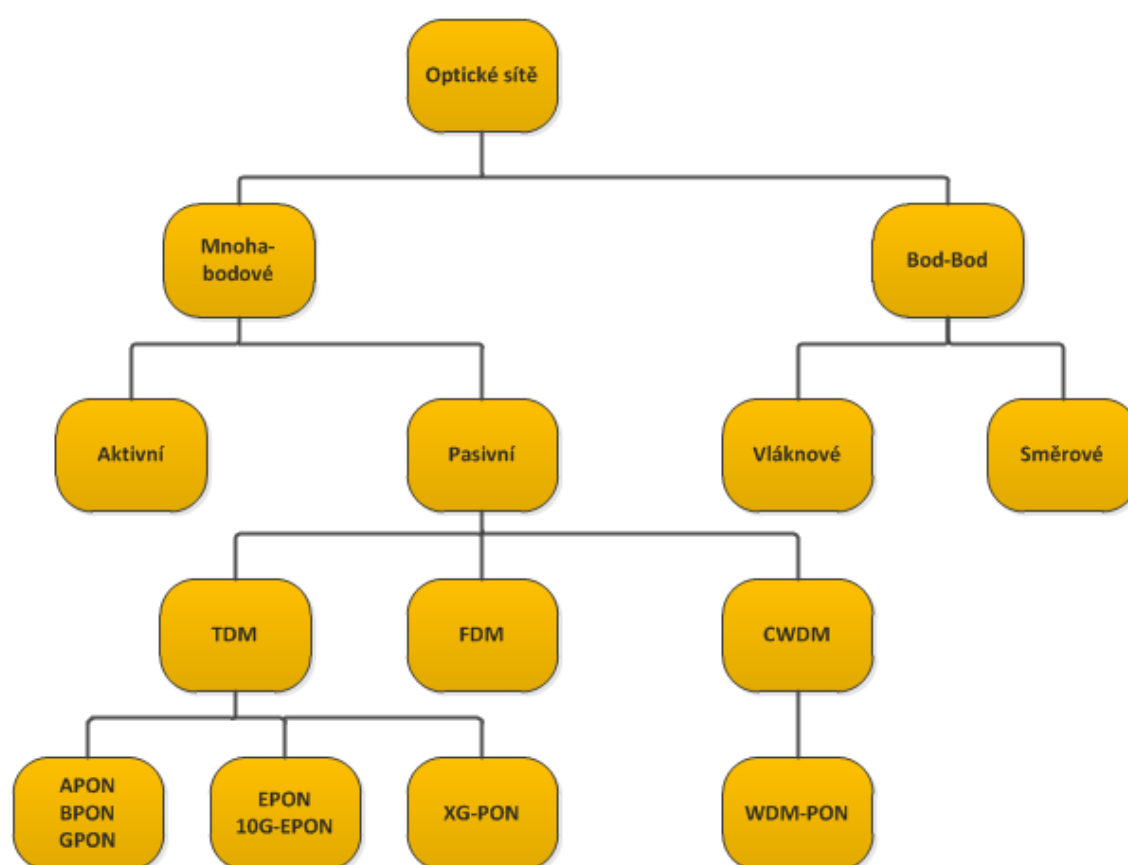
Poskytování vysokorychlostního připojení je zcela klíčové, proto je zcela nezbytné zajistit dostatečnou šířku pásma. Jednak rychlost vysokorychlostního připojení může být snížena při přenosu digitální televize přes datovou síť, případně při sledování více televizních kanálů najednou.

Samotný přenos dat je zcela závislý na použitém transportním protokolu (4. vrstvy při použití ISO/OSI modelu, případně 3. vrstvy modelu TCP/IP). Jestliže je použit protokol TCP, přenos dat je spolehlivý a spojově orientovaný, čímž vzniká vysoká režie na vybudování spojení a neustále potvrzování příchozích datagramů. Protokol TCP našel uplatnění pro několik aplikačních protokolů a aplikací, přenos emailů nebo SSH a další. Ačkoli protokol zajišťuje spolehlivý a spojově orientovaný přenos, přesto i tyto záruky nabízejí jednu nevýhodu. Zpoždění, které vzniká při opětovném přenosu ztracených nebo poškozených dat. Toto zpoždění může být pro aplikace citlivé na zpoždění kritické (VoIP).

Proto aplikace citlivé na zpoždění využívají druhý transportní protokol UDP. Samotný protokol UDP nenavazuje spojení ani žádná data nepotvrzuje, proto je využíván například pro přenos hlasu po datové síti. Neboť je „lepší“, aby samotný hovor na zlomek času vypadl, než aby bylo doručeno slovo, které již do samotné konverzace nezapadá.

2 OPTICKÉ PŘÍSTUPOVÉ SÍTĚ

První optické sítě byly využívány zejména na dálkové přenosy. Neboť koncovým uživatelům byla zpočátku nabízená možnost připojení do sítě Internet většinou pomocí modemů. Přenosová rychlost nepřevyšovala však 56 kb/s, tedy například pro tisíc koncových uživatelů stačila páteřní přenosová rychlost okolo 56 Mb/s. Ovšem situace, kdy všichni uživatelé najednou stahují nastávala zřídka. Postupem času a vznikem dalších lokálních operátorů začal konkurenční boj, jak o samotné zákazníky, tak o to, kdo nabídne lepší služby. Dnes je zcela běžné připojení k internetu nad 10 Mb/s a rychlejší¹. Vyšších přenosových rychlostí je právě dosaženo pomocí optických vláken, které tvoří část přenosové soustavy nebo celou.

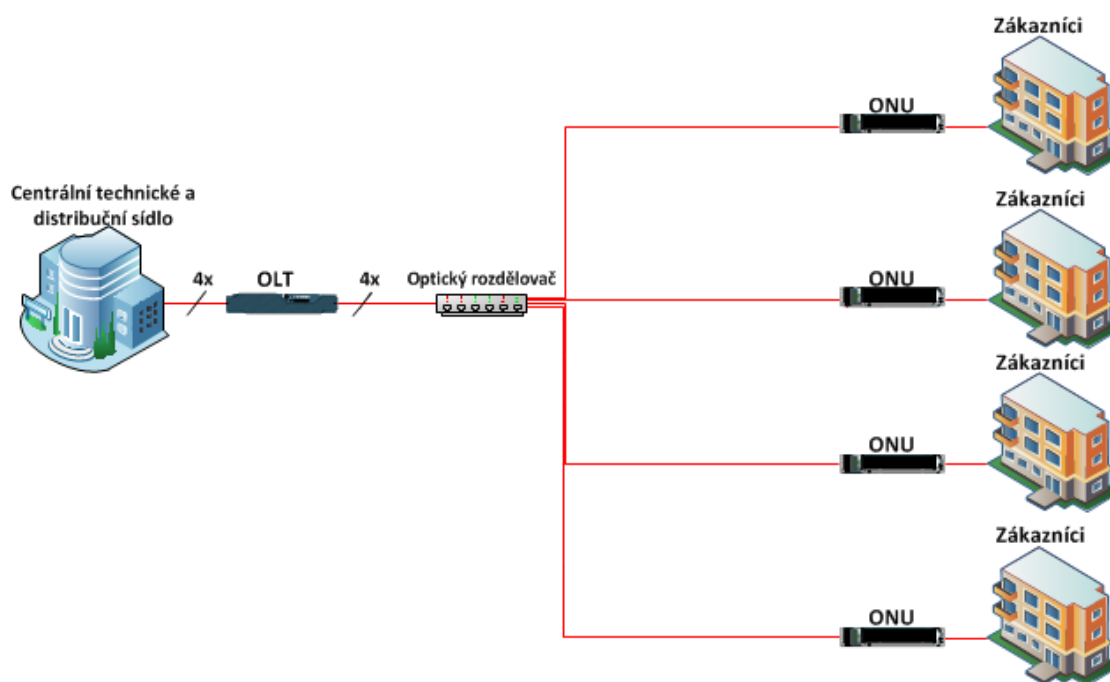


Obr. 2.1: Rozdělení přístupových optických sítí.

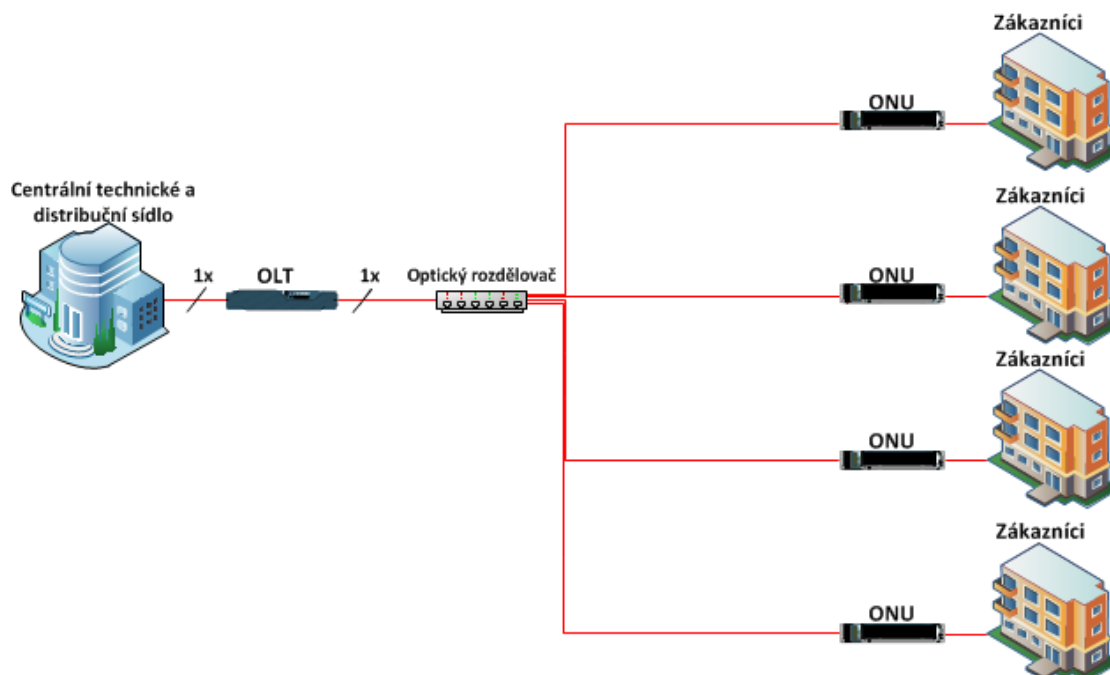
¹Například v roce 2004 začala společnost Karneval Media s. r. o. nabízet připojení k internetu s rychlostí 2 000/150 kb/s za cenu 1 790 Kč [14].

2.1 Rozdělení optických přístupových sítí

Základní rozdělení optických přístupových sítí (OAN) zobrazuje obr. 2.1. První rozdělení je na základě využití spojů, tedy jeden tok pro jednoho zákazníka Bod-Bod viz obr. 2.2 (P2P) nebo Bod-Mnohobod viz obr. 2.3 (P2MP). Již ze samotného názvu mnohabodové spojení vyplývá, jedná se o sdílení přenosové kapacity mezi několika zákazníky. Mnohabodové sítě jsou dále děleny v závislosti na použitých prvcích. Za aktivní optickou síť je považována síť, která neobsahuje mezi jednotkami OLT a ONU žádný pasivní optický prvek mimo vlákna samotného. Návrh aktivní optické sítě vyžaduje zohlednění přivedení podpůrné napájecí sítě. Naopak pokud optickou síť tvoří pouze pasivní optické prvky mezi jednotkami OLT a ONU je síť považována za pasivní optickou síť (PON). Dnes jsou právě pasivní optické sítě velmi oblíbené a vyvíjely se z různých standardů, které budou popsány dále.



Obr. 2.2: Princip přenosu typu Bod-Bod.



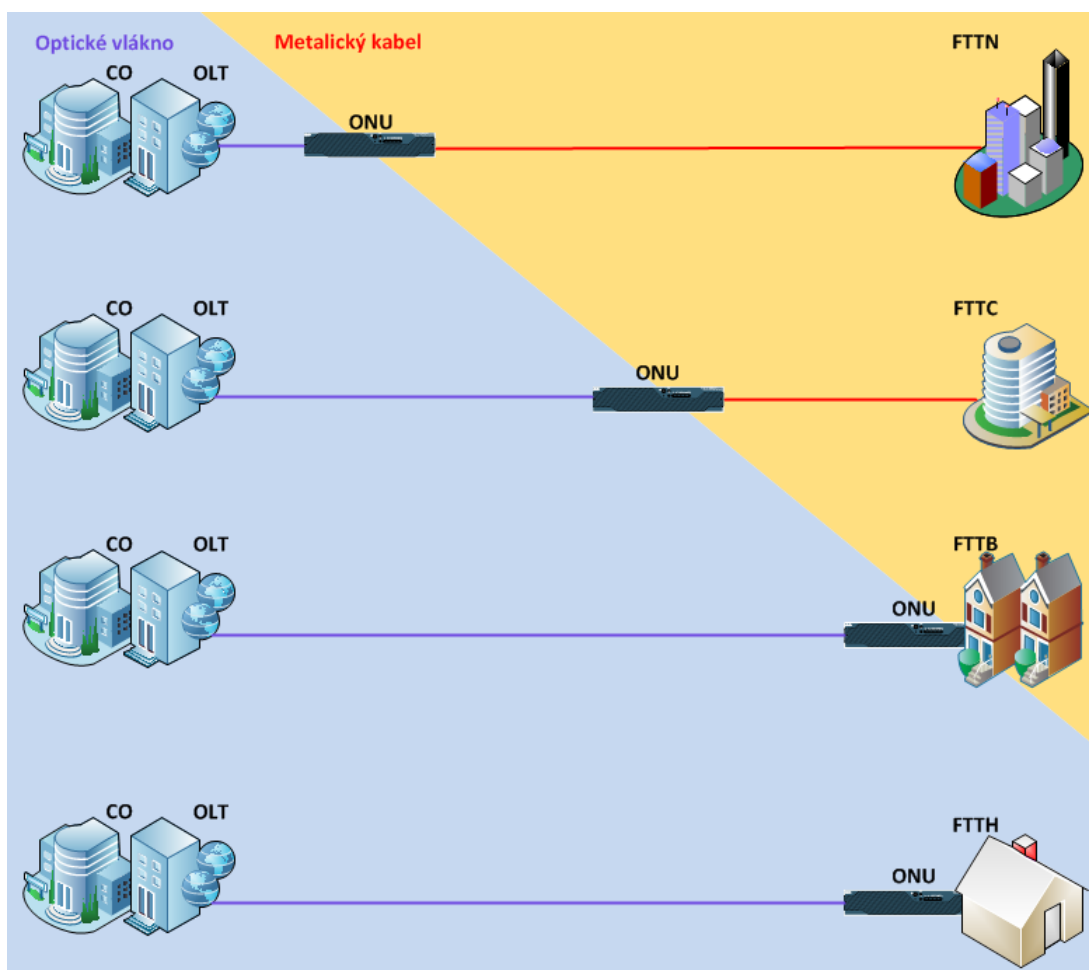
Obr. 2.3: Princip přenosu typu Bod-Mnohobod.

2.2 FTTx

Samotné budování optických sítí záleží také na tom, kde přesně bude optické vlákno ukončeno. Zkratka FTTx, tedy „optické vlákno do ...“ nabízí následující známe metody viz obr. 2.4:

FTTH (Fiber To The Home) – metoda přivedení optického vlákna až do bytu zákazníka. Jedná se o nejnákladnější metodu, avšak u „náročných“ uživatelů velmi oblíbenou. Nabízí nejvyšší dostupné přenosové rychlosti (běžně 100 Mb/s i víc), obvykle v synchronním (rychlost sestupného i vzestupného směru jsou shodné), případně asynchronním režimu. Zakončení optického vlákna touto metodou je nejběžněji nasazováno v lokálních sítích místními operátory, neboť mají předem zjištěný zájem o službu/y, případně je optická síť plně připravená na připojení budoucích zákazníků. Touto metodou připojuje své zákazníky společnost Google, službu nazývá Google Fiber [15]. Koncovým zákazníkům nabízí připojení o rychlosti 1 Gb/s, jak pro sestupný (download) směr, tak pro vzestupný (upload) směr. Reálné přenosové rychlosti se pohybují (podle testu rychlosti připojení jednoho zákazníka) okolo 700 Mb/s pro sestupný směr a 620 Mb/s pro vzestupný směr. Menší naměřené přenosové parametry lze přisuzovat hardwarové náročnosti služby. Služba Google Fiber je prozatím dostupná pouze v jednotlivých domech v Kansas City. V České repub-

lice jako příklad vyhovuje společnost SMART Comp. a.s.². Ve vybraných lokalitách nabízí synchronní přenosovou rychlost 200 Mb/s.



Obr. 2.4: Rozdělení FTTx metod.

FTTO (Fiber To The Office) – zcela obdobná metoda k předešlé. Jedná se více-méně o tutéž metodu, optické vlákno je rovněž přivedeno až k zákazníkovi. Rozdíl však spočívá v koncovém zákazníkovi, tato metoda je určená pro připojení kancelářských prostor, firemních nebo průmyslových prostor, nemocnicí nebo veřejnému sektoru. Z koncových zákazníků vyplývá, že zde bude kladen důraz na symetričnost přenosových rychlostí, stabilitu a také rychlost odezvy. Například nemocnice přenáší velké množství dat mezi sály, případně mezi jinými odděleními.

FTTP (Fiber To The Premises) – toto označení nesou dvě předchozí metody, tedy FTTB a FTTH.

²Provozovatel a vlastník sítě NETBOX.

FTTB (Fiber To The Building) – další možnost ukončení optického vlákna představuje možnost přivedení optického vlákna do budovy. Optický kabel může být zakončen například v suterénu budovy v jednotce OLT nebo ONU a dále pak vyveden pomocí metalických vodičů, které jsou mnohdy v budovách již zavedeny. Pro připojení koncových zákazníků stačí například přepínač s podporou přenosové rychlosti 1 Gb/s. Síť je tedy opticko-metalická. Je však potřeba klást důraz, aby délka segmentu od aktivního prvku vedeného pomocí nestíněné kroucené dvoulinky nepřesáhla délku 100 m (dle ISO/IEC 11801).

FTTC (Fiber To The Curb) – optické vlákno je přivedeno až k okraji chodníku v blízkosti sídliště, nebo je vlákno přivedeno pouze do venkovního rozvaděče. Odtud je připojení koncových zákazníků realizováno různými metodami, zpravidla pomocí VDSL, případně jinou xDSL metodou. Přičemž vzdálenost od koncových zákazníků je od 100 do 300 metrů.

FTTN (Fiber To The Node) – optické vlákno je ukončeno v „uzlu“, zpravidla DSLAMu. K DSLAMu jsou zákazníci opět nejčastěji připojováni pomocí některé z dostupných metod xDSL. Maximální vzdálenost mezi DSLAMem a zákazníky je 1 524 m.

2.3 Standardy pasivních optických sítí

2.3.1 APON

Pilotní specifikace pasivních optických sítí založených na přenosu ATM buněk (53 bajtů). Pasivní optická síť typu APON (ATM Passive Optical Network) byla schválena v roce 1998 jako standard G.983.1. Síť využívá asynchronní přenos. Pro směr k uživateli (download) je přenosová rychlost 622 Mb/s, od uživatele (upload) pak 155 Mb/s. Případně v synchronním režimu 155 Mb/s do obou směrů.

2.3.2 BPON

Standard vycházející z dřívější specifikace APON sítě, tedy podle doporučení ITU-T G.983.1. Přenosové rychlosti BPON (Broadband Passive Optical Network) sítě jsou totožné s rychlostmi APON sítí, tedy v asynchronním režimu 622 Mb/s ve směru k uživateli (download) a 155 Mb/s ve směru od uživatele (upload). Případně synchronní režim 155 Mb/s do obou směrů. Přičemž vzdálenost pro přenos by neměla přesáhnout 20 km. Přenosová kapacita může být rozdělena až mezi 32 obydlených domů/lokalit, rozdíl jednotlivých vlnových délek tvoří 100 GHz, případně 200 GHz pokud se rozděluje přenosová kapacita pro 16 částí. Standard BPON rozšiřuje APON síť o vlnový multiplex.

2.3.3 GPON

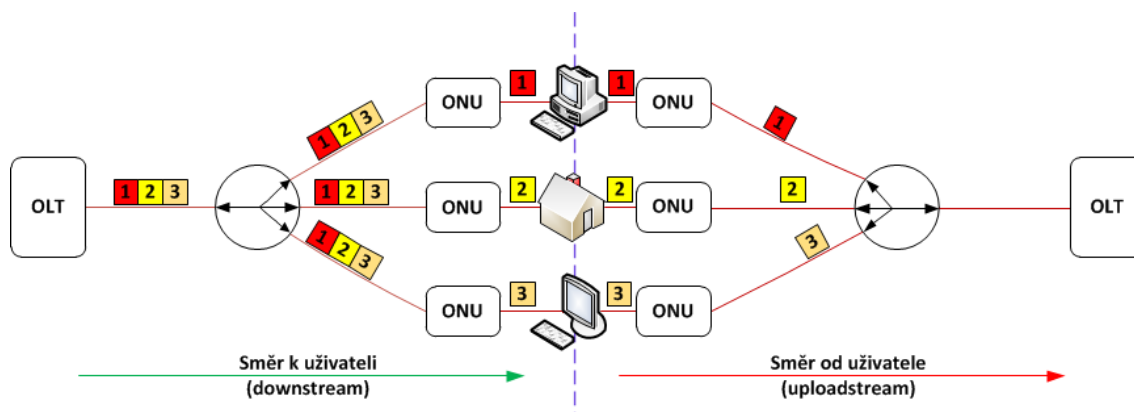
Následná poptávka po neustále vyšších přenosových rychlostech, byla potřeba dalšího rozšíření stávajících standardů. Revoluci přinesla specifikace GPON (Gigabit Passive Optical Network) schválená v roce 2004, pod označení G.984. GPON síť stejně jako její předchůdci podporuje oba režimy přenosu, jak asynchronní, tak synchronní. V asynchronním režimu jsou rychlosti směrem k uživateli 1 244,16 nebo 2 488,32 Mb/s, rychlost od uživatele jsou 155,52, 622,08 nebo 1 244,16 Mb/s. Synchronní režim podporuje rychlosti 1 244,16 nebo 2 488,32 Mb/s v obou směrech. Následné rozšíření přenosové kapacity na desetinásobek umožňuje přenosovou kapacitu sdílet mezi až 64 obydlených domů/lokalit na vzdálenost do 60 km. Přenos dat, videa a hlasu probíhá stále pomocí ATM buněk, je zde i možnost využít Ethernet protokol. Nechybí také podpora vlnově děleného multiplexu.

2.3.4 EPON

Síť EPON (Ethernet Passive Optical Network) je založena na technologii Ethernet. Dochází tedy ke změně přenášených dat, již se nepřenáší ATM buňky (konstantní délky), ale Ethernet rámce. Schválení standardu se datuje k roku 2004 pod označení 802.3ah. Přenosová rychlost v symetrickém režimu dosahuje 1 Gb/s a využívá kódování 8B/10B (z čehož vyplývá přenosová rychlost 1,25 Gb/s na fyzické vrstvě). Pro pasivní optické sítě byly dostupné dvě varianty. První 1000BASE-PX10 a druhá varianta 1000BASE-PX20. Detailněji obě varianty popisuje tab.2.1. Princip přenosu je zobrazen na obr. 2.5. O pět let později byl vytvořen další standard IEEE - 10GEPON, který umožňuje přenos dat v symetrickém režimu 10 Gb/s.

Tab. 2.1: Vlastnosti dostupných variant EPON sítí.

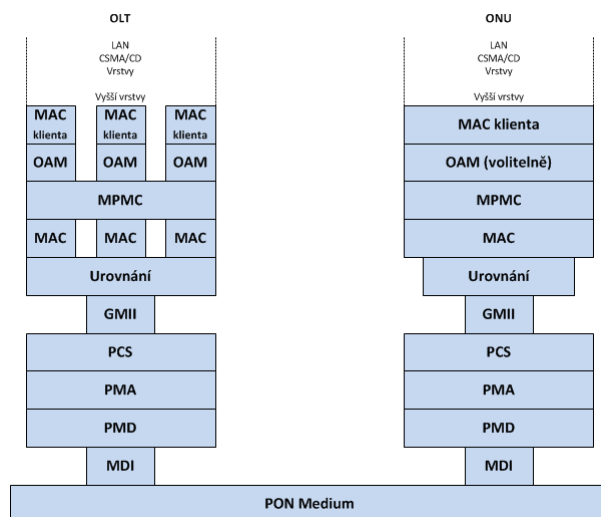
Označení varianty	Směr přenosu	Přenosová rychlost [Mb/s]	λ [nm]	Jmenovitá vzdálenost [km]	Přenosové médium
1000BASE-PX10	Sestupný	1 000	1 490	10	1 SM vlákno
1000BASE-PX10	Vzestupný	1 000	1 310	10	1 SM vlákno
1000BASE-PX20	Sestupný	1 000	1 490	20	1 SM vlákno
1000BASE-PX20	Vzestupný	1 000	1 310	20	1 SM vlákno



Obr. 2.5: Princip datového přenosu v sítích EPON.

EPON multirámec

Předchozí standardy 802.3 použily k přenosu spojení Bod-Bod (P2P), síť PON však vyžadují spojení Bod-Mnohobod (P2MP). Zde přichází hlavní odlišnost v koncepci přenášených datových jednotek-rámců. Mezitím co při spojení Bod-Bod je vždy zřejmé, že rámec má svého jediného příjemce, při spojení Bod-Mnohobod je potřeba definovat více příjemců v daném rámci. Strukturu EPON multirámce zobrazuje obr. 2.6. Nejníže postavené je tedy médium pasivní optické sítě (představující fyzickou vrstvu). Vrstva MDI (Medium Dependent Interface) spolu s GMII (Gigabit Medium Independent Interface) tvoří dvě standardizované rozhraní pro přístup k ostatním vrstvám [16]. Vyšší vrstvy nad MDI vrstvou (PMD, PMA a PCS) jsou používány pro přizpůsobení a úpravu přenášených dat v závislosti na použitém rozhraní a médiu. Následuje výplň rámce, dále pak MAC vrstva zodpovědná za řazení, adresování, detekci chyb a kontrolu přístupu reprezentované informace pomocí protokolu Multi-Point MAC Control. Zkratka další vrstvy OAM vychází z anglických výrazů „Operation, Administration a Maintenance“, tedy „řízení, správa a údržba“ data obsažená v této vrstvě slouží středisku správy, přičemž data mohou být odlišná pro jednotlivé MAC adresy. Poslední část tvoří MAC adresy jednotlivých optických ukončujících jednotek (ONU). Obdobná struktura je uvedena na obr. 2.6 vpravo pro směr k optickému ukončujícímu terminálu (ONT).



Obr. 2.6: Struktura EPON multirámce [16].

EPON rámce

V pasivní optické síti EPON jsou přenášeny dva druhy rámců, datový pro přenos dat a kontrolní pro konfiguraci EPON systému. Přístup sítě je řešen pomocí kontrolního

rámce, který je vytvořen pomocí MAC kontrolního protokolu a následně předány do MPMC (Multi Point MAC Control) rámce³, vycházející ze standardu IEEE 802.3 MAC-CONTROL rámce [16]. Kontrolní rámce (obr. 2.7 jsou rozpoznány pomocí opkódu.

	Počet oktetů
Cílová adresa	6
Zdrojová adresa	6
Délka/Typ = 88-08	2
Opkód	2
Časová známka	4
Data/Rezerva/Výplň	40
Kontrolní sekvence rámce	4

Obr. 2.7: Formát MPMC rámce [16].

Opkód je tvořen dvěma oktety, které mohou mít následující formát a význam:

- Gate (Brána) = 0×00-02 – zpráva odesílána z optického ukončujícího terminálu (OLT) do optické ukončovací jednotky (ONU) pro přidělení časového slotu, nebo pro udržení spojení mezi těmito jednotkami pomocí zprávy „keep alive“ [16].
- Report 0×00-03 – zpráva mezi optickou ukončovací jednotkou (ONU) a optickým ukončujícím terminálem (OLT) pro sdělení požadavků na vzestupný směr, monitorování linky a výpočet potřebné doby, než paket dorazí od zdroje k cíli a zpět [16].
- REGISTER_REQ 0×00-04 – registrační dotaz odeslaný při připojení optické ukončovací jednotky (ONU) k optickému ukončujícímu terminálu (OLT) [16].

³Tyto rámce jsou následně předány do MPCPDU rámce.

- REGISTER 0×00-05 – optický ukončující terminál, který přijme žádost o registraci do sítě (REGISTER_REG) odpoví optické ukončovací jednotce (ONU) touto zprávou, která obsahuje informace o síti, aby mohla nově připojená jednotka správně pracovat [16].

Samotný rámec přenášející uživatelská data se nikterak neliší od rámce z kabelových (metalických) sítí. Strukturu rámce přenášející uživatelská data zobrazuje obr. 2.8. Významný rozdíl zde tvoří možnost přenosu několik MAC adres optických ukončujících terminálů (OLT). Preamble (obsahuje CRC8) s oddělovačem přenášených dat tvoří synchronizační vzor pro přijímač. Význam dalších položek je zcela jednoznačný z jejich názvů.

	Počet oktetů
Preamble	7
Oddělovač začátku rámce	1
Cílová adresa	6
Zdrojová adresa	6
Délka/Typ	2
MAC data klienta	46-1 500
Výplň	
Kontrolní sekvence rámce	4
Rozšíření	

Obr. 2.8: Formát MAC rámce přenášející data[16].

2.4 Aktivní prvky pro měřenou síť

Aktivní prvky disponují velmi podobnými parametry, což umožňuje jejich detailní porovnání při měření. Jednotka OLT od společnosti XDK je vhodná pro jednu optickou linku (sít). Zařízení OLT společnosti ZyXel dovoluje připojit až 4 sítě. Pro testovanou pasivní optickou síť byly k dispozici následující prvky:

- OLT jednotka Zyxel OLT-1308S-22
- OLT jednotka XDK OLT-E8110T
- ONU jednotka Zyxel ONU-6040B-21
- ONU jednotka XDK-E8010U

2.4.1 Parametry aktivních prvků

Zyxel OLT-1308S-22

- 2× pevné GEAPON porty,
- 3× sloty pro GEAPON moduly,
- 4× Gigabitové uplinkové porty, přičemž 2× 1000BASE-T a 2× SFP combo porty,
- 1× 10/100BASE-T port pro management,
- 1× DB9 RS-232 port,
- 1000BASE-PX10 do vzdálenosti 10 km,
- Vlnové délky – 1310 nm pro vzestupný směr a 1490 nm pro sestupný směr.



Obr. 2.9: Zyxel OLT-1308S-22.

XDK 8110T

- 1× pevný GEAPON port,
- 1× port Gigabit uplink port,
- 1× 10/100BASE-T port pro management,
- 1× DB9 RS-232 port,
- 1000BASE-PX10 do vzdálenosti 10 km,
- Vlnové délky – 1310 nm pro vzestupný směr a 1490 nm pro sestupný směr.



Obr. 2.10: Jednotka OLT XDK 8110T.

Zyxel ONU-6040B-21

- 1× GEAPON port s konektorem SC,
- 4× LAN porty 10/100 BASE-T auto MDI/MDI-X,
- 1000BASE-PX10 do vzdálenosti 10 km,
- Vlnové délky – 1310 nm pro vzestupný směr a 1490 nm pro sestupný směr.

XDK E8015U

- 1× GEAPON port s konektorem SC,
- 1× LAN porty 10/100 BASE-TX
- 1000BASE-PX10 do vzdálenosti 10 km,
- 1× RS-232 port,
- Vlnové délky – 1310 nm pro vzestupný směr a 1490 nm pro sestupný směr.

3 MĚŘENÍ NA PASIVNÍ SÍTI

Kapitola měření pasivní sítě je členěna na dvě podkapitoly: přímá metoda a reflektometrická metoda. Každá podkapitola přináší popis měřicí metody a naměřené výsledky, které jsou zpracovány v tabulkách.

3.1 Přímá metoda

Při měření přímou metodou tvoří optickou trasu: dvě optická vlákna G.652.D s délkou 1 a 5 km, rozbočovače s různými poměry dělení 1:2, 1:8 a 1:16 a v případě potřeby patch panel. Patch panel sloužil pouze na straně měřiče výkonu (Power Meter) FPM-600 pro převedení rovného konektoru na šikmý, kterým disponují oba měřicí přístroje. Jako zdroj záření sloužil laser FLS-600 (Light Source). Samotné měření probíhalo na vlnových délkách 1310 nm a 1550 nm ve směru od optického linkového zakončení k optickému síťovému zakončení (OLT→ONU) a obráceně (ONU→OLT).

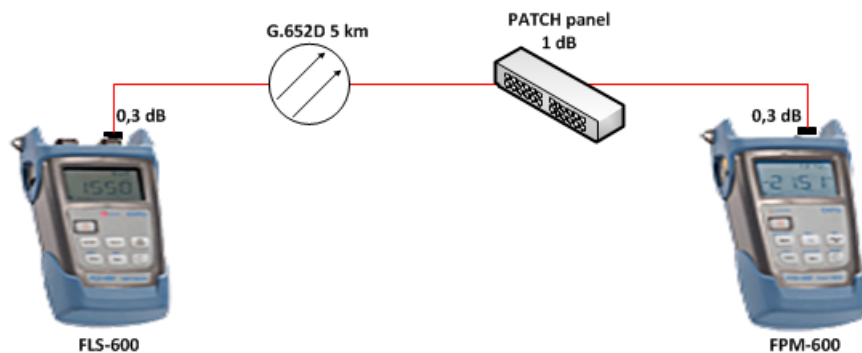
Na začátku před měřením na vlnové délce 1310 nm byla nastavena mezi měřicími přístroji referenční hodnota, aby nebylo potřeba při každém měření odečítat hodnotu úrovně mezi přístroji (útlum konektorů). Referenční hodnota (viz obr. 3.1) zahrnovala dva konektory a jedno propojovací vlákno.



Obr. 3.1: Nastavení referenční hodnoty mezi měřicími přístroji FLS-600 a FPM-600.

Samotné měření pasivních prvků v síti proběhlo po nastavení referenční hodnoty. Prvky byly měřeny postupně, nejprve na jedné vlnové délce a pak na druhé. Z obr. 3.2 je zřejmé zapojení vlákna do měřené topologie. Vlákno o délce 5 km mělo na jedné straně konektor rovný a na straně druhé šikmý, proto je v topologii obsažen patch panel (hodnota útlumu patch panelu byla také změřena). Při měření vlákna o délce 1 km nebyla potřeba využít patch panelu. Naměřené hodnoty zobrazuje tab. 3.1.

Hodnoty útlumu vláken pro jednotlivé vlnové délky byly z naměřených hodnot dopočítány. Dopočtené hodnoty útlumu pro jednotlivá vlákna a vlnové délky jsou v rozsahu udávané standardem G.652.D. Ten stanovuje hodnoty útlumu pro vlnovou délku 1310 nm 0,33-0,35 dB/km a pro vlnovou délku 1550 nm 0,19-23 dB/km [17].



Obr. 3.2: Měření útlumu vlákna o délce 5 km.

Tab. 3.1: Naměřené výsledky pro vlákno o délce 1 km a 5 km.

Typ vlákna	Délka vlákna [km]	Útlum pro 1310 nm [dB/km]	Útlum pro 1550 nm [dB/km]
G.652D	1	0,36	0,23
G.652D	5	0,31	0,234

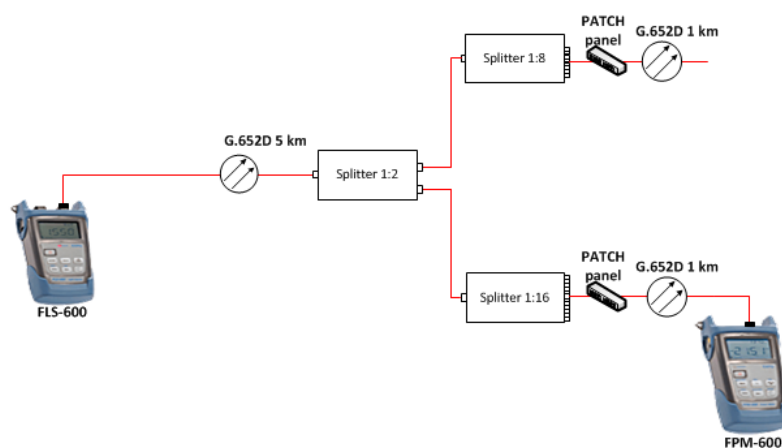
Vlákna lze tedy klasifikovat jako vyhovující k dalšímu měření na optické síti. Dalšími měřeními komponenty byly rozbočovače, jejichž výsledky jsou shrnuty v tab. 3.2. Naměřené hodnoty byly porovnány s hodnotami udávanými výrobcem.

Poslední část přímé měřicí metody probíhala na sestavené síti (viz obr. 3.3) ve směru od OLT→ONU a opačném směru. Měření probíhalo na shodných portech jako u přímé měřicí metody. Výsledné hodnoty zobrazuje tab. 3.3 a tab. 3.4.

Ze všech měření jsou patrné lepší hodnoty útlumu pro vlnovou délku 1550 nm, což plně odpovídá teoretickým předpokladům o průběhu závislosti útlumu na vlnové délce.

Tab. 3.2: Přehled změřených a deklarovaných hodnot útlumů na rozbočovačích.

Rozbočovač / port	Změřená hodnota útlumu 1310 nm [dB]	Změřená hodnota útlumu 1550 nm [dB]	Deklarováno výrobce 1310 nm [dB]	Deklarováno výrobce 1550 nm [dB]
1:2/1	4,02	3,87	3,6	3,6
1:2/2	3,73	3,51	3,6	3,6
1:8/1	10,04	9,62	9,8	9,9
1:8/8	10,14	9,64	9,8	9,9
1:16/1	12,88	12,6	12,8	12,7
1:16/8	12,72	13,14	12,8	12,7
1:16/16	12,69	13,43	12,8	12,7



Obr. 3.3: Měření ve směru od OLT k ONU pomocí přímé měřící metody.

Tab. 3.3: Naměřené hodnoty útlumu ve směru od OLT k ONU.

Rozbočovač / port	Útlum pro 1310 nm [dB]	Útlum pro 1550 nm [dB/km]
1:8/1	17,74	17,86
1:8/8	17,72	17,86
1:16/1	20,92	18,75
1:16/8	20,9	18,61
1:16/16	20,79	18,56

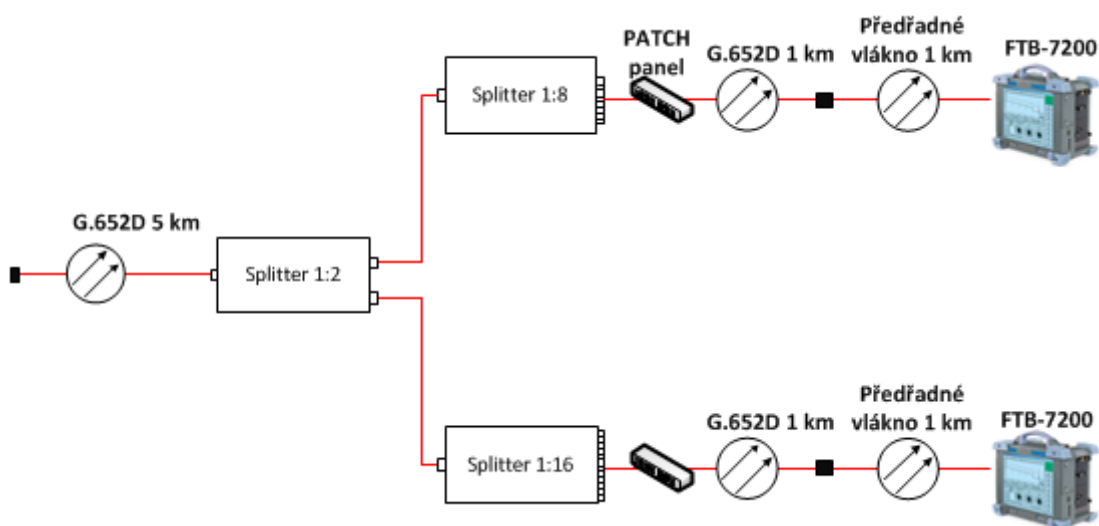
Tab. 3.4: Naměřené hodnoty útlumu ve směru od ONU k OLT.

Rozbočovač / port	Útlum pro 1310 nm [dB]	Útlum pro 1550 nm [dB/km]
1:8/1	18,01	17,35
1:8/8	17,97	17,9
1:16/1	20,83	18,89
1:16/8	20,81	18,64
1:16/16	20,78	18,65

3.2 OTDR

Další testovanou metodou bylo měření za použití reflektometrické metody OTDR (Optical Time Domain Reflectometry), která slouží pro zjištění rozložení jednotlivých útlumů. Tato metoda je založena na principu vysílání pulzů a jeho odrazu (Railyho rozptyl) od prvků v optické síti. Metoda je určena pro měření rozložení útlumů pouze ze směru od optického síťového k optickému linkovému zakončení (ONT → OLT). V laboratorních podmínkách byl využíván pouze jeden port, proto bylo možné měřit i směr od optického linkového zakončení k optickému síťovému zakončení.

Pro měření reflektometrickou metodou byl k dispozici reflektometr společnosti EXFO FTB-7200. Měřenou topologii zobrazuje obr. 1. Reflektometrem bylo měřeno na obou rozbočovačích 1:8 a 1:16. Dle údajů výrobce i změřených hodnot je zřejmé, že tyto rozbočovače vnaší poměrně velký útlum. Z důvodu změny konektoru ze šikmého na rovný je také nutné zmínit použití propojovacího patch panelu a množství spojek v trase (vše zobrazuje obr. 3.4).



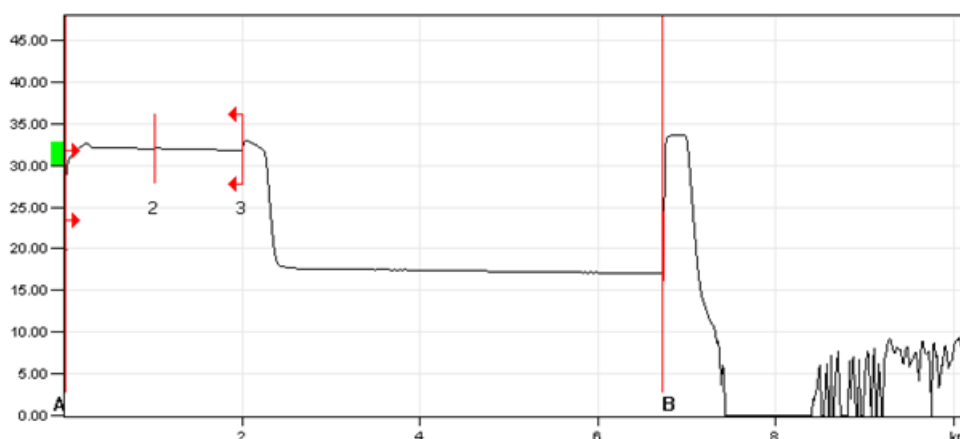
Obr. 3.4: Blokové schéma měřené sítě pomocí OTDR ve směru ONU→OLT.

Při měření pomocí reflektometrické metody se často využívá ještě tzv. předřadné vlákno, které slouží k pokrytí mrtvé zóny, která by mohla znemožnit měření trasy od samého počátku. Měření bylo provedeno na obou vlnových délkách, a to jak 1310 nm, tak 1550 nm. Reflektometrická metoda rovněž slouží k potvrzení obecně známých útlumů vláken G.652 pro jednotlivé vlnové délky: 1310 nm přibližně 0,35 dB/km a 1550 nm přibližně 0,25 dB/km. Stejně vlnově závislé lze očekávat i měřené rozbočovače sítě. Naměřené hodnoty (na vlnové délce 1310 nm) pro rozbočovač s dělicím poměrem 1:8 zobrazuje tab.3.5. Výsledný náměr měřicího přístroje EXFO FTB-7200

zobrazuje obr. 3.5. Z OTDR náměru (obr. 3.5) byly zjištěny následující parametry: délka trasy, útlum trasy, útlum vlákna o délce 1 km a 5 km, útlum patch panelu, útlum rozbočovačů (součet útlumů obou rozbočovačů) a celkové ORL (Optical Return Loss). Hodnota ORL pro EPON sítě by měla být vyšší než 15 dB [23], což dle výsledných náměrů bylo splněno.

Tab. 3.5: Zjištěné parametry z OTDR náměru pro rozbočovač 1:8.

Rozbočovač	1:8	
λ [nm]	1310	1550
délka trasy [km]	6,7	6,7
útlum trasy [km]	17,475	16,313
útlum vlákna 1 km [dB/km]	0,296	0,23
útlum vlákna 5 km [dB/km]	0,301	0,226
útlum patch panelu [dB]	1,38	1,192
útlum rozbočovačů [dB]	13,944	13,411
celkové ORL [dB]	36,43	38,5
šířka pulzu [μ s]	2,5	2,5
doba průměrování [s]	30	30
rozsah [km]	10	10



Obr. 3.5: Náměr OTDR ve směru ONU→OLT pro rozbočovač 1:8 na vlnové délce 1310 nm.

Na náměru (obr. 3.5) je možné vidět následující důležité události.

1 – odraz na výstupním konektoru OTDR

2 – spojku spojující předřadné vlákno s vláknovou konzervou

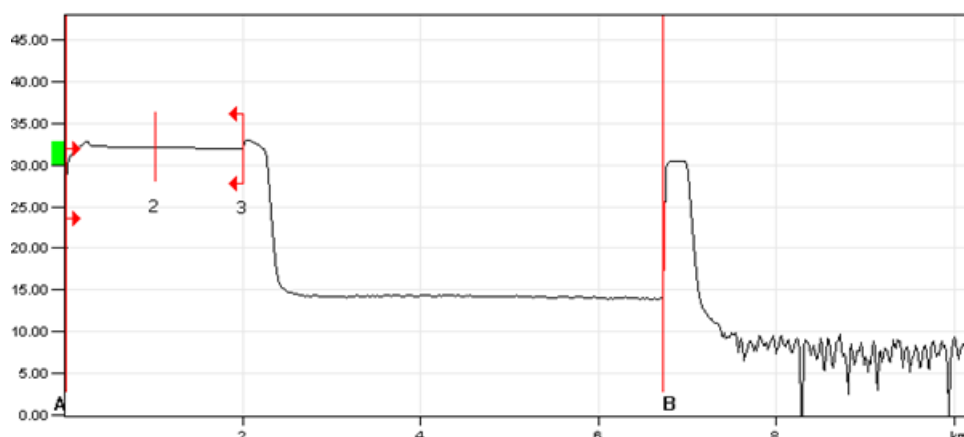
3 – odraz od konektoru rozbočovače.

Kurzor A označuje počátek trasy, kurzor B její konec. Za kurzorem B je pouze šum.

OTDR náměr pro rozbočovač s dělicím poměrem 1:16 je zachycen na obr. 3.6 a výsledné hodnoty získané z OTDR náměru v tab. 3.6. Ve výsledném náměru (obr. 3.6) jsou zobrazeny tři stejné skutečnosti jako na obr. 3.5.

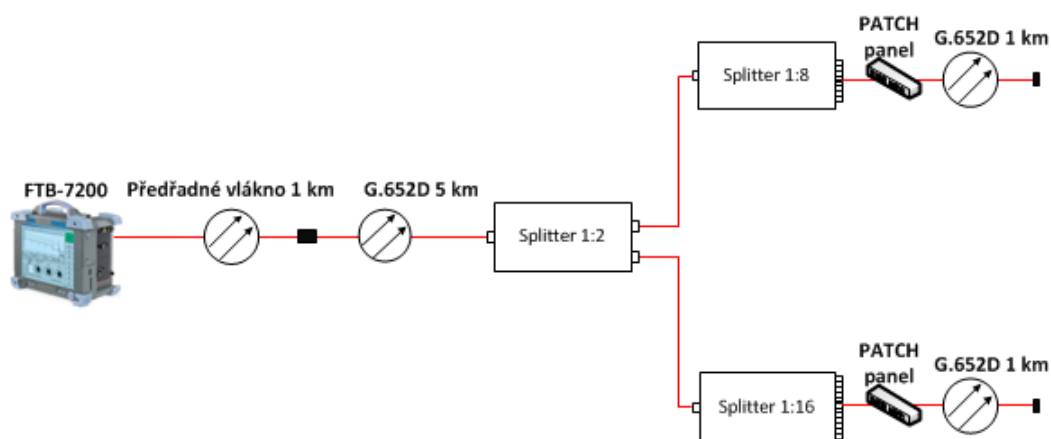
Tab. 3.6: Zjištěné parametry z OTDR náměru pro rozbočovač 1:16.

Rozbočovač	1:16	
λ [nm]	1310	1550
délka trasy [km]	6,7	6,7
útlum trasy [km]	20,819	16,313
útlum vlákna 1 km [dB/km]	0,29	0,23
útlum vlákna 5 km [dB/km]	0,31	0,228
útlum patch panelu [dB]	1,4	1,2
útlum rozbočovačů [dB]	17,229	16,9
celkové ORL [dB]	36,44	38,5
šířka pulzu [μ s]	2,5	2,5
doba průměrování [s]	30	30
rozsah [km]	10	10

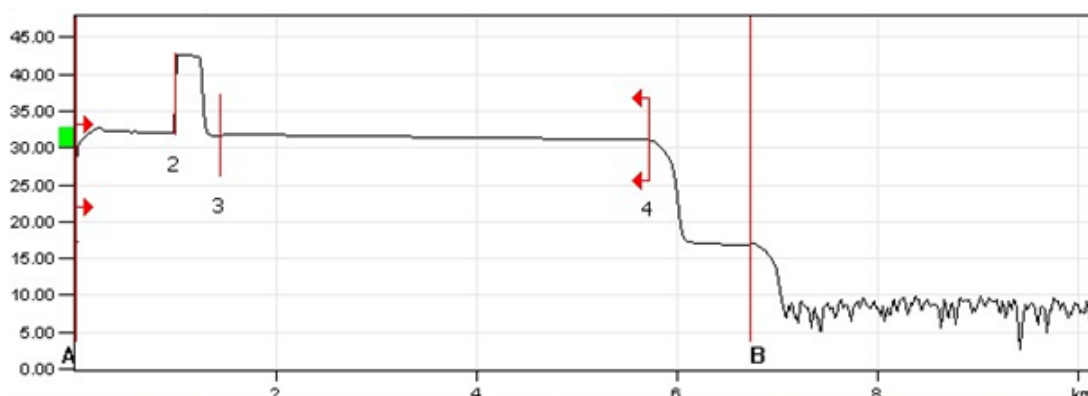


Obr. 3.6: Náměr OTDR ve směru ONU→OLT pro rozbočovač 1:16 na vlnové délce 1550 nm.

Veškeré náměry z obr. 3.5 a obr. 3.6 jsou pro směr od optického síťového zakončení (ONU) k optickému linkovému zakončení (OLT). Trasa byla měřena i z druhého směru tedy OLT→ONU, přestože při plně obsazeném rozbočovači by docházelo k měření součtů útlumu jednotlivých tras, které by byly k rozbočovači připojeny. Výsledný OTDR náměr pro rozbočovač s dělicím poměrem 1:8 zobrazuje obr. 3.8. Obrázek 3.9 zobrazuje náměr OTDR pro rozbočovač s dělicím poměrem 1:16. Hodnoty odečteny z OTDR náměru zobrazují tab. 3.7 a tab. 3.8. Výsledné OTDR náměry umožňují změřit délku a útlum trasy, útlum vlákna 5 km, útlum patch panelu, útlum rozbočovačů a celkové ORL. Výsledný OTDR náměr obsahuje na konci trasy pouze šum, proto není zaznamenáno celé vlákno o délce 1 km (topologie viz obr. 3.7), ale jen jeho část.



Obr. 3.7: Blokové schéma měřené sítě pomocí OTDR ve směru OLT→ONU.



Obr. 3.8: Náměr OTDR ve směru OLT→ONU pro rozbočovač 1:8 na vlnové délce 1550 nm.

Tab. 3.7: Zjištěné parametry z OTDR náměru pro rozbočovač 1:8.

Rozbočovač	1:8	
λ [nm]	1310	1550
délka trasy [km]	5,7	5,7
útlum trasy [km]	17,636	16,31
útlum vlákna 1 km [dB/km]	—	—
útlum vlákna 5 km [dB/km]	0,29	0,226
útlum patch panelu [dB]	1,813	1,192
útlum rozbočovačů [dB]	14,023	13,411
celkové ORL [dB]	<25,31	<26,56
šířka pulzu [μ s]	2,5	2,5
doba průměrování [s]	30	30
rozsah [km]	10	10

Samotný náměr má naznačené 4 složky:

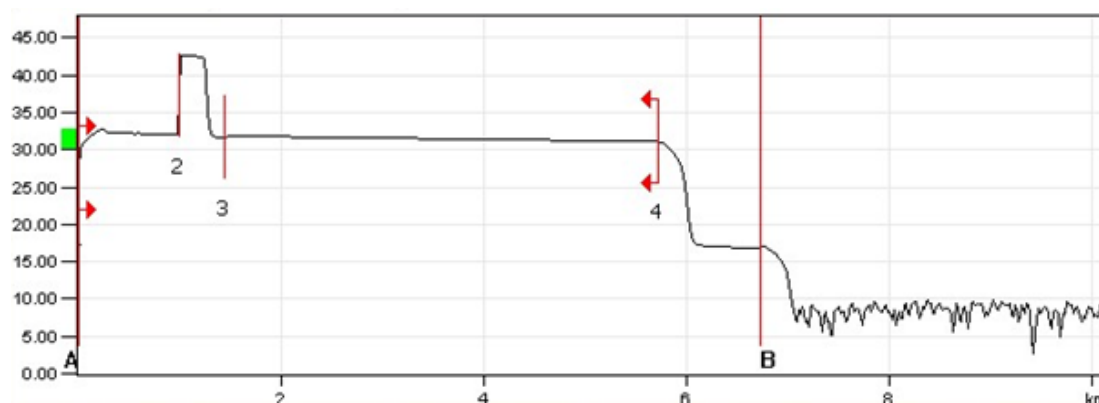
- 1 – odraz na výstupním konektoru OTDR
- 2 – spojka spojující předřadné vlákno vláknem o délce 5 km
- 3 – začátek vlákna o délce 5 km
- 4 – odraz na vstupu rozbočovače.

Kurzor A označuje počátek trasy, kurzor B demonstruje konec trasy. Za kurzorem B je možno vidět vstup do patch panelu, ačkoli vlákno za ním připojené náměr nezobrazuje. Je tedy patrné, že délka pulzu je nevyhovující pro překlenutí útlumu. Šířku pulzu lze zvolit na 1 ms, čímž by byl překlenut větší útlum a zvětšil by se dynamicky rozsah přístroje. Útlum patch panelu v tab.3.7 a tab.3.8 je nutno brát pouze jako orientační, protože jej nelze z OTDR náměru přesně určit. Hodnota útlumu pro vlákno o délce 1 km nelze změřit, v celkovém náměru tedy chybí.

Označené body 1, 2, 3 a 4 symbolizují stejné akce jako na obr.3.8 (1 – odraz na výstupním konektoru OTDR; 2 – spojka spojující předřadné vlákno vláknem o délce 5 km, 3 – začátek vlákna o délce 5 km; 4 – odraz na vstupu rozbočovače). Kurzor A označuje počátek trasy, kurzor B demonstruje konec trasy. Za kurzorem B je možno vidět patch panel, dále je pouze šum.

Tab. 3.8: Zjištěné parametry z OTDR náměru pro rozbočovač 1:16.

Rozbočovač	1:16	
λ [nm]	1310	1550
délka trasy [km]	5,7	5,7
útlum trasy [km]	20,045	18,767
útlum vlákna 1 km [dB/km]	—	—
útlum vlákna 5 km [dB/km]	0,278	0,184
útlum patch panelu [dB]	1,563	1,225
útlum rozbočovačů [dB]	16,742	16,272
celkové ORL [dB]	<26,12	<27,3
šířka pulzu [μ s]	2,5	2,5
doba průměrování [s]	30	30
rozsah [km]	10	10



Obr. 3.9: Náměr OTDR ve směru OLT→ONU pro rozbočovač 1:16 na vlnové délce 1310 nm.

4 MĚŘENÍ PARAMETRŮ KVALITY SLUŽEB

Měření parametrů kvality služeb (QoS) je realizováno pomocí různých standardů: EtherSAM, měření bitové chybovosti BERT a RFC 2544. Jednotlivé standardy tvoří dílčí podkapitoly, kde jsou popsány principy měření.

4.1 EtherSam

Jedná se o novější standard na testování sítí, který přináší oproti RFC 2544 hned několik výhod. Zkrátila se jím například nutná doba testování a umožňuje testovat více služeb najednou, tedy přenášet více toků za stejný čas. Doporučení RFC využívalo vždy jeden tok, pokud bylo potřeba testovat tři služby, znamenalo to spustit tři testy. Chod těchto testů vyžadoval různé časy, přičemž nebylo výjimkou, aby test trval i několik hodin (například při větším útlumu trasy). Nový standard označený ITU-T Y.156 (známý také jako Y.156sam - service activation methodology) nabízí testování QoS, kolísání zpoždění a jak již bylo zmíněno, více služeb najednou např.: data, video a hlas.

Prakticky lze standard EtherSAM označit jako nástupce RFC 2544. Tohoto testu bylo využíváno při testování navržené topologie. Topologie zůstala shodná s obr. 3.3, kde konec trasy ukončovala zpětná smyčka (loopback) přístrojem EXFO BV-10. Toto měření nese označení „Roundtrip“. Měření probíhalo na 8. portu na rozbočovači 1:16.

4.1.1 Nastavení služeb

Měření pomocí specifikace EtherSAM ITU-T Y.156 (Y.156sam) bylo uskutečněno pomocí přístroje EXFO FTB-860 NetBlazer. Zařízení umožňuje velmi specifické nastavení až 10ti služeb, které mohou být testovány najednou. Pro měření navržené topologie byly definovány 4 služby: VoIP, IPTV-SDTV, IPTV-HDTV a přenos dat.

Tab. 4.1: Nastavení jednotlivých služeb pro testování živé sítě dle standardu ITU-T Y.156.

Služba	Kodek	CIR [Mb/s]	EIR [Mb/s]	Overshoot [Mb/s]
VoIP	G.711	4,423	4,649	4,9
IPTV-SDTV	MPEG-2	15,893	16	16,5
IPTV-HDTV	MPEG-4	42,37	42,6	43
DATA	—	35	36,5	37

Tab. 4.2: Nastavení jednotlivých služeb pro testování živé sítě dle standardu ITU-T Y.156.

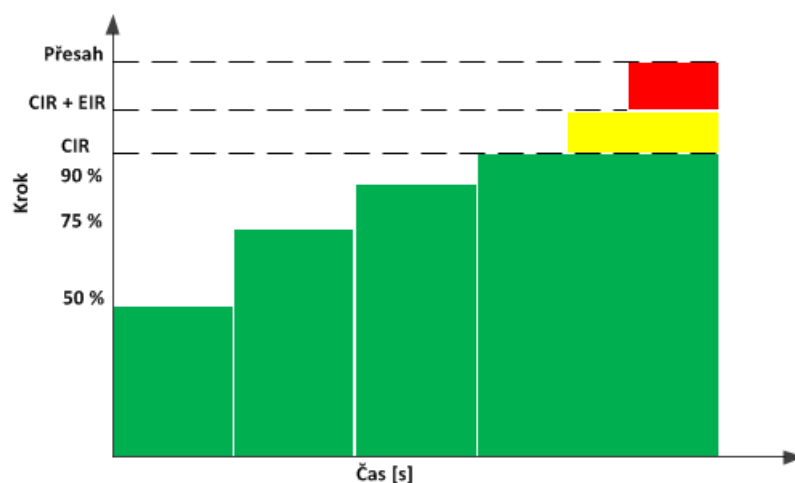
Služba	Velikost rámců [B]	Maximální proměnné zpoždění [ms]	Maximální zpoždění [ms]
VoIP	138	20	120
IPTV-SDTV	1374	30	125
IPTV-HDTV	1374	30	150
DATA	náhodná	55	200

- **Parametr CIR** (Committed Information Rate) – udává maximální přenosovou rychlost pro služby, kde je služba garantována pomocí parametrů (zpoždění, kolísání zpoždění) [18].
- **Parametr EIR** (Excess Information Rate) – udává maximální přenosovou rychlost, kde nejsou garantovány všechny parametry přenosu (nedochází ke ztrátám rámců) [18].
- **Parametr overshoot** (přesah) – udává hodnotu, kdy bude veškerý provoz zahazován [18].

4.1.2 Průběh testování

Celkový průběh testu vystihuje obr. 4.1. Z obrázku je patrné, že v prvním kroku testu je generován datový tok shodný s 50% šířkou pásma hodnoty CIR. Druhý krok odpovídá hodnotě 75 % CIR hodnoty. Třetí krok je stanoven jako 90 % z hodnoty CIR. Čtvrtý krok je hodnota zadaného údaje CIR (během těchto čtyř kroků nesmí docházet ke ztrátě rámců/paketů). Pátý krok je definován jako hodnota EIR (rovněž nesmí docházet ke ztrátě rámců/paketů) a poslední krok je vymezen jako přesah (zde může docházet ke ztrátě rámců/paketů).

Celkový test je rozdělen na dvě fáze. První fáze (označována jako Service Configuration Test) má za úkol otestovat veškeré klíčové parametry mezi které patří propustnost, ztrátovost a kolísání zpoždění. Pro každou službu je generován náběhový test (viz obr. 4.1) až do dosažení hodnoty CIR. Druhá fáze (označována jako Service Performance Test) testuje kvalitu služby pro každou definovanou službu. Tedy jestli splňuje výše stanovené parametry (označovány v anglické literatuře jako SLA parametry). Všechny služby jsou vygenerovány najednou do hodnoty CIR a současně (po celou dobu testování) jsou měřeny parametry všech služeb.



Obr. 4.1: Průběh testu pomocí standardu EtherSAM ITU-T Y.156.

4.1.3 Dosažené výsledky pro aktivní prvky ZyXel

Tabulky 4.3, 4.4, 4.5 a 4.6 zobrazují naměřené výsledky pro jednotlivé služby (v konfiguračním testu), které byly nadefinovány (viz tab. 4.1 a tab. 4.2). Tabulka 4.7 zobrazuje naměřené hodnoty ve výkonovém testu. V měření živé sítě nebyl připojen proměnný útlumový člen. Tabulky 4.3, 4.4, 4.5, 4.6 a 4.7 neobsahují veškerá data, která měřicí přístroj ukládá do reportu. Reporty jsou uloženy k nahlédnutí na příloženém DVD disku.

Tab. 4.3: Naměřené hodnoty pro službu VoIP dle standardu ITU-T Y.156.

Krok	Přenosová rychlost [Mb/s]	Kolísání zpoždění [ms]	Ztrátovost [%]	Zpoždění [ms]
50 % CIR	2,212	0,899	0	1,644
75 % CIR	3,318	1,061	0	1,497
90 % CIR	3,982	1,055	0	1,535
CIR	4,425	1,091	0	1,532
EIR	4,651	1,007	0	1,447
Přesah	4,9	0,255	0	0,797

Tab. 4.4: Naměřené hodnoty pro službu IPTV ve standardním rozlišení dle standardu ITU-T Y.156.

Krok	Přenosová rychlost [Mb/s]	Kolísání zpoždění [ms]	Ztrátovost [%]	Zpoždění [ms]
50 % CIR	7,947	0,843	0	1,819
75 % CIR	11,92	0,824	0	1,918
90 % CIR	14,302	0,761	0	1,811
CIR	15,893	0,872	0	1,901
EIR	16,002	0,796	0	1,879
Přesah	16,5	0,787	0	1,841

Z výsledků je patrné, že parametry zcela vyhovují definicím (viz tab. 1.11). Zpoždění nepřesáhlo 2,1 ms, což lze považovat za dostačující hodnotu pro veškeré testované služby, stejně tak pro nulovou ztrátovost.

Tab. 4.5: Naměřené hodnoty pro službu IPTV ve vysokém rozlišení dle standardu ITU-T Y.156.

Krok	Přenosová rychlost [Mb/s]	Kolísání zpoždění [ms]	Ztrátovost [%]	Zpoždění [ms]
50 % CIR	21,186	1,039	0	2,079
75 % CIR	31,777	1,059	0	1,929
90 % CIR	38,137	1,118	0	1,94
CIR	42,372	0,302	0	1,317
EIR	42,6	0,27	0	1,248
Přesah	43	0,306	0	1,377

Tab. 4.6: Naměřené hodnoty pro službu přenos dat dle standardu ITU-T Y.156.

Krok	Přenosová rychlost [Mb/s]	Kolísání zpoždění [ms]	Ztrátovost [%]	Zpoždění [ms]
50 % CIR	17,498	1,257	0	1,923
75 % CIR	26,247	1,295	0	2,043
90 % CIR	31,5	1,205	0	1,854
CIR	35	1,262	0	1,939
EIR	36,5	1,322	0	1,983
Přesah	37,495	1,269	0	1,991

Tab. 4.7: Naměřené hodnoty ve výkonovém testu dle standardu ITU-T Y.156.

Služba	Propustnost [Mb/s]	Kolísání zpoždění [ms]	Ztrátovost [%]	Zpoždění [ms]
VoIP	4,424	0,355	0	1,422
IPTV-SDTV	15,889	0,363	0	1,418
IPTV-HDTV	42,371	0,365	0	1,427
Data	35	0,356	0	1,419

4.1.4 Dosažené výsledky pro aktivní prvky XDK

Aktivní prvky XDK jsou čínskými zařízeními, která splňují požadavky Čínského telekomu. Tabulky 4.8, 4.9, 4.10 a 4.11 zobrazují naměřené výsledky pro jednotlivé služby (v konfiguračním testu), které byly nadefinovány (viz tab.4.1 a tab.4.2). Tabulka 4.12 zobrazuje naměřené hodnoty ve výkonovém testu. V měřené živé síti nebyl připojen proměnný útlumový člen.

Tab. 4.8: Naměřené hodnoty pro službu VoIP dle standardu ITU-T Y.156.

Krok	Přenosová rychlost [Mb/s]	Kolísání zpoždění [ms]	Ztrátovost [%]	Zpoždění [ms]
50 % CIR	2,211	3,92	0	4,568
75 % CIR	3,318	4,111	0	4,636
90 % CIR	3,982	4,174	0	4,621
CIR	4,423	4,297	0	4,744
EIR	4,647	4,22	0	4,65
Přesah	4,903	0,324	0	4,186

Tab. 4.9: Naměřené hodnoty pro službu IPTV ve standardním rozlišení dle standardu ITU-T Y.156.

Krok	Přenosová rychlost [Mb/s]	Kolísání zpoždění [ms]	Ztrátovost [%]	Zpoždění [ms]
50 % CIR	7,941	2,964	0	4,791
75 % CIR	11,918	3,504	0	4,941
90 % CIR	14,301	3,507	0	5,005
CIR	15,885	3,449	0	4,897
EIR	16	3,511	0	4,936
Přesah	16,495	3,442	0	4,946

Tab. 4.10: Naměřené hodnoty pro službu IPTV ve vysokém rozlišení dle standardu ITU-T Y.156.

Krok	Přenosová rychlost [Mb/s]	Kolísání zpoždění [ms]	Ztrátovost [%]	Zpoždění [ms]
50 % CIR	21,185	3,459	0	4,967
75 % CIR	31,776	3,945	0	4,949
90 % CIR	38,162	4,003	0	4,793
CIR	42,371	0,351	0	1,305
EIR	42,603	0,287	0	1,212
Přesah	43,001	0,355	0	1,258

Tab. 4.11: Naměřené hodnoty pro službu přenos dat dle standardu ITU-T Y.156.

Krok	Přenosová rychlost [Mb/s]	Kolísání zpoždění [ms]	Ztrátovost [%]	Zpoždění [ms]
50 % CIR	17,511	4,241	0	4,924
75 % CIR	26,247	4,231	0	4,976
90 % CIR	31,5	4,189	0	4,992
CIR	35,005	4,338	0	5,125
EIR	36,491	4,299	0	4,986
Přesah	37,488	4,358	0	4,022

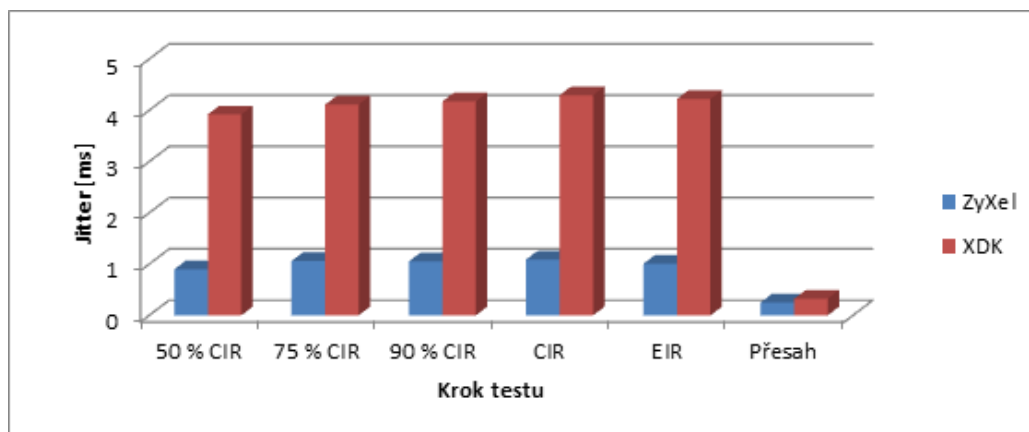
Tab. 4.12: Naměřené hodnoty ve výkonovém testu dle standardu ITU-T Y.156.

Služba	Propustnost [Mb/s]	Kolísání zpoždění [ms]	Ztrátovost [%]	Zpoždění [ms]
VoIP	4,424	0,418	0	3,324
IPTV-SDTV	15,889	0,391	0	3,324
IPTV-HDTV	42,371	0,391	0	3,324
Data	35	0,374	0	3,324

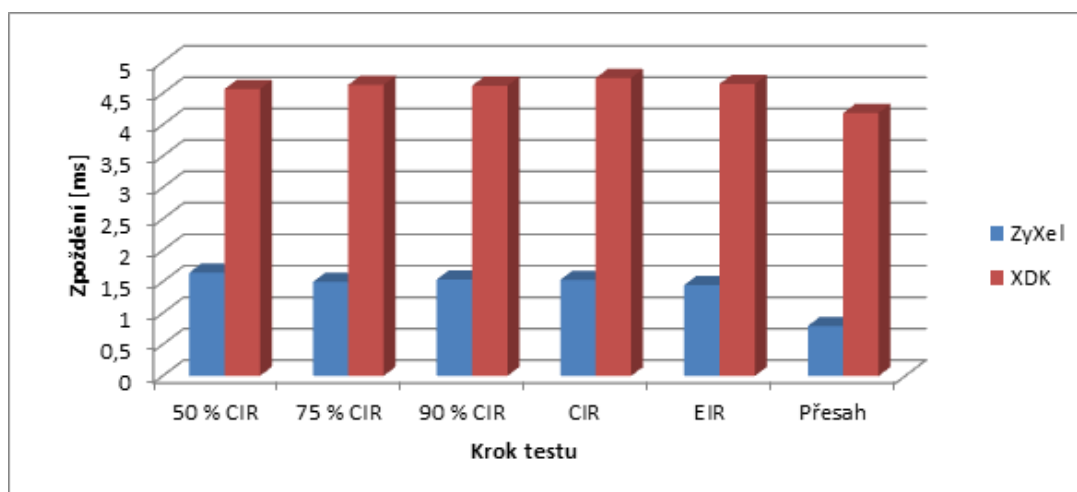
Stejně tak jako pro zařízení společnosti ZyXel, tak pro tato čínská zařízení platí, že testy úspěšně absolvovaly. Dosažené výsledky se však značně liší, zejména ve zpoždění a kolísání zpoždění (Jitter), kde čínské zařízení vykazuje prakticky 2× vyšší zpoždění a kolísání zpoždění, než zařízení společnosti ZyXel.

Grafické srovnání výsledků

Pro grafické srovnání byla zvolena služba VoIP - přenos hlasu. Tato služba je velmi citlivá jak na kolísání zpoždění, tak na zpoždění samotné. Přestože jsou výsledky značně rozdílné, jak již bylo zmíněno (místy se liší až čtyřnásobně), přesto jsou naměřené parametry zcela dostačující pro provoz této služby.



Obr. 4.2: Grafické srovnání kolísání zpoždění u přenosu hlasu na aktivních prvcích ZyXel a XDK.



Obr. 4.3: Grafické srovnání zpoždění u přenosu hlasu na prvcích ZyXel a XDK.

4.1.5 Dosažené výsledky pro aktivní prvky ZyXel (16,1 dB)

Test byl uskutečněn znovu tentokrát s připojeným útlumovým členem v síti. Hodnota útlumového členu byla nastavená pomocí testu Traffic Generator. Podstata testu spočívala v kontinuálním generování síťového provozu. Při zvyšování vloženého útlumu byla sledována propustnost a indikační diody na optickém síťovém zakončení (indikují stav linky). Hodnota proměnného útlumu byla postupně zvyšována a nastavena na maximální úroveň, kdy síť ještě pracovala. Pro zařízení ZyXel bylo specifické poklesnutí propustnosti (při vloženém útlumu 16,1 dB) na hodnotu okolo 70 Mb/s. Další zvýšení hodnoty útlumu by vedlo ke ztrátě konektivity. Pro zařízení ZyXel byla zvolena hraniční hodnota útlumu 16,1 dB. Zvýšení vloženého útlumu na hodnotu 16,15 dB vedlo ke ztrátě konektivity. Tabulky 4.13, 4.14, 4.15 a 4.16 zobrazují hodnoty pro konfigurační test a tabulka 4.17 zobrazuje hodnoty pro výkonový test.

Tab. 4.13: Naměřené hodnoty pro službu VoIP při vloženém útlumu 16,1 dB dle standardu ITU-T Y.156.

Krok	Přenosová rychlost [Mb/s]	Kolísání zpoždění [ms]	Ztrátovost [%]	Zpoždění [ms]
50 % CIR	2,211	1,675	0,046	2,341
75 % CIR	3,314	1,865	0,122	2,361
90 % CIR	3,976	1,929	0,127	2,522
CIR	4,411	2,072	0,286	2,517
EIR	4,641	1,983	0,185	2,439
Přesah	4,89	1,017	0,206	1,681

Tab. 4.14: Naměřené hodnoty pro službu IPTV ve standardním rozlišení při vloženém útlumu 16,1 dB dle standardu ITU-T Y.156.

Krok	Přenosová rychlost [Mb/s]	Kolísání zpoždění [ms]	Ztrátovost [%]	Zpoždění [ms]
50 % CIR	7,93	1,818	0,197	2,94
75 % CIR	11,893	1,303	0,206	2,779
90 % CIR	14,266	2,916	0,25	3,747
CIR	15,872	1,536	0,112	2,602
EIR	15,93	1,549	0,446	2,624
Přesah	16,47	1,562	0,189	2,626

Tab. 4.15: Naměřené hodnoty pro službu IPTV ve vysokém rozlišení při vloženém útlumu 16,1 dB dle standardu ITU-T Y.156.

Krok	Přenosová rychlost [Mb/s]	Kolísání zpoždění [ms]	Ztrátovost [%]	Zpoždění [ms]
50 % CIR	21,163	1,729	0,116	2,749
75 % CIR	31,715	1,904	0,218	2,761
90 % CIR	38,041	1,938	0,246	2,848
CIR	42,243	1,023	0,316	2,097
EIR	42,466	2,002	0,319	3,03
Přesah	42,868	1,998	0,311	2,909

Tab. 4.16: Naměřené hodnoty pro službu přenos dat při vloženém útlumu 16,1 dB dle standardu ITU-T Y.156.

Krok	Přenosová rychlost [Mb/s]	Kolísání zpoždění [ms]	Ztrátovost [%]	Zpoždění [ms]
50 % CIR	17,467	2,023	0,215	2,595
75 % CIR	26,196	1,983	0,217	2,794
90 % CIR	31,413	2,116	0,277	2,796
CIR	34,927	2,008	0,233	2,786
EIR	36,384	1,283	0,291	1,946
Přesah	37,416	2,135	0,229	2,779

Tab. 4.17: Naměřené hodnoty pro službu přenos dat při vloženém útlumu 16,1 dB dle standardu ITU-T Y.156.

Služba	Propustnost [Mb/s]	Kolísání zpoždění [ms]	Ztrátovost [%]	Zpoždění [ms]
VoIP	4,413	1,992	0,248	3,081
IPTV-SDTV	15,997	0,246	3,081	1,418
IPTV-HDTV	42,264	1,992	0,251	3,081
Data	34,915	1,992	0,246	3,081

4.1.6 Dosažené výsledky pro aktivní prvky XDK (15,4 dB)

Pomocí testu Traffic Generator byla nastavena hodnota útlumového členu na 15,4 dB. Tabulky 4.18, 4.19, 4.20 a 4.21 zobrazují hodnoty z konfiguračního testu a tabulka 4.22 naměřené hodnoty pro výkonový test.

Tab. 4.18: Naměřené hodnoty pro službu VoIP při vloženém útlumu 15,4 dB dle standardu ITU-T Y.156.

Krok	Přenosová rychlost [Mb/s]	Kolísání zpoždění [ms]	Ztrátovost [%]	Zpoždění [ms]
50 % CIR	2,212	3,92	0,011	4,572
75 % CIR	3,317	4,127	0	4,639
90 % CIR	3,98	4,175	0,006	4,639
CIR	4,425	4,218	0,011	4,672
EIR	4,651	4,211	0,011	4,639
Přesah	4,651	4,291	0,005	4,912

Tab. 4.19: Naměřené hodnoty pro službu IPTV ve standardním rozlišení při vloženém útlumu 15,4 dB dle standardu ITU-T Y.156.

Krok	Přenosová rychlost [Mb/s]	Kolísání zpoždění [ms]	Ztrátovost [%]	Zpoždění [ms]
50 % CIR	7,939	2,964	0,112	4,918
75 % CIR	11,915	3,43	0,037	4,857
90 % CIR	14,288	7,127	0,62	4,754
CIR	15,893	3,514	0,028	4,892
EIR	15,998	3,479	0,084	4,802
Přesah	16,489	3,619	0,095	4,802

Tab. 4.20: Naměřené hodnoty pro službu IPTV ve vysokém rozlišení při vloženém útlumu 15,4 dB dle standardu ITU-T Y.156.

Krok	Přenosová rychlost [Mb/s]	Kolísání zpoždění [ms]	Ztrátovost [%]	Zpoždění [ms]
50 % CIR	21,162	3,736	0,095	4,946
75 % CIR	31,752	3,637	0,091	5,142
90 % CIR	38,11	4,191	0,076	4,984
CIR	42,333	4,319	0,095	5,264
EIR	42,569	4,32	0,073	5,344
Přesah	42,957	3,777	0,104	4,762

Tab. 4.21: Naměřené hodnoty pro službu přenos dat při vloženém útlumu 15,4 dB dle standardu ITU-T Y.156.

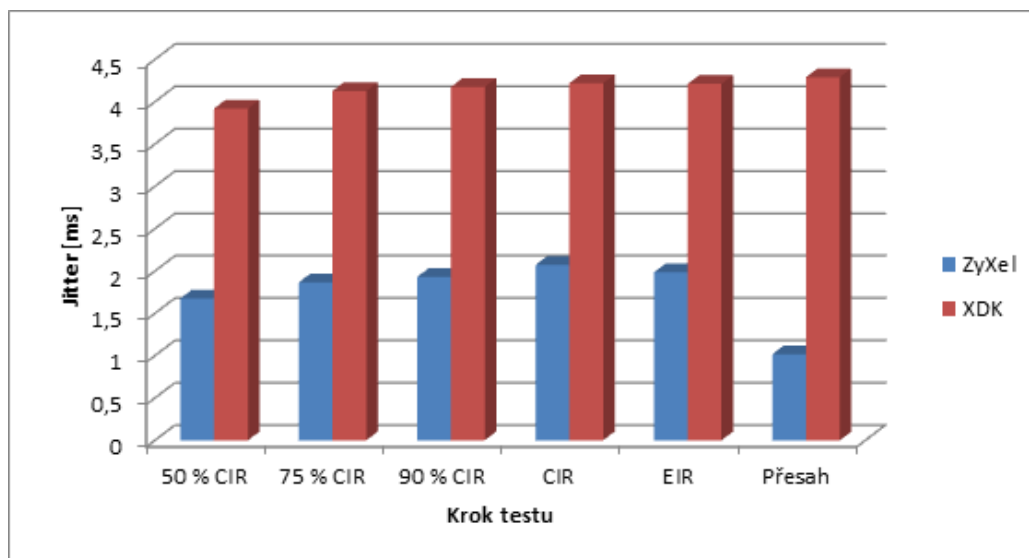
Krok	Přenosová rychlost [Mb/s]	Kolísání zpoždění [ms]	Ztrátovost [%]	Zpoždění [ms]
50 % CIR	17,472	4,236	0,088	4,926
75 % CIR	26,242	4,25	0,05	4,992
90 % CIR	31,481	4,219	0,037	4,979
CIR	34,97	4,302	0,067	5,118
EIR	36,475	4,273	0,05	4,992
Přesah	37,492	4,22	0,041	4,96

Tab. 4.22: Naměřené hodnoty ve výkonovém testu při vloženém útlumu 15,4 dB dle standardu ITU-T Y.156.

Služba	Propustnost [Mb/s]	Kolísání zpoždění [ms]	Ztrátovost [%]	Zpoždění [ms]
VoIP	4,423	4,349	0,012	5,359
IPTV-SDTV	15,873	4,314	0,099	5,359
IPTV-HDTV	42,331	4,317	0,095	5,359
Data	34,977	4,317	0,05	5,359

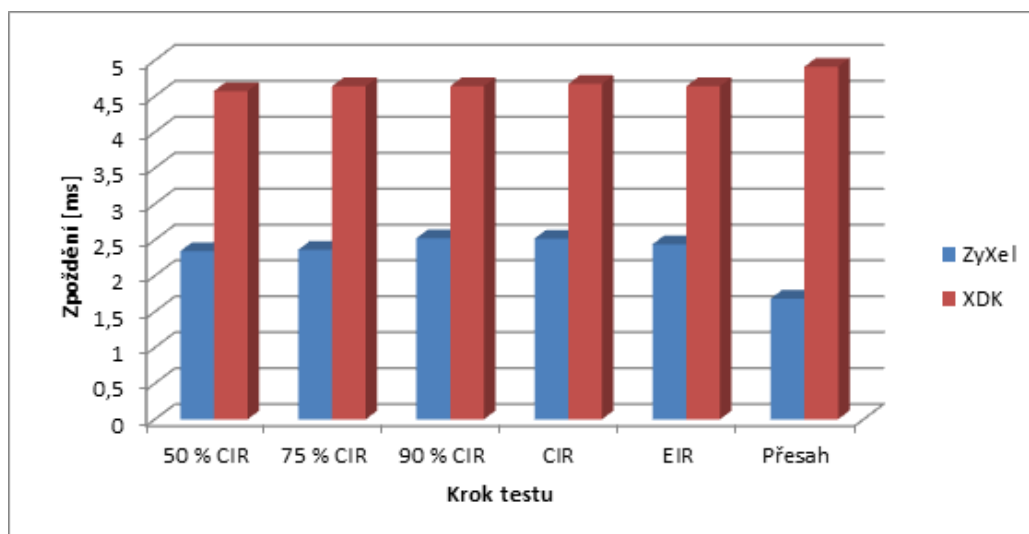
Grafické srovnání výsledků

Stejně jako v předchozím grafickém srovnání byla vybrána služba VoIP - přenos hlasu - z důvodu možnosti srovnání s předešlými výsledky. Hodnoty vložených útlumu se od sebe liší, mohou ale být brány jako hraniční, neboť by při jejich zvýšení mohlo dojít ke ztrátě konektivity.

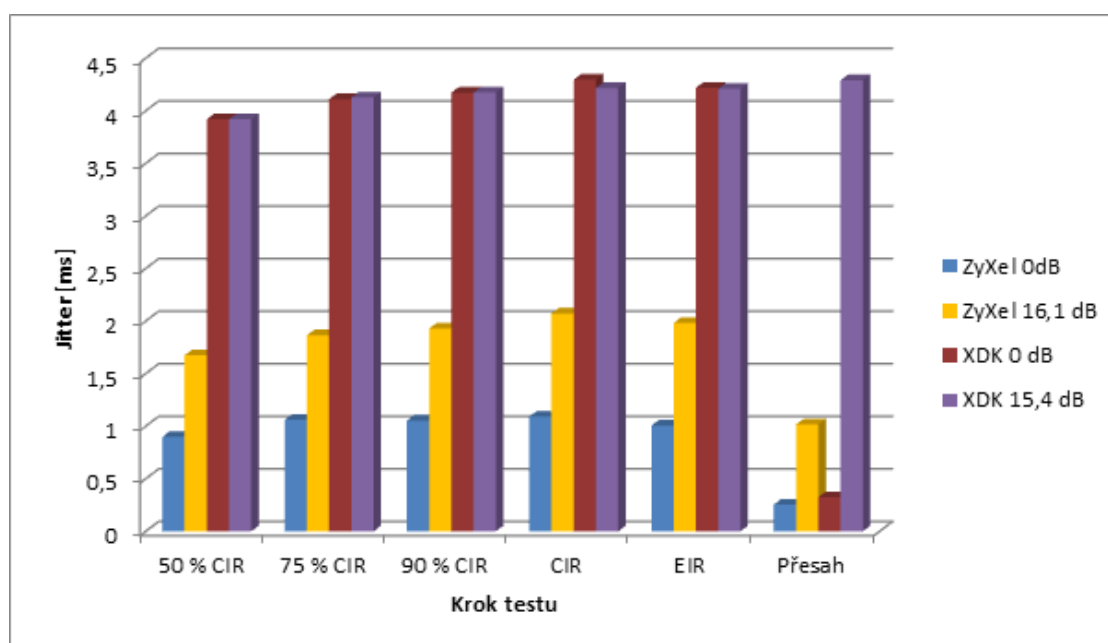


Obr. 4.4: Grafické srovnání kolísání zpoždění u přenosu hlasu s vloženými útlumy na prvcích ZyXel a XDK.

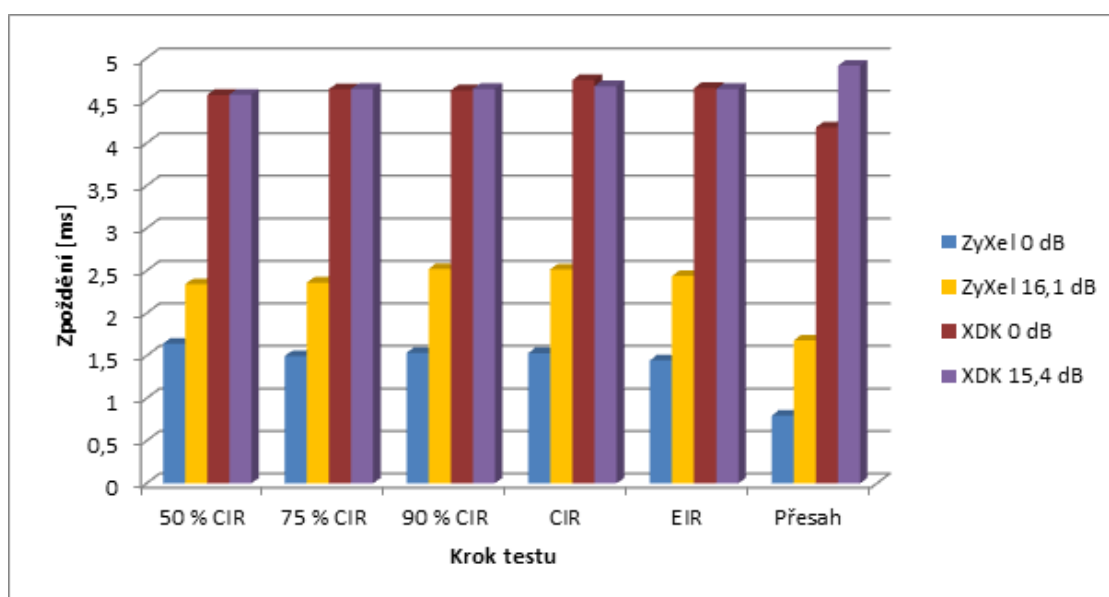
Z obr. 4.6 a 4.7 je patrný nárůst hodnot zpoždění pro zařízení ZyXel v momentě zvýšení vloženého útlumu. Oproti tomu zařízení XDK si drží prakticky shodné údaje, které se o mnoho neliší. Výjimku tvoří pouze měření přesahu. Zařízení XDK také vykazovalo po celou dobu navázané spojení. Projevovaly se však občasné výpadky. Tyto výpadky se vyskytovaly při vloženém útlumu 15,45 dB. Proto byla finální hodnota nastavená na 15,4 dB. Při této hodnotě spojení nebylo přerušováno a nebylo tudíž potřeba testy opakovat.



Obr. 4.5: Grafické srovnání zpoždění u přenosu hlasu s vloženými útlumy na prvcích ZyXel a XDK.



Obr. 4.6: Porovnání obou výsledků kolísání zpoždění pro zařízení ZyXel a XDK dle ITU-T Y.156.



Obr. 4.7: Porovnání obou výsledků zpoždění pro zařízení ZyXel a XDK dle ITU-T Y.156.

4.1.7 BERT

Dalším z prováděných testů na živé síti byl BERT (Bit Error Rate Testing). Princip testu je zcela jednoduchý. Zdroj dat (měřicí přístroj) vyšle data o určitém počtu a čeká kolik z nich je odesláno zpátky. Pokud dojde ke změně rámce, je tento rámec vyhodnocen jako chybný. Samotný test nevyžaduje nikterak složité nastavení. Postačuje nastavit následující hodnoty: pseudonáhodné posloupnosti, velikost rámce, čas bez provozu a prahovou hodnotu BER. Většina z hodnot byla zanechána v defaultní hodnotě. Přesné nastavení jednotlivých hodnot zobrazuje tab. 4.23. Tabulka 4.24 zachycuje nastavené parametry z hlediska síťové vrstvy. Nastavení zobrazené v tab. 4.23 a tab. 4.24 jsou shodná jak pro obě zařízení, tak pro topologie (bez/s útlumovým členem).

Tab. 4.23: Nastavené parametry pro vyhodnocení BERT testu.

Velikost rámce [B]	64
Přenosová rychlost vysílače [Mb/s]	100
Pseudonáhodná posloupnost	$2^{31} - 1$
Čas bez provozu [ms]	50
Doba testování [s]	900
Propustnost přijímače [Mb/s]	100,002

Tab. 4.24: Nastavení parametrů pro společnou komunikaci při BERT testu.

Parametr	Zdroj - EXFO	Cíl - EXFO
Verze IP protokolu	4	4
MAC adresa	00:03:01:FD:9F:EC	00:21:CE:0C:3C:69
IP adresa	192.168.1.4	192.168.1.1
UDP port	49184	7
Rámce	Ethernet/IPv4/UDP	—

Naměřené výsledky

Doba testování byla stanovena na 15 minut a po uplynutí testů byly uloženy reporty vygenerované měřicím přístrojem EXFO FTB-860 NetBlazer. Hodnoty u testů bez útlumového článku dopadly zcela shodně. Hodnota BER byla rovna nule. Na přiloženém DVD jsou však v reportech zaznamenány i jiné chybovosti ($BER_{ZyXel} = 1,6 \cdot 10^{-9}$ a $BER_{XDK} = 5,5 \cdot 10^{-10}$). Tyto hodnoty byly způsobeny injektovanou umělou chybou, konkrétně samotným měřicím přístrojem po stisku tlačítka *INJECT* během testování.

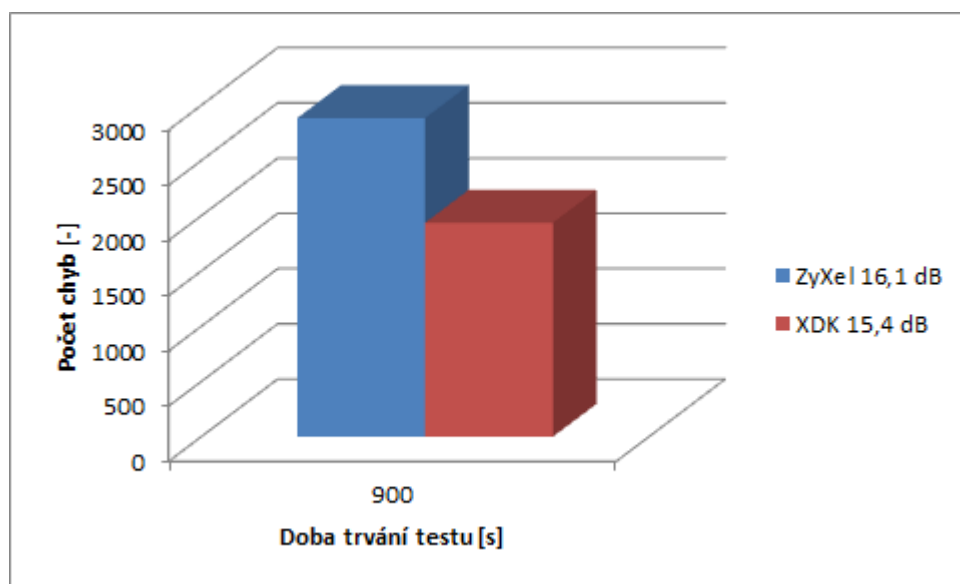
Výsledky testů při vloženém útlumu (ZyXel zařízení 16,2 dB a XDK zařízení 15,4 dB) jsou zobrazeny v tab. 4.25 a tab. 4.26. Z výsledků je patrné, že zařízení ZyXel vykazovalo chybovost $3,2 \cdot 10^{-5}$, zatímco chybovost zařízení XDK byla $8 \cdot 10^{-5}$. Naměřené hodnoty nabývají velmi podobných hodnot, neliší se v exponentu ale pouze v udávaném množství. Zajímavé je však porovnání počtu chybných rámců. Zařízení ZyXel po dobu testování (15 minut) detekovalo 2884 chyb. Oproti tomu zařízení XDK za stejnou dobu detekovalo přibližně o tisíc chyb méně, přesněji 1937 chyb. Rozložení chyb v nulách a jedničkách bylo téměř shodné v polovičním poměru. Grafické srovnání celkového počtu chyb zachycuje obr. 4.8. Obě naměřené hodnoty jsou v rámci normy brány jako přijatelné. Maximální chybovost, kterou je síť schopná překlenout, udává norma IEEE 802.3av jako hodnotu BER 10^{-3} [19]. Maximální chybovost v sítích, které pracují na rychlostech maximálně 1 Gb/s, je hodnota BER $2,9 \cdot 10^{-6}$ (1000BASE-PX10) a BER $1,9 \cdot 10^{-4}$ (1000BASE-PX20) [20], přičemž maximální hodnota BER je 10^{-12} [21].

Tab. 4.25: Výsledné hodnoty pro BERT test při vloženém útlumu 16,1 dB (ZyXeL).

Počet chyb	2884	$3,20 \cdot 10^{-5}$
Počet chybných 0	1392	$1,50 \cdot 10^{-5}$
Počet chybných 1	1492	$1,60 \cdot 10^{-5}$

Tab. 4.26: Výsledné hodnoty pro BERT test při vloženém útlumu 15,4 dB (XDK).

Počet chyb	1937	$8,0 \cdot 10^{-5}$
Počet chybných 0	970	$4,10 \cdot 10^{-5}$
Počet chybných 1	967	$4,10 \cdot 10^{-5}$



Obr. 4.8: Grafické srovnání obou výsledků BER testu při vloženém útlumu.

4.2 RFC 2544

Měření reálné sítě probíhalo pomocí dvou standardů, a sice RFC 2544 a ITU-T Y.156 (znám také pod označením Y.156sam). Standard RFC 2544 lze pojmenovat pomocí volného překladu jako „Metodika výkonnostních měření pro síťová zařízení“. Dokumenty RFC předkládají návrh možností testování a je pouze jistým doporučením. Přesněji řečeno RFC popisuje - navrhuje - testování propustnosti (Throughput), ztrátovosti (FrameLoss), zpoždění (Latency) a „propustnost s navazujícími rámci“ (Back-to-Back).

Testování propustnosti

Testování propustnosti spočívá v odesílání maximálního možného počtu rámců bez jejich zahození. Datový zdroj (tester) vygeneruje určitý počet rámců, které odešle a čeká, kolik rámců testované zařízení vrátí zpět - potvrdí. Pokud počty rámců souhlasí, vygeneruje se nový - větší - počet rámců a test se opakuje.

Testování ztrátovosti

Měření ztrátovosti částečně vychází z propustnosti. Výpočet ztrátovosti vychází ze vzorce [22]:

$$\text{ztrátovost} = \frac{(\text{počet_odeslaných_rámců} - \text{počet_přijatých_rámců})}{\text{počet_odeslaných_rámců}} * 100 \text{ [\%]}$$

Počáteční nastavení odeslaných rámců je stanoveno na 100 % propustnost linky (tedy na hodnotu udávanou výrobcem). Dalšími kroky je postupné snižování propustnosti (vždy o 10 %) do té doby, než proběhnou dva úspěšné testy po sobě (nedojde ke ztracení rámců).

Testování zpoždění

Na počátku testování je důležité správně navrhnout propustnost pro jednotlivé velikosti rámce. Následně je odeslán proud dat (stream), ve kterém je náhodně vybrán jeden rámec, který nese časovou známku 1 (časovou známku upravuje příjemce). Tato známka v sobě zahrnuje informaci o době trvání přenesení rámce od vysílače k přijímači. Při odeslání proudu dat zpět k vysílači se časová známka označí jako 2 (tuto časovou známku upravuje vysílač). Ta nese informace o době přenášení rámce. Výsledné zpoždění je udáno jako:

$$\text{zpoždění} = \text{časová_známka2} - \text{časová_známka1} \quad [\text{ms}]$$

Pro získání reálných výsledků musí být tento proces opakován nejméně 20krát. Nejkratší doba testování je 120 vteřin, přičemž pro získání reálných výsledků je ideální doba okolo 280 minut [22].

Testování propustnosti s navazujícími rámci

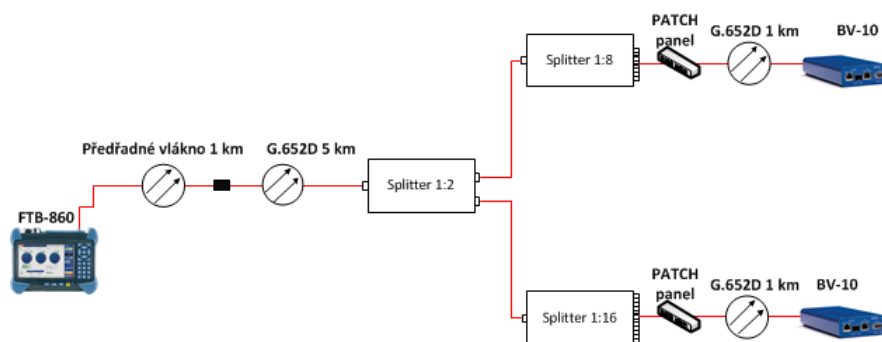
Metoda testování vychází z počátečního odeslání burstu (shluku rámců s minimální mezirámcovou mezerou) směrem k testovanému zařízení. Následně zdroj (tester) počítá, kolik rámců se vrátilo zpět. Jestliže počty souhlasí, zkrátí se mezirámcová mezera a test se opakuje. Test je opakován tolikrát, než dojde ke ztrátě rámců. Samotné testování by mělo být opakováno minimálně $50\times$ a jeho dosažené hodnoty se průměrují.

4.2.1 Naměřené výsledky

Veškeré testování sítě probíhalo pouze ve směru od optického linkového zakončení (OLT) k optickému síťovému zakončení (ONU). Testovaná topologie byla navržena z OLT a ONU jednotky, tří rozbočovačů s různými poměry dělení (1:2, 1:8 a 1:16) a optických vláken s délkou 1 a 5 km. Přesné zapojení zachycuje obr. 1. Pro změření optické trasy podle doporučení RFC 2544 byly použity přístroje EXFO FTB-860 NetBlazer a EXFO BV-10.

Přístroj EXFO FTB-860 NetBlazer nabízí širokou škálu dostupných testů (BERT, EtherSAM, RFC, výkonnost sítě aj.) pro Ethernet sítě s přenosovými rychlostmi od 10 Mb/s do 10 Gb/s a pokročilé testování Triple Play služeb. Další značnou výhodou zařízení je možnost generování reportů. Veškeré testy mohou být vykonány z combo portů (10/100/1000 Base-Tx nebo 100/1000 Base-Fx). Společnost EXFO jako první představila plnou adaptaci standardu ITU-T Y.156 (známější jako Y.156sam) ve svých měřících přístrojích.

Zařízení EXFO BV-10 sloužilo jako zpětná smyčka (loopback), která zajišťovala otáčení provozu. Nastavení přístrojů bylo řešeno čistě ze síťového pohledu (nastavení doby trvání bude upřesněno dále) a přiřazené IP adresy byly z privátního rozsahu od 192.168.0.0 do 192.168.255.255. Zdroj dat (měřák) měl nastavenou IP adresu 192.168.1.4 a zpětná smyčka 192.168.1.1. Na straně OLT byl připojen do uplinkového portu přístroj EXFO FTB-860, následně na straně ONU byla připojená zpětná smyčka EXFO BV-10. Pokud by byly k dispozici dva kusy EXFO FTB-860 a EXFO BV-10 bylo by možné měření provést v obou směrech najednou při použití rozdílných vlnových délek.



Obr. 4.9: Topologie měřené sítě dle RFC 2544.

Následující tabulky zobrazují naměřené hodnoty přístrojem EXFO FTB-860, které byly uloženy do reportů (tabulky zobrazují vybrané hodnoty). První tabulky

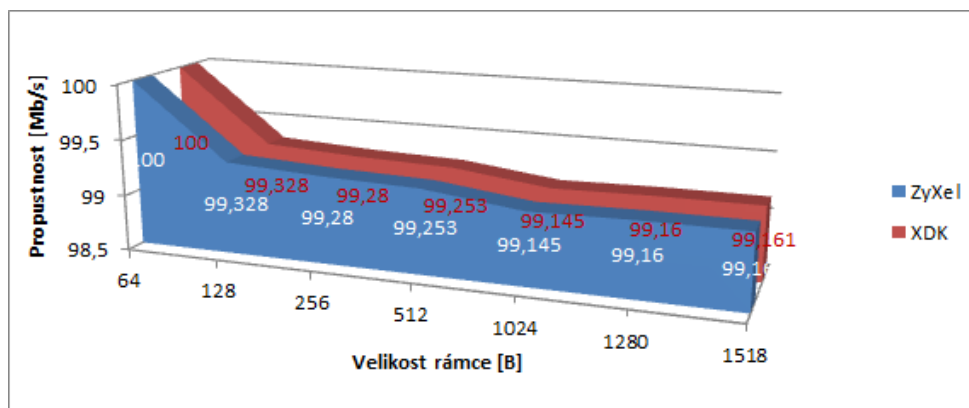
(tab. 4.27 a tab. 4.28) zobrazují hodnoty bez vloženého útlumového členu. Útlumový člen sloužil jako simulace delšího vlákna. Pomocí testu propustnosti a jeho sledování v reálném čase byl nastaven útlum, který je blízký hodnotě, při níž dojde ke ztrátě konektivity. Pro zařízení výrobce ZyXel jde o hodnotu 16,1 dB, v případě XDK výrobce se jedná o hodnotu 15,4 dB.

Tab. 4.27: Souhrn RFC výsledků bez vloženého útlumu pro zařízení ZyXel.

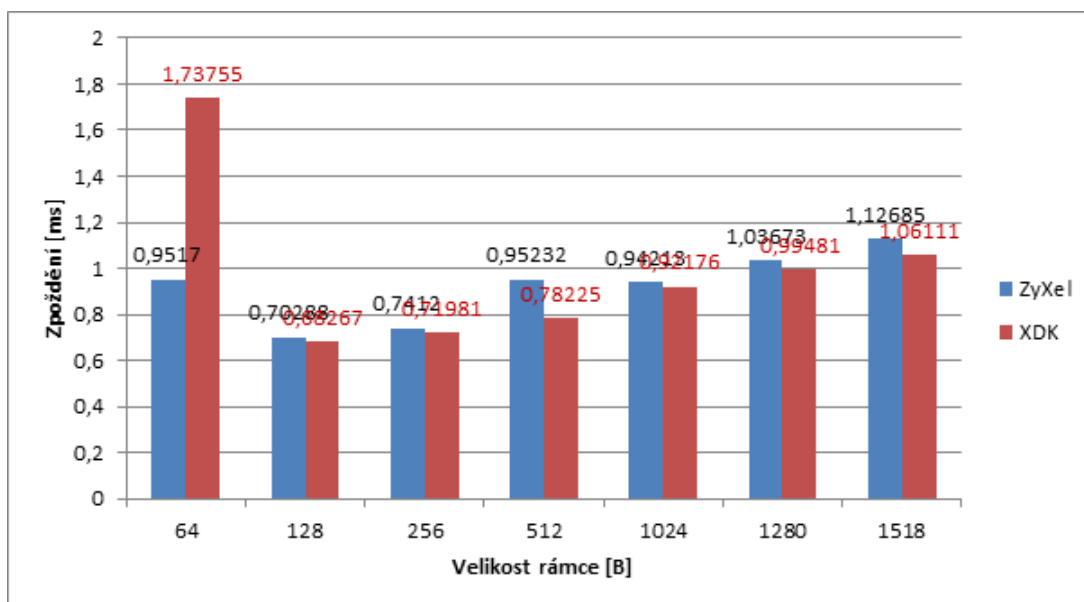
Velikost dat [B]	Propustnost [Mb/s]	Propustnost s navazujícími rámci [Mb/s]	Ztrátovost rámců [%]	Zpoždění [ms]
64	100	100	0	0,952
128	99,328	100	0	0,703
256	99,28	100	0	0,741
512	99,253	100	0	0,952
1024	99,145	100	0	0,942
1280	99,16	100	0	1,037
1518	99,161	100	0	1,127

Tab. 4.28: Souhrn RFC výsledků bez vloženého útlumu pro zařízení XDK.

Velikost dat [B]	Propustnost [Mb/s]	Propustnost s navazujícími rámci [Mb/s]	Ztrátovost rámců [%]	Zpoždění [ms]
64	100	100	0	1,738
128	99,328	100	0	0,683
256	99,28	100	0	0,72
512	99,253	100	0	0,782
1024	99,145	100	0	0,922
1280	99,16	100	0	0,995
1518	99,161	100	0	1,061



Obr. 4.10: Závislost propustnosti na délce rámce dle RFC 2544.



Obr. 4.11: Závislost zpoždění na délce rámce dle RFC 2544.

Při testování zařízení společnosti ZyXel došlo k zajímavému jevu. Při zvyšování útlumu, zcela podle očekávání, klesala propustnost. Zajímavý je údaj z tab. 4.31 a tab. 4.32, kde je vidno, že při posledním „hraničním“ kroku zvýšení útlumu o pouhých 0,05 dB došlo zcela ke ztrátě spojení a konektivity, přičemž předcházející hodnota propustnosti byla relativně stále dosti vysoká.

Zařízení XDK naopak pracují zcela odlišně v závislosti na použité velikosti rámce. Z dosažených výsledků je tedy zřejmé, že vkládání vyššího útlumu do přenosové trasy má za následek zvýšení režie a tím tedy snížení propustnosti.

Tab. 4.29: Souhrn RFC výsledků s vloženým útlumem 15,4 dB pro zařízení ZyXeL.

Velikost dat [B]	Propustnost [Mb/s]
64	100
128	99,328
256	99,28
512	99,253
1024	99,145
1280	99,16
1518	99,161

Tab. 4.30: Souhrn RFC výsledků s vloženým útlumem 15,95 dB pro zařízení ZyXeL.

Velikost dat [B]	Propustnost [Mb/s]
64	100
128	99,328
256	99,28

Tab. 4.31: Souhrn RFC výsledků s vloženým útlumem 16,1 dB pro zařízení ZyXeL.

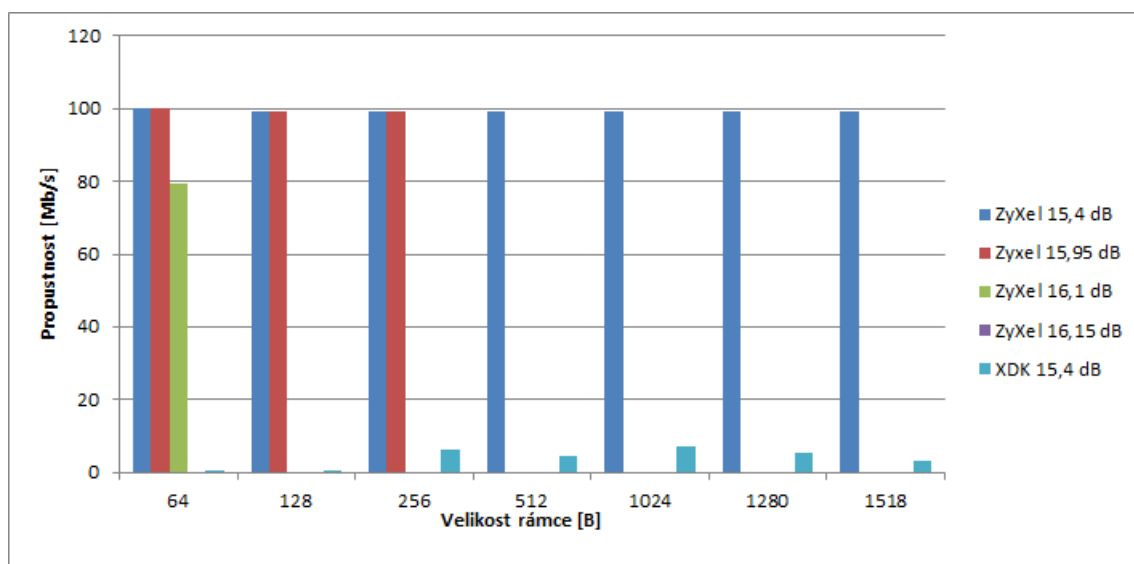
Velikost dat [B]	Propustnost [Mb/s]
64	79,245

Tab. 4.32: Souhrn RFC výsledků s vloženým útlumem 16,15 dB pro zařízení ZyXeL.

Velikost dat [B]	Propustnost [Mb/s]
64	0

Tab. 4.33: Přehled RFC výsledků s vloženým útlumem 15,4 dB v topologii se zařízeními XDK.

Velikost dat [B]	Propustnost [Mb/s]
64	0,619
128	0,738
256	6,139
512	4,335
1024	7,052
1280	5,171
1518	3,379



Obr. 4.12: Závislost propustnosti na délce rámce a vloženého útlumu dle RFC 2544.

5 SIMULAČNÍ MODEL SÍTĚ

Poslední kapitolou je navržený simulační model sítě, který je navržen v simulačním programu OptSim 5.2. Simulační model byl simulován s různými hodnotami attenuátoru a dosažené výsledky byly porovnány s naměřenými výsledky.

5.1 OptSim

Simulační program OptSim 5.2 nabízí bohaté možnosti k simulaci různých technologií. Díky svému přehlednému grafickému rozhraní (viz obr. 5.1) umožňuje vytvářet scénáře pro simulace. Aplikace umožňuje simulovat optické sítě s DWDM, CWDM, OTDM, CATV, FTTx metody a další. Značnou výhodou přináší možnost navržení topologie v blocích nebo po vzorcích, kterou lze propojit s kódem z Matlabu pro vlastní prvek nebo zpracování. I pro neznalého uživatele, který se v programu neorientuje, nabízí OptSim tzv. ukázkové modely, jak ve vzorkovém režimu, tak v blokovém režimu.

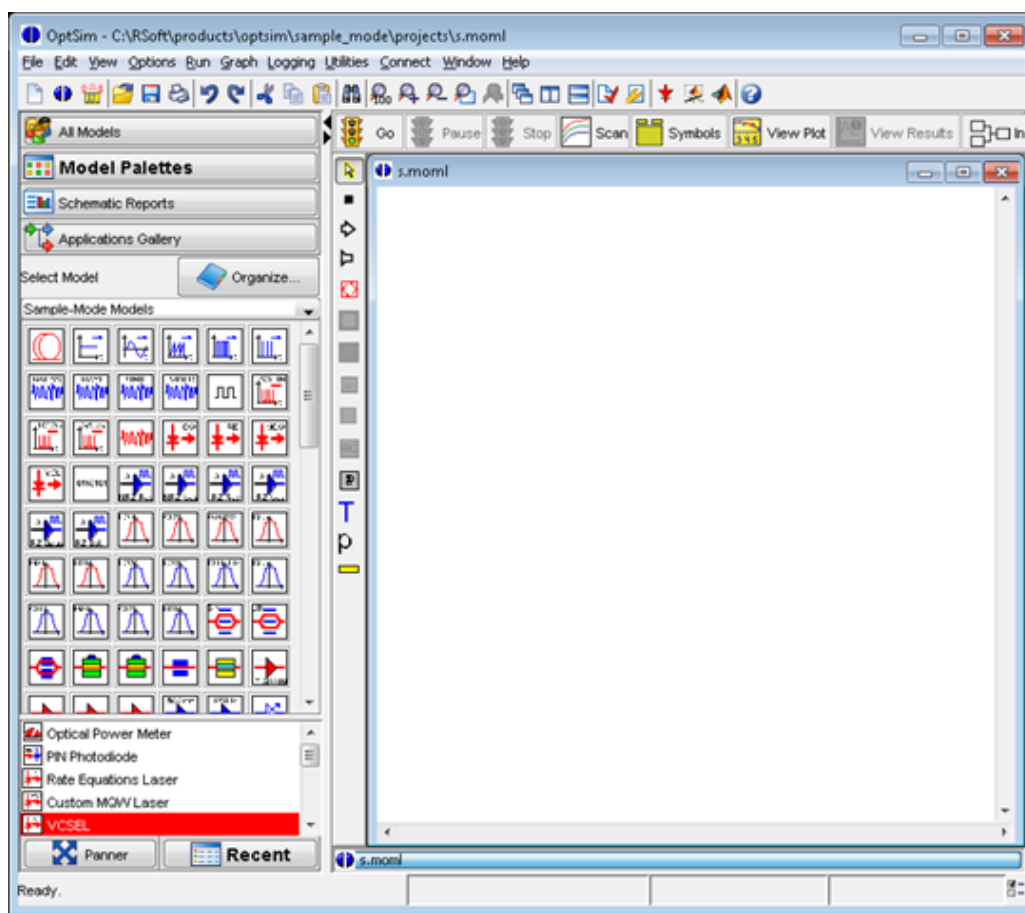
Návrh optické sítě v programu OptSim umožňuje exemplárně prověřit navrženou optickou síť před její výstavbou. Rovněž umožní demonstrativní připojení optických měřicích přístrojů a zobrazení jejich výsledků: chybovosti BER, diagram oka, proměnlivost zpoždění, otevřenost oka, mezisymbolovou interferenci, výkonové úrovně, optické spektrum, elektrické spektrum a další.

Nevýhodou aplikace je absence OTDR měřicí metody a absence obousměrného simulování (obousměrné simulování lze částečně nahradit přivedením zpětných smyček). Simulace probíhá pouze blok po bloku, kdy jsou data z jednoho bloku předána bloku dalšímu.

Tato podkapitola řeší návrh měřené topologie, z důvodu možnosti porovnat výsledky samotného měření se simulací. Na úvod je potřeba zmínit, že simulační program OptSim 5.2 nedisponuje linkovou vrstvou síťového modelu RM ISO/OSI, což se může mnohdy jevit jako problém.

Značnou výhodou tohoto programu je jeho vysoká variabilita nastavení a možnost demonstrovat, kde se v reálné síti připojují měřicí přístroje. Pro simulaci reálné sítě byla navržena topologie obr. 5.2 (obrázek v plném rozlišení je přiložen na DVD disku), která je prakticky identická s měřenou topologií. K nastavení jednotlivých prvků/vzorků (dle terminologie OptSim programu) byly využity následující parametry:

- **Zdroj dat:** Přenosová rychlost: 1,25 Gb/s, Sekvence: náhodná
- **Zdroj optického záření:** Vln. délka: 1490 nm, Výkon laseru: 3,66/4,95 dBm



Obr. 5.1: Ukázka prostředí simulačního programu OptSim 5.2.

- **Generátor pulzů:** Nízká/vysoká úroveň: 0/5 V
- **Optická vlákna:** Délka: 1 a 5 km, útlum: 0,2 dB/km
- **Simulace spojek:** 1 dB
- **Útlum rozbočovače 1:2:** 3,5 dB
- **Útlum rozbočovače 1:8:** 9,7 dB
- **Útlum rozbočovače 1:16:** 12,6 dB

Detailní nastavení jednotlivých vzorků je přiloženo na DVD médiu.

Celá topologie sestává z optického vlákna délky 1 a 5 km, optického linkového zakončení (OLT) a z optického síťového zakončení. Simulační program OptSim 5.2 umožňuje vytvoření topologie, jak již bylo zmíněno, ve dvou návrzích, a to blokovém a vzorkovém. Veškeré simulace v rámci diplomové práce jsou zhotoveny ve vzorkovém editoru. Rovněž je potřeba zmínit, že veškeré aktivní prvky je potřeba ve vzorkovém editoru vytvořit. Schéma odpovídající OLT jednotce odpovídá obr. 5.3, schéma ONU je následně na obr. 5.4.

V rámci simulování je možno spolu porovnat pouze výsledky testu BER (Bit Error Rate) při různých hodnotách proměnného útlumu. Při měření byly pouze dvě možnosti, a sice zapojení živé sítě bez proměnného útlumu a zapojení živé sítě s proměnným útlumem. Schéma zapojení se nijak neliší pro obě značky aktivních prvků (mění se pouze nastavení vysílacího výkonu zdroje záření). Hodnota útlumového členu pro zařízení ZyXel byla stanovena na 16,1 dB, pro zařízení XDK na 15,4 dB. Simulace probíhala na různých hodnotách útlumu, aby bylo možné detailně sledovat změny hodnoty BER. Hodnoty BER byly měřeny pomocí měřicího přístroje (označen v topologii jako *pestim*) a odečítány z digramu oka. Hodnoty získané simulacemi pro ZyXel zobrazuje tab.5.1, pro zařízení XDK tab.5.2. Zvýrazněné hodnoty vloženého útlumu symbolizují hraniční hodnoty vloženého útlumu.

Tab. 5.1: Hodnoty získané simulacemi pro zařízení ZyXel.

Vložený útlum [dB]	BER (diagram oka)	BER (pestim)
0	$1 \cdot 10^{-40}$	$1 \cdot 10^{-40}$
10	$4,1 \cdot 10^{-35}$	$4,09 \cdot 10^{-35}$
12,5	$3,52 \cdot 10^{-27}$	$3,52 \cdot 10^{-27}$
15	$5,73 \cdot 10^{-20}$	$4,04 \cdot 10^{-21}$
16	$3,31 \cdot 10^{-18}$	$8,22 \cdot 10^{-19}$
16,1	$1,26 \cdot 10^{-17}$	$2,98 \cdot 10^{-18}$
16,5	$8,66 \cdot 10^{-17}$	$2,85 \cdot 10^{-17}$
17,5	$2,93 \cdot 10^{-14}$	$1,8 \cdot 10^{-15}$
18,5	$4,13 \cdot 10^{-12}$	$6,35 \cdot 10^{-13}$
19,5	$2,66 \cdot 10^{-10}$	$7,77 \cdot 10^{-11}$
20,5	$8,63 \cdot 10^{-9}$	$6,91 \cdot 10^{-10}$
21,5	$1,44 \cdot 10^{-7}$	$1,35 \cdot 10^{-8}$
22,5	$1,24 \cdot 10^{-6}$	$4,57 \cdot 10^{-7}$
23,5	$7,55 \cdot 10^{-6}$	$4,35 \cdot 10^{-7}$
24,5	$3,47 \cdot 10^{-5}$	$3,51 \cdot 10^{-5}$
25,5	$1,07 \cdot 10^{-4}$	$1,08 \cdot 10^{-4}$
26,5	$1,07 \cdot 10^{-4}$	$2,72 \cdot 10^{-4}$

Tab. 5.2: Hodnoty získané simulacemi pro zařízení XDK.

Vložený útlum [dB]	BER (diagram oka)	BER (pestim)
0	$1 \cdot 10^{-40}$	$1 \cdot 10^{-40}$
10	$1,29 \cdot 10^{-26}$	$1,29 \cdot 10^{-26}$
11,5	$4,8 \cdot 10^{-24}$	$4,8 \cdot 10^{-24}$
12,5	$7,38 \cdot 10^{-22}$	$7,38 \cdot 10^{-22}$
13,5	$7,38 \cdot 10^{-23}$	$1,37 \cdot 10^{-19}$
14,5	$2,54 \cdot 10^{-17}$	$2,54 \cdot 10^{-17}$
15	$3,23 \cdot 10^{-16}$	$3,23 \cdot 10^{-16}$
15,2	$8,8 \cdot 10^{-16}$	$8,8 \cdot 10^{-16}$
15,4	$2,37 \cdot 10^{-15}$	$2,37 \cdot 10^{-15}$
15,5	$3,86 \cdot 10^{-15}$	$3,86 \cdot 10^{-15}$
16,5	$4,18 \cdot 10^{-13}$	$4,18 \cdot 10^{-13}$
17,5	$2,34 \cdot 10^{-11}$	$2,34 \cdot 10^{-11}$
18,5	$6,98 \cdot 10^{-10}$	$6,98 \cdot 10^{-10}$
19,5	$1,44 \cdot 10^{-8}$	$1,44 \cdot 10^{-8}$
20,5	$1,88 \cdot 10^{-7}$	$1,88 \cdot 10^{-7}$
21,5	$1,49 \cdot 10^{-1}$	$1,49 \cdot 10^{-6}$
22,5	$7,22 \cdot 10^{-6}$	$7,22 \cdot 10^{-6}$
23,5	$2,91 \cdot 10^{-5}$	$2,91 \cdot 10^{-5}$
24,5	$9,78 \cdot 10^{-5}$	$9,78 \cdot 10^{-5}$
25,5	$2,65 \cdot 10^{-4}$	$2,65 \cdot 10^{-4}$
26,5	$6,36 \cdot 10^{-4}$	$6,58 \cdot 10^{-4}$

Z uvedených hodnot vyplývají výše zmíněná úskalí programu OptSim 5.2. Podle simulace by měla být síť stále schopna pracovat i s hodnotou vloženého útlumu odpovídající hodnotě 26,5 dB pro obě zařízení, neboť norma udává hodnotu, BER $1 \cdot 10^{-3}$. Samotnou simulaci lze však brát jako velmi názornou ukázkou celé topologie a představy, kde na ní měřit. Mezi hodnotami získanými z diagramu oka a z měřicího přístroje v topologii samotné nejsou patrné rozdíly. Z tohoto hlediska lze považovat simulační program jako dostatečně výkonný nástroj. Nutné je také zmínit, že hodnota při nulovém vloženém útlumu vyšla jako $1 \cdot 10^{-40}$, což je ideální údaj, který lze v OptSimu 5.2 získat, protože odpovídá prakticky nulové chybovosti.

V rámci simulování byly zobrazeny diagramy oka jak při nulovém vloženém

útlumu, tak pro hraniční hodnoty pro zařízení obou výrobců. Výsledný diagram oka bez vloženého útlumu zobrazují obr. 5.5 a obr. 5.6. Výsledné diagramy oka s vloženým útlumem (hraničních hodnot) zachycují obr.5.7 a obr. 5.8.

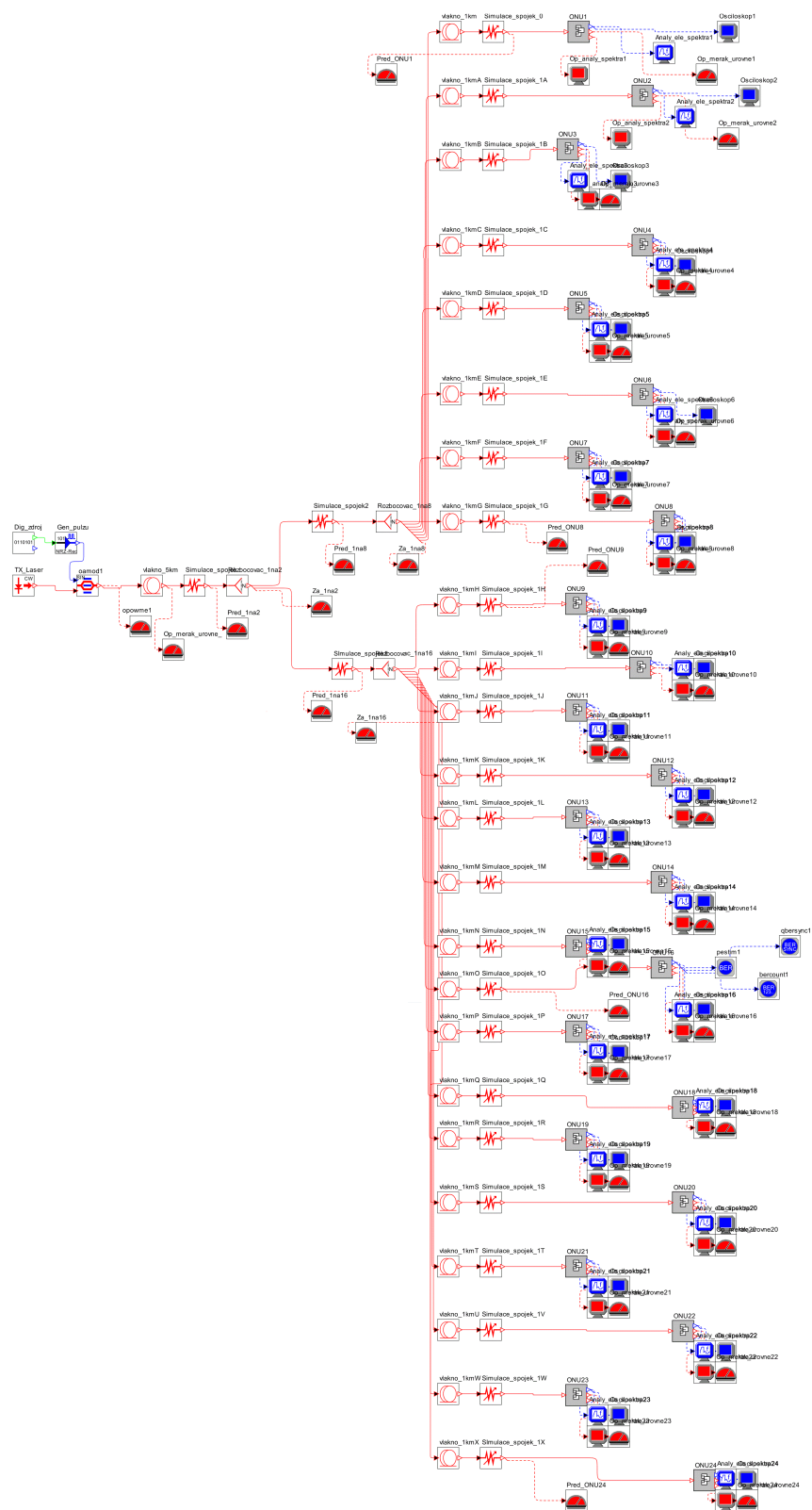
Z výsledků dle obr. 5.6 lze zjistit, že dochází k vysoké mezisymbolové interferenci, a také zmenšení otevření oka. Obecně platí čím větší otevření oka, tím menší útlum neboli rušení a tedy i vyšší kvalita signálu. Pro měření se staly tyto hodnoty hraniční. Simulace však probíhá blok po bloku, kdy parametry jednoho bloku jsou předány bloku druhému. Zcela ideální by byla simulace všeho najednou a nejlépe v reálném čase.

Co se týče výsledků zařízení XDK, může být konstatováno to stejné jako u zařízení ZyXeL. Projevila se mezisymbolová interference a zmenšení otevřenosti oka. Srovnání parametrů, které program OptSim spočítá z diagramu oka, jsou v tab. 5.3.

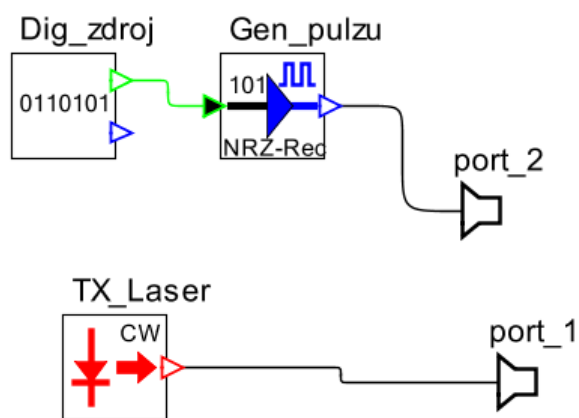
Tab. 5.3: Porovnání obou výsledných hodnot pro hraniční hodnoty vloženého útlumu.

Aktivní prvky	BER	Kolísání zpoždění [ns]
ZyXeL	$1,26 \cdot 10^{-17}$	0,020048
XDK	$2,02 \cdot 10^{-14}$	0,021713

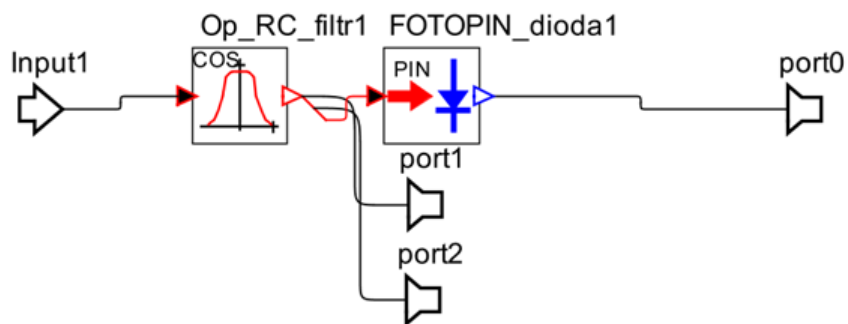
Vyrovnanost obou hodnot je značná. Markantní rozdíl je pouze v bitové chybě, která se liší prakticky o tři řády. Na základě povahy simulačního programu lze tyto výsledky považovat za orientační. Měněný parametr byl pouze výkon zdroje záření (laseru) podle dokumentace zařízení, proto jsou hodnoty pro ZyXel horší, neboť bylo potřeba překlenout daleko vyšší útlum v přenosové trase.



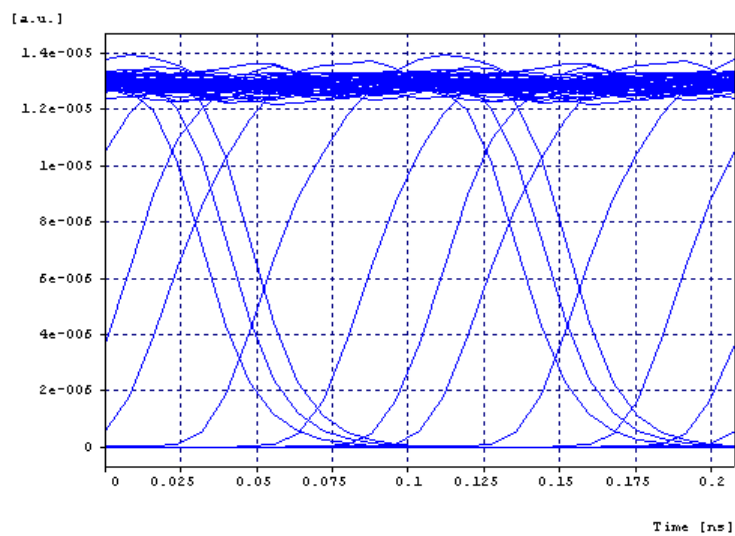
Obr. 5.2: Navržená simulační topologie odpovídající reálné měřené síti.



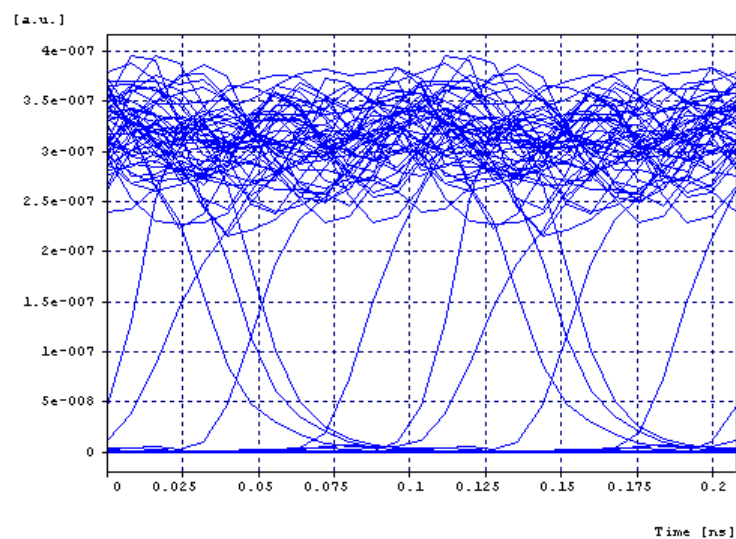
Obr. 5.3: Schéma zapojení odpovídající jednotce OLT.



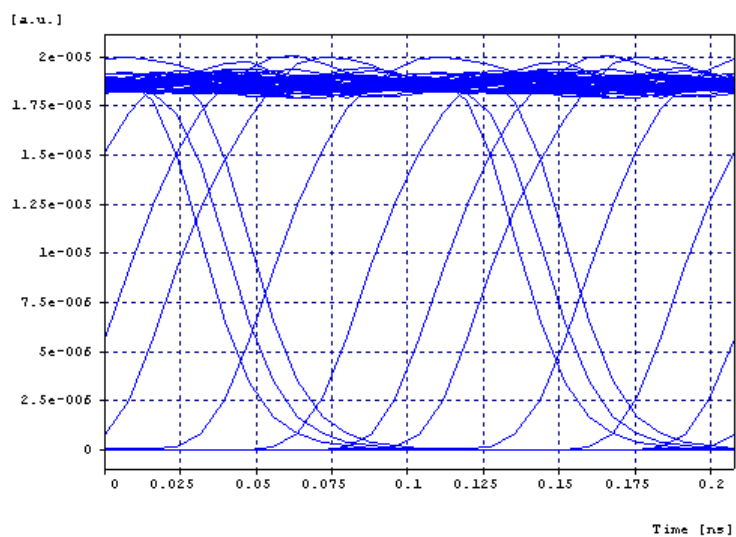
Obr. 5.4: Schéma zapojení odpovídající jednotce ONU.



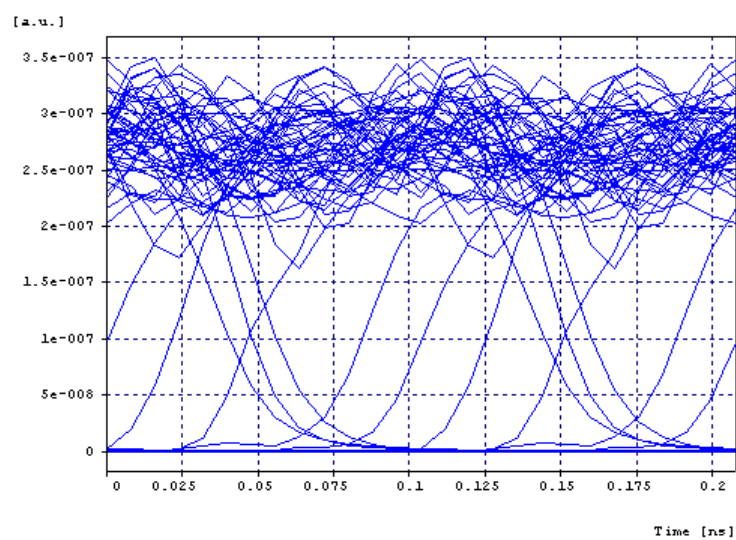
Obr. 5.5: Diagram oka pro ZyXel ONU jednotku na 8. portu rozbočovače.



Obr. 5.6: Diagram oka pro ZyXel ONU jednotku na 8. portu rozbočovače 1:16 při hodnotě vloženého útlumu 16,1 dB.



Obr. 5.7: Diagram oka pro XDK ONU jednotku na 8. portu rozbočovače.



Obr. 5.8: Diagram oka pro XDK ONU jednotku na 8. portu rozbočovače 1:16 při hodnotě vloženého útlumu 15,4 dB.

6 ZÁVĚR

Diplomová práce se věnuje simulaci a měření služeb Triple Play v sítích FTTx. Teoretická část diplomové práce poskytuje detailní náhled na jednotlivé služby zapadající do „trojité hry“ (televize, volání a data). Pro každou službu zde najdete uvedeny nejpoužívanější kodeky zvuku a obrazu a jejich porovnání se staršími verzemi, které jsou stále ještě někde využívány. Poslední služba, přenos dat, je rozebrána pouze z principu využití transportního protokolu (TCP nebo UDP). Další kapitoly teoretické části podávají informace o jednotlivých metodách přivedení optického vlákna a o standardech pasivních optických sítí. Největší pozornost je však věnována sítím využívající standard EPON. Samotné EPON sítě umožňují připojit na jeden rozbočovač až 32 koncových účastníků.

Praktická část diplomové práce je členěna do tří kapitol z nichž první se zabývá samotným měřením (na pasivní síti) za využití následujících měřících metod: přímá měřící metoda, měření reflektometrickou metodou OTDR. Druhá kapitola se zabývá měřením kvality služeb (QoS) pomocí: měření dle Y.1564 EtherSam (Y.156sam), měření chybovosti BERT a měření dle standardu RFC 2544 a poslední kapitola se věnuje návrhu simulací v programu OptSim.

Během měření pomocí přímé měřící metody byly zjištěny hodnoty jednotlivých prvků. U měření touto metodou byl kladen velký důraz na čistotu jednotlivých spojek a konektorů. Nevýhodou této měřící metody byla absence rozložení jednotlivých útlumů v trase.

Měření pomocí reflektometrické metody zobrazovalo rozložení celkového útlumu v trase na jednotlivých prvcích v síti, konektorech a dalších částí, které způsobují rozptyl - odraz vyslaného pulzu. Samotné měření proběhlo ve dvou směrech jak od optického síťového k optickému linkovému zakončení, tak ve směru opačném. Nevýhody měření ze směru optického linkového zakončení k optickému síťovému zakončení je vysvětleno v kapitole OTDR. Značnou výhodou této měřící metody je detailní znalost o celkové trase bez znalosti o síti jako celku.

Testování sítě pomocí standardu RFC 2544, tedy „předchůdce“ standardu EtherSam, znepríjemňuje velká časová náročnost na měření samotné. Pro dnešní optické přístupové sítě není příliš důležitý parametr zpoždění, nýbrž jeho kolísání (jitter). Například služba přenos hlasu po datových sítích (VoIP) vyžaduje maximální zpoždění až do 150 ms, aby bylo možné službu klasifikovat jako vyhovující. Zatímco kolísání zpoždění by mohlo způsobit změnu pořadí přenášených paketů, což má za následek nevyhovující konverzaci v reálném čase. Podobné nároky klade také přenos televizního signálu. Pakety ve špatném pořadí a kolísání zpoždění mají za následek

artefakty v obraze. Testování sítě na toto kolísání zpoždění zavádí až novější standard EtherSam. Z principu testování lze tedy očekávat brzy plné nahrazení standardu RFC 2544 standardem EtherSam (Y.1564). Časová náročnost na měření je výrazně menší a testování po krocích v jednotlivých zátěžových testech lze považovat za velmi přínosné, neboť se v reálné síti stane velmi zřídka, že všichni koncoví zákazníci budou všichni telefonovat nebo stahovat současně. Služba přenos dat má v Triple Play sítích nejmenší prioritu, proto zákazníci mohou očekávat proměnlivou přenosovou rychlost.

Poslední metoda měření byla měření bitové chybovosti BERT. Pro zařízení ZyXeL je například typické, že se zvyšující se hodnotou útlumu neklesá i přenosová rychlost přímo úměrně (rychlost poklesne např. ze 100 Mbit na hranici 80 Mbit a zde se drží). Další zvýšení vloženého útlumu má poté za následek ztrátu konektivity. Zařízení XDK se naopak chovají podle očekávání. Zvyšující se hodnota vloženého útlumu vede ke snížení přenosové rychlosti, prakticky přímo úměrně. Obě jednotky pracují v režimu PX-10 tedy do maximální vzdálenosti 10 km. Nedocházelo tedy ke zvýhodnění jedné ONU jednotky před druhou.

Navržený simulační model byl použit jako návrh, kde na reálné síti měřit, přičemž měření reálné sítě proběhlo podle pomoci výše uvedených metod. V simulaci byly sledovány výkonové úrovně a diagramy oka. Z diagramu oka byla zjištěna hodnota bitové chybovosti a tyto hodnoty byly dále porovnávány s hodnotami při zvyšující se hodnotě vloženého útlumu, až do hodnoty, kdy podle reálného měření došlo ke ztrátě konektivity. V rámci samotných simulací se hodnoty vloženého útlumu dále zvyšovaly až do hodnot, kdy chybovost neodpovídala standardu EPON sítí.

Výsledné hodnoty všech náměrů jsou zpracovány v jednotlivých podkapitolách.

LITERATURA

- [1] EN 300 429 *Digital Video Broadcasting (DVB): Framing structure, channel coding and modulation for cable systems EBU*. France: ETSI, 1998.
- [2] COLOGNE. DVB-C2: *Chances and Challenges for Cable Operators* [online]. 2009, [cit. 2. 11. 2012]. Dostupné z URL: <<http://goo.gl/rDITC>>.
- [3] DVB PROJECT OFFICE. *2nd Generation Cable: The World's Most Advanced Digital Cable TV System*. [online]. [cit. 2. 11. 2012]. Dostupné z URL: <http://www.dvb.org/technology/fact_sheets/DVB-C2_Factsheet.pdf>.
- [4] HENS, Francisco J. a José M. CABALLERO. *Triple Play: Building the Converged Network for IP, VoIP and IPTV*. Great Britain: Wiley, 2008. xiii, 401 p. ISBN 978-0-470-75367-5.
- [5] BOCH, Laurent. NETMODE: *MPEG-2 Profiles and Levels* [online]. 1996, [cit. 2. 11. 2012]. Dostupné z URL: <http://www.netmode.ntua.gr/courses/postgraduate/video_communications/documents/Profiles_MPEG-2.pdf>.
- [6] WALLACE, Kevin. *Cisco Voice over IP*. 3. vyd. Indianapolis: Cisco Press, 2008. ISBN 978-1-58705-554-6.
- [7] INTERNATIONAL TELECOMMUNICATION UNION. *ITU-T Recommendation G.711* [online]. [cit. 10. 11. 2012]. Dostupné z URL: <<http://www.itu.int/rec/T-REC-G.711-198811-I/en>>.
- [8] INTERNATIONAL TELECOMMUNICATION UNION. *ITU-T Recommendation G.723* [online]. [cit. 10. 11. 2012]. Dostupné z URL: <<http://www.itu.int/rec/T-REC-G.723.1-200605-I/en>>.
- [9] INTERNATIONAL TELECOMMUNICATION UNION. *ITU-T Recommendation G.726* [online]. [cit. 10. 11. 2012]. Dostupné z URL: <<http://www.itu.int/rec/T-REC-G.726-199012-I>>.
- [10] INTERNATIONAL TELECOMMUNICATION UNION. *ITU-T Recommendation G.729* [online]. [cit. 10. 11. 2012]. Dostupné z URL: <<http://www.itu.int/rec/T-REC-G.729-199603-S>>.
- [11] STRETCH, Jeremy. *VoIP Basics* [online]. 2008, [cit. 10. 11. 2012]. Dostupné z URL: <http://media.packetlife.net/media/library/34/VOIP_Basics.pdf>.

- [12] SZIGETI, Tim. *End-to-End QoS Network Design: Quality of Service in LANs, WANs, and VPNs*. Indianapolis: Cisco Press, 2004. ISBN 1-58705-176-1.
- [13] INTERNATIONAL TELECOMMUNICATION UNION. *ITU-T Recommendation G.114* [online]. [cit. 10. 11. 2012]. Dostupné z URL: <<http://www.itu.int/rec/T-REC-G.114-200305-I>>.
- [14] KUNEŠ, Jan. *Karneval zrychluje na 2 Mbit* [online]. 2004 [cit. 23. 04. 2013]. Dostupné z URL: <<http://www.zive.cz/bleskovky/karneval-zrychluje-na-2-mbit/sc-4-a-118355/>>.
- [15] *Google Fiber* [online]. ©2012 [cit. 23. 04. 2013]. Dostupné z URL: <<https://fiber.google.com/about/>>.
- [16] BOOMSMA, Christiaan. *Ethernet over Passive Optical Networks*. Nizozemsko, 2006. Diplomová práce. Univerzita Twente. Vedoucí práce prof. dr. ir. W.C. van Etten.
- [17] FILKA, Miloslav. *Optoelektronika pro telekomunikace a informatiku*. Vyd. 1. Brno: Miloslav Filka, 2009, 369 s. ISBN 978-80-86785-14-1.
- [18] KOCIÁN, Radek. *Měření a kvalita IPTV streamu na reálné síti*. 2012. Dostupné z URL: <<http://goo.gl/NTZHj>>.
- [19] IEEE STANDARD FOR INFORMATION TECHNOLOGY. *Carrier Sense Multiple Access with Collision Detection (CSMA/CD) Access Method and Physical Layer Specifications*. [online]. 2009, [cit. 21. 04. 2013]. Dostupné z URL: <<http://ieeexplore.ieee.org/xpl/mostRecentIssue.jsp?punumber=5294944>>.
- [20] GIRARD, André. *FTTxPon technology and testing*. Canada. EXFO Electro-Optical Engineering, 2005. ISBN 15-534-2006-3.
- [21] IEEE STANDARD FOR INFORMATION TECHNOLOGY. *Carrier Sense Multiple Access with Collision Detection (CSMA/CD) Access Method and Physical Layer Specifications*. [online]. 2004, [cit. 21. 04. 2013]. Dostupné z URL: <<http://ieeexplore.ieee.org/xpl/login.jsp?tp=&arnumber=1576509>>.
- [22] BRADNER, S. a J. MCQUAID. *Benchmarking Methodology for Network Interconnect Devices* :. RFC 2544 [online]. 1999, [cit. 21. 04. 2013]. Dostupné z URL: <<http://ieeexplore.ieee.org/xpl/mostRecentIssue.jsp?punumber=5294944>>.

- [23] ŠIFTA, Radim, Petr MÜNSTER a Miloslav FILKA. *Optická přístupová síť EPON a její měření distribuční sítě*. Elektorevue. 2013, 2013/11. ISSN 1213-1539. Dostupné z URL: <<http://www.elektorevue.cz/cz/clanky/komunikacni-technologie/0/opticka-pristupova-sit-epon-a-jeji-mereni-distribucni-site/>>.

SEZNAM SYMBOLŮ, VELIČIN A ZKRATEK

ACELP Algebraic Code Excited Linear Prediction – Algebraická lineární kódová predikce

APON ATM Passive Optical Network – ATM pasivní optická síť

ATM Asynchronous Transfer Mode – Asynchronní přenosový mód

AVC Advanced Video Coding – Pokročilé kódování obrazu

BER Bit Error Rate – Bitová chybovost

BERT Bit Error Rate Testing – Testování bitové chybovosti

BPON Broadband Passive Optical Network – Širokopásmová pasivní optická síť

CATV Cable Analogue TeleVision – Analogová kabelová televize

CD Compact Disc – Kompaktní disk

CIR Committed Information Rate – Meze nastavené hodnoty informačního toku

CS-ACELP Conjugate Structure Algebraic Code Excited Linear Prediction – Spojená struktura algebraického lineárního kódování predikce

CWDM Coarse Wavelength Division Multiplexing – Hrubý vlnový multiplex

DPCM Differential Pulse-Code Modulation – Rozdílová pulzně kódová modulace

DSLAM Digital Subscriber Line Access Multiplexer – Přístupový multiplexor k digitální lince

DVB Digital Video Broadcasting – Digitální video vysílání

DVD Digital Video Disc – Digitální video disk

DWDM Dense Wavelength Division Multiplexing – Řídký vlnový multiplex

EIR Excess Information Rate – Překročení nastavené hodnoty informačního toku

EPON Ethernet Passive Optical Network – Ethernet pasivní optická síť

ETSI European Telecommunications Standards Institute – Evropský ústav pro telekomunikační normy

FTT Fiber To The – Optické vlákno do

GEPON Gigabit Ethernet Passive Optical Network – Ethernet gigabitová pasivní optická síť

GMII Gigabit Medium Independent Interface – Gigabitové rozhraní

GPON Gigabit Passive Optical Network – Gigabitová pasivní optická síť

HD High Definition – Vysoké rozlišení

HDTV High Definition Television – Vysoké rozlišení přenášeného videa

IEEE Institute of Electrical and Electronics Engineers – Institut pro elektrotechnické a elektronické inženýrství

IP Internet Protocol – Internetový protokol

IPTV Internet Protocol Television – Televizní signál přenášen pomocí IP

ISO International Organization for Standardization – Mezinárodní organizace pro standardizaci

ISP Internet Service Provider – Poskytovatel internetového připojení

ITU International Telecommunication Union – Mezinárodní telekomunikační unie

JPEG Joint Photographic Experts Group – Formát obrazových souborů.

LDCELP Low-Delay Code Excited Linear Prediction – Lineární kódová predikce s nízkým zpožděním

LDPC Low Density Parity Code – Lineární korekční kód

LLC LossLess Compression – Bezeztrátová komprese

MAC Media Access Control – Identifikátor síťového zařízení

MDI Medium Dependent Interface – Přístup k médiu

MGCP Media Gateway Control Protocol – Komunikační protokol mezi VoIP bránami

MPEG Moving Picture Experts Group – Formát pohyblivého obrazu

MPMC Multi Point Media Access Control Control – Vícebodový přístup k médiu

OAM Operation, Administration and Maintenance – Řízení, správa a údržba

OAN Optical Access Network – Aktivní optická síť

OLT Optical Line Termination – Optické linkové zakončení

ONT Optical Network Termination – Optická síťové zakončení

ONU Optical Network Unit – Optická síťová jednotka

ORL Optical Return Loss – Optický útlum

OSI Open Systems Interconnection – Standardizace komunikace

OTDM Optical Time Division Multiplexing – Optický časový multiplex

OTDR Optical Time Domain Reflectometer – Reflektometrická měřicí metoda

P2MP Point-To-MultiPoint – Spojení Bod-Mnohobod

P2P Point-To-Point – Spojení Bod-Bod

PCM Pulse Code Modulation – Pulzně kódová modulace

PCS Physical Coding Sublayer – Kódování na podvrstvě fyzické vrstvy

PMA Physical Medium Attachment – Podpora různých médií na fyzické vrstvě

PMD Physical Medium Dependent – Podvrstva fyzické vrstvy

PON Passive Optical Network – Pasivní optická síť

PS Program Stream – Programový tok

PSTN Public Switched Telephone Network – Veřejná telefonní síť

QAM Quadrature Amplitude Modulation – Kvadrurní amplitudová modulace

RFC Request For Comments – Žádost o komentáře

RTP Real-time Transport Protocol – Přenosový protokol pro náročné aplikace (zvuk-obraz)

SD Standard Definition – Standardní rozlišení

SDTV Standard Definition TeleVision – Standardní rozlišení přenášeného videa

SIF Source Input Format – Zdrojový vstupní formát

SIP Session Initiation Protocol – Relační inicializační protokol

SNR Signal to Noise Ratio – Odstup signálu od šumu

SSH Secure Shell – Zabezpečený přístup

TCP Transmission Control Protocol – Protokol transportní vrstvy

TS Transport Stream – Přenosový tok

UDP User Datagram Protocol – Protokol transportní vrstvy

VAD Voice Activity Detection – Detekce hlasu

VoIP Voice over Internet Protocol – Přenos hlasu po datových sítích

SEZNAM PŘÍLOH

A Obsah DVD

109

A OBSAH DVD

Na DVD disku je přiloženo:

- Elektronická verze diplomové práce,
- Tabulka z programu Excel obsahující tabulky měření,
- OTDR náměry,
- Reporty z měření dle standardu EtherSAM,
- Reporty z měření dle standardu BERT,
- Reporty z měření dle standardu RFC 2544,
- Zdrojové soubory z programu OptSim 5.2,
- Obrázky nastavení jednotlivých vzorků v programu OptSim 5.2,
- Výsledné digramy oka z programu OptSim 5.2,
- Navržená simulační topologie v plném rozlišení,
- Zdrojové kódy diplomové práce z programu $\text{\LaTeX}$.