

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky  
a komunikačních technologií

HABILITAČNÍ PRÁCE

Brno, 2023

Ing. TOMÁŠ HORVÁTH, Ph.D.



**VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ**

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

**FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH  
TECHNOLOGIÍ**

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

**ÚSTAV TELEKOMUNIKACÍ**

DEPARTMENT OF TELECOMMUNICATIONS

**FYZICKÁ A PŘENOSOVÁ VRSTVA PASIVNÍCH  
OPTICKÝCH SÍTÍ**

PHYSICAL AND TRANSMISSION CONVERGENCE LAYER OF PASSIVE OPTICAL NETWORKS

**HABILITAČNÍ PRÁCE**

HABILITATION THESIS

**AUTOR PRÁCE**

AUTHOR

**Ing. Tomáš Horváth, Ph.D.**

**BRNO 2023**

## ABSTRAKT

Habilitační práce pojednává o fyzické a přenosové vrstvě pasivních optických sítí. Práce se zaměřuje na analýzu možnosti prodloužení dosahu distribuční části sítě, navýšení počtu zákazníků v pasivní optické síti, analýzou a simulacemi aktivačního procesu koncové jednotky a popisem navržené sondy pro monitorování přenosové vrstvy v sítích další generace. Habilitační práce se skládá z pěti částí. První část popisuje komunikaci, vývoj a současný stav na poli pasivních optických sítí. Druhá část představuje detailní popis vysokorychlostních pasivních optických sítí (25G, 50G a 100G). V této kapitole je obsažen autorův simulační model fyzické vrstvy podle dostupných doporučení IEEE a ITU. Třetí část obsahuje detailní popis přenášených datových jednotek v sestupném a vzestupném směru. Dále popis aktivačního procesu koncové jednotky s jednotlivými stavy a autorovy simulační modely k evaluaci vlivu počtu koncových zákazníků na dobu trvání aktivace koncové jednotky. Navazující simulační model se zabývá nasazením algoritmu max-min fair pro alokaci časových slotů ve vzestupném směru v prostředí OPNET Modeler. Čtvrtá část se zaměřuje na bezpečnostní rizika pasivních optických sítí a popisem vyvinuté sondy v rámci projektu ministerstva vnitra. Navržená sonda je schopna monitorovat dodržování dílčích doporučení jak pro složení rámce, tak přenos řídicích zpráv během aktivačního procesu a datové komunikace v pasivní optické síti. Habilitační práci uzavírá pátá část s popisem budoucích vědeckých výzev v oblasti pasivních optických sítí.

## KLÍČOVÁ SLOVA

vysokorychlostní pasivní optická síť; fyzická a přenosová vrstva; simulace; VPIphotonics; OPNET Modeler; aktivační proces; FPGA; bezpečnost.

## ABSTRACT

The habilitation thesis deals with the physical and transmission convergence layer of passive optical networks. The thesis analyzes possibilities of extending the reach of the optical distribution network, increasing the number of customers in the passive optical network, analysis and simulations of the activation process of optical network unit and the description of the custom-made probe for monitoring the transmission convergence layer in the next generation optical networks. The habilitation thesis consists of five parts. The first part describes the communication, development and state of the art in passive optical networks. The second part presents a detailed description of high-speed passive optical networks (100G EPON and high-speed PON). This part contains the author's physical layer simulation model according to available IEEE and ITU recommendations. The third part contains a detailed description of the transmitted data units in the descending and ascending directions. Furthermore, it describes the activation process of the optical network unit with particular states. Moreover, the author's simulation models evaluate the influence of the number of end customers on the activation process duration. The subsequent simulation model deals with the deployment of the max-min fair algorithm for the allocation of time slots in the upstream direction in the OPNET Modeler environment. The fourth part focuses on the security risks in passive optical networks and describes the probe developed as part of the Ministry of Interior project in cooperation with our partner. The proposed probe is able to monitor the recommendations observance for frame structure and correct transmission of control messages during the activation process and data communication in a passive optical network. The habilitation thesis is concluded by the fifth part with a description of future scientific challenges in passive optical networks.

## KEYWORDS

high-speed passive optical network; physical and transmission convergence layer; simulation; VPIphotonics; OPNET Modeler; activation process; FPGA; security.

HORVÁTH, Tomáš. *Fyzická a přenosová vrstva pasivních optických sítí*. Brno, 2023, 150 s. Habilitační práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav telekomunikací.

---

Vysázeno pomocí balíčku `thesis` verze 3.03; <http://latex.feec.vutbr.cz>

## PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svou habilitační práci na téma „Fyzická a přenosová vrstva pasivních optických sítí“ jsem vypracoval samostatně 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 habilitační práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této habilitační 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

# Obsah

Úvod	7
<b>1 Přehled práce</b>	<b>9</b>
1.1 Motivace a cíle	9
1.2 Přínos práce	10
1.3 Struktura práce	11
<b>2 Vývoj a současný stav pasivních optických sítí</b>	<b>13</b>
2.1 PON sítě další generace (XG-PON)	14
2.2 PON sítě další generace druhé fáze (NG-PON2)	16
2.3 Vysokorychlostní pasivní optické sítě	17
2.4 Současný stav pasivních optických sítí	18
<b>3 Fyzická vrstva pasivních optických sítí</b>	<b>23</b>
3.1 100G EPON sítě	23
3.1.1 Vlnové páry pro sítě 100G EPON architektury 1+3	23
3.1.2 Přenosové parametry sítě 100G EPON architektury 1+3	25
3.1.3 Simulační model 100G EPON sítě	26
3.2 Vysokorychlostní přístupové sítě 50G dle ITU	41
3.2.1 Architektura systému HSP	42
3.2.2 Plán vlnových délek pro HSP	44
3.2.3 Simulační model sítě HSP-TDM-PON	45
<b>4 Přenosová vrstva PON sítí</b>	<b>53</b>
4.1 Rámec pro sestupný směr	53
4.2 Burst pro vzestupný směr	57
4.3 Aktivační proces koncové jednotky v sítích NG-PON2	59
4.3.1 Inicializační stav – (O1)	60
4.3.2 Stav sériového čísla – (O2-3)	61
4.3.3 Stav rozsahu – (O4)	63
4.3.4 Operační stav – (O5)	64
4.3.5 Stav přerušení – (O6)	65
4.3.6 Nouzový stav – (O7)	65
4.3.7 Ladicí stav v sestupném směru – (O8)	66
4.3.8 Ladicí stav ve vzestupném směru – (O9)	66
4.3.9 Časování koncové jednotky	69
4.3.10 DBA	71
4.3.11 Simulace aktivačního procesu v sítích NG-PON2	74

4.4	Simulace alokace časových slotů . . . . .	77
4.4.1	Statická alokace . . . . .	79
4.4.2	Dynamická alokace . . . . .	80
<b>5</b>	<b>Bezpečnostní rizika PON sítí</b>	<b>84</b>
5.1	Bezpečnostní výzkum na poli pasivních optických sítí . . . . .	88
5.1.1	Zapojení analyzátoru do pasivní optické sítě . . . . .	91
5.1.2	Závěr . . . . .	100
<b>6</b>	<b>Směr vývoje PON sítí</b>	<b>101</b>
<b>7</b>	<b>Závěr</b>	<b>104</b>
	<b>Autorovy publikace</b>	<b>107</b>
	<b>Literatura</b>	<b>120</b>
	<b>Seznam symbolů, veličin a zkratk</b>	<b>142</b>
<b>A</b>	<b>Přílohy</b>	<b>146</b>
A.1	Finální simulační modely PON sítí . . . . .	146
<b>B</b>	<b>Obsah přiloženého CD</b>	<b>149</b>

# Úvod

S rozvojem služeb, přenášených v celosvětové síti Internet, jde ruku v ruce modernizace jak transportní, tak přístupové sítě. Nástup streamovacích platforem a cloudivých služeb vede k nárůstu přenášených dat od/k koncovým zákazníkům [123]. Možnosti připojení domácnosti do sítě Internet by měly reflektovat požadované parametry zákazníků, zejména však přenosovou rychlost. Zmíněné služby budou stále funkční na různých typech připojení od DSL (digitální účastnická přípojka – Digital Subscriber Line) po WiFi (obchodní označení pro IEEE 802.11b – WiFi) je však pravděpodobné, že dojde ke snížení kvalitativních parametrů přenášeného videa nebo prodloužení doby stahování/nahrávání souborů do cloudu. Z tohoto důvodu se stále častěji rozšiřuje optické vlákno z původně transportních sítí až do přístupových sítí. Díky přibližování optického vlákna podle jeho metod zakončení FTTx (optické vlákno do ... – Fiber to the ...) lze optické vlákno ukončit přímo u koncového zákazníka doma FTTH (optické vlákno do bytu – Fiber to the Home) a nabídnout mu tak plně optické připojení.

Výstavba optické sítě je ekonomicky nákladná a v rámci České republiky i náročná administrativně. Není proto vhodné realizovat pro každého zákazníka typ spojení PtP (bod bod – Point to Point), ale naopak využívat vícenásobné větvení jednoho vlákna k více klientům PtMP (bod mnohobod – Point to Multi Point). K tomuto typu spojení PtMP jsou určeny sítě typu PON (pasivní optická síť – Passive Optical Network). Ze strany poskytovatele služeb ISP (Internet Service Provider – poskytovatel připojení k Internetu) je využíváno jedno optické vlákno k prvnímu rozbočovači (dále v textu splitteru), odkud může dojít k větvení více směry nebo k více koncovým zákazníkům. Topologie PON byla původně hvězdicová, později byla navržena topologie stromová, jenž zůstala zachována doposud [34, 63, 94, 111]. Výhoda snadnější realizace PON sítě je vykoupena sdílením přenosové kapacity mezi všemi účastníky připojenými k danému portu OLT (optické linkové zakončení – Optical Line Termination) jednotky.

Předložená habilitační práce se zabývá jak vývojem PON sítí, tak jejich vyhodnocováním z pohledu fyzické a přenosové vrstvy. Kapitola 2 poskytuje čtenáři ucelený přehled ve vývoji PON od přenosové rychlosti 10 Gbit/s. Navazující kapitola 3 obsahuje přehled vysokorychlostních PON sítí (>10 Gbit/s na kanál) mezi dvěma „soupeřícími“ organizacemi IEEE (Institut pro elektrotechnické a elektronické inženýrství – Institute of Electrical and Electronics Engineers) a ITU (Mezinárodní telekomunikační unie – International Telecommunication Union). Každá ze zmíněných organizací je založena na rozdílné filosofii a třebaže jsou jejich parametry, z pohledu fyzické vrstvy, obdobné, nejsou vzájemně kompatibilní. Pro každý vysokorychlostní návrh sítě (podle IEEE a ITU) byl vytvořen simulační model pro vyhodnocování



kvalitativního parametru BER (bitová chybovost – Bit Error Rate) fyzické vrstvy.

Další kapitola 4 se zabývá přenosovou vrstvou ITU PON sítě. Detailně je popsán aktivační proces ONU (optická síťová jednotka – Optical Network Unit) jednotky v síti NG-PON2 (pasivní optická síť druhé generace – Next Generation PON Stage 2). Dovedením optického vlákna do bytu zákazníka a připojením ONU automaticky neprobíhá obousměrná komunikace. Nejprve je nezbytné jednotku aktivovat, aby bylo dosaženo obousměrné datové komunikace. V rámci aktivačního procesu dochází k přenosu PLOAM (správa fyzické vrstvy – Physical Layer Operations, Administrations and Maintenance), jež jsou popsány v dané kapitole. Aktivační proces může být prodlužován navyšujícím se počtem ONU jednotek, jak dokládají výsledky simulací. Sdílené přenosové médium ve vzestupném směru vyžaduje aktivní řízení komunikace. Navržený simulační model obsahuje jak využití statického přidělování časových slotů, tak dynamickou alokaci časových slotů.

Poslední kapitola 5 popisuje bezpečnostní rizika spojená s PON sítěmi a dále obsahuje analýzu zachycených dat v rámci laboratorní PON sítě s aktivačním procesem a dynamickou alokací časových slotů. Představeným analyzátozem lze verifikovat správnost implementace dílčích doporučení PON. V případě detekce anomálie (neznámá PLOAM zpráva) může dojít k automatickému předání bezpečnostního incidentu s možností poskytnutí celého rámce, jež tuto anomálii obsahoval.

# 1 Přehled práce

V této kapitole je obsažen přehled práce. Kapitola 1.1 prezentuje motivaci autora a cíle práce. Navazující část 1.2 obsahuje soupis přínosů autora, na kterou navazuje podkapitola 1.3 s popisem struktury práce. Kapitulu ukončuje prohlášení autora s relevantní publikační činností k tématu habilitační práce a další vědecké publikace nad rámec problematiky habilitační práce a její cíle.

## 1.1 Motivace a cíle

S rostoucími požadavky na přenosové rychlosti jde ruku v ruce ukončování optického vlákna stále blíže ke koncovému uživateli. V současné chvíli dominující doporučení pasivních optických sítí GPON (gigabitová pasivní optická síť – Gigabit capable Passive Optical Network), nabízející přenosovou rychlost 2,48 Gbit/s v sestupném a 1,24 Gbit/s ve vzestupném směru, se blíží svým limitním parametrům. Je tomu tak, protože přenosová rychlost pro sestupný směr je plně sdílená se všemi účastníky. I přes tyto známé skutečnosti, navržená topologie pro pasivní optické sítě, neprošla změnou od své prvotní specifikace (diskuze mezi hvězdicovou a stromovou topologií). Vítězem se stala stromová struktura, protože nabízí snadný management celé sítě v rámci jedné řídicí jednotky a z povahy stromové topologie neexistují v síti smyčky. Limitujícím faktorem systému GPON se však nyní stává dosah, který je stanovený pouze na 20 km a dělicí poměr (v současné verzi maximálně 1:64 na jeden GPON port).

Cílem habilitační práce je rozvinout problematiku přístupových sítí jak z hlediska dosahu, tak konečného dělicího poměru, aby bylo docíleno pokrytí aglomerací s menším počtem řídicích jednotek a využití potenciálu sdíleného vlákna PtMP. Díky využití jednoho optického vlákna, které je v posledním bodě rozvětveno – pomocí pasivních rozbočovačů<sup>1</sup> – k jednotlivým koncovým účastníkům, jsou redukovány náklady na výstavbu sítě. Navazující cíl habilitační práce je ukotven v navyšování přenosové rychlosti, aby koncovým zákazníkům byla poskytována dostatečná přenosová rychlost v sestupném směru s ohledem na zvýšenou agregaci datového provozu. K zajištění obousměrné komunikace mezi řídicí a koncovou jednotkou je nezbytné koncovou jednotku (ONU) aktivovat při jejím připojení do sítě. Nutnost aktivace ONU platí jak pro nové zákazníky (změna tarifu nebo výměna zařízení), tak stávající, např. při výpadku napájení. Aktivaci koncové jednotky zajišťuje přenosová vrstva pasivních optických sítí spolu s řízením komunikace ve vzestupném směru (s využitím časových slotů). Právě alokace časových slotů tvoří další vědeckou

---

<sup>1</sup>Dále v textu, stejně jako dle zvyklostí v oboru označován splitter.

výzvu na přenosové vrstvě PON sítí. Agregací znalostí fyzické a přenosové vrstvy pasivních optických sítí bylo umožněno, v rámci výzkumného projektu, vyvinout vlastní sondu pro monitorování řídicích zpráv v reálném čase. Hlavním benefitem vlastního analyzátoru je ukládání veškerých/vybraných dat přímo z pasivní optické sítě (jedná se o unikátní strukturu datových jednotek PON systémů) pro pozdější analýzu, aplikaci strojového učení apod.

## 1.2 Přínos práce

Habilitační práce se věnuje sítím další generace s ohledem na současné trendy ve vývoji optických sítí. Doposud nejnásazovanější doporučení GPON naráží na své limity. Práce poskytuje ucelený teoretický přehled topologie a princip datové komunikace pro oba směry. Dále se práce zabývá současnými trendy na poli pasivních optických sítí. Postupným přibližováním optického vlákna blíže ke koncovému zákazníkovi se tyto technologie stávají dominantními. Tento trend potvrzuje rozšířenost ukončení vláken podle FTTB (optické vlákno do budovy – Fiber to the Building) nebo FTTH ve světě (zejména Spojené arabské emiráty) [49, 131].

Dílní přínos tvoří navržená simulační schémata pro sítě další generace s navýšeným dělicím poměrem, přenosovou rychlostí a dosahem. Nabyté teoretické znalosti byly aplikovány v prostředí VPIphotonics Design Suite™ v11.2. Výsledky simulací potvrzují, že i při zachování přenosové vrstvy, bez nutných modifikací ve strukturách rámce, lze dosáhnout vyššího dosahu sítě s vyšším dělicím poměrem. Bez aplikace korekčního kódu, lze prodloužit dosah o 10 % při zachování definovaného dělicího poměru (1:32). Bude-li brán v potaz korekční kód, lze prodloužit dosah sítě o 30 % s dvojnásobným dělicím poměrem (až 1:64). Simulační schémata potvrzují, že lze pokrývat vyšší počet zákazníků s jedinou řídicí jednotkou OLT v rámci širšího perimetru. Návrhy sítí byly vytvořeny dle nejnovějších trendů obou standardizačních organizací. IEEE a ITU, kdy každá z nich má vlastní přístup ke konečnému formátu datových jednotek. Zatímco IEEE se soustředí na plné využití Ethernet rámců, organizace ITU využívá vlastní struktury.

Dále je v práci obsažen ucelený přehled aktivačního procesu koncové jednotky ONU při prvotním připojení do sítě nebo po výpadku napájení. Aktivační proces je specifický pro pasivní optické sítě podle ITU, kterým je věnována větší pozornost (vyšší potenciál k nasazení). Samotný proces sestává z několika stavů a jejich provázanost je komplexním řešením, které se děje na „pozadí“ před obousměrnou komunikací. Povaha přenosu v sestupném směru je charakteristická metodou broadcast, zatímco vzestupný směr je podmíněn řízením časových slotů. V prostředí OPNET Modeler byla implementována dynamická alokace šířky pásma a porovnána se statickým přístupem.

Významným přínosem práce je vývoj a realizace vlastní sondy pro analýzu provozu v pasivních optických sítích. Vlastní sonda umožňuje zachytit veškerý provoz (v obou směrech) jak v sítích GPON, tak v sítích další generace. Dále je možné data analyzovat jak v reálném čase, tak všechna/konkrétní data ukládat k pozdějšímu zpracování – strojovým učení nebo jiným moderním přístupem. Práci uzavírá pohled na směr vývoje PON sítí.

Získané znalosti během výzkumných aktivit tvoří i pedagogický přínos, neboť znalosti v oblasti pasivních optických sítích jsou předávány formou přednášek a laboratorních cvičení v předmětu „Služby komunikačních systémů“. Cílem je rozšířit povědomí o PON sítích, neboť povaha přenosu kombinuje časové i vlnové dělení.

Vědecký přínos práce je obsažen ve stěžejních kapitolách věnující se fyzické a přenosové vrstvě PON sítí. Na základě simulačních výsledků je patrné, že lze prodlužovat dosah, navyšovat přenosovou rychlost a dělicí poměr v navazujících doporučeních. Obsáhlý aktivační proces je úzce spojen s datovou strukturou přenášených rámců a řídicích zpráv. S ohledem na unikátnost přenášených dat a dynamickou alokací časových slotů, bylo možné vyvinout vlastní sondu v rámci projektů Ministerstva vnitra České republiky a dosáhnout unikátních výsledků na poli vědy a výzkumu, kdy výsledná sonda může kontrolovat dodržování doporučení jednotlivých PON sítí v reálném čase.

Praktický přínos práce je v propojení výzkumné organizace a poskytovatele služeb Orange SK (formálně Orange nebo France Télécom S.A.), jenž nabídl testování výsledku projektu ve vlastní síti. Orange SK doposud využíval, bylo-li nezbytné, komerčně dostupné řešení, které vyžadovalo post-processing zachycených dat (zachycená data byla odeslána výrobcí systému). Díky propojení s komerční sférou byly implementovány reálné požadavky operátora.

### 1.3 Struktura práce

Práce je členěna do pěti samostatných kapitol. Kapitola 2 popisuje topologii PON sítí a způsob komunikace pro sestupný a vzestupný směr. Dále je obsažen vývoj PON sítí z pohledu využitých vlnových délek, popis zvažovaných technologií pro síť nové generace a popis vysokorychlostních PON sítí s přenosovou rychlostí vyšší než 25 Gbit/s. Poslední část kapitoly se zaměřuje na současné vědecké výzvy na poli aktuálně řešené problematiky PON sítí. Navazující kapitola 3 pohlíží na PON síť z pohledu fyzické vrstvy. Blíže je specifikována architektura dosažení vysokorychlostní PON sítě v reálném nasazení jak podle IEEE, tak podle doporučení ITU. Obě síť mají rozdílný pohled na klíčové parametry a jejich zohledňování. V prostředí VPIphotonics Design Suite™ v11.2 byly vytvořeny simulační modely obou variant a jejich vyhodnocení na základě bitové chybovosti BER. Teoretický základ

kapitoly 3 byl nadále využíván pro realizace simulací aktivačního procesu a implementaci algoritmu pro dynamické přidělování časových slotů ve vzestupném směru, jak je diskutováno v kapitole 4. Aktivační proces je specifikován doporučeními, nejedná se však o kompletní specifikaci a mnoho bodů závisí na implementaci výrobce systému. Dynamická alokace časových slotů představuje neefektivnější způsob řízení komunikace ve vzestupném směru. Navazující kapitola 5 je zaměřena na uplatnění znalostí z fyzické a přenosové vrstvy PON systémů pro jejich nasazení v rámci vyvinuté sondy. Sonda se primárně zaměřuje na přenosovou vrstvu, neboť fyzickou vrstvu lze monitorovat dostupnými měřicími metodami. Poslední kapitola 6 krátce identifikuje možné směry dalšího vývoje v oblasti PON sítí.

## Prohlášení autora

Habilitační práce prezentuje autorovu vědeckou činnost a výsledky publikované od roku 2018. Hlavní výsledky a prezentované návrhy, v habilitační práci, byly publikovány v řadě mezinárodních časopisů s impaktním faktorem [Atr23, Atr51, Atr3, Atr11, Atr12, Atr57, Atr20, Atr18, Atr28, Atr50, Atr53, Atr60] časopisech evidovaných v databázi Web of Science nebo Scopus (bez impaktního faktoru) [Atr14, Atr16, Atr43, Atr44, Atr38], mezinárodních konferencích zaměřených na telekomunikace [Atr19, Atr22, Atr45, Atr21, Atr47, Atr17, Atr49, Atr10, Atr24, Atr15, Atr33, Atr46, Atr42, Atr13, Atr48, Atr52, Atr58, Atr29, Atr25] a odborných kapitolách v knihách [Atr31, Atr32].

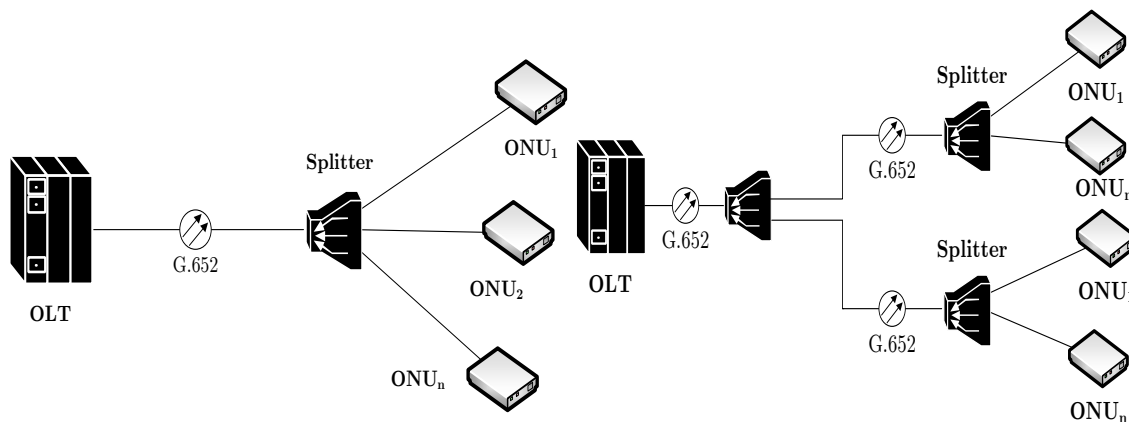
Dále je autor habilitační práce autorem nebo spoluautorem publikací, mimo téma habilitační práce, v odborném periodiku s impaktním faktorem [Atr27, Atr39, Atr26, Atr37, Atr8, Atr5, Atr56] a na mezinárodních konferencích [Atr9, Atr66, Atr59, Atr63, Atr64, Atr4, Atr2, Atr6, Atr65, Atr62, Atr70, Atr67, Atr1, Atr36, Atr68, Atr61, Atr34, Atr40, Atr69, Atr55, Atr7, Atr54, Atr35, Atr41, Atr30].

Žádný z prezentovaných výsledků v habilitační práci nebyl uveden v autorově dizertační práci. Dizertační práce autora se zaměřovala na „Optimalizaci služeb v přístupových sítích FTTx“, jmenovitě na bezpečnostní rizika, zvýšení bezpečnosti pomocí doby šíření signálu, robustní model zabezpečení a analýzu dat v GPON sítích. Dále pak implementací přenosové vrstvy do prostředí VPIphotonics Design Suite™ v11.2 (implementace dopředné korekce chyb), nikoli struktury rámce. Habilitační práce se věnuje sítím další generace, přičemž princip komunikace, z povahy sítě, zůstal zachován, nicméně struktura přenášených dat a forma řídicích zpráv je odlišná.

## 2 Vývoj a současný stav pasivních optických sítí

Pasivní optické sítě představují budoucnost k dosažení vysokorychlostního symetrického připojení k Internetu. Dotažení optického vlákna ke koncovému zákazníkovi eliminuje počet konverzí z optické do elektrické domény v průběhu trasy od poskytovatele služeb k zákazníkovi. Zařízení realizující tento převod se nazývá, v terminologii PON sítí, koncová jednotka ONU. Uvedená jednotka může být základní a v nejlevnější variantě, kdy realizuje pouze převod z optické domény do elektrické a je vybavena jediným portem RJ-45. Do tohoto portu může koncový zákazník zapojit svůj domácí směrovač nebo jediné koncové zařízení (např. PC). Běžnější variantu představuje sofistikovanější ONU vybavena více porty RJ-45, vlastním managementem a WiFi moduly. Koncový zákazník následně již nepotřebuje jiné aktivní prvky a svou lokální síť obsluhuje ve správě koncové jednotky.

Jak již bylo uvedeno výše, celý přenos probíhá po optickém vlákně. Obecně lze shrnout topologii PON sítě obrázkem 2.1. Obrázek 2.1a zobrazuje nejjednodušší variantu, kde je nasazen jediný splitter s vysokým dělicím poměrem v závislosti na použitém doporučení. Druhá varianta, viz obrázek 2.1b, obsahuje nasazení kaskádního zapojení splitterů, jenž je mnohem používanější v reálných PON sítích.



(a) Základní topologie pasivní optické sítě. (b) Topologie s kaskádním nasazením splitterů.

Obr. 2.1: Varianty topologie pasivní optické sítě.

Princip komunikace v PON síti je rozdílný pro oba směry. Komunikace v sestupném směru probíhá pomocí všesměrového vysílání, z povahy topologie není možné zajistit jinou variantu přenosu. Koncové ONU následně zpracovávají rámce, které jsou určeny této jednotce, hledají unikátní identifikátor ONU-ID (identifikátor op-

tické síťové jednotky – Optical Network Unit Identifier). Komunikace ve vzestupném směru naopak probíhá metodou unicast, kdy je nezbytné jednotlivé ONU řídit a definovat přesně stanovený čas, ve kterém může konkrétní ONU vysílat. O řízení datové komunikace ve vzestupném směru se stará řídicí jednotka OLT.

## 2.1 PON sítě další generace (XG-PON)

Sítě další generace XG-PON (pasivní optická síť další generace – Next Generation Passive Optical Network) jsou považovány za nástupce GPON, které již dosahují svých limitů, zejména v ohledu přenosové rychlosti a dělicího poměru. Mezinárodní telekomunikační unie definuje sítě v rámci rodiny doporučení G.987, přičemž první dokument pokrývá obecný popis sítí, navazující se zabývá parametry fyzické vrstvy a třetí poskytuje ucelený přehled k přenosové vrstvě (struktura rámce, aktivační proces koncových jednotek atd.). První doporučení z uvedené rodiny bylo schváleno v roce 2010. Literatury uvádějí dvojí zápis 10G-PON a XG-PON. Samotná ITU uvádí pouze druhý způsob zápisu.

Po nasazení GPON v sítích ISP došlo k přesunu vývoje na navazující doporučení usklopením FSAN (služby přístupových sítí – Full Service Access Network). Obecně lze shrnout, že přípravy nového doporučení byly předmětem výzkumu a vývoje od roku 2007 a finální verze sítí XG-PON byla dokončena o dva roky později [42, 136, 14, 25].

Hlavním záměrem vývoje nového doporučení byly jak vyšší přenosová rychlost a dělicí poměr, tak zachování zpětné kompatibility a plynulý přechod mezi technologiemi dalších generací. Dle publikovaných odhadů je zřejmé, že se celkový přenos dat zvyšuje a klesající charakter nelze očekávat [55, 123]. S ohledem na dostupnost streamovacích služeb, cloudových úložišť a množství zařízení připojených k celosvětové síti Internet je tento trend zcela očekávaným. Dalším důležitým milníkem v této oblasti bylo schválení dokumentu G.984.5, které rozšířilo specifikaci sítě GPON. Primárním cílem doporučení bylo poskytnout nejjednodušší možný přechod z GPON na nově připravovaný standard. Vlnové délky a jejich přiřazení byly přerozděleny na dva různé standardy. Původní rozsah vlnových délek GPON byl příliš „roztáhlý“ napříč spektrem. Koncové jednotky doporučení XG-PON byly doplněny o filtry, které blokují vlnové délky předchozích doporučení [61].

Vývoj nového doporučení se vydal dvěma proudy – NG-PON1 a NG-PON2 – v závislosti na možnosti provozování předchozí a nové generace na současné ODN (optická distribuční síť – Optical Distribution Network). První větev se opírala o zachování plné kompatibility s předchozím doporučením GPON na stejné distribuční síti. Distribuční část je tvořena plně pasivními prvky, jako jsou optická vlákna, spojky, splittery a optické konektory. Cílem bylo minimalizovat vstupní náklady pro

plynulý přechod, neboť nedocházelo k výměně komponent mezi OLT a ONU a zároveň bylo umožněno zachování přístupu uživatelům k Internetu jak na síti GPON, tak na síti XG-PON. Koncové jednotky mohly být vyměněny postupně s minimalizací nedostupnosti služeb na straně zákazníka. Řídící jednotky obou doporučení byly připojeny k ODN pomocí WDM (vlnově dělený multiplex – Wavelength Division Multiplexing), přičemž na straně zákazníka zůstala zachována pouze přítomnost koncové jednotky ONU. Celý proces doprovázel výběr technologie, na které budou sítě XG-PON provozovány. Uvažovány byly následující varianty: CDMA-PON (pasivní přístupová síť založená na kódovém multiplexu – Code-Division Multiple-Access Passive Optical Network), TDM-PON (pasivní přístupová síť založená na časovém multiplexu – Time Division Multiplex Passive Optical Network), WDM-PON (pasivní přístupová síť založená na vlnovém multiplexu – Wavelength Division Multiplex Passive Optical Network) [27, 124, 2, 109, 110, 103, 108]. Pro zachování maximální jednoduchosti systému byla zvolena technologie TDM-PON, jenž tvoří základ dosavadních doporučení pasivních optických sítí. Druhý směr počítal s vývojem zcela nových přístupů a nasazením pokročilých technologií, které se nakonec ukázaly nad rámec navazujícího doporučení a byly přesunuty do navazující generace NG-PON2.

Po výběru technologie pro přenos dat a přístupu k médiu bylo dalším cílem zvolit vhodné rozsahy vlnových délek. V potaz byly uvažovány následující rozsahy:

- 1595–1615 nm – navržený rozsah byl zamítnut z důvodu nedostačující specifikace pro optická vlákna a komponenty pasivních optických sítí.
- 1540–1560 nm – druhý rozsah byl rovněž zamítnut, jelikož pokrývá i vlnovou délku pro přenos RF signálu na vlnové délce 1550 nm.
- 1530–1540 nm – koncové jednotky současných PON<sup>1</sup> dostatečně nefiltrují uvedené vlnové délky (zamítnutý návrh).
- 1340–1360 nm – finální návrh pro sítě nové generace s nutností nasazení „koexistenčních“ filtrů, jenž povedou ke zvýšení útlumu trasy mezi OLT a ONU jednotkami, byl také zamítnut.

Ve finální specifikaci sítí další generace byl zvolen rozsah 1575–1580 nm pro sestupný směr a 1260–1280 nm pro vzestupný směr. Důležitou součástí schvalovacího procesu byla implementace algoritmů pro energetickou úsporu koncových – neaktivních – jednotek na straně zákazníka [40, 53]. Předchozí doporučení uvažovala pouze deaktivaci transceiverů na straně ONU, přičemž po přijetí zprávy k opětovné aktivaci jednotky bylo nezbytné projít celý aktivační proces od prvního stavu [Atr18].

---

<sup>1</sup>GPON systému



## 2.2 PON síť další generace druhé fáze (NG-PON2)

V současné době poslední doporučení pro pasivní optické sítě v rámci plně schválené rodiny G.989 [60]. Předchozí doporučení, uvedené v předešlé kapitole 2.1, si kladlo za cíl zachování zpětné kompatibility, kdežto druhá větev si kladla za primární cíl navýšení přenosové kapacity pro koncové uživatele, efektivní využití finančních prostředků, vyšší dosah systému, efektivní alokaci síťových zdrojů a vysokou energetickou efektivitu bez podpory zpětné kompatibility [15]. Pro docílení stanovených cílů bylo zřejmé, že současně využívaná technologie TDM-PON je již nedostačující a bylo nezbytné znovu revidovat možné přístupy o varianty UDWDM-PON (pasivní optická síť s využitím hustého vlnového multiplexu – Ultra Dense Wavelength Division Multiplexing Passive Optical Network), OFDM-PON (pasivní optická síť na principu ortogonálně děleném multiplexu – Orthogonal Frequency Division Multiplexing Passive Optical Network) a TWDM-PON (pasivní optická síť na principu časového a vlnového multiplexu – Time Wavelength Division Multiplexing Passive Optical Network).

Zmíněná technologie UDWDM-PON vychází z velmi jemného vlnového dělení. Pro jednotlivé přenosy jsou tedy přiděleny vlnové délky nacházející se velmi blízko sebe. Samotné jemné vlnové dělení by nebylo dostačující, proto je nezbytné využít koherentní modulace. Dojde k vytvoření signálu 13 sruženými vlnovými délkami o rozestupu 25 GHz. Každá vlnová délka je pak schopna přenášet datový tok s rychlostí 100 Gbit/s s použitím QPSK (kvadrurní fázová modulace – Quadrature Phase Shift Keying).

Dále uvažovanou technologií představovala OFDM-PON. Princip technologie lze shrnout zcela následovně: modulace desítek až stovek nosných kmitočtů je docíleno díky modulaci QPSK nebo m-QAM (kvadrurní amplitudová modulace – Quadrature Amplitude Modulation). Kmitočty nosných musí plnit podmínku vzájemné ortogonality a dále je zapotřebí využití ochranných intervalů mezi vysíláním informací. I přes značnou výhodu vysoké odolnosti vůči chybám jak mezi symboly, tak mezi nosnými, nebyla technologie nasazena z důvodu vysoké náročnosti na koncová zařízení.

Logickým požadavkem na PON nové generace je poskytovat lepší parametry přenosu než existující standardy PON v souvislosti se zvyšujícími se požadavky šířky pásma. NG-PON2 systém musí podporovat přenosovou rychlost až 40 Gbit/s v sestupném směru<sup>2</sup> a 10 Gbit/s pro vzestupný směr. Dosah distribuční sítě se zvýšil z původních 20 km na 40 km, síť s prodlouženým dosahem až 60 km a dělicí poměr až 1:256. V rámci výběru vlnových délek nebyly stanoveny rozsahy a došlo k finál-

---

<sup>2</sup>Díky použití 4 různých vlnových délek s přenosovou rychlostí 10 Gbit/s. Doporučení G.989.1 specifikuje využití 4–8 vlnových délek.

nímu rozhodnutí použít 1596–1603 nm pro sestupný směr a 1524–1544 nm pro směr vzestupný.

Poslední a vítěznou technologii představuje TWDM-PON. Základ tvoří kombinace vlnového a časového přístupu. Několik vlnových délek je zde použito díky vlnovému multiplexu a každá vlnová délka je využita koncovými jednotkami ONU s vícenásobným časovým přístupem. Čtyři vysílací části XG-PON jsou seskupeny použitím 4 párů vlnových délek  $(\lambda_1, \lambda_5)$ ,  $(\lambda_2, \lambda_6)$ ,  $(\lambda_3, \lambda_7)$  a  $(\lambda_4, \lambda_8)$ . Pro sestupný směr tyto 4  $((\lambda_1, \lambda_5), (\lambda_2, \lambda_6))$ , ale může být použito až 8 vlnových délek  $((\lambda_1, \lambda_5), (\lambda_2, \lambda_6), (\lambda_3, \lambda_7)$  a  $(\lambda_4, \lambda_8))$ .

Důležitým krokem je nasazení „nezabarvených“<sup>3</sup> ONU jednotek, které nejsou navrženy pro konkrétní vlnové délky. Cena koncových jednotek je důležitým parametrem, neboť tvoří významnou sumu pořizovacích nákladů pro přechod mezi doporučeními. Bezbarvost koncových jednotek usnadní zmíněný přechod. Mimo jiné byla očekávaným faktorem víceúčelovost infrastruktury, zejména z pohledu sloučení telekomunikačních služeb a využití infrastruktury pro připojení základnových stanic pro mobilní pokrytí 5G signálem [26, 17].

## 2.3 Vysokorychlostní pasivní optické sítě

Navzdory existenci systému NG-PON2 založeném na TWDM s flexibilní a škálovatelnou architekturou, který poskytuje agregované přenosové rychlosti až 80 Gbit/s, existují další důvody pro vývoj nového vysokorychlostního standardu pro pasivní optické sítě. Nevýhoda systému NG-PON2 spočívá ve složitosti, nákladech a předpokládané době nahrazení systémů XG-PON až po roce 2025, kdy by se měly stát standardem technologie s jednou vlnovou délkou o rychlosti 50 Gbit/s.

V roce 2016 zahájila pracovní skupina ITU SG<sup>4</sup> Q2/15 studii, která má odpovědět na otázku, zda je možné v pasivních optických sítích dosáhnout rychlosti přenosu dat nad 10 Gb/s/λ. Výsledky této studie byly publikovány v příloze k článku G.Sup64 [57]. Výsledek této studie posloužil jako základní kámen pro HSP (vysokorychlostní pasivní optické sítě – Higher Speed Passive Optical Network) podle doporučení G.hsp [133]. Projekt HSP-PON se skládá ze tří komponent: 50Gbit/s TDM-PON,  $N \times 50$ Gbit/s TWDM-PON a PtP WDM-PON [56]. Systém HSP TWDM-PON je stále v počátečních fázích vývoje, velké změny lze očekávat až do doby, než se technologie 50 Gbit/s TDM-PON z vývojového hlediska více etabluje/standardizuje [133]. První sada požadavků HSP (G.hsp.req, G.9804.1) byla schválena v červenci 2019 na plenárním zasedání SG15 [56]. Společná vrstva (G.hsp.com) pro

<sup>3</sup>V anglické terminologii colorless.

<sup>4</sup>Study Group – studijní/pracovní skupina.

přenosovou vrstvu (TC) zahrnuje specifikace pro všechny tři systémy HSP a možná budoucí rozšíření [133].

## 2.4 Současný stav pasivních optických sítí

Tato podkapitola se věnuje aktuální problematice z pohledu fyzické a přenosové vrstvy pasivních optických sítí. Schvalování a vývoj nového doporučení je doprovázeno publikačními aktivitami jak v rámci studijní skupiny, tak odborných publikací. Tyto publikace se zaměřují na směr vývoje zlepšení v oblasti dosahu distribuční sítě, celkový dosah systému, počet koncových jednotek na jeden port řídicí jednotky apod. [142, 21]. Pojem „Super-PON“ se historicky již dříve uváděl, zejména v prvopočátcích pasivních optických sítí [118], kdy se nebral plný ohled na pasivitu celé distribuční části sítě. Bylo zcela běžné, že se v návrzích objevovaly EDFA (vláknový erbiem dopovaný zesilovač – Erbium Doped Fiber Amplifier) zesilovače za účelem zvýšení dosahu celé sítě, případně překlenutí vyššího dělicího poměru [118]. Novodobé využití pojmu „Super-PON“ je založeno na specifikaci IEEE P802.3cs. Hlavním cílem specifikace bylo navýšení dosahu mezi ONU a OLT v rámci ODN [21]. Prodloužení dosahu mezi koncovou a řídicí jednotkou by samo o sobě nestačilo, dále bylo uvažováno zvýšení dělicího poměru<sup>5</sup> (až 1:1024), bitová chybovost  $\leq 10^{-12}$  bez využití korekčních kódů, podpora až 16 párů vlnových délek pro PtMP spojení a využití laditelných transceiverů. Obdobným směrem, se shodnými cíli, se vydala i pracovní skupina pod hlavičkou ITU [142].

Významnou roli hrají také algoritmy pro dynamické přidělování komunikačních slotů vzestupného směru [147, 75, 33]. Přidělování časových slotů, založených na TDM (časově dělený multiplex – Time Division Multiplex), je nedílnou součástí vylepšení a férového vytížení vzestupného směru. Mezi nejběžněji zmiňované algoritmy patří algoritmus GIANT (algoritmus pro dynamické přidělování časových slotů ve vzestupném směru – GigaPON Access Network), jenž byl navržen v roce 2006 [Atr51]. Primárním nasazením jsou sítě PON založené na specifikacích ITU. Princip algoritmu lze shrnout na dvě fáze – garantovaná a „přebytková“ fáze, bližší informace o dynamické alokaci časových slotů jsou k dispozici v [Atr51]. Dílčí návaznost na nasazování DBA (dynamická alokace časových slotů – Dynamic Bandwidth Allocation) představuje kombinaci sensorického systému založeném na FBG (vláknová Braggova mřížka – Fiber Bragg Grating) a telekomunikačních služeb. Publikace zavádí nový koncept sdílení šířky pásma mezi FBG snímáním a telekomunikačními službami [18]. Zahrnuje matematickou simulaci a experimentální výsledky. Navrhovaná koncepce využívá statistickou detekci výkonových špiček FBG, monitorování

---

<sup>5</sup>Kaskádním zapojením splitterů.

dynamiky FBG mřížek a periodický odhad intenzity FBG. Alokace časových slotů, výběr modulačního formátu (k optimalizaci zpoždění a spotřeby energie) a dynamické využití subnosných ve vzestupném směru prezentováno v [148] je založeno na využití strojového učení [72]. Nevýhodou prezentovaného řešení je komplexnost a nutnost zásahu na obou stranách aktivních prvků, čímž by došlo k prodražení celého řešení.

S rozšířeností mobilních sítí páté generace se infrastruktura neobejde bez optických vláken, čímž dochází k minimalizaci zpoždění mezi koncovými stanicemi. Pracovní skupina ITU využitelnost ODN, pro připojení mobilních uzlů, zohlednila v návrhu a schválení doporučení NG-PON2. Ukončení optického vlákna FTTH (optické vlákno ukončené v anténě – Fiber to the Antenna) je v rámci specifikace G.989 uváděno jako modalita pro byznys klienta. Jinými slovy, připojení antény od řídicí jednotky je realizováno separátní vlnovou délkou. Publikace [23] zohledňuje zpoždění pro citlivé aplikace s ohledem na množství připojených koncových jednotek. Na základě výsledků pro rozsah ODN 20 km a 64 koncových jednotek, dosahuje průměrné zpoždění 200  $\mu$ s. Alokace časových slotů koncovým jednotkám, v sítích TWDM-PON, tvoří sdílený přístup k médiu. Jakmile dojde k připojení bodu 5G sítě, bude nezbytné časové sloty dělit na mini časové sloty [143]. Alokace minislotů v časových slotech může způsobovat kolizi a je nezbytné aplikovat kooperativní alokaci časových slotů nebo se pravidelně dotazovat na reportování stavu koncových jednotek [143]. Článek [130] popisuje pilotní nasazení 50G PON systému, založeného na TDM, jako páteřní síť pro 5G spojení. Experimentální síť obsahovala dvě koncové jednotky ONU, na níž byla připojena 5G základnová stanice s dvěma mobilními uzly. Koncoví uživatelé dosahovali, v sestupném směru, přenosové rychlosti od 800 do 1000 Mbit/s. Efektivní využití kapacity vzestupného směru a minimalizaci zpoždění si kladou za cíl i autoři publikace [7]. C-RAN (centralizovaná rádiová přístupová síť – Centralized Radio Access Network) architekturu v 5G systémech je možné rozdělit na fyzickou vrstvu signálového zpracování mezi RU (rádiová jednotka – Radio Unit) a DU (distribuovaná jednotka – Distributed Unit). Rozdělení funkcí umožňuje statisticky proměnlivý provoz mezi RU a DU, který je třeba přenášet přes fronthaul rozhraní s definovanými požadavky na latenci (několik 100  $\mu$ s) a kolísání zpoždění (řádově 10  $\mu$ s) [7]. V této souvislosti nabízí TDM-PON efektivní řešení pro statistický multiplex provozu přes pasivní optickou infrastrukturu typu PtMP.

Kompletní pasivita distribuční sítě eliminuje spotřebu energie mezi řídicí a koncovou jednotkou, nicméně právě koncové jednotky a jejich spotřeba se dostávala do centra výzkumných článků. Řízení spotřeby, zejména v neaktivitě, se ukázalo jako významná složka celkové spotřeby. Článek [81] se zabývá PON sítěmi založenými na TDM, prakticky většina současně nasazených technologií. Autoři uvádí, že rozložení spotřeby elektrické energie lze rozdělit:

- $\approx 19\%$  na páteřní část sítě (aktivní prvky za OLT jednotkou),
- $\approx 21\%$  na „ústřední část“<sup>6</sup> na straně poskytovatele služeb,
- $\approx 60\%$  na koncové uživatele (zejména jejich ONU jednotky).

Publikace [9] se zabývá využitím dvojitého schématu pro koexistenci GPON a XG-PON. Jinými slovy, jedná se primárně o realizaci jediné koncové jednotky, která bude podporovat obě doporučení s využitím WDM členu. Dané řešení je plně pokryto současným a schváleným doporučením G.987.3. Příspěvek [71] popisuje přístupovou síť s bezdrátovým přístupovým bodem připojeným ke koncové jednotce. Dle výsledků je patrné, že spotřeba závisí nejen na množství přístupových bodů, ale také na množství připojených koncových stanic k danému bodu.

Spolehlivost služeb, provozní náklady a zpoždění přenosu optických přístupových sítí jsou v současné době hlavními problémy, které je nezbytné řešit při plánování a vývoji pasivních optických sítí nové generace. Článek navrhuje flexibilní, energeticky účinnou architekturu PON s časovým multiplexem a multiplexem s dělením vlnové délky (TWDM) (Časový a vlnový multiplex – Time Wavelength Division Multiplex), která má možnost centralizovaného sdílení zdrojů OLT s více optickými sítěmi [31]. Navržená struktura umožňuje sdílení prostředků OLT s více optickými sítěmi a možnost přenosu mezi jednotlivými body pro komunikaci uvnitř ODN. Zajištěním intra-komunikace mezi ONU na stejném segmentu bylo dosaženo hodnoty latence přenosu dat na  $148\ \mu\text{s}$ . Dosavadně navržené topologie sice umožnili snížit spotřebu elektrické energie, nicméně neexistuje žádné schéma, které by umožnilo přímo komunikaci mezi koncovými jednotkami [45, 137, 129, 30].

Publikace [3] představuje efektivní využití přidělovaných časových slotů, pro vzestupný směr, na základě požadavků k odeslání dat koncovými zařízeními. Konvenční řídicí jednotka poskytuje časové sloty i pro nevytížené koncové jednotky, čímž dochází ke znemožnění přechodu do režimu spánku. Autoři představují nová schémata pro uspávání koncových jednotek s pravidelným monitorováním/poskytováním časových slotů. K zajištění odpovídající QoS (kvalita služby – Quality of Service) je zavedena funkce včasného probuzení<sup>7</sup>, tedy probuzení z režimu spánku při příchodu požadavků odeslání dat ve vzestupném směru. Stávající proces předčasného probuzení ONU však může vést ke zvýšení spotřeby energie ONU. Je to proto, že ONU se při příchodu rámce proti proudu okamžitě probudí ze stavu spánku, ale i tak musí čekat na předání rámce až do přidělené doby bezplatného přidělení, což vede ke zbytečné spotřebě energie. Tento nedostatek je eliminován díky managementu grantů představených v [3]. Prezentované řešení se zabývá pouze efektivitou přidělování grantů, neobsahuje žádné zohlednění k DBA algoritmům.

Výše uvedený nedostatek odstraňuje publikace [10], kde je představen CSM (cyk-

---

<sup>6</sup>Central office

<sup>7</sup>Definováno v příslušných dokumentech doporučení PON podle ITU.

lický režim spánku – Cyclic Sleep Mode). Úspora energie je dána delšími periodami stavu „Asleep“ a zkrácením periody stavu „SleepAware“. Příliš krátká doba SleepAware výrazně ovlivňuje DBA algoritmy a může způsobit zpoždění PLOAM zpráv od OLT. Navržené schéma autoři odsimulovali v prostředí OPNET Modeler se všemi třídami provozu T-CONT 1–4. Výsledky dokládají, že pro zajištění maximální úspory energie dosahovalo průměrné zpoždění  $\approx 56$  ms [10].

V roce 2016 se na prestižní konferenci OFC (konference zaměřená na optické komunikace – Optical Fiber Communication Conference) objevil článek [74], jenž nabádá k otevření metropolitní sítě pomocí disagregovaného hardware a software. Daná oblast zaujala i zájmové sdružení právnických osob CESNET [69, 70]. Obdobnou cestu v současnosti razí i technologické firmy Meta nebo Microsoft. Ruku v ruce s otevřeným hardware jde možnost softwarového ovládní optických prvků, známým pod označením SDN (softwarově definovaná síť – Software Defined Networking). Článek [91] popisuje vývoj SDN agenta založeného na OpenFlow zprávách pro řízení koncových jednotek sítě GPON (dochází k překladu konfiguračního souboru do OLT jednotky). SDN kontrolér byl založen na technologii ONOS [35]. Autoři [13] se zabývají třemi metodami přístupu ke správě SDN-PON založené na XG(S)-PON (symetrická pasivní optická síť další generace – Next Generation Symmetric Passive Optical Network) doporučení, primárním cílem je minimalizovat zpoždění. Strategie RLLR (reaktivní rezervace s nízkou latencí – Reactive Low-Latency Reservation) obsahuje reaktivní zásahy do konfigurace OLT jednotky na základě grantů. Tento přístup je vhodný pro většinu datových přenosů (data, video a hlas), není však vhodným pro kritické aplikace a bezpečnostní scénáře.

Cílem architektury OBBA (abstrakce širokopásmového připojení – Open Broadband Broadband Access Abstraction) je modernizovat komponenty informačních technologií širokopásmových sítí, konkrétně CO. CO se vyznačují tím, že jsou důležitým agregátorem různých technologií přístupových sítí, jako jsou optické, mobilní a kabelové sítě a profitují z paradigmatu SDN. Článek [79] popisuje VNF (virtualizované síťové funkce – Virtual Network Functions) pro zabezpečení sítě, která bude integrována jako součást architektury OBBA řízené SDN kontrolérem pro autentizaci a autorizaci síťových zařízení s využitím protokolu IEEE 802.1X v sítích PON další generace.

Požadavky na disagregované sítě se z metropolitních sítí přesunuly i do přístupových sítí. Nedostatkem otevřených PON sítí je hardwarová dostupnost a primárně nedostatečná SW podpora. Řešení otevřené PON sítě, na straně OLT, poskytuje projekt vOLTHA (virtuální hardwarová abstrakce OLT jednotky – Virtual Optical Lite Termination Hardware Abstraction) podporující doporučení pasivních optických sítí GPON, XG-PON a XG(S)-PON. V současné době certifikované řešení vOLTHA nabízí 9 výrobců, přičemž se jedná primárně o OLT jednotky. Koncové

jednotky mohou být ty, které se v síti operátora již nachází. Nedostatkem bude jejich podpora po stránce SDN, neboť jsou určeny pro homogenní síť jednoho výrobce [95, 106].

## 3 Fyzická vrstva pasivních optických sítí

Kapitola se zabývá posledními schválenými – případně rozpracovanými – doporučeními pro nejmodernější pasivní optické sítě. Kapitola pokrývá nejen popis fyzické vrstvy, ale i dílčí kroky, které vedly ke konečné specifikaci architektury se zvolenými dělicími poměry. Z pohledu topologie sítě nedochází k žádné změně již od prvního návrhu, neboť stromová struktura sítě PON poskytuje ekonomické řešení sítí založených na PtMP. Kapitola dále obsahuje simulační modely jednotlivých doporučení v jejich dosavadní podobě a jsou vyhodnocovány z pohledu bitové chybovosti, jakožto klíčového parametru pro všechny PON sítě.

### 3.1 100G EPON síť

Vysokorychlostní síť pro přístupové sítě se snaží adaptovat přenosovou rychlost metropolitních sítí a zároveň zachovávat nízkou cenu všech aktivních zařízení, která mají být nasazena. Vývoj doporučení dle IEEE postupoval v souladu se specifikovanými parametry v kapitole 2.3 a kladl důraz na výše zmíněné požadavky. Architektura těchto sítí měla vycházet již z nasazených doporučení a zároveň zajistit trvanlivost pro dlouhodobé a perspektivní nasazení. Níže uvedený obrázek 3.1 zobrazuje vývoj jednotlivých architektur. Doporučení 10G EPON (pasivní optická síť na technologii Ethernet – Ethernet capable Passive Optical Network) nebylo plně zahrnuto v návrzích, nicméně dochází k zachování vzájemné koexistence, proto je tento typ sítí obsažen. Je zřejmé, že nebude možné plně zachovat veškeré prvky, zejména s ohledem na využití širokého rozsahu spektra vlnových délek, spolu s jednoduchým nasazením OLT. Vývoj se proto opíral o dvě varianty vlnových párů [51]:

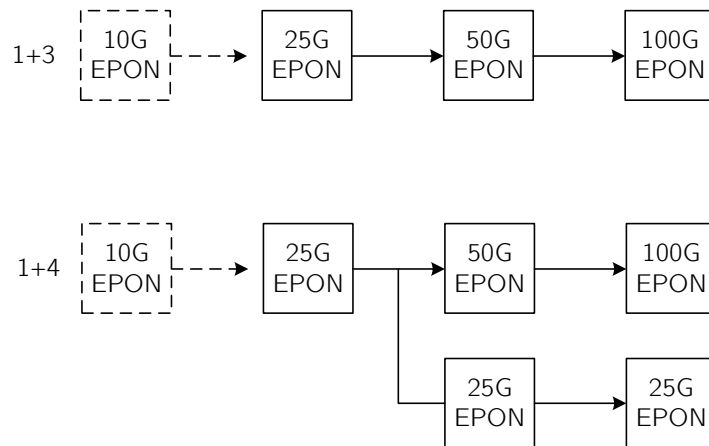
- Architektura 1+3 – nasazení a využití vlnových párů z 1. generace těchto sítí.
- Architektura 1+4 – vytvoření jednoho páru pro kanál 1. generace a využití odlišných vlnových párů pro sítě dalších generací.

Již dnes je zřejmé, že finální varianta odpovídá první zmíněné architektuře, tedy 1+3 [50].

#### 3.1.1 Vlnové páry pro síť 100G EPON architektury 1+3

Výběr vhodných vlnových délek je vždy stěžejní úloha jednotlivých pracovních skupin k finálnímu schválení podoby, z pohledu fyzické vrstvy, nadcházejícího doporučení. Další parametry mnohdy vyplývají z povahy přenosu – zvýšení dělicího poměru, navýšení přenosových rychlostí nebo prodloužení dosahu v rámci ODN. Pracovní skupina celkově předložila 6 plánů (pojmenovaných „A–F“ s dílčími revizemi pro





Obr. 3.1: Návrhy architektur sítí dle IEEE 100G EPON [51].

sestupný a vzestupný směr. Následující text se bude věnovat pouze plánům A–B, neboť zbylé plány byly určeny pro architekturu 1+4, která nebyla nakonec vybrána.

### Vlnové délky pro plán A

Navržený plán se opíral o vybrání vlnových párů z O pásma (1260–1360 nm) za účelem nízké disperze a zachování NRZ (linkový kód bez návratu k nule – Non Return Zero) linkového kódu. Současně je tento plán v souladu se zachováním nízké ceny pro koncové jednotky, neboť mohou být stávající prostředky modifikovány pro využití v síti 100G EPON. Pracovní skupina se nezabývala možnou kolizí se systémem GPON, protože se jedná o „konkurenční“ doporučení od ITU a nepředpokládá se koexistence s takovými sítěmi. Naopak vzniká nárok na koexistenci se symetrickými sítěmi 10G EPON. Řešení zahrnuje nasazení WDM a zmiňuje implementaci filtrů na straně OLT z důvodu malého ochranného pásma mezi vlnovými délkami vzestupného směru obou doporučení. Níže uvedená tab. 3.1 obsahuje pilotní vlnové délky plánu A.

Tab. 3.1: Navržené páry vlnových délek dle plánu A.

Kanál [-]	Sestupný směr [nm]	Vzestupný směr [nm]
0	1334,874	1289,985
1	1344,361	1294,441
2	1349,201	1298,927
3	1354,076	1303,445

## Vlnové délky pro plán B

Druhý plán navrhuje využití stejného pásma pro vhodné vlnové délky implementace 1. generace (25 Gbit/s EPON) v porovnání s plánem A, čehož je docílení omezením rozsahu pro vzestupný směr mezi 1260–1280 nm. Díky širšímu rozsahu (20 nm) pro vzestupný směr lze využít nejlevnější optické komponenty ve formě nechlazených DML (laser s přímou modulací – Directly Modulated Laser) laserů [51]. Nevýhodou současného plánu s navrženými vlnovými délkami (viz tab. 3.2) je omezená koexistence se sítěmi 10G EPON, jelikož dochází k využití shodného pásma pro vzestupný směr, což musí vést k nasazení TDM napříč jednotlivými doporučeními [46].

Tab. 3.2: Pilotní vlnové délky pro plán B.

Kanál [-]	Sestupný směr [nm]	Vzestupný směr [nm]
0	1328,87	1260–1280
1	1343,16	1292,77
2	1347,99	1297,24
3	1352,85	1301,75

### 3.1.2 Přenosové parametry sítě 100G EPON architektury 1+3

Architektura 1+3, dle obrázku 3.1, vyžaduje postupné navyšování přenosových rychlostí od 25 k 50 až po konečných 100 Gbit/s. Nejsnadnějším dosažením konečné přenosové rychlosti je sdružování dílčích kanálů o rychlosti 25 Gbit/s. Struktura ODN zůstane kompletně pasivní i nadále. O vysílání dílčích kanálů se bude starat OLT a příjem pak koncová jednotka ONU, která bude navržena pro dílčí generace [51]:

- 1. generace – je běžně označována jako 25G EPON, jedná se o prvotní krok k dosažení konečné přenosové rychlosti 100 Gbit/s. Žádoucí je plná podpora symetrického 25/25 Gbit/s i asymetrického 25/10 Gbit/s přenosového módu. Doposud využíván linkový kód NRZ zůstal zachován, včetně FEC (dopředná korekce chyb – Forward Error Correction) – doposud bez finální volby korekčního kódu. Dosah přenosového systému – závisí na vlnovém plánu<sup>1</sup> – má zůstat zachován do 20 km při dělicím poměru 1:32.
- 2. generace – jedná se o další stupeň vysokorychlostní sítě a využívá sdružení 2 kanálů (vlnových párů) o přenosové rychlosti 25 Gbit/s, čímž bude docíleno 50G EPON. Požadavkem je symetrický 50/50 Gbit/s a asymetrický 50/25 Gbit/s mód. Asymetrický režim využije původně použitý vlnový pár z 1. generace.

<sup>1</sup>V návrhu, pro architekturu 1+4, je uveden i vyšší dosah

- 3. generace – poslední varianta se sdružením 4 kanálů (vlnových párů) nabídne symetrickou přenosovou rychlost 100/100 Gbit/s, asymetrický režim je shodný s režimy 1. a 2. generace, neboť dochází k využití nasazených vlnových párů v těchto generacích.

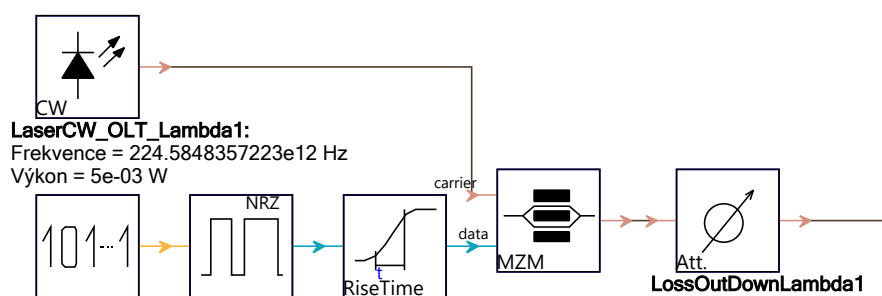
Doposud známé parametry pro pasivní optické přístupové sítě 100G EPON shrnuje tabulka 3.3.

Tab. 3.3: Přehled dostupných parametrů pro pasivní optické přístupové sítě 100G EPON.

Doporučení [-]	802.3ca
Přenosová rychlost v sestupném směru [Gbit/s]	100 (4 × 25)
Přenosová rychlost ve vzestupném směru [Gbit/s]	100 (4 × 25) případně 50 (2 × 25)
Linkový kód [-]	NRZ
Metoda zapouzdření rámců [-]	Ethernet
Maximální dělicí poměr [-]	1:32
Maximální dosah sítě [km]	20
Korekce chyb	ano (doposud bez finální volby korekčního kódu)

### 3.1.3 Simulační model 100G EPON sítě

K vytvoření simulačních modelů pro 100G pasivní optické sítě, dle doporučení IEEE, v rámci architektury 1+3 byl využit nástroj VPIphotonics Design Suite™ v11.2. Model přístupové sítě byl rozdělen do 3 bloků – vysílací část (OLT), distribuční část (ODN) a přijímací část (ONU). V rámci vysílací části, zobrazené na obrázku 3.2, byl kladen důraz na plnění parametrů definovaných v kapitole 3.1. Vysílací část sestává z laseru, generátoru dat, linkového kódu a modulátoru.



Obr. 3.2: Návrh vysílací části vysokorychlostní přístupové sítě dle 100G EPON.

Zdrojem optického signálu je blok laser CW (spojitá vlna – Continuous Wave), jenž reprezentuje DFB (laser s rozprostřenou zpětnou vazbou – Distributed Feedback). Model vytváří časově závislé pole  $E(t)$  popisující záření CW laseru se zadanou frekvencí, spektrální šířkou čáry, výkonem a polarizací. Nastavení výstupu

(OutputDataType) odpovídá blokům, čímž je v simulačním nástroji dosaženo generování pole  $E(t)$  v definovaném pásmu s centrální frekvencí  $f_c$  (odpovídající parametru EmissionFrequency). Signál je reprezentovaný výkonem  $|E(t)|^2$ , definovaným v parametru AveragePower. Šířka spektrální čáry generovaného signálu  $E(t)$  je modelována pomocí Gaussova zdroje bílého šumu s rozptylem  $2\Pi\Delta f$  korespondující s parametrem FWHM (maximální šířka průběhu v polovině jeho výšky – Full Width Half Maximum)  $\Delta f$ . Výstup se vynásobí komplexním vektorem zohledňující SOP (stav polarizace – State of Polarization), z čehož jsou získány složky polarizace X a Y. Základní pásmo signálu, z bloku laser CW, lze definovat vztahem (3.1) [128]:

$$E(t) = \sqrt{P} \begin{pmatrix} \sqrt{1-k} \\ \sqrt{ke^{j\delta}} \end{pmatrix} \cdot \exp \left( j \int_0^t \omega(\tau) d\tau \right). \quad (3.1)$$

SOP je dán parametrem rozdělení výkonu  $k(0 \leq k \leq 1)$  a doplňkovou fází  $\delta$ . Vztahy mezi rozdělením výkonu  $k$ , doplňkovou fází  $\delta$  s azimutem  $\eta$  a elipticitou  $\varepsilon$  jsou dány rovnicemi (3.2) a (3.3) [128]:

$$\tan(2\eta) = 2 \frac{\sqrt{k(1-k)} \cdot \cos \delta}{1-2k}, \quad (3.2)$$

$$\sin(2\varepsilon) = 2\sqrt{k(1-k)} \cdot \sin \delta. \quad (3.3)$$

Průměrnou výkonovou spektrální hustotu výstupního signálu (definovanou vztahem (3.1)) lze popsat následovně [128]:

$$P(f) = \frac{2P}{\pi\Delta f \left[ 1 + \frac{(f-f_c)^2}{(\frac{\Delta f}{2})^2} \right]}. \quad (3.4)$$

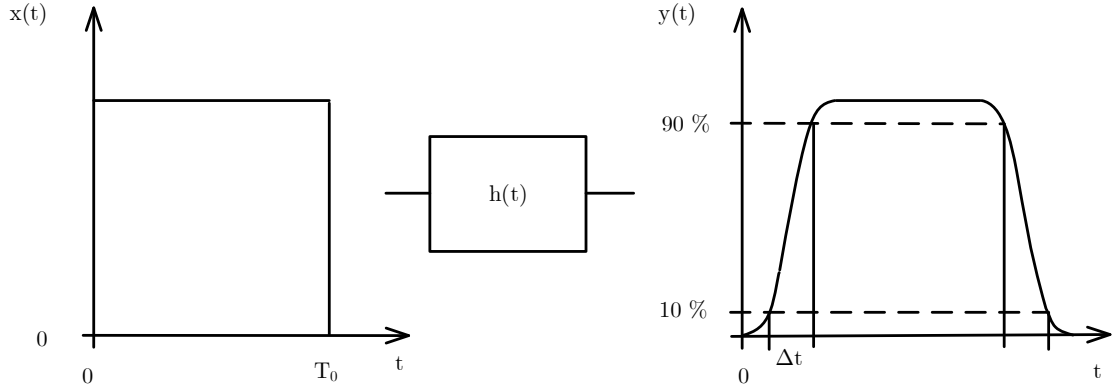
Pro vygenerování bitových posloupností slouží blok PRBS (generátor pseudonáhodných binárních sekvencí – Pseudorandom Binary Sequence Generator). Modul generuje několik typů pseudonáhodných datových sekvencí PRBS, De Bruijn sekvence řádu  $N$ , střídavě 1 a 0, samé 1 nebo samé 0, případně odešle uživatelem nadefinovanou sekvenci. Blok PRBS vytváří posloupnost  $M$  bitů (viz vztah (3.5)) tvořenou 0 a 1. Vygenerovanou posloupnost lze uložit do souboru a použít pro další simulace/simulační scénáře. Implementace v prostředí VPIdesign Suite™ se opírá o nasazení modifikovaného Wichman–Hill generátoru [135, 19, 64].

$$M = TimeWindow \cdot BitRate, \quad (3.5)$$

kde *TimeWindow* nastavuje časový úsek reálného času, který je reprezentován jako blok dat a parametr *BitRate* definuje požadovanou přenosovou rychlost systému.

Blok PRBS je napojen do modulu NRZ, který pro každý vstupní bit generuje elektrický signál. Impuls NRZ má jedinečnou hodnotu po celou dobu trvání daného

bitu. Logická 1 je kódována vysokou úrovní s nenulovou amplitudou a logická 0 nízkou úrovní s nulovou amplitudou. Poté signál vstupuje do bloku RiseTime. Z bloku NRZ vystupuje zcela ideální výstupní signál, který lze upravit pomocí bloku RiseTime (princip bloku zobrazuje obrázek 3.3). Modul RiseTime se opírá o implementaci popsánou v literatuře [98].



Obr. 3.3: Výstupní impulzy s uživatelem definovanou dobou náběhu  $\Delta t$  generované filtrováním vstupních impulsů pomocí filtru Gaussova tvaru.

Obdélníkový vstupní impuls NRZ s dobou trvání  $T_0$  je filtrován lineárním časově invariantním filtrem s normalizovanou impulzní odezvou Gaussova tvaru, definovanou jako [128]:

$$h(t) = \frac{2}{\sqrt{\pi T}} e^{-\left(\frac{2t}{T}\right)^2}, \quad (3.6)$$

kde  $T$  označuje dobu trvání impulsu. Výstupní impuls  $y(t)$  je dán konvolucí  $h(t)$  s obdélníkovou časovou funkcí [128]:

$$y(t) = \frac{1}{2} \left( \operatorname{erfc} \frac{2(t - T_0)}{T} - \operatorname{erfc} \frac{2t}{T} \right). \quad (3.7)$$

Hodnoty 10% a 90% amplitudy  $y(t)$  definuje parametr RiseTime  $\Delta t$ . Při úvaze, že doba trvání impulsu  $T_0$  odpovídá časové konstantě  $T$  filtru, pak je náběžná doba  $\Delta t \approx \frac{3}{4}T$ . Pro  $T_0 \geq 1,5 \cdot T$  je chyba aproximace menší než 10%. Ve frekvenční oblasti má filtr rovněž Gaussov tvar a šířka pásma  $1/e$ ,  $\Delta f_e$  je dána vztahem (3.8) [128]:

$$\Delta f_e = \frac{4}{\pi T}, \quad (3.8)$$

z čehož plyne, že pro všechny náběžné doby  $\Delta t \leq 0,5 \cdot T_0$  je šířka pásma  $1/e$  přibližně rovna vztahu (3.9) [128]:

$$\Delta t \leq 0,5 \cdot T_0 \quad (3.9)$$

Nyní je nezbytné elektrický signál přivést na vstup MZM (Machův–Zehnderův modulátor – Mach–Zehnder Modulator), což je interferometrická struktura vyrobená

z materiálu se silným elektrooptickým účinkem (např. LiNbO<sub>3</sub>, GaAs, InP). Modul MZM se primárně opírá o publikace [132, 67]. V rámci návrhu a výroby bude mít modulátor velký extinkční poměr a nízký chirp (dynamická změna frekvence při modulaci). Optický výkon  $P_{out}$  na výstupu MZM závisí na fázovém rozdílu  $\Delta\Phi$  mezi oběma větvemi modulátoru a lze ho definovat vztahem (3.10) [128]:

$$P_{out}(t) = P_{in}(t) \cdot d(t) = P_{in}(t) \cdot \cos^2[\Delta\Phi(t)], \quad (3.10)$$

při:

$$\Delta\Phi(t) = \frac{\Delta\Phi_1(t) - \Delta\Phi_2(t)}{2}, \quad (3.11)$$

kde  $d(t)$  je přenosová funkce výkonu,  $\Delta\Phi_1(t)$  a  $\Delta\Phi_2(t)$  jsou změny fáze v každé větvi způsobené použitým modulačním signálem. Při požadavku na vysoký extinkční poměr  $f_{extinct} = \frac{d_{max}}{d_{min}}$  je závislost fázového rozdílu  $\Delta\Phi(t)$  na elektrickém vstupním datovém signálu  $data(t)$  dána vztahem (3.12) [128]:

$$\Delta\Phi = \frac{\pi}{2} \left( \frac{1}{2} - ext \cdot \left( data(t) - \frac{1}{2} \right) \right), \quad (3.12)$$

při:

$$ext = 1 - \frac{4}{\pi} \arctan \left( \frac{1}{\sqrt{f_{extinct}}} \right). \quad (3.13)$$

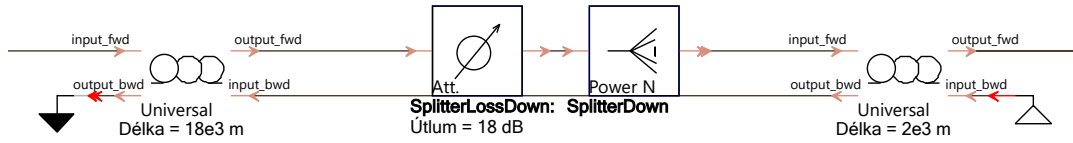
Extinkční poměr lze zadat v jednotkách dB podle  $\varepsilon = 10 \cdot \log(f_{extinct})$  nastavením parametru Extinction v prostředí simulace.

Poslední blok vysílací části reprezentuje útlumový člen pracující dle vztahu (3.14) [128]:

$$E_{out,v}(t) = E_{in}(t) \cdot 10^{\frac{-a}{20}}, \quad (3.14)$$

kde  $a$  uvádí nastavený útlum (dB) v prostředí simulace.

Distribuční část (viz obrázek 3.4) sestává z optického vlákna vedoucího do dané lokality, pasivního rozbočovače (splitteru) a dalším vláknem směrem ke koncové jednotce na straně zákazníka.



Obr. 3.4: Návrh distribuční části vysokorychlostní přístupové sítě dle 100G EPON.

Model ODN sestává z optického vlákna, útlumových členů a splitteru. Optické vlákno je charakterizováno svou délkou, měrným útlumem a parametry disperzí. Signál v reálném vlákně je degradován ztrátami, které snižují jeho výkonovou úroveň šířeného signálu (absorpce materiálu, nečistoty ve vlákně a Rayleighův rozptyl).

Světelný paprsek, který je navázán do optického vlákna, se šíří ve dvou vzájemně kolmých polarizačních rovinách. Příklad-li v úvahu osa z jako směr šíření vlnění, pak lze roviny označit jako horizontální ve směru x a vertikální ve směru y, tedy jako rychlou a pomalou osu. Uvedený model os je definován jako PSP (základní stavy polarizace – Principal States of Polarization). Tím, že se přenášené vidy šíří různou rychlostí, dochází k roztahování impulzu mezi vstupním a výsledným impulzem. Na velikosti prodlevy závisí výsledná rychlost. Výsledné roztažení impulzu udává časové zpoždění  $\Delta\tau$  na konci trasy. Polarizační vidová disperze je spektrální střední hodnotou DGD (skupinové zpoždění – Differential Group Delay). Velikost DGD se v časové oblasti mění pouze velmi pozvolna. Oproti tomu se v závislosti na vlnové délce mění podstatně rychleji. Vlastnosti PMD (polarizační vidová disperze – Polarisation Mode Dispersion) spočívají mimo jiné v anizotropních vlastnostech optického vlákna. Hodnota polarizační vidové disperze je udávána v jednotkách ps. Mezi parametry ovlivňující polarizační vidovou disperzi řadíme špatnou geometrii vláken (nesymetrie uvnitř vlákna), vzduchové bubliny, napětí mezi vrstvami skla, natahování tahem nebo tlakem, ohyby a zkruty vláken.

Veškeré výše uvedené parametry se vyskytují v reálných vláknech, pro něž je typická nesymetrie uvnitř vláken daná výrobním procesem. Na druhou stranu významnou roli hraje i preciznost při zapojování optické trasy, čištění konektorů, vyvarování se ohybům atd. Další vliv má také změna teploty v jednotlivých ročních obdobích (např. vysoké teploty v létě nebo extrémní chlad v zimě).

Polarizační vidovou disperzi lze vyjádřit pomocí vztahu (3.15):

$$\text{PMD} = \frac{\Delta\tau}{l}, \quad (3.15)$$

kde PMD je polarizační vidová disperze,  $\Delta\tau$  je rozdílové skupinové zpoždění a  $l$  je délka optického vlákna. Tento vztah však platí pouze pro krátká vlákna (méně než 10 km). Výsledná závislost je lineární.

Pro delší vlákna (nad 10 km) platí, že se PMD šíří s druhou odmocninou vzdálenosti, dle vztahu (3.16):

$$\text{PMD} = \frac{\Delta\tau}{\sqrt{l}}, \quad (3.16)$$

kde PMD je polarizační vidová disperze,  $\Delta\tau$  je rozdílové skupinové zpoždění a  $\sqrt{l}$  je druhá odmocnina délky optického vlákna.

Navazující blok útlumový člen pracuje dle vztahu (3.14) a jedná se o doplněk k bloku Power N splitteru. V reálné síti je splitter charakterizován svým dělicím poměrem, zatímco v prostředí VPIphotonics se jedná o symbolický blok, kterému nelze definovat dělicí poměr. Hodnota dělicího poměru na bloku Power N je reprezentována hodnotou útlumu v bloku attenuation.

Model koncové jednotky, zobrazen na obrázku 3.5, sestává z filtru, APD (lavinová dioda – Avalanche Photodiode) diody pro konverzi signálu z optické do elektrické domény, vyhodnocující části k evaluaci BER (bitová chybovost – Bit Error Rate) a diagramu oka. První blok nahrazuje konektorový spoj a je definován pevnou hodnotou útlumu 0,3 dB, následovaný modulem filtru. Modul FilterOpt je univerzální model optického filtru pro simulace pásmových propustí, pásmových zádrží a hřebenových filtrů se standardními přenosovými funkcemi (Bessel, Chebyshev, apod.) a je založen na referencích [104, 119]. Vlastnosti filtru lze definovat přenosovou funkcí. Modul a argument komplexně vyjádřené přenosové funkce  $H(\omega)$  popisují amplitudovou a fázovou frekvenční odezvu filtru na vstupní harmonické signály  $E(t) = \exp[j(\omega t + \varphi_0)]$ . Je-li přenosová funkce filtru známa, pak lze filtrovaný signál, ve frekvenční oblasti, jednoduše nalézt jako součin spektra vstupního signálu a přenosové funkce filtru  $E_{out}(\omega) = H(\omega) E_{in}(\omega)$ .

Přenosovou funkci lineárního časově invariantního filtru lze vyjádřit jako poměr polynomů v oblasti  $s$  dle vztahu (3.17) [128]:

$$H(s) = H_0 \frac{Z(s)}{P(s)}, \quad s = j\omega, \quad \omega = 2\pi f, \quad (3.17)$$

s jmenovatelem ve tvaru podle vztahu (3.18) [128]:

$$Z(s) = \prod_{i=1}^{N_Z} (s - z_i), \quad (3.18)$$

a čitatelem ve tvaru podle vztahu (3.19) [128]:

$$P(s) = \prod_{i=1}^{N_P} (s - p_i), \quad (3.19)$$

kde  $z_i$  jsou kořeny čitatele nazývané nulové body,  $p_i$  jsou kořeny jmenovatele nazývané póly,  $N_P$  a  $N_Z$  jsou počty nul a pólů a platí, že  $N_P \geq N_Z$ ,  $H_0$  udává koeficient zesílení.

Doprovodný modul pro získání parametrů BER a Q faktoru se jmenuje Rx-OKK-BER (založený na referencích [52, 87, 41, 47, 88]). Primárním účelem je zvolení fotodetektoru APD a následně vyhodnocování příchozího signálu z pohledu zmíněných parametrů. Deterministický přístup ve vyhodnocení BER předpokládá, že všechny fluktuace tvaru signálu způsobené přeslechy, mezisymbolovou interferencí, disperzí vlákna a nelinearitou nemají statistickou povahu – proto tyto fluktuace nelze zohlednit pouhým přičtením k celkovému rozptylu šumu. Místo toho je třeba vypočítat pravděpodobnost chyby pro každý bit v bitové posloupnosti s ohledem na statistické vlastnosti šumu a deterministický průběh signálu. Pro Gaussovou analýzu



parametru BER se střední hodnota a rozptyl signálu pro každý bit odhadují z derivace celkové charakteristické funkce. BER pro každý bit se vypočítá vztahem (3.20) [128]:

$$\text{BER} = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left( \frac{(-1)^{B(n)} (\mu(n) - D)}{\sigma(n)} \right), \quad (3.20)$$

kde:  $B(n)$  je číslo  $n$ -tého bitu,  $\mu(n)$  a  $\sigma(n)$  označují střední hodnotu a rozptyl tohoto bitu,  $D$  je rozhodovací prahová hodnota a funkce  $\operatorname{erfc}$  je definována vztahem (3.21) [128]:

$$\operatorname{erfc} = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_x^{\infty} \exp(-y)^2 dy. \quad (3.21)$$

Po výpočtu pravděpodobnosti chyby pro každý bit modul zjistí celkovou hodnotu BER pro celou posloupnost bitů pomocí vztahu (3.22) [128]:

$$\text{BER}(D, t_S) = \frac{1}{N\text{Bits}} \sum_{k=1}^{N\text{Bits}} \text{BER}_k(D, t_S). \quad (3.22)$$

Ve většině případů je však žádoucí optimální hodnota BER, tedy minimální BER pro všechny možné doby vzorkování a prahové hodnoty, pak algoritmus postupuje následovně. Pro daný čas vzorkování se vypočítají střední hodnoty signálu pro všechny jedničkové a nulové bity podle vztahů (3.23) a (3.24) [128]:

$$\mu_1(t_S) = \sum_{k=1}^{N\text{Bits}} \delta(B_k, 1) \mu_k(t_S) = \sum_{k=1}^{N\text{Bits}} \delta(B_k, 1) \int_{-\infty}^{\infty} x \text{PDF}_k(x, t_S) dx, \quad (3.23)$$

$$\mu_0(t_S) = \sum_{k=1}^{N\text{Bits}} \delta(B_k, 0) \mu_k(t_S) = \sum_{k=1}^{N\text{Bits}} \delta(B_k, 0) \int_{-\infty}^{\infty} x \text{PDF}_k(x, t_S) dx, \quad (3.24)$$

kde platí:

$$\delta(A, B) = \begin{cases} 1, & A = B \\ 0, & A \neq B \end{cases}$$

Minimální hodnota BER je nalezena jako minimum funkce na definovaném intervalu, dána vztahem (3.25) [128]:

$$\text{BER}(D_{\text{opt}}, t_S) = \min(\text{BER}(D, t_S)), D \in [\mu_0(t_S), \mu_1(t_S)]. \quad (3.25)$$

Výpočet Q faktoru lze popsat vztahem (3.26) [128]:

$$Q = \frac{\mu_1 - \mu_0}{\sigma_1 + \sigma_0}, \quad (3.26)$$

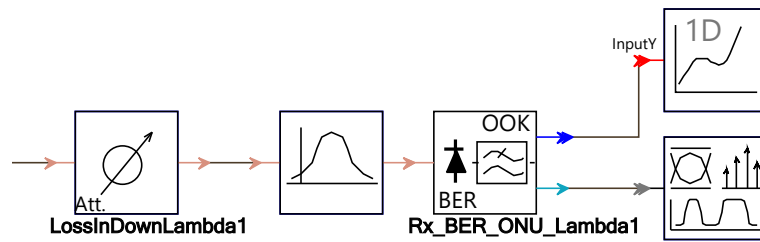
kde  $\mu_1$ ,  $\mu_0$ ,  $\sigma_1$  a  $\sigma_0$  jsou střední hodnoty a směrodatné odchylky signálů „jedna“ a „nula“ v rozsahu vzorkování v rámci každého bitu. Střední hodnoty  $\mu_1$  a  $\mu_0$  jsou

vypočteny na základě vztahů (3.23) a (3.24). Směrodatné odchylky  $\sigma_1$  a  $\sigma_0$  lze vypočítat podle vztahů (3.27) a (3.28) [128]:

$$\sigma_1 = \sqrt{\frac{1}{N\text{Ones}} \left[ \sum_{k=\text{Ones}} \sigma_k^2 + \sum_{k=\text{Ones}} (\mu_k - \mu_1)^2 \right]}, \quad (3.27)$$

$$\sigma_0 = \sqrt{\frac{1}{N\text{Zeros}} \left[ \sum_{k=\text{Zeros}} \sigma_k^2 + \sum_{k=\text{Zeros}} (\mu_k - \mu_0)^2 \right]}, \quad (3.28)$$

kde  $N\text{Ones}$  a  $N\text{Zeros}$  jsou počty „jedničkových“ a „nulových“ bitů v posloupnosti bitů.



Obr. 3.5: Návrh přijímací části vysokorychlostní přístupové sítě dle 100G EPON.

Z pohledu vývoje architektury 1+3 je výchozím stavem 25G EPON, čili využití jednoho vlnového páru. Navazující doporučení, 50G EPON, je tvořeno využitím dvěma vlnovými páry s použitím původního páru ze sítě 25G EPON. Finálním stavem je 100G EPON s nasazením dvou nových vlnových párů k již využívaným. Jelikož dochází k postupnému násobení 25 Gbit/s přenosové rychlosti, je možné vytvořit finální schéma pro sítě 100G EPON s postupným povolováním dílčích vlnových párů. Obrázek A.1 zobrazuje konečné zapojení pro 100G EPON sítě. V rámci simulování 25G EPON sítě dochází k využití jediné vlnové délky 1334,874 nm, 50G EPON síť využívá vlnové délky 1334,874 nm a 1344,361 nm, konečný stav využívá všechny vlnové délky dle tabulky 3.1.

## 25G EPON

Cílem simulací bylo verifikovat současně dostupné parametry pro pasivní optické sítě 100G EPON v rámci sestupného směru pro jednotlivá schémata architektury 1+3. Parametry simulované trasy jsou obsaženy v tabulce 3.4.

Tabulka 3.5 zobrazuje výsledky parametru BER pro sestupný směr. Simulační model neobsahuje kaskádní zapojení splitterů, obsahuje jediný splitter s vyšším dělicím poměrem, neboť při kaskádním zapojení by docházelo pouze k sečtení jednotlivých vložených útlumů (hodnota nebude odpovídat přesnému součtu), nicméně

Tab. 3.4: Parametry simulované trasy pro 25G EPON.

Parametr	—
Vysílací výkon	7 dBm
Vlnová délka	1334,874 nm
Minimální dělicí poměr	1:4
Maximální dělicí poměr	1:64
Linkový kód	NRZ
Min útlum v ODN	8,72 dB
Max útlum v ODN	29,06 dB
Limitní BER	$10^{-4}$
Minimální délka ODN	12 km
Maximální délka ODN	26 km

pro přehlednost modelu byl zvolen jediný splitter. Vysílací výkon zůstal zachován pro veškeré dělicí poměry shodný, doposud nejsou definovány útlumové třídy, které by specifikovaly minimální a maximální vysílací výkon. Simulované dělicí poměry odpovídají schváleným parametrům do dělicího poměru 1:32 a celkové vzdálenosti 20 km. Simulace vyššího dělicího poměru a dosahu distribuční sítě má čistě demonstrativní charakter, neboť PON sítě podle ITU běžně podporují vyšší dělicí poměry. Z výsledků je patrné, že k dosažení limitní hodnoty<sup>2</sup> BER  $10^{-4}$  nedojde ani při maximálním definovaném dělicím poměru pro sítě 25G EPON, tedy 1:32. Výsledky pro vyšší dělicí poměr dosahují bitové chybovosti s délkou distribuční sítě 24 km a využitím FEC, bez využití dopředné korekce chyb bude limitní vzdálenost 15 km s maximálním dělicím poměrem. Tabulka 3.5 obsahuje limitní hodnoty BER oranžovou barvou. Hodnoty zapsány touto barvou lze považovat jako nedostatečné pro nasazení v sítích 25G EPON bez FEC. Bude-li FEC na OLT povolen, jsou veškeré hodnoty akceptovatelné a síť lze provozovat do dělicího poměru 1:64 s celkovou délkou ODN až 26 km.

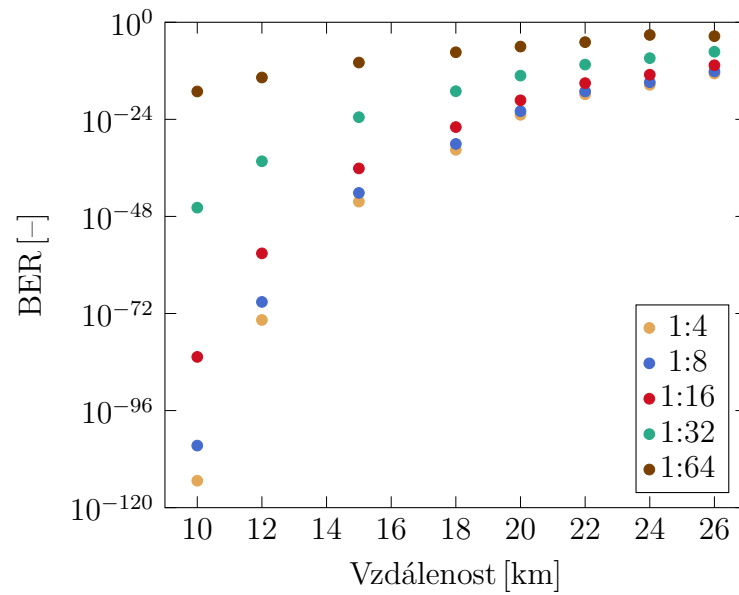
Tab. 3.5: Výsledky simulací sítě 25G EPON.

Děl. poměr	10 km	12 km	15 km	18 km	20 km	22 km	24 km	26 km
1:4	$4,5 \times 10^{-114}$	$2,4 \times 10^{-74}$	$4,5 \times 10^{-45}$	$2,9 \times 10^{-32}$	$1,3 \times 10^{-23}$	$1,5 \times 10^{-18}$	$3,4 \times 10^{-16}$	$2,1 \times 10^{-13}$
1:8	$2,2 \times 10^{-105}$	$7,2 \times 10^{-70}$	$6,5 \times 10^{-43}$	$8,3 \times 10^{-31}$	$1,1 \times 10^{-22}$	$7,8 \times 10^{-18}$	$1,4 \times 10^{-15}$	$6,9 \times 10^{-13}$
1:16	$1,8 \times 10^{-83}$	$7,3 \times 10^{-58}$	$7,4 \times 10^{-37}$	$1,2 \times 10^{-26}$	$5,1 \times 10^{-20}$	$8,8 \times 10^{-16}$	$1,1 \times 10^{-13}$	$2,3 \times 10^{-11}$
1:32	$1,4 \times 10^{-46}$	$4,2 \times 10^{-35}$	$3,4 \times 10^{-24}$	$9,1 \times 10^{-18}$	$6,4 \times 10^{-14}$	$3,4 \times 10^{-11}$	$1,3 \times 10^{-09}$	$5,1 \times 10^{-08}$
1:64	$7,7 \times 10^{-18}$	$2,1 \times 10^{-14}$	$1,1 \times 10^{-10}$	$3,8 \times 10^{-8}$	$9,7 \times 10^{-7}$	$1,2 \times 10^{-5}$	$7,3 \times 10^{-4}$	$3,6 \times 10^{-4}$

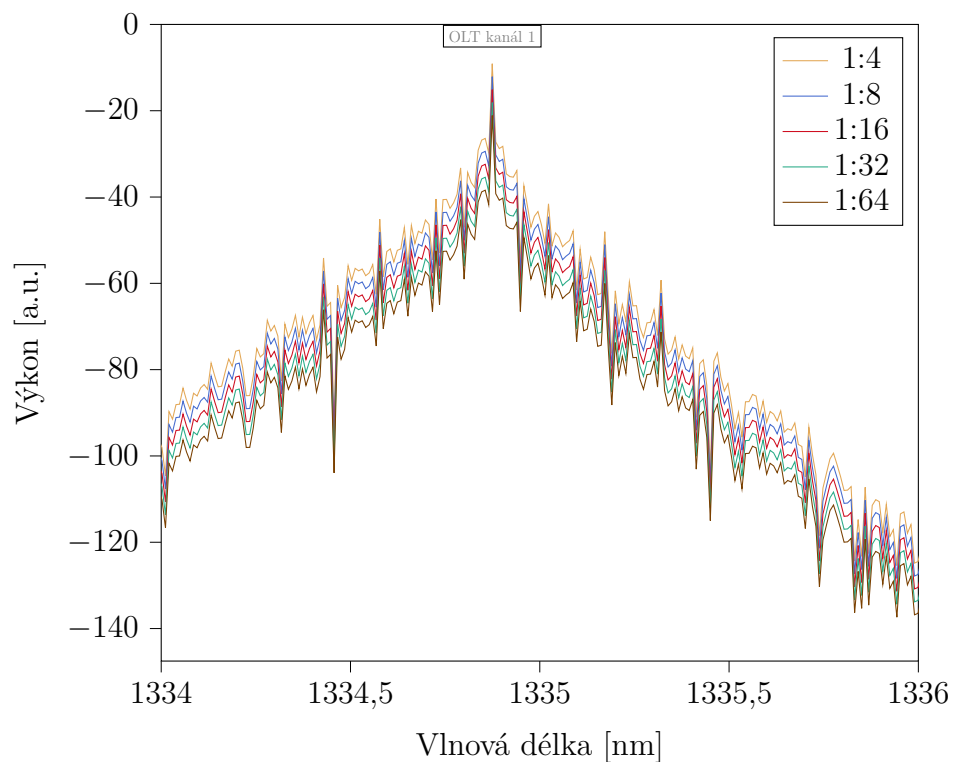
Pro přehlednost je z tabulky 3.5 vykreslen graf (viz obrázek 3.6) obsahující závislost parametru bitové chybovosti na délce distribuční sítě pro různé dělicí poměry.

<sup>2</sup>Při využití FEC.

Dále bylo v rámci simulací zachyceno spektrum, zobrazeno na obrázku 3.7, s délkou distribuční sítě 20 km, pro různé dělicí poměry.



Obr. 3.6: Závislost bitové chybovosti na délce distribuční sítě pro různé dělicí poměry v síti 25G EPON.



Obr. 3.7: Optické spektrum sítě 25G EPON s délkou distribuční sítě 20 km.

## Závěr

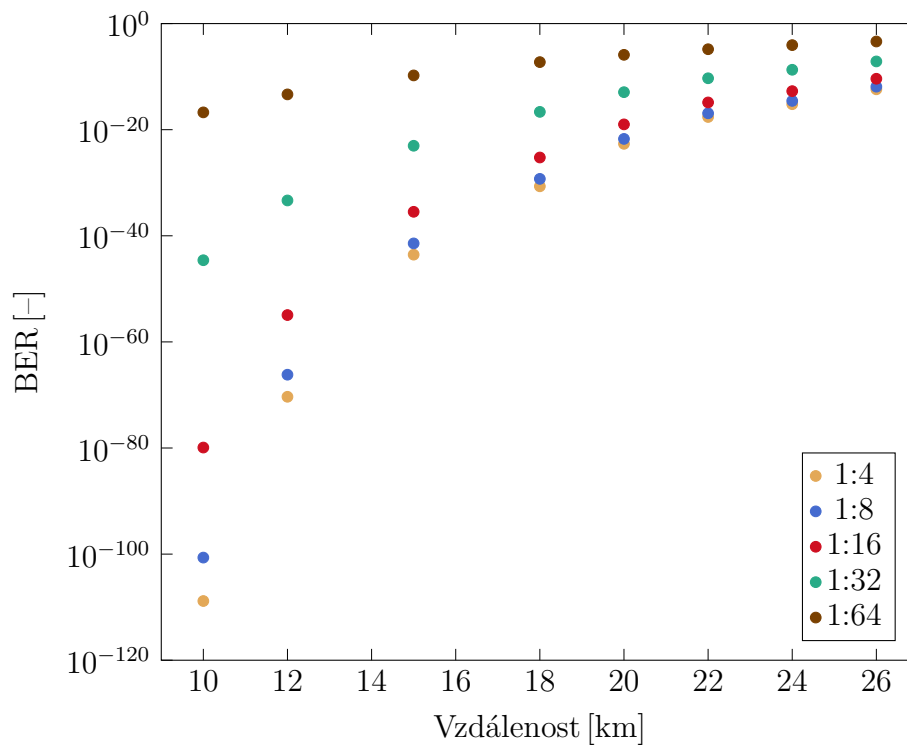
Nejjednodušší varianta vysokorychlostní EPON sítě, podle obrázku 3.1, je 25G EPON, kde dochází k využití jedné vlnové délky 1334,874 nm s maximálním dělicím poměrem 1:32 podle [51]. Simulační scénář připouštěl vyšší dělicí poměr, protože je více než pravděpodobné, že dojde k jeho navýšení do finální specifikace, obdobně jako tomu bylo u sítí 10G-EPON. V prostředí VPIphotonics Design Suite™ v11.2 proběhly simulace sestupného směru pro dělicí poměr až 1:64. Výsledky prokázaly, že v rámci dosavadní specifikace, jsou sítě 25G EPON schopné obsloužit až 32 zákazníků na jediném portu až do vzdálenosti 22 km bez využití dopředné korekce chyb. V případě nasazení FEC lze síť provozovat až pro 64 zákazníků do vzdálenosti 26 km. Hodnoty BER vyžadující FEC jsou v tabulce 3.5 zvýrazněny oranžovou barvou. Prostředí VPIphotonics Design Suite™ v11.2 nemá nastavenou maximální hodnotu BER, kterou nelze překonat. V případě využití simulačního nástroje OptSim nedojde k zobrazení lepší BER hodnoty, než je  $10^{-40}$ , filozofie společnosti VPI je rozdílná a lepší hodnoty BER lze prakticky zanedbávat, jelikož by chyba v přenosu prakticky „nikdy“ nenastala. Obrázek 3.7 zachycuje spektrum sestupného směru v závislosti na dělicím poměru. Z obrázku 3.7 je patrné, že vyšší dělicí poměry mají vliv na pokles výkonu přijímaného signálu.

## 50G EPON

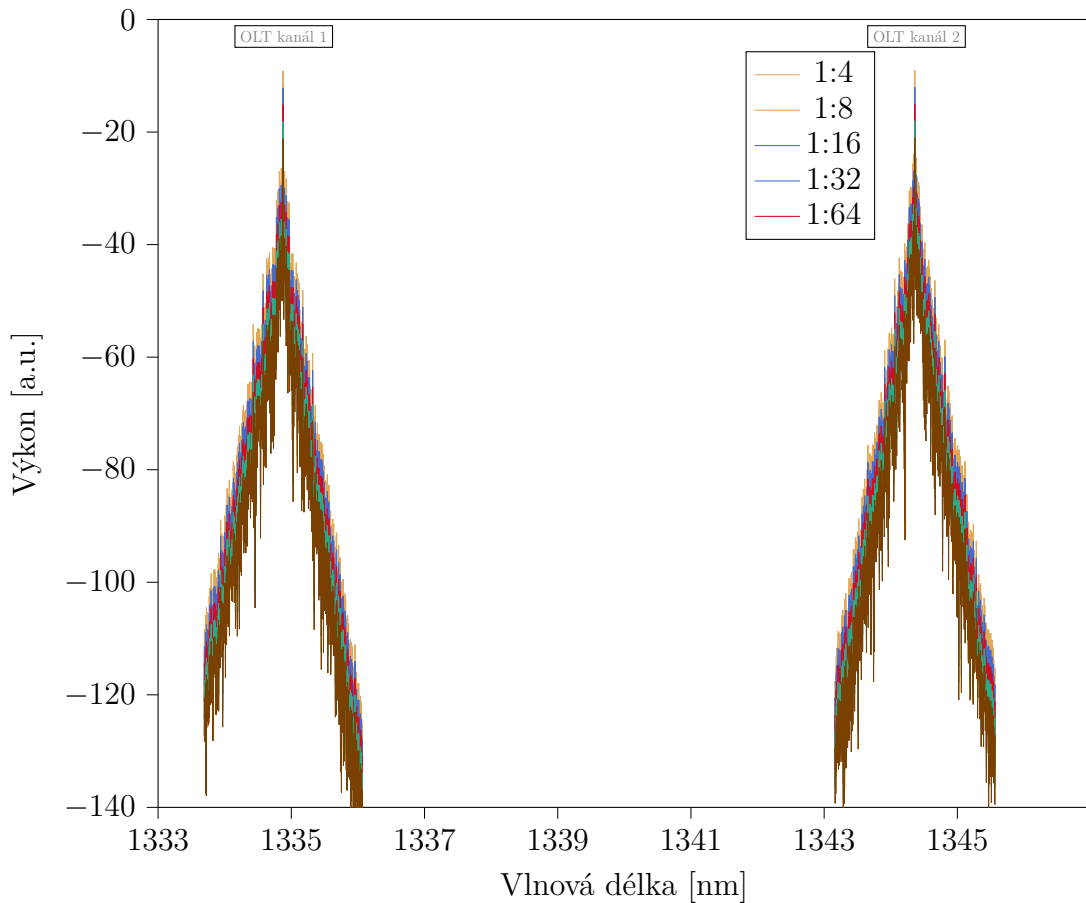
Architektura 1+3, jako dílčí stupeň k dosažení 100G, uvádí přenosovou rychlost 50 Gbit/s, které je dosaženo pomocí dvou vlnových párů. Tabulka 3.6 obsahuje výsledky simulací 50G sítě. V rámci vyhodnocování výsledků byl kladen důraz na zvolenou vlnovou délku, přičemž lze předpokládat, že výsledky budou obdobné pro dílčí vlnové délky, neboť dochází k zachování parametrů v distribuční síti a výkonových úrovních vysílačů. Grafickou závislost bitové chybovosti na vzdálenosti v distribuční části pro různé dělicí poměry zobrazuje obrázek 3.8. Ze spektrálního analyzátoru je patrné, že dochází k přenosu dvou vlnových délek v sestupném směru (viz obrázek 3.9).

Tab. 3.6: Výsledky simulací sítě 50G EPON.

Děl. poměr	10 km	12 km	15 km	18 km	20 km	22 km	24 km	26 km
1:4	$1,4 \times 10^{-109}$	$4,5 \times 10^{-71}$	$2,8 \times 10^{-44}$	$2,1 \times 10^{-31}$	$2,2 \times 10^{-23}$	$2,5 \times 10^{-18}$	$6,4 \times 10^{-16}$	$4,1 \times 10^{-13}$
1:8	$2,2 \times 10^{-101}$	$6,5 \times 10^{-67}$	$3,7 \times 10^{-42}$	$5,4 \times 10^{-30}$	$1,8 \times 10^{-22}$	$1,2 \times 10^{-17}$	$2,7 \times 10^{-15}$	$1,3 \times 10^{-12}$
1:16	$1,2 \times 10^{-80}$	$1,2 \times 10^{-55}$	$3,3 \times 10^{-36}$	$5,7 \times 10^{-26}$	$1,1 \times 10^{-19}$	$1,4 \times 10^{-15}$	$1,9 \times 10^{-13}$	$3,9 \times 10^{-11}$
1:32	$2,4 \times 10^{-45}$	$4,5 \times 10^{-34}$	$9,4 \times 10^{-24}$	$2,3 \times 10^{-17}$	$1,2 \times 10^{-13}$	$4,9 \times 10^{-11}$	$1,9 \times 10^{-09}$	$7,4 \times 10^{-08}$
1:64	$1,8 \times 10^{-17}$	$4,4 \times 10^{-14}$	$1,7 \times 10^{-10}$	$5,5 \times 10^{-08}$	$1,3 \times 10^{-06}$	$1,5 \times 10^{-05}$	$8,2 \times 10^{-6}$	$4,2 \times 10^{-05}$



Obr. 3.8: Závislost bitové chybovosti na délce distribuční sítě pro různé dělicí poměry v síti 50G EPON.



Obr. 3.9: Optické spektrum sítě 50G EPON s délkou distribuční sítě 20 km.

## Závěr

Přechodný krok k dosažení 100G EPON sítě tvoří přidání dílčího kanálu pro sestupný směr do stávající sítě 25G EPON, čímž vznikne kombinace  $2 \times 25$  Gbit/s sítě, tedy 50G EPON. Druhý kanál se bude nacházet na vlnové délce 1344,361 nm a bude vzdálen o  $\approx 10$  nm od původního kanálu 1334,874 nm. Dostatečný rozestup mezi kanály nebude vyžadovat teplotně stabilní lasery pro řídicí jednotky, čímž se nebudou markantně navyšovat ekonomické aspekty celé sítě. Dosažené hodnoty BER byly v tabulce 3.6 barevně odlišeny. Černě zapsané hodnoty jsou limitní hodnoty pro 50G EPON síť bez využití FEC. Maximálně použitelný dělicí poměr je 1:64 s celkovou vzdáleností, v rámci ODN, až 15 km. Bude-li brán v potaz maximální dělicí poměr současné – nefinální – podoby těchto sítí, pak lze dosáhnout až 22 km při dělicím poměru 1:32. Výsledky jsou značně obdobné s předchozím scénářem. Tento fakt je i dán dostatečným kanálovým rozestupem a pouze simulačním výpočtem hodnoty BER. Při využití BER lze 50G EPON síť provozovat v plném obsazení až 64 zákazníky na jeden port do vzdálenosti 26 km.

## 100G EPON

Konečný model 100G EPON sítě odpovídá využití 4 vlnových párů, přičemž výsledky jsou zaměřeny na vyhodnocení sestupného směru. Tabulka 3.7 zobrazuje dosažené výsledky simulací. Je patrné, že bitová chybovost je nepatrně horší (lišící se o jediný řád pro nejhorší scénář), což může být dáno chybou, v rámci vyhodnocení výsledků. Při využití všech vlnových délek v sestupném směru nedochází k čtyřvlnnému směřování, protože rozestup mezi dílčími vlnovými délkami je dostatečný. Nejhorší simulovaný scénář stále reflektuje limitní hodnotu bitové chybovosti při využití FEC kódu. Současná specifikace však nepočítá s navýšením dělicího poměru ani pro finální schéma 100G EPON, lze tedy očekávat, že navýšování dělicího poměru proběhne v rámci revizí nebo během pilotního testování. Prvotní – pilotní – nasazení se doposud zaměřilo na posouzení vhodnosti architektury pro mobilní sítě [150].

Grafická závislost bitové chybovosti, pro různé dělicí poměry na délce distribuční části sítě, je zobrazena na obrázku 3.10. Díky dostatečnému rozestupu mezi jednotlivými kanály jsou výsledky, dílčích stupňů architektury, přibližně odpovídající. Primárním cílem konečné architektury zůstala nízká cena komponent a nenáročnost koncových jednotek, které bude nezbytné osadit pouze filtry. Přehled přenášených kanálů poskytuje obrázek 3.11.

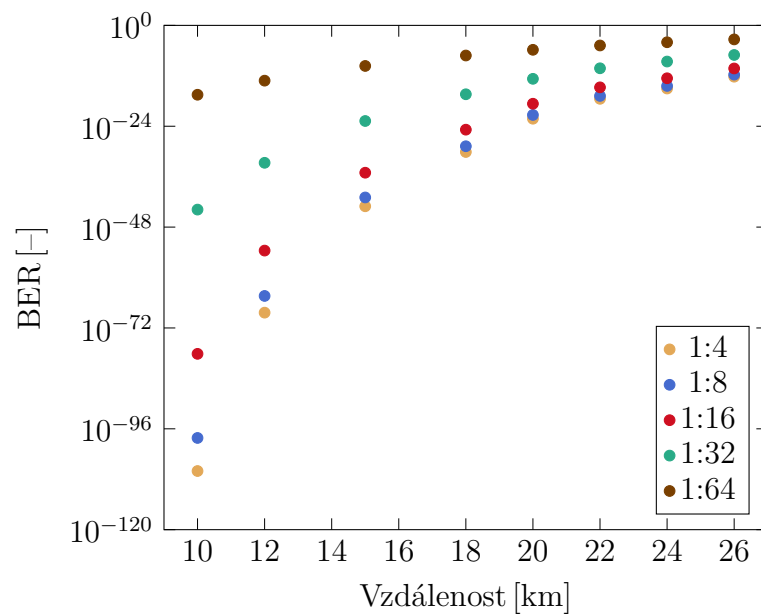
Tab. 3.7: Výsledky simulací sítě 100G EPON.

Děl. poměr	10 km	12 km	15 km	18 km	20 km	22 km	24 km	26 km
1:4	$9,1 \times 10^{-107}$	$4,4 \times 10^{-69}$	$9,1 \times 10^{-44}$	$7,4 \times 10^{-31}$	$6,2 \times 10^{-23}$	$3,4 \times 10^{-18}$	$9,5 \times 10^{-16}$	$6,2 \times 10^{-13}$
1:8	$6,7 \times 10^{-99}$	$4,2 \times 10^{-65}$	$1,1 \times 10^{-41}$	$1,7 \times 10^{-29}$	$4,9 \times 10^{-22}$	$1,6 \times 10^{-17}$	$3,9 \times 10^{-15}$	$1,9 \times 10^{-12}$
1:16	$6,9 \times 10^{-79}$	$2,6 \times 10^{-54}$	$8,7 \times 10^{-36}$	$1,5 \times 10^{-25}$	$2,3 \times 10^{-19}$	$1,8 \times 10^{-15}$	$2,6 \times 10^{-13}$	$5,6 \times 10^{-11}$
1:32	$1,5 \times 10^{-44}$	$2,1 \times 10^{-33}$	$1,7 \times 10^{-23}$	$4,1 \times 10^{-17}$	$1,9 \times 10^{-13}$	$6,2 \times 10^{-11}$	$2,4 \times 10^{-09}$	$9,2 \times 10^{-08}$
1:64	$3,1 \times 10^{-17}$	$7,1 \times 10^{-14}$	$2,2 \times 10^{-10}$	$6,8 \times 10^{-08}$	$1,5 \times 10^{-06}$	$1,6 \times 10^{-5}$	$9,7 \times 10^{-5}$	$4,6 \times 10^{-4}$

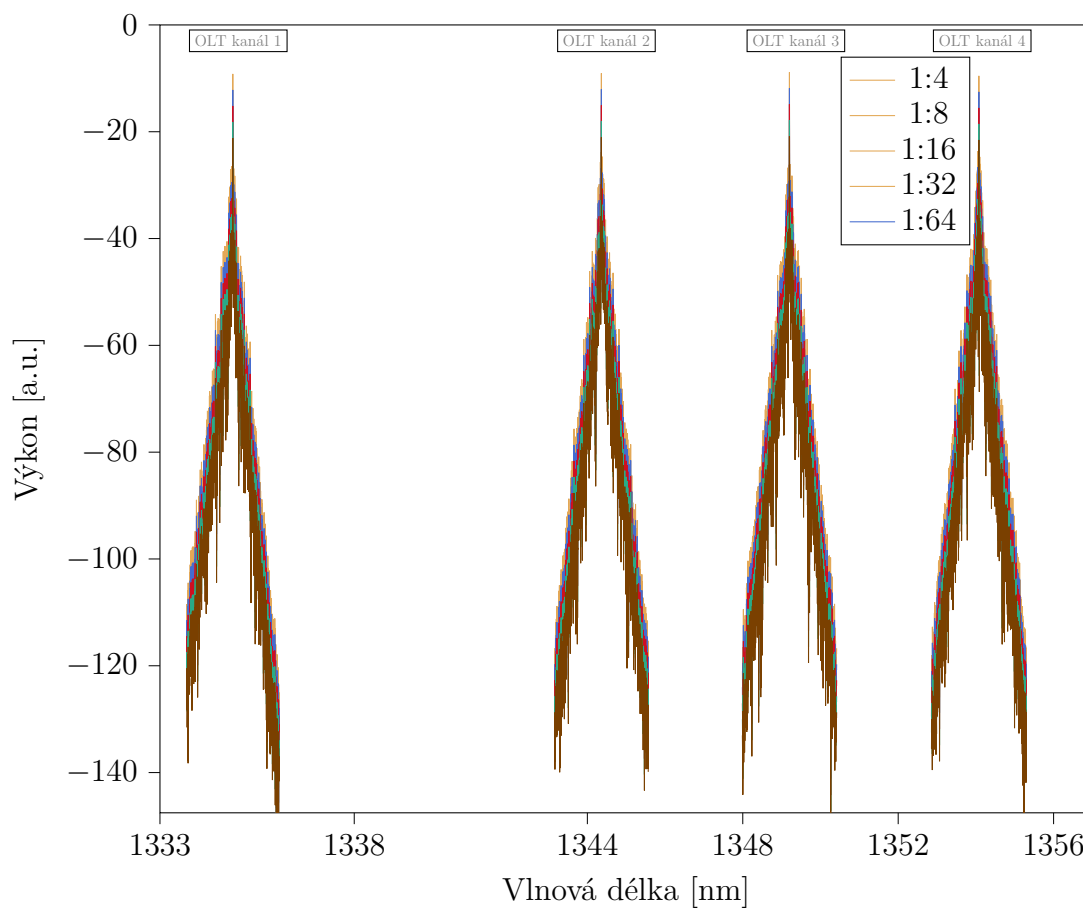
## Závěr

Finální podobou zvolené architektury 1+3 jsou dílčí přechody s přidáváním kanálů pro sestupný směr. Sítě 50G EPON využívají 1334,874 a 1344,361 nm pro dva sestupné kanály. K dosažení vyšší přenosové rychlosti a zachování nízké ceny systému podporujícího přenos v sestupném směru až 100 Gbit/s byly přidány dva kanály pro sestupný směr 1349,201 nm a 1354,076 nm. Jednotlivé kanály, v rámci simulací, jsou zobrazeny na obrázku 3.11. Hodnoty BER korespondují s předchozími sítěmi (25G EPON a 50G EPON) a jsou barevně rozlišeny. Oranžové hodnoty uvádějí akceptovatelné hodnoty, když bude povolen FEC na řídicí jednotce. V tomto případě je možné síť provozovat pro 64 zákazníků do vzdálenosti 26 km. Bez využití FEC je maximální vzdálenost 22 km s dělicím poměrem 1:32 – při dodržování dosavadních parametrů sítě [51], nebo až pro 64 zákazníků s délkou ODN až 15 km.





Obr. 3.10: Závislost bitové chybovosti na délce distribuční sítě pro různé dělicí poměry v síti 100G EPON.



Obr. 3.11: Optické spektrum sítě 100G EPON s délkou distribuční sítě 20 km.

## 3.2 Vysokorychlostní přístupové sítě 50G dle ITU

V prosinci roku 2020 dosahoval počet zákazníků využívající širokopásmové připojení přes optické vlákno celkem 700 milionu s dominující technologií PON [8]. Jako obvykle, při vývoji nových doporučení, zůstala motivace stejná, navýšit přenosovou rychlost v obou směrech. V uplynulých letech se staly populární služby: video přenosy v rozlišení 4k (3840×2160), cloudové služby pro malé a střední podniky, dostupnost 5G připojení, které nabízí vysoké přenosové rychlosti bezdrátovými technologiemi v symetrickém režimu při zachování nízké latence. Výše uvedené služby vedly k iniciativě na straně ITU a byla zahájena debata pracovní skupiny SG15 k navržení přístupové sítě, která by plně dostačovala těmto požadavkům. Výsledkem studie je návrh HSP podporující přenosovou rychlost až 50 Gbit/s na jediné vlnové délce s komerčním nasazením takového systému v roce 2025.

Z dnešního pohledu se tento plán nasazení jeví více než ambiciózně, neboť stále nedošlo k hojnému komerčnímu využití XG-PON ani NG-PON2 sítí<sup>3</sup>. Pilotní nasazení XG(S)-PON technologie se symetrickým připojením 8/8 Gbit/s pro domácnosti jako jediná nabízí společnost T-Mobile za cenu 3 999 Kč<sup>4</sup> pouze ve vybraných lokalitách v Olomouci [117]. V rámci vědeckého přístupu k problematice je navyšování přenosových rychlostí a technologický předstih žádoucí, proto je nezbytné navrhovat nová doporučení pro vysokorychlostní pasivní optické sítě, i když je aktuálně k dispozici varianta NG-PON2, jež podporuje flexibilní a rozšiřitelnou architekturu pro agregovanou<sup>5</sup> přenosovou rychlost až 80 Gbit/s [83, 84, 134]. Nadnárodní operátoři neočekávají nasazení technologie NG-PON2 do roku 2025. Po tomto roce má již být k dispozici finální specifikace sítě HSP využívající jediný vlnový pár pro dosažení přenosové rychlosti 50 Gbit/s. Pracovní skupina SG15 do návrhu HSP zapracovala i možnost využití stávající přenosové vrstvy a využití TWDM-PON, čili by vyšších přenosových rychlostí bylo stále dosahováno pomocí násobků 10 Gbit/s. Finální rozhodnutí však s touto variantou nakonec nepočítá, neboť došlo k zásadním změnám jak v přenosové vrstvě, tak konečném přístupu k dílčím specifikacím. Obecně lze technické požadavky na HSP shrnout pomocí tabulky 3.8.

Doposud schvalované dokumenty se opíraly o sérii dokumentů pokrývajících specifikaci systému (obecný popis), definice fyzické vrstvy systému (použité vlnové délky, útlumové třídy apod.), definice přenosové vrstvy systému (specifikace rámců, aktivní proces koncové jednotky apod.) a doplňující dokumenty (prodlužování dosahu systému, management koncové jednotky apod.). Základy nově vznikající specifikace HSP budou definovány dvěma základními dokumenty, které budou aplikovatelné na

---

<sup>3</sup>V rámci České republiky.

<sup>4</sup>Deklarovaná cena je platná v době psaní habilitační práce.

<sup>5</sup>Při využití maximálního množství, 8 párů, vlnových délek.

nadcházející systémy z pohledu jak fyzické, tak přenosové vrstvy, které mohou být dále rozšiřovány. V dubnu 2021 bylo dosaženo klíčového milníku s finálním schválením prvních třech dokumentů pro sítě HSP:

- Obecné požadavky (G.9804.1) – funkce spojené s nasazenou optickou infrastrukturou jsou doplněny o podporu nových služeb vyžadující vysokou přenosovou rychlost, nízkou latenci a bezpečnost. Dále je specifikována koexistence s nasazenou technologií PON a migrace z ní [56].
- Společná přenosová vrstva (G.9804.2) – definice přenášených rámců, zapouzdření služeb a aktivační proces koncové jednotky [58].
- Vrstva závislá na fyzickém médiu pro systémy využívající jednu vlnovou délku (G.9804.3) [59].

Tab. 3.8: Technické požadavky na systémy HSP.

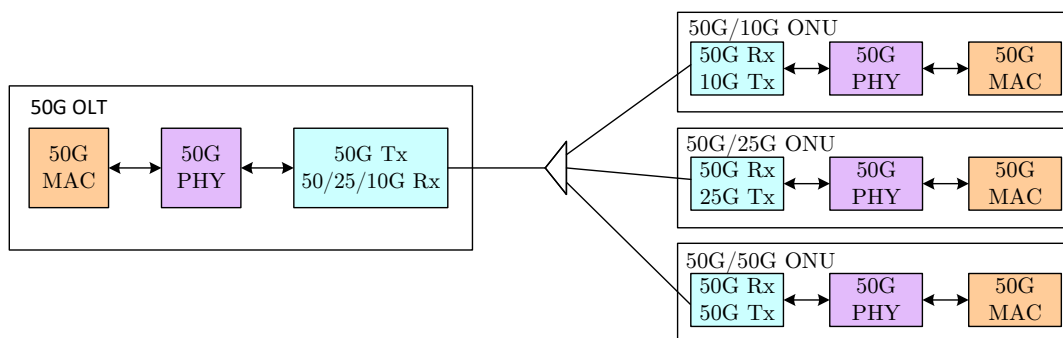
Systémová charakteristika	Požadavky
Přenosová rychlost	Symetrická varianta (vlnový kanál) 50 Gbit/s v obou směrech
	Asymetrická varianta (vlnový kanál) 50 Gbit/s v sestupném směru a 25 Gbit/s ve vzestupném směru
	Asymetrická varianta (vlnový kanál) 50 Gbit/s v sestupném směru a 12.5/10 Gbit/s ve vzestupném směru
	Podpora variabilních přenosových rychlostí na straně přijímače
Dosah systému	Nejméně 20 km pro běžné aplikace
	Nejméně 10 km pro aplikace citlivé na zpoždění (5G)
Typy vláken	ITU-T G.652 a G.657
Podpora ODN	Původní ODN založené na pasivním rozbočování signálů, volitelně vlnově selektivní zařízení
Ostatní	OLT power management, výpadek služby, na straně ONU, kratší než 50 ms, podpora nové TC vrstvy

### 3.2.1 Architektura systému HSP

Architektura systému HSP obsahuje tři podtypy: 50G TDM-PON, 50Gbit/s/kanál TWDM-PON a 50G PtP-PON. První uvedený podtyp je evolucí konvenčních TDM/TDMA (vícenásobný přístup s časovým dělením – Time Division Multiple Access) s využitím jedné vlnové délky v každém směru, jak je využíváno například v sítích GPON a XG(S)-PON. Sítě založené na TWDM-PON naopak využívají několik vlnových párů, přičemž každý vlnový pár je sdílený několika koncovými jednotkami ONU. Poslední uvedený typ PtP-PON poskytuje vyhrazený kanál do každé koncové

jednotky nebo koncového bodu. Nasazením PtP-PON a TWDM-PON je nezbytné doplnit přenosovou vrstvu o možnost lazení vysílače a přijímače na straně koncové jednotky. Běžné sítě TDM-PON využívají nominální vlnové délky s možností „driftování“ (zpravidla teplotou a nepřesností vlnových filtrů).

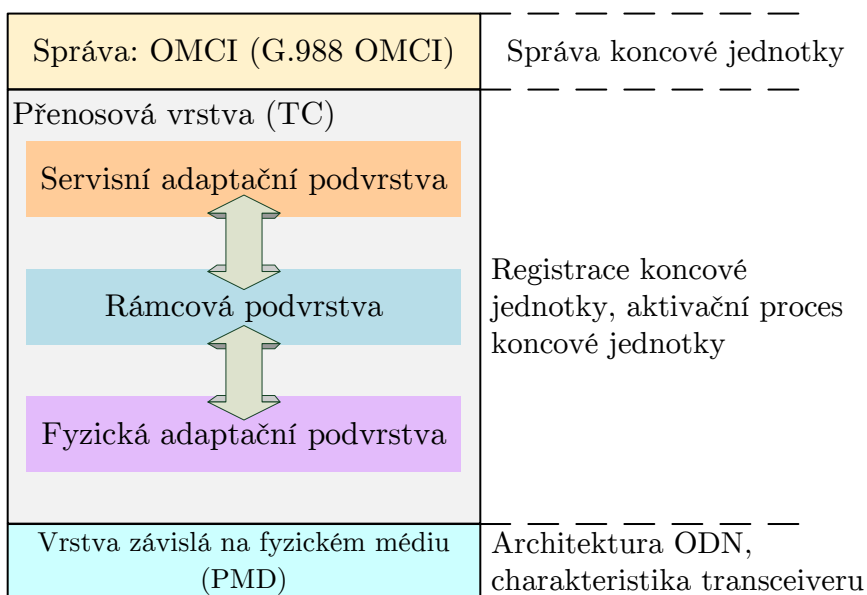
Současná podoba dokumentu [56] připouští jedinou možnost v sestupném směru, a to 50 Gbit/s. Koncové jednotky naopak mají podporovat různé kombinace přenosových rychlostí 50/10 Gbit/s, 50/25 Gbit/s a plně symetrickou variantu 50/50 Gbit/s. V porovnání s typem HSP PtP-PON, kde se připouští pouze symetrické varianty 10, 25 a 50 Gbit/s [105, 77, 76, 93]. Systémová architektura je zobrazena na obrázku 3.12.



Obr. 3.12: Architektura systému HSP s využitím jednoho vlnového páru k dosažení přenosové rychlosti 50Gbit/s v sestupném směru [133].

Pro uchování současné infrastruktury, z předešlých doporučení, je žádoucí využívat pasivně větvenou ODN s dosahem minimálně 20 km pro trojitou hru (data, video a hlas) a 10 km pro služby citlivé na zpoždění. Provozuje-li operátor síť založenou na TDMA, přenosová vrstva HSP bude podporovat maximální délku vlákna 60 km v ODN a minimální dělicí poměr bude stanoven na 1:256. Obecně se veškerá doporučení ITU-T PON opírají o vrstvý model (viz obrázek 3.13).

Vrstva PMD (vrstva závislá na fyzickém médiu – Physical Media Dependent) je zodpovědná za architekturu ODN, plán vlnových délek, charakteristiku transceiveru, nasezení vlnového multiplexu pro sestupný a vzestupný směr. V širším pohledu na vrstvu TC (přenosová vrstva – Transmission Convergence), sestávající se z třech podvrstev, je celá vrstva zodpovědná za aktivaci a registraci ONU. Servisní adaptační podvrstva odpovídá za zapouzdření uživatelských dat. Rámcová podvrstva přebírá zapouzdřená data ze servisní adaptační podvrstvy a stará se o správu PON sítě – fyzická správa zpráv PLOAM nebo využití DBA. Fyzická adaptační podvrstva zahrnuje funkce pro zlepšení detekce signálu a jeho příjem – FEC, zarovnání rámce a zabezpečení. Nejvýše posazená vrstva, správa OMCI (řídící rozhraní koncových jednotek – ONU Management Control Interface), realizuje rozhraní pro správu



Obr. 3.13: Vrstvový model sítí ITU-T PON [133].

a ovládání ONU (OMCI), celkovou konfiguraci ONU, správu poruch a řízení výkonných úrovní.

### 3.2.2 Plán vlnových délek pro HSP

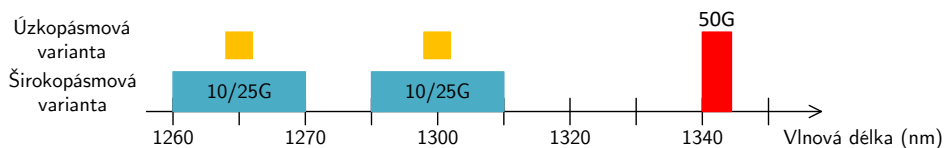
Náročnou výzvou pro finalizaci specifikace PMD vrstvy byl výběr vhodných vlnových délek. Každé navazující doporučení musí splňovat požadavky na zachování již vybraných vlnových délek předchozích systémů, vybírat vhodné rozsahy z pohledu přenosových vlastností optického vlákna a zachování nízké ceny koncových jednotek ONU. Z výše uvedených důvodů padla finální volba vlnových délek na O pásmo (1260–1360 nm), díky relativně nízké chromatické disperzi, což najde uplatnění pro překonání disperzí způsobující mezisymbolové interference při vysokorychlostním přenosu signálu linkovým kódem NRZ rychlostí 50 Gbit/s. Pro systémy 50G HSP TDM-PON a sestupný směr platí rozsah vlnových délek 1340–1344 nm. Tolerance 4 nm je zvolena tak, aby poskytovala dostatečnou výrobní toleranci pro střední vlnovou délku vysílače a minimalizaci výrobních nákladů. Předpokládá se tedy využití EML (externě modulovaný laser – Externally Modulated Laser)  $\leq 1360$  nm s tolerancí 4 nm, rozestup mezi vlnovými délkami pro sestupný a vzestupný směr činí  $< 45$  nm. Vzestupný směr se neorientuje na jeden rozsah vlnových délek, neboť je nutné zajistit klíčovou koexistenci s předchozími doporučeními a pravděpodobně i nasazenými/provozovanými systémy v sítích operátora. K tomuto účelu byly diskutovány dvě varianty [142]:

- Možnost 1 – pro zachování koexistence se systémy XG(S)-PON/EPON s vy-

užitím WDM existují dvě možnosti realizace: širokopásmová 1290–1310 nm a úzkopásmová 1298–1302 nm.

- Možnost 2 – pro zachování koexistence se systémem GPON jsou rovněž definovány dvě možnosti: úzkopásmová 1300–1320 nm a širokopásmová 1260–1280 nm.

Druhá možnost je předmětem další diskuze a hlavním záměrem širokopásmového výběru (20 nm) byla motivace zachování nechlazených vysílačů na straně ONU jednotky s využitím DML laserů. Úzkopásmová realizace povede k využití chlazených vysílačů, na straně koncové jednotky ONU, čímž lze předpokládat navýšení ceny těchto jednotek. Obrázek 3.14 zobrazuje zvolené/diskutované vlnové délky jednotlivých směrů sítě 50G HSP. Uvedený obrázek postrádá přidělené vlnové délky pro symetrickou variantu 50G HSP-TDM-PON, jelikož tato varianta je teprve ve fázi plánování s budoucím nasazením.



Obr. 3.14: Rozvržení vlnových délek pro sestupný a vzestupný směr pro síť HSP-TDM-PON [142].

### 3.2.3 Simulační model sítě HSP-TDM-PON

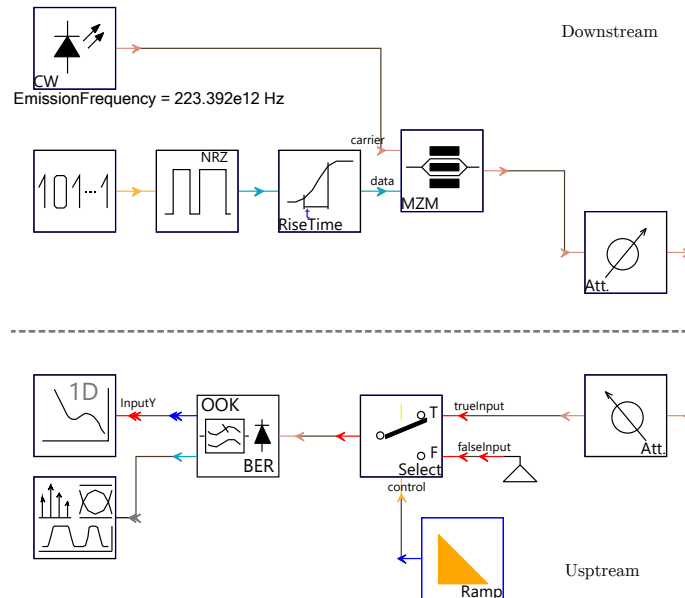
Celkový simulační model lze rozdělit na dílčí části: vysílací část – reprezentující OLT jednotku (viz obrázek 3.15), distribuční část sítě – reprezentující ODN (viz obrázek 3.16) a přijímací část sítě – reprezentující ONU (viz obrázek 3.17).

Klíčové parametry pro nastavení vysílací jednotky OLT zobrazuje tabulka 3.9. Dvojice vysílacích výkonů reflektuje dílčí útlumové třídy, které jsou definovány pro ODN. První uvedená hodnota reflektuje třídu N, druhá útlumovou třídu E. Vlnová délka v OLT byla zvolena 1342 nm, která odpovídá stanovenému rozsahu. Obrázek 3.15 obsahuje vysílací část zobrazenou výše na uvedeném obrázku a přijímací část dole na obrázku (rozdělena čarou v obrázku). Obousměrný přenos je v prostředí VPIphotonics Design Suite™ v11.2 realizován obdobnými bloky.

V návaznosti na dokument [59] je nezbytné rozlišovat dva scénáře, pro které se specifikace zcela liší. První variantou je výskyt jediného doporučení sítě, HSP-TDM-PON, v rámci ODN. Pro tuto variantu obsahuje rozdělení útlumových tříd tabulka 3.10. Reálnější podobou nasazení HSP-TDM-PON, zejména v jeho počátcích, bude MPM (vzájemná koexistence dílčích doporučení pasivních optických sítí

Tab. 3.9: Parametry pro vysílací jednotku OLT v síti HSP-TDM-PON [59].

Parametr	Jednotka	Hodnota
Přenosová rychlost	Gbit/s	49,7664
Rozsah vlnových délek	nm	1340–1344
Linkový kód	—	NRZ
Minimální vysílací výkon	dBm	5,5/8,5
Maximální vysílací výkon	dBm	11/14



Obr. 3.15: Navržený model řídicí jednotky pro HSP-TDM-PON v prostředí VPI-photonics Design Suite™ v11.2.

v rámci jedné distribuční sítě – Multi PON Module). K tomuto účelu jsou definovány pouze dvě útlumové třídy (viz tabulka 3.11), dokument [59] předpokládá druhou variantu, neboť jsou specifikovány vysílací výkony právě pro variantu MPM. Distribuční síť obsahuje veškeré pasivní komponenty: optická vlákna, splitters, sváry, konektory a spojky. Celkový útlum v ODN by se měl pohybovat v rámci zvolené útlumové třídy. Obrázek 3.16 obsahuje optické vlákno, útlumový člen, splitter a optické vlákno vedoucí k ONU zákazníka. Shodně s návrhem OLT jednotky i tady je nezbytné provést duplicitní zapojení pro vzestupný směr. Duplicitním zapojením se rozumí obousměrné vlákno, které je v prostředí VPIphotonics Design Suite™ v11.2 charakterizováno jako vlákno se dvěma vstupy a dvěma výstupy. Čára uprostřed obrázku pouze pomyslně rozděluje vlákno na sestupný a vzestupný směr. Charakteristické dělicí poměry od 1:16 po 1:256, v rámci simulačního modelu, jsou reprezentovány útlumovým členem, neboť splitter je pouze symbolickým prvkem v prostředí

Tab. 3.10: Rozdělení útlumových tříd sítí HSP-TDM-PON [59].

Popis	Třída N1	Třída N2	Třída E1	Třída E2
Minimální útlum v ODN	14 dB	16 dB	18 dB	20 dB
Maximální útlum v ODN	29 dB	31 dB	33 dB	35 dB

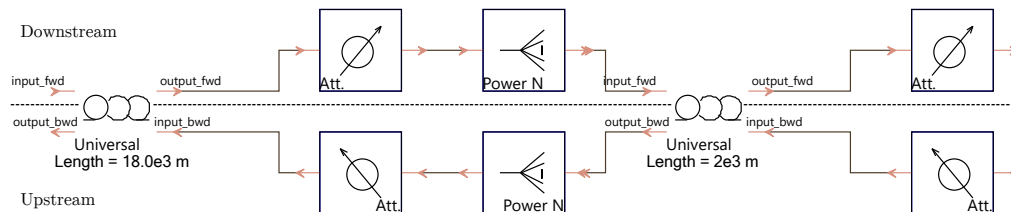
Tab. 3.11: Rozdělení útlumových tříd sítí HSP-TDM-PON s MPM [59].

Popis	Třída N1	Třída C+
Minimální útlum v ODN	14 dB	17 dB
Maximální útlum v ODN	29 dB	32 dB

Parametry simulačního modelu ODN (viz obrázek 3.16) zobrazuje tabulka 3.12. Dokument [59] uvádí minimální dělicí poměr 1:16, maximální 1:128, přičemž 1:256 je stále předmětem debat na poli s operátory s ITU. Simulační model obsahuje všechny uvedené hodnoty dělicích poměrů a délku ODN nad rámec specifikace, neboť i zde je situace shodná s maximálním dělicím poměrem – stále je předmětem diskuzí maximální délka 40 km.

Tab. 3.12: Parametry distribuční sítě ODN v síti HSP-TDM-PON [59].

Parametr	Jednotka	Hodnota
Dělicí poměr	—	1:16–1:256
Typ optického vlákna	—	G.652/G.657
Délka vlákna v ODN	km	20/40
Měrný útlum vlákna	dB/km	0,35–0,45



Obr. 3.16: Navržený model distribuční sítě pro HSP-TDM-PON v prostředí VPI-photonics Design Suite™ v11.2.

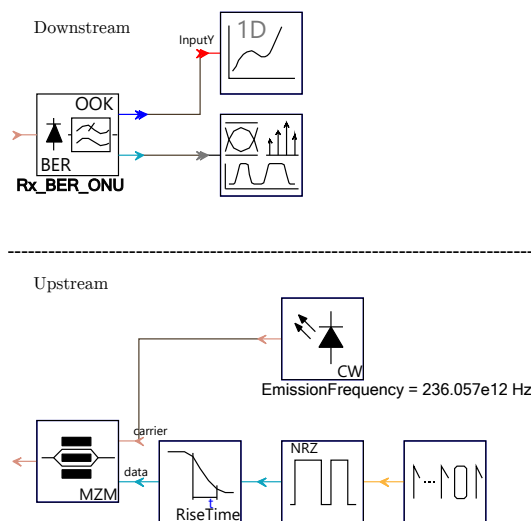
Model ONU je zobrazen na obrázku 3.17 s rozdělením na přijímací část (downstream) a vysílací část (upstream). Rozdělení modelu ONU pro oba směry zobrazuje



čára uprostřed obrázku 3.17. Parametry simulace obsahuje tabulka 3.13. Přenosová rychlost byla zvolena 24,8832 Gbit/s pro vlnové délky (1270/1300 nm) z obou rozsahů (viz kapitola 3.2.2). Varianta s přenosovou rychlostí 12,44 Gbit/s nebyla brána v potaz. Definované výkonové úrovně jsou platné pro schémata MPM.

Tab. 3.13: Parametry jednotky ONU v síti HSP-TDM-PON [59].

Parametr	Jednotka	Hodnota
Přenosová rychlost	Gbit/s	24,8832
Rozsah vlnových délek	nm	1260–1280
Rozsah vlnových délek	nm	1290–1310
Linkový kód	—	NRZ
Minimální vysílací výkon	dBm	5/5
Maximální vysílací výkon	dBm	9/9



Obr. 3.17: Navržený model koncové jednotky pro HSP-TDM-PON v prostředí VPI-photronics Design Suite™ v11.2.

### Vyhodnocení simulací HSP-TDM-PON

Výsledné zapojení sítě HSP-TDM-PON v prostředí VPIphotronics Design Suite™ v11.2 je zobrazeno na obrázku A.2. Primárně vyhodnocovaným parametrem byla bitová chybovost BER. Shodně s předchozími doporučeními je nezbytné brát v potaz dva scénáře. Vyhodnocení parametru BER bez korekčního kódu (prahová hodnota  $10 \times 10^{-12}$ ) a s využitím korekčního kódu (prahová hodnota  $10 \times 10^{-2}$ ). Sestupný směr má definovanou přenosovou rychlost v jediné variantě, a to 49,7664 Gbit/s, kdežto

vzestupný směr, uvažována pouze přenosová rychlost 24,8832 Gbit/s, se může vyskytovat na dvou vlnových délkách (1270 nm a 1300 nm). Dílčí výsledky pro vzestupný směr jsou vyhodnoceny separátně.

Simulace obousměrných komunikací probíhaly pro různé délky ODN v rozsahu 20–40 km s krokem 5 km a variabilními hodnotami dělicích poměrů (1:16, 1:32, 1:64, 1:128 a 1:256) s odpovídajícími hodnotami útlumů (viz tabulka 3.14). Nižší hodnoty dělicích poměrů nebyly brány v potaz, neboť specifikace těchto sítí začíná na daném dělicím poměru. Z pohledu PON sítí nižší dělicí poměry ani nedávají smysl, protože je primární snahou zajistit konektivitu co největšímu počtu zákazníků.

Tab. 3.14: Přehled použitých dělicích poměrů a jejich hodnot útlumu

Dělicí poměr	Útlum [dB]
1:16	13,2
1:32	17,4
1:64	20,3
1:128	23,5
1:256	27,1

Kanálový rozestup mezi sestupným a vzestupným směrem činí 72 nm, respektive 42 nm pro druhou variantu sestupného směru (viz obrázek 3.19). Z výsledků v tabulce 3.15 je zřejmé, že komunikace v sestupném směru bude splňovat doporučení do dělicího poměru 1:128 a celkové délky ODN 35 km. Byla-li by aplikována korekce chyb, lze považovat výsledky pro nejvyšší dělicí poměr 1:256 s délkou ODN 40 km jako limit, avšak stále splňující specifikace daných sítí.

Výsledky simulací pro vzestupný směr zobrazuje tabulka 3.16 a 3.17. Grafická závislost pro sestupný směr je zobrazena na obrázku 3.18. Z výsledku je patrné, že dosah ve vzestupném směru je značně zkrácen, což je dáno i tím, že stále neexistuje finální specifikace útlumových tříd a dílčích parametrů pro koncové jednotky. Při aplikaci korekčního kódu lze považovat za limitní výsledek (1270 nm) BER pro dělicí poměr 1:64 s délkou ODN 30 km  $8,7 \times 10^{-4}$ , případně pro dělicí poměr 1:128 s délkou ODN 20 km  $2,58 \times 10^{-5}$ . U druhé varianty vzestupného směru, provozovaného na vlnové délce 1300 nm, bylo limitní hodnoty BER dosaženo s dělicím poměrem 1:128 a délkou ODN 25 km  $2,58 \times 10^{-5}$ .

Tab. 3.15: Výsledky simulací sestupného směru sítě HSP-TDM-PON.

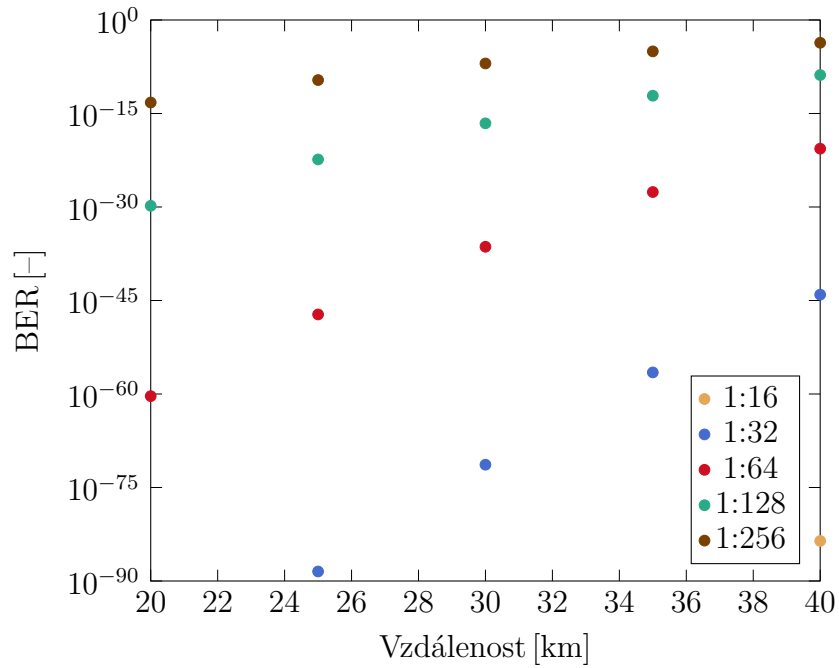
Dělicí poměr	20 km	25 km	30 km	35 km	40 km
1:16	$6,35 \times 10^{-169}$	$7,25 \times 10^{-146}$	$1,05 \times 10^{-123}$	$4,95 \times 10^{-103}$	$2,65 \times 10^{-84}$
1:32	$1,71 \times 10^{-108}$	$3,36 \times 10^{-89}$	$4,52 \times 10^{-72}$	$2,89 \times 10^{-57}$	$8,67 \times 10^{-45}$
1:64	$4,53 \times 10^{-61}$	$5,77 \times 10^{-48}$	$4,12 \times 10^{-37}$	$2,51 \times 10^{-28}$	$2,27 \times 10^{-21}$
1:128	$1,59 \times 10^{-30}$	$4,22 \times 10^{-23}$	$2,63 \times 10^{-17}$	$7,08 \times 10^{-13}$	$1,48 \times 10^{-9}$
1:256	$5,79 \times 10^{-14}$	$2,31 \times 10^{-10}$	$1,06 \times 10^{-7}$	$9,21 \times 10^{-6}$	$2,26 \times 10^{-4}$

Tab. 3.16: Výsledky simulací vzestupného směru (1270 nm) sítě HSP-TDM-PON

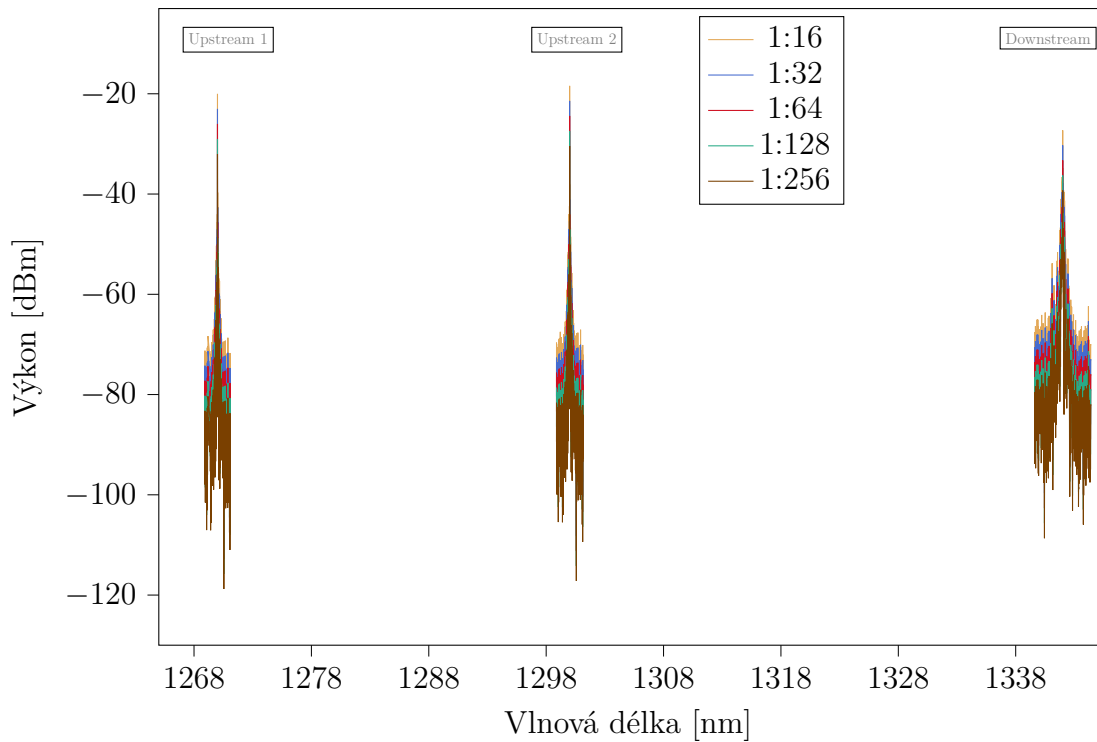
Dělicí poměr	20 km	25 km	30 km	35 km	40 km
1:16	$6,85 \times 10^{-63}$	$1,38 \times 10^{-38}$	$2,21 \times 10^{-20}$	$2,07 \times 10^{-11}$	$2,07 \times 10^{-6}$
1:32	$1,44 \times 10^{-29}$	$8,46 \times 10^{-17}$	$1,59 \times 10^{-8}$	$7,03 \times 10^{-5}$	$5,2 \times 10^{-3}$
1:64	$1,52 \times 10^{-12}$	$5,16 \times 10^{-7}$	$8,7 \times 10^{-4}$	$1,86 \times 10^{-2}$	$8,62 \times 10^{-2}$
1:128	$2,58 \times 10^{-5}$	$3 \times 10^{-3}$	$4,4 \times 10^{-2}$	$1,3 \times 10^{-1}$	$2,39 \times 10^{-1}$
1:256	$3,4 \times 10^{-3}$	$7,21 \times 10^{-2}$	$1,9 \times 10^{-1}$	$2,2 \times 10^{-1}$	$3,59 \times 10^{-1}$

Tab. 3.17: Výsledky simulací vzestupného směru (1300 nm) sítě HSP-TDM-PON

Dělicí poměr	20 km	25 km	30 km	35 km	40 km
1:16	$1,67 \times 10^{-88}$	$6,85 \times 10^{-63}$	$9,28 \times 10^{-43}$	$5,48 \times 10^{-28}$	$8,42 \times 10^{-18}$
1:32	$5,68 \times 10^{-45}$	$1,46 \times 10^{-29}$	$7,37 \times 10^{-19}$	$7,93 \times 10^{-12}$	$2,01 \times 10^{-7}$
1:64	$5,66 \times 10^{-20}$	$1,53 \times 10^{-12}$	$7,29 \times 10^{-8}$	$4,91 \times 10^{-5}$	$2,2 \times 10^{-3}$
1:128	$2,49 \times 10^{-8}$	$2,58 \times 10^{-5}$	$1,5 \times 10^{-3}$	$1,62 \times 10^{-2}$	$6,37 \times 10^{-2}$
1:256	$1 \times 10^{-3}$	$1,3 \times 10^{-2}$	$5,58 \times 10^{-2}$	$1,29 \times 10^{-1}$	$2,13 \times 10^{-1}$



Obr. 3.18: Závislost bitové chybovosti na délce distribuční sítě pro sestupný směr (50G) s různými dělicími poměry v síti HSP-TDM-PON.



Obr. 3.19: Spektra pro sestupný a vzestupný směr sítí HSP-TDM-PON.

## Závěr

Mezinárodní telekomunikační unie stanovila obecné požadavky na sítě typu HSP-TDM-PON. Prozatím není stanoven maximální dělicí poměr, který by měly tyto sítě pokrývat. Naopak byly stanoveny útlumové třídy, v nichž lze sítě provozovat. Bude-li brána v potaz útlumová třída N2, pak by měl být minimální útlum v ODN 16 dB a maximální útlum 31 dB. K této útlumové třídě byly stanoveny výkonové úrovně vysílačů. Následně v prostředí VPIphotonics Design Suite™ v11.2 byl vytvořen simulační model sítě HSP-TDM-PON. K reprezentaci splitteru v ODN byly použity hodnoty z tabulky 3.14 udávající vložný útlum různých splitterů. Zbylý útlum v síti byl tvořen optickými vlákny a konektory. Sestupný směr lze provozovat do dělicího poměru 1:256 a celkové délky ODN 25 km. Jedná se však o extrémní případ, který nereflektuje omezení útlumové třídy. V reálném provozu by mohla mít koncová jednotka nižší výkonovou úroveň vstupního signálu, než je stanoveno v [59]. Hodnoty zvýrazněny oranžovou barvou jsou přípustné, v rámci výsledků simulací, bude-li nasazena dopředná korekce chyb.

Vzestupný směr na vlnové délce 1270 nm lze provozovat do celkové vzdálenosti 20 km s dělicím poměrem 1:64. V případě využití FEC se může dělicí poměr navýšit na 1:128 se zachováním shodné délky ODN. Hodnoty červenou barvou nelze brát v potaz ani při aplikování FEC či jiného korekčního kódu. Druhá varianta pro vzestupný směr je použití vlnové délky 1300 nm s dosažením shodného dělicího poměru jako při vlnové délce 1270 nm, přičemž dojde k možnému prodloužení ODN až na 25 km – bez využití FEC. S využitím FEC se dosah prodlouží o 5 km na 25 km a dělicím poměrem 1:128. Během simulací je patrný efekt, že při dvojnásobném navýšení dělicího poměru nedochází k poklesu o polovinu v rámci BER hodnot. Z hlediska omezení simulačního nástroje VPIphotonics Design Suite™ v11.2 na fyzickou vrstvu, nelze přímo verifikovat parametry zpoždění. Nástroj udává hodnotu kolísání zpoždění (jitter) řádově v ps, protože se jedná o zpoždění na fyzické vrstvě, tedy zpoždění je dáno pouze propagačním zpoždění ve vláknech (chybí rámcové zpoždění, zapouzdření apod). Simulace vzestupného směru jsou realizovány pro přenosovou rychlost 25 Gbit/s. Vyšší přenosová rychlost 50 Gbit/s je uvažována v dokumentu [59], nemá však stanoveny veškeré parametry a jsou předmětem dalšího zkoumání.

## 4 Přenosová vrstva PON sítí

Předchozí kapitola se věnovala specifikaci fyzické vrstvy pro PON sítě. Dosavadní – metalické – sítě se opírají o přenos ethernetových rámců. Sítě PON zaujímají odlišnou strategii a využívají vlastní – nikoli proprietární – řešení zapouzdření dat. Obecný formát rámců je definován v dílčích dokumentech pro jednotlivé technologie. Principiálně se jedná o stejné rámce pro drtivou většinu sítí, avšak management a správa sítě je koncentrována do jediného bodu CO (centrální bod poskytovatele služeb – Central Office). Poskytovatel služeb ISP nemá trvalý přístup k jednotlivým zákazníkům, proto je veškerá správa orientována do jeho prostor v CO. Z těchto důvodů je struktura rámce značně komplexní a je unikátní právě pro PON sítě. Zmíněný – odlišný – formát platí pro sítě definované ITU, které Ethernet rámce pouze zapouzdřují (část rámce). Druhá varianta PON sítí, definovaných IEEE, vychází z využití Ethernet rámce.

### 4.1 Rámec pro sestupný směr

Specifikace sítě NG-PON2 definuje dvě velikosti rámce pro sestupný směr v závislosti na použité přenosové rychlosti, množství obsažených – užitečných dat – je následně závislé na povolené/zakázané dopředné korekci chyb FEC. Přehledný soupis velikostí rámců obsahuje tabulka 4.1.

Tab. 4.1: Velikosti rámce v sestupném směru [60].

Přenosová rychlost [Gbit/s]	9,953		2,488	
Velikost rámce [bajty]	155 520		38 880	
FEC [—]	Ano	Ne	Ano	Ne
Velikost rámce FS [bajty]	135 432	155 496	36 344	38 856

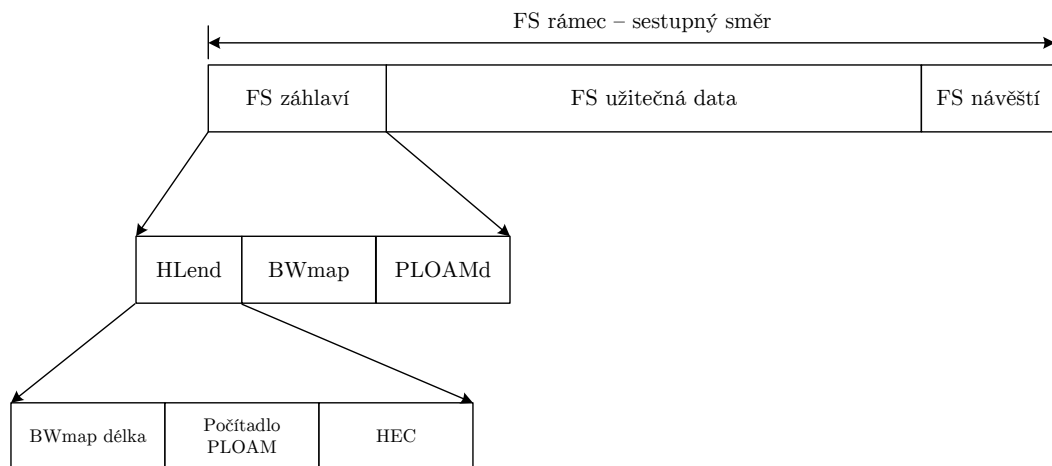
Primární zodpovědnost za tvorbu rámce nese FS (rámcová podvrstva – Framing Sublayer), která k finální velikosti ještě namapuje 24bajtové pole PSBd (synchronizační blok pro sestupný směr – Physical Synchronization Block downstream), jenž obsahuje tři 8bajtové struktury:

- Psync (pole pro synchronizaci v sestupném směru – Physical synchronization) – pevně definovaná 64bitová sekvence.
- SFC (počítadlo rámců – Super Frame Counter) – 54bitové počítadlo rámců v sestupném směru, které je s každým rámcem inkrementováno o 1, dojde-li k dosažení maximální hodnoty, vrací se na hodnotu 0 a pokračuje v identifikaci dílčích rámců. Zbylých 13 bitů se využívá k HEC (hybridní korekce chyb – Hybrid Error Coding).

- OC (řízení provozu – Operation Control) – řízení provozu (64bitová struktura) poskytuje zevrubné informace o nastavení/přítomnosti FEC v sestupném směru, oznamuje výkonové úrovně a útlumovou třídu pro ODN, umožňuje využití metody zapouzdření jak pro síť NG-PON2, tak pro síť XG-PON.

Rámec v sestupném směru obsahuje FS záhlaví, FS užitečná data a FS návěští. FS užitečná data jsou předávána na straně OLT jednotky a následně zpracovávána na přijímací straně ONU. FS záhlaví je tvořeno polem HLen<sup>1</sup> o neměnné velikosti a dvěma – dynamickými poli – BWmap (přidělení šířky pásma – Bandwidth map) a PLOAM. Strukturu pole HLen lze shrnout pomocí obrázku 4.1. Z obrázku 4.1 plyne, že pole HLen tvoří celkem tři struktury:

- BWmap délka (11bitová) – obsahující celé číslo  $N$  definující počet alokačních struktur v poli BWmap.
- Počítadlo PLOAM (8bitová) – obsahující celé číslo  $N$  definující počet odesílaných zpráv PLOAM.
- HEC (13bitová) – hybridní korekce chyb pro HLen pole.

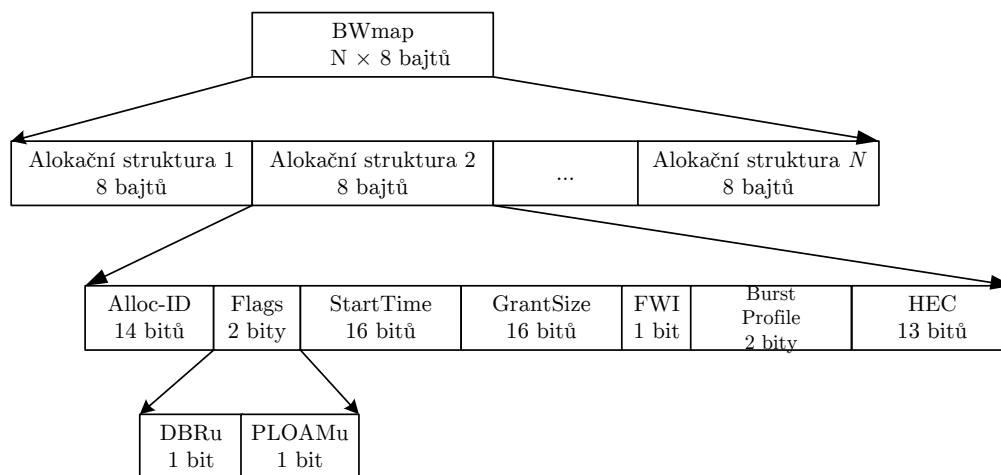


Obr. 4.1: Rámec pro sestupný směr v sítích NG-PON2 [60].

Navazující – dynamická – struktura (BWmap) je tvořena 8bajtovými alokačními strukturami (viz obrázek 4.2). Množství obsažených alokací je definováno v poli „délka BWmap“, aktuální délka BWmap je dána jako  $8 \times N$  bajtů.

Každá alokační struktura specifikuje časový slot pro dílčí Alloc-ID (alokační identifikátor – Allocation Identifier). Identifikátor Alloc-ID slouží k rozlišení dílčích T-CONT (přenosový kontejner – Transmission Container). Přidělování časového slotu je totiž závislé na množství využitých přenosových kontejnerů, přičemž každý z nich je dále reprezentován svým Alloc-ID. Obecně platí, že T-CONT1 je určen pro nejprioritnější přenos, tedy přenos VoIP (přenos hlasu přes Internetový

<sup>1</sup>Nemá svou definici, pole je takto pouze nazváno.



Obr. 4.2: Struktura pole BWmap v sítích NG-PON2 [60].

protokol – Voice over Internet Protocol), T-CONT2 je určen pro méně prioritnější přenos, zpravidla IPTV (přenos televize přes Internetový protokol – Internet Protocol Television). Nejnižší prioritu má přenos dat reprezentovaný T-CONT5. Přehled využívaných hodnot Alloc-ID zobrazuje tabulka 4.2.

Tab. 4.2: Hodnoty pole Alloc-ID v sítích NG-PON2 [60].

Alloc-ID	Význam	Popis
0–1020	Výchozí přiřazování	Výchozí/počáteční hodnota Alloc-ID koresponduje s hodnotou ONU-ID.
1021	Rezervováno broadcast	Využíváno OLT během aktivačního procesu ONU (využívající přenosovou rychlost ve vzestupném směru 9,95 nebo 2,48 Gbit/s) ve stavu sériového čísla (O2–3).
1022	Rezervováno broadcast	Využíváno OLT během aktivačního procesu ONU (využívající přenosovou rychlost ve vzestupném směru 9,95 Gbit/s) ve stavu sériového čísla (O2–3).
1023	Rezervováno broadcast	Využíváno OLT během aktivačního procesu ONU (využívající přenosovou rychlost ve vzestupném směru 2,48 Gbit/s) ve stavu sériového čísla (O2–3).
1024–16383	Explicitně přiděleno	Je-li potřeba přiřadit více než jedno Alloc-ID pro ONU. OLT vybírá unikátní hodnotu z rozsahu a předává tuto hodnotu přes PLOAM zprávu Assign Alloc-ID.

Jedné ONU může náležet více hodnot Alloc-ID a vytvořit tak alokační sérii. Každá alokační struktura obsahuje definovaná pole:

- Pole Alloc-ID – jedná se o 14bitové pole indikující příjemce časového slotu



(alokační struktury). Dílčí hodnoty Alloc-ID reprezentují využívané T-CONT kontejnery.

- Pole flags – je rozděleno do dvou nezávislých polí:
  - DBRu (report obsahující aktuální vytížení pro vzestupný směr – Dynamic Bandwidth Report upstream) – odesílaný report se zasílá pro dílčí a přiřazené Alloc-ID. Je-li tento bit nastaven, ONU může ohlašovat vytížení bufferů pro vzestupný směr, není-li obsažen, nedochází k odesílání DBRu.
  - PLOAMu (správa fyzické vrstvy ve vzestupném směru – Physical Layer Operations, Administrations and Maintenance upstream – pokud je tento bit nastaven v první alokační struktuře série, velikost hlavičky FS shluku<sup>2</sup> pro vzestupný směr by měla být 52 bajtů a ONU by měla přenášet zprávu PLOAM jako součást hlavičky FS shluku. Pokud v první alokační struktuře není tento bit PLOAMu nastaven, měla by být velikost záhlaví FS shluku 4 bajty a zpráva PLOAM by neměla být přenášena.
- Pole StartTime – pole obsahuje 16bitové číslo, které označuje umístění prvního bajtu FS shluk pro vzestupný směr v rámci PHY rámce (jedná se o FS shluku opatřený PSBu (synchronizační blok pro vzestupný směr – Physical Synchronization Block upstream). StartTime je měřen od začátku rámce. Nabývá celočíselných hodnot v rozsahu od 0 do 9719. Interval mezi dvěma sousedními časovými okamžiky specifikovanými po sobě jdoucími hodnotami StartTime může pojmout 4bajtové slovo při přenosové rychlosti 2,48832 Gbit/s nebo 16bajtový blok při přenosové rychlosti 9,95328 Gbit/s ve vzestupném směru. Bude-li brána v potaz série alokačních struktur pro shodnou ONU StartTime, bude definován pouze pro první alokaci a bere se v potaz, že další budou neprodleně následovat.
- Pole GrantSize – obsahuje 16bitové číslo, které udává kombinovanou délku užitečných dat s režii DBRu přenášených v rámci dané alokace. GrantSize nezohledňuje FS hlavičku ani návěští. Stejně jako v poli StartTime i zde hraje roli přidělená přenosová rychlost ve vzestupném směru, velikost GrantSize jsou 4/16bajtovými bloky (2,48 a 9,95 Gbit/s). Dochází-li k odeslání pouze PLOAM zprávy, v rámci aktivačního procesu (viz kapitola 4.3), velikost GrantSize je rovna 0.
- FWI (indikace nuceného probuzení – Forced Wake-up Indication) – při dosazování jednotky ONU, která podporuje režim řízení spotřeby, nastaví OLT tento bit, aby urychlila probuzení ONU nacházející se v režimu spánku.
- Pole BurstProfile – 2bitové pole obsahuje index konkrétního burst profilu,

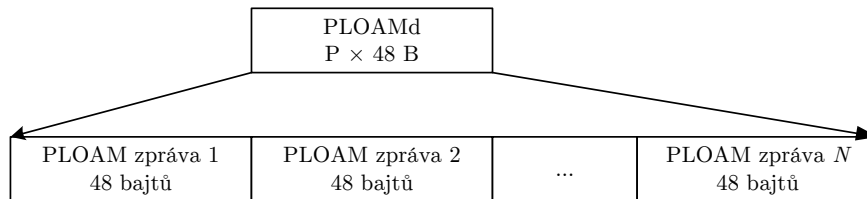
---

<sup>2</sup>V anglické terminologii burst.

který má být využíván.

- Pole HEC – zajišťuje detekci a korekci chyb v alokačních strukturách.

Druhá – dynamická – struktura PLOAMd (správa fyzické vrstvy v sestupném směru – Physical Layer Operations, Administrations and Maintenance upstream), navázána za pole HLEnd, obsahuje nula, jednu nebo více PLOAM zpráv. Délka každé PLOAM zprávy je 48 bajtů a celkový počet obsažených zpráv je dán jako násobek  $48 \times P$  bajtů, přičemž celé číslo  $P$  je obsaženo v poli HLEnd. Strukturu PLOAMd zobrazuje obrázek 4.3.



Obr. 4.3: Struktura pole PLOAMd v sítích NG-PON2 [60].

Návěští FS rámce (viz obrázek 4.1) obsahuje 4 bajty BIP (sudá parita s prokládaním bitů – Bit-Interleaved even Parity) pole pro kompletní FS rámeček. Je-li vypnuta korekce chyb FEC pro sestupný směr, ONU využívá BIP k vypočtení hodnoty BER na ODN. V opačném případě je před odvozením hodnoty BER aplikována korekce chyb FEC.

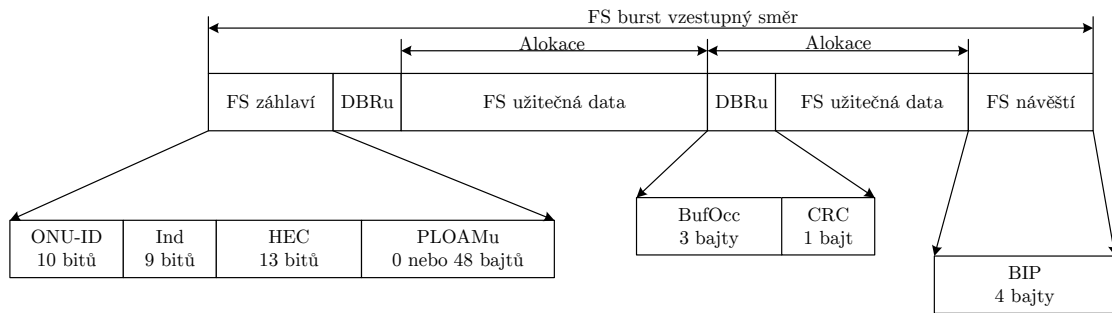
## 4.2 Burst pro vzestupný směr

Ve vzestupném směru je rozhraní mezi TC rámcovou podvrstvou a TC fyzickou adaptační podvrstvou reprezentováno FS shlukem (dále v textu burst). Burst FS je přenášen konkrétní ONU s dynamickou velikostí s FS burst záhlavím, jedním nebo více alokačními intervaly, přičemž každý tento interval je přiřazen ke konkrétní hodnotě Alloc-ID a FS návěštím, jak je zobrazeno na obrázku 4.4. Velikost každé alokační struktury je přiřazována specifickou alokací v poli BWmap.

První pole z burstu, zobrazeného na obrázku 4.4, obsahuje FS záhlaví se 4 bajty neměnné části a proměnlivou část. Neměnná část obsahuje ONU-ID, Ind<sup>3</sup> a HEC. Proměnlivá část je složená z 0 nebo 48 bajtů pro zprávu PLOAM a odvíjí se z hodnoty PLOAMu odpovídající BWmap alokační struktury.

Pole ONU-ID je 10bitové pole obsahující unikátní hodnotu ONU-ID konkrétní ONU, jež vysílá příslušný burst. Hodnota ONU-ID (viz tabulka 4.3) je přiřazena během aktivačního procesu (viz kapitola 4.3). V rámci kontrolního mechanismu, že

<sup>3</sup>Dokument [60] neuvádí plný význam zkratky.



Obr. 4.4: Burst pro vzestupný směr v sítích NG-PON2 [60].

burst odeslala správná jednotka ONU, může OLT porovnat hodnotu ONU-ID s odeslanou alokační strukturou pro danou ONU v poli BWmap.

Tab. 4.3: Hodnoty pole ONU-ID v sítích NG-PON2 [60].

ONU-ID	Význam	Popis
0–1020	Přidělováno	Přidělované hodnoty jednotkou OLT během aktivačního procesu ONU. Využíváno pro identifikaci odesílatele burstu nebo PLOAMu zprávy a příjemce zprávy PLOAMd.
1021–1022	Rezervováno	Nepřidělitelné hodnoty jednotkám ONU.
1023	Broadcast	Všesměrová adresa v PLOAMd, hodnota pro neaktivovanou ONU pro zprávu PLOAMu.

Dalším polem za ONU-ID je Ind, které sestává z 9 bitů, ty zajišťují rychlou – nevyžádanou – signalizaci stavu ONU:

- 0. bit LSB (nejméně významný bit – Least Significant Bit) – je-li tento bit nastaven, dochází k identifikaci problémů na straně ONU, který brání v odesílání burstů ve vzestupném směru. Přijetím této zprávy (Dying Gasp) OLT reaguje tím, že již nedochází k přidělování alokačních struktur dané ONU. Stav může být revokován a OLT dále přiděluje alokační struktury.
- 1.–7. bit – slouží jako rezerva.
- 8. bit MSB (nejvýznamnější bit – Most Significant Bit) – bit indikuje o stavu fronty s připravenými řídicími zprávami PLOAM, které nemohly být odeslány v předchozí alokační struktuře. Není-li bit nastaven – ONU nemá žádné PLOAM připravené k odeslání.

Následující pole HEC se stará o detekci a korekci chyb ve FS hlavičce pro burst ve vzestupném směru. Poslední pole, z FS hlavičky, je PLOAMu indikující přítomnost zprávy PLOAM. Je-li tento bit nastaven, obsahuje pouze jedinou PLOAM zprávu,

není-li nastaven PLOAM zpráva není obsažena.

Za užitečnými daty se nachází pole DBRu složené ze dvou polí:

- BufOcc (obsazenost front – Buffer Occupancy) – pole obsazení vyrovnávací paměti je dlouhé 3 bajty a obsahuje celkové množství provozu SDU (datová jednotka služby – Service Data Unit), vyjádřené pomocí 4bajtových jednotek, agregovaných ve všech vyrovnávacích pamětech přidružených k identifikátoru Alloc-ID. Odeslaná hodnota by měla představovat nejlepší dostupný odhad, který odpovídá časovému okamžiku – pro danou alokační strukturu – kdy je report o obsazenosti front přenášen.
- CRC (cyklický redundantní součet – Cyclic Redundancy Check) – struktura DBRu je chráněna pomocí CRC-8 polynomu  $g(x) = x^8 + x^2 + x + 1$ . V případě detekce chyby v poli DBRu jsou informace zahozeny.

Příspěvek BufOcc  $W$  pro SDU o délce  $L$  lze vyjádřit vztahy (4.1) a (4.2) [60]:

$$W = \left\{ \left\lceil \frac{L}{4} \right\rceil, \text{ pro } L > 8, \right. \quad (4.1)$$

$$W = 2, \text{ pro } 0 < L \leq 8. \quad (4.2)$$

Zatímco  $L$  jsou přirozená čísla SDU, BufOcc podporuje přenos dvou speciálních hodnot: 0x000000 reprezentující prázdnou vyrovnávací paměť a 0xFFFFFFF udávající neplatné měření.

Obdobně jako v sestupném směru i v opačném směru je FS burst doplněn o náležitější obsahující BIP.

### 4.3 Aktivační proces koncové jednotky v sítích NG-PON2

Topologie pasivních optických sítí byla popsána v kapitole 2. Připojením nové ONU jednotky, na straně zákazníka, nedochází okamžitě k obousměrnému přenosu dat. Nová ONU musí být na straně ISP zaregistrována a následně aktivována. Zpravidla ISP poskytuje několik tarifů připojení (specifické svými přenosovými rychlostmi) a zákazník si zvolí, který mu vyhovuje cenou nebo rychlostí. Zmíněný tarif je souborem nastavení na řídicí jednotce OLT, jenž jsou obecná a shodná pro jednotlivé xPON porty na straně OLT. Z výše uvedeného je zřejmé, že dílčí zákazníci mohou mít odlišné tarify, i když jsou připojeni ke stejné OLT. Parametry tarifu jsou přiřazeny ONU během jejího prvotního připojení do sítě operátora, a to během aktivačního procesu, který je charakteristický unikátními stavy [60]:

- Inicializační stav (Initial state (O1)) – počáteční stav, ve kterém se ONU nachází po svém zapnutí.

- Stav sériového čísla (Serial number state (O2–3)) – v tomto stavu ONU očekává výzvu od OLT k předání svého sériového čísla.
- Stav rozsahu (Ranging state (O4)) – všechny ONU jednotky je potřeba virtuálně zarovnat na stejnou vzdálenost.
- Operační stav (Operational state (O5)) – úspěšné dokončení ONU vede k povolení obousměrnému datovému přenosu.
- Stav přerušeni (Intermittent state (O6)) – ONU přechází do stavu, dojde-li k výpadku synchronizace na sestupném směru.
- Nouzový stav (Emergency state (O7)) – vynucený stav ONU, který inicializuje OLT (například při neuhrazení platby za služby).
- Ladicí stav v sestupném směru (Downstream tuning state (O8)) – ONU jednotka vyžaduje přeladění vlnové délky pro sestupný směr (inicializuje OLT).
- Ladicí stav ve vzestupném směru (Upstream tuning state (O9)) – ONU jednotka vyžaduje přeladění vlnové délky pro vzestupný směr (inicializuje OLT).

### 4.3.1 Inicializační stav – (O1)

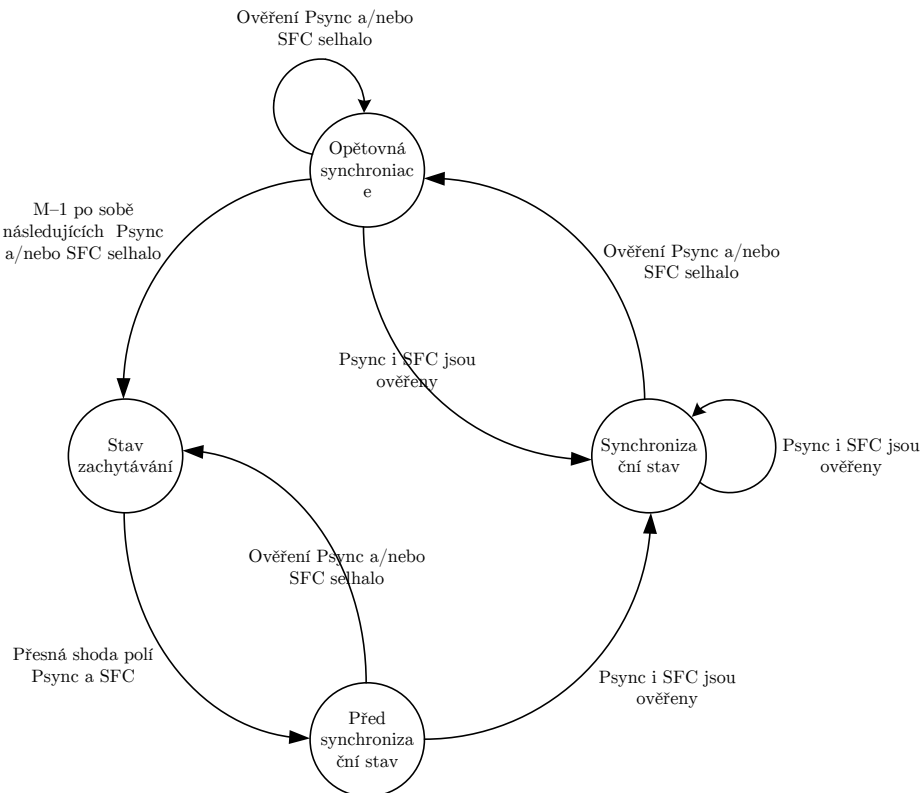
Do tohoto stavu se ONU dostává automaticky ihned po svém zapnutí. Principiálně se stav rozděluje do dvou podstavů: synchronizační a učící se. Výchozím stavem nově připojené/zapnuté ONU je inicializační stav v rámci stavu zachytávání<sup>4</sup>. Koncová jednotka zůstává zcela pasivní (nevysílá) a pouze zpracovává příchozí rámce v sestupném směru a vyhledává pole Psync, přičemž toto políčko obsahuje neměnnou 64bitovou strukturu s hodnotou 0xC5E51840 FD59BB49. Dojde-li k přijetí M–1 po sobě následujících rámců s touto hodnotou, může se koncová jednotka přesunout do před-synchronizačního stavu.<sup>5</sup> K ověřování, že se jedná o M–1 po sobě následujících rámců, dochází kontrolou pole SFC, jehož kopii si s prvním příchozím rámcem ONU uloží lokálně. Pole SFC je inkrementováno, s každým nově odeslaným rámcem, o 1 v sestupném směru od OLT k ONU.

V před-synchronizačním stavu dochází ke kontrole Psync a SFC pro každý přijatý rámeček (každých 155 520 bajtů pro přenosovou rychlost 9,95 Gbit/s nebo každých 38 880 bajtů pro přenosovou rychlost 2,48 Gbit/s – v sestupném směru). Ověřená pole vedou k navýšení lokální hodnoty SFC o 1 – očekávání dalšího rámce. Jsou-li pole bezchybná, přesouvá se koncová jednotka do synchronizačního stavu a setrvává v něm tak dlouho, dokud jsou pole Psync a SFC bezchybně ověřovány. Nebudou-li hodnoty souhlasit, dojde k přechodu do dílčího stavu opětovné synchronizace. V opětovném stavu synchronizace musí dojít k přijetí a kontrole polí M–1 rámců v sestupném

<sup>4</sup>V publikacích Hunt state.

<sup>5</sup>V publikacích pre-sync state.

směru. Doporučená hodnota  $M$  je 3. Přechody mezi jednotlivými podstavami zobrazuje obrázek 4.5.



Obr. 4.5: Stavový automat pro inicializační stav v sítích NG-PON2 [60].

Při dosažení synchronizačního stavu, respektive po dobu setrvávání v něm, u nově připojené ONU stále nedochází k aktivnímu vysílání jak dat, tak řídicích zpráv. Dochází na druhou fázi, tedy fázi učení se. Konkrétně se jedná o extrahování parametrů z provozované sítě, zejména vlnové délky v sestupném směru a informací o kanále. Zpočátku dojde k aktivaci časovače (s dobou trvání nejméně 10 s) a následně dochází k extrakci PLOAM části z rámců v sestupném směru. Uvedené údaje obsahuje PLOAM zpráva „Channel Profile“ vysílaná v sestupném směru. Tato zpráva obsahuje údaje o vlnové délce (oba směry), provozované přenosové rychlosti (oba směry), přítomnosti FEC apod. Popis vybraných polí zprávy kanálového profilu obsahuje tabulka 4.4. Po extrakci uvedených parametrů se může ONU přesunout do stavu sériového čísla (O2–3).

### 4.3.2 Stav sériového čísla – (O2–3)

Jednotka ONU v tomto stavu neprodleně spustí časovač TOZ, jehož inicializační hodnota je závislá na režimu aktivace. V případě aktivace „v pásmu“<sup>6</sup> odpovídá

<sup>6</sup>V literatuře in-band.

Tab. 4.4: Popis vybraných polí obsažených ve zprávě Channel Profile [60].

Oktet	Obsah	Popis
1–2	ONU-ID	0x03FF, broadcast ONU-ID.
3	ID zprávy	0x18, kanálový profil (Channel Profile).
4	Sekvence	8bitové sekvenční číslo PLOAM zprávy.
...	...	...
11	Frekvenční offset sestupný směr	Rozdíl mezi nominální a aktuální frekvencí na straně OLT.
12	Přenosová rychlost sestupný směr	V podobě 00SE LLLL, kde S 0 = 9,95 Gbit/s; 1 = 2,48 Gbit/s. E – 0 = FEC povolen; 1 = FEC zakázán, LLLL identifikuje linkový kód: 0000 = NRZ.
...	...	...
18	Grant pro sériové číslo	Oktet ve tvaru 0000 00IA, kde I reprezentuje "in-band" 0 = grant pro sériové číslo není přidělen; 1 = grant je přidělen.
...	...	...
23	UWLCH ID	Oktet ve tvaru 0000 UUUU, kde UUUU udává vlnovou délku pro vzestupný směr (její ID).
24–27	Frekvence ve vzestupném směru	Nominální centrální frekvence kanálu ve vzestupném směru.
...	...	...
29	Přenosová rychlost vzestupný směr	Oktet ve tvaru 0000 00HL, kde H je určeno pro přenosovou rychlost 9,95 Gbit/s (0 = nepodporováno, 1 = podporováno); L je určeno pro přenosovou rychlost 2,48 Gbit/s (0 = nepodporováno, 1 = podporováno).
...	...	...

hodnota časovače 20 s, ONU aktivuje svůj vysílač, aby došlo k naladění vlnové délky pro vzestupný směr (parametry ONU získala z extrahování řídicích zpráv kanálového profilu) odpovídající s vlnovou délkou pro směr sestupný (pár).

Po naladění vlnové délky pro vzestupný směr se očekává přidělení sériového čísla, respektive výzva ve zprávě kanálového profilu, na kterou ONU odpovídá řídicí zprávou „Serial Number ONU“, popis vybraných polí zprávy obsahuje tabulka 4.5. Nově ONU podporují vyrovnávání výkonu a optimalizaci výkonové úrovně (v rámci útlumových tříd). Má-li dojít k optimalizaci výkonu, může jednotka provádět obě činnosti zároveň. Lze tedy reagovat zprávou se sériovým číslem a souběžně optimalizovat výkonovou úroveň dle instrukcí v PLOAM zprávě kanálového profilu. Následně je očekávaná zpětná reakce OLT jednotky, neboť ONU poskytla své sériové číslo a v potaz připadá několik typů odpovědí:

- Přiřazení ONU-ID – při přijetí zprávy „Assign ONU-ID“ může ONU přejít do dalšího stavu rozsahu (O4).
- Požadavek na kalibraci ONU – ONU setrvává ve stavu sériového čísla a naslouchá parametrům v kanálovém profilu pro další kalibraci parametrů.
- Úprava vlnové délky pro vzestupný směr – ONU se vrací zpátky do inicializačního stavu (O1), aby došlo k opětovnému přeladění vlnové délky pro vzestupný směr.

Tab. 4.5: Popis vybraných polí obsažených ve zprávě Serial Number ONU [60].

Oktet	Obsah	Popis
1–2	ONU-ID	0x03FF, broadcast ONU-ID
3	ID zprávy	0x01, Serial Number ONU
4	Sekvence	Nastaveno jako 0x00 pro všechny instance Serial Number ONU PLOAM zprávy.
5–8	ID výrobce	
9–12	VSSN	Unikátní část sériového čísla.
13–16	Náhodné zpoždění	Náhodné zpoždění využito ONU jednotkou, když dochází k odesílání této zprávy.
...	...	...

Poslední variantou v současném stavu je vypršení časovače TOZ. Dojde-li k jeho vypršení a ONU nenaladila svůj vysílač, nebo neobdržela odpověď od OLT, dojde k přesunu do inicializačního stavu (O1) a opětovné extrakci kanálového profilu.

### 4.3.3 Stav rozsahu – (O4)

Ve stavu rozsahu dojde zpočátku k aktivaci časovače TO1 a očekává se přidělení hodnoty ekvalizačního zpoždění. Ekvalizační zpoždění má za následek virtuální zarovnání všech ONU do stejné vzdálenosti, aby bylo docíleno vysílání ve správný čas – v rámci přidělených časových slotů. K inicializaci výpočtu ekvalizačního zpoždění, pro konkrétní ONU, je odeslána zpráva Ranging Time s ID 4 (sestupný směr) obsahující [60]:

- unikátní identifikátor ONU-ID (identifikátor optické síťové jednotky – Optical Network Unit Identifier) (pro všechny ONU odpovídá hodnotě 0x03FF nebo pro konkrétní ONU s unikátní hodnotou ONU-ID),
- typ zprávy – identifikátor zprávy, sekvenční číslo,
- hodnota ekvalizačního zpoždění,
- identifikátor PON-ID (identifikátor pasivní optické sítě – Passive Optical Network Identifier) pro sestupný i vzestupný směr,



- výplň.

Přehled obsažených polí ve zprávě Ranging Time (sestupný směr) obsahuje tabulka 4.6. Koncová jednotka ONU odpovídá pouze potvrzující zprávou (acknowledgement), viz tabulka 4.7. Na straně OLT dojde následně k výpočtu ekvalizačního zpoždění a předání zpoždění ve zprávě Ranging Time (sestupný směr). Pro unikátní identifikaci příslušného T-CONT je přidělen identifikátor Alloc-ID a následně ONU přechází do operačního stavu (O5).

Tab. 4.6: Popis vybraných polí obsažených ve zprávě Ranging Time [60].

Oktet	Obsah	Popis
1–2	ONU-ID	Přímo adresováno konkrétní ONU, případně všem s označením ONU-ID = 0x03FF.
3	ID zprávy	0x04, Ranging Time.
4	Sekvence	8bitové sekvenční číslo PLOAM zprávy.
...	...	...
6–9	Ekvalizační zpoždění	Ekvalizační zpoždění pro ONU jednotku.
...	...	...

Tab. 4.7: Popis vybraných polí obsažených v potvrzovací zprávě [60].

Oktet	Obsah	Popis
1–2	ONU-ID	Konkrétní hodnota ONU-ID odesílající jednotky ONU.
3	ID zprávy	0x09, potvrzení.
4	Sekvence	Shodná hodnota s příchozí hodnotou ze zprávy Ranging Time.
...	...	...

#### 4.3.4 Operační stav – (O5)

Z pohledu obousměrného přenosu dat se jedná o konečný stav. Jednotka ONU může realizovat přenos dat, ve shlucích, ve vzestupném směru, na základě přidělených časových slotů (staticky nebo dynamicky) a zpracovávat příchozí rámce určené této jednotce. ONU je spojena s konkrétním kanálem ve vzestupném směru a žádná zpráva Tuning Control není ve zpracování. K zajištění kontroly oprávněného setrvání v operačním stavu, dochází k aktivaci časovače TO6. Výchozí hodnota časovače je nastavena na 10s. Důležitou vlastností je opětovný reset časovače na výchozí hodnotu, když dojde k přijetí rámce v sestupném směru s definicí časového slotu pro vysílání dat ve vzestupném směru. Neobdrží-li ONU časový slot do vypršení časovače, dojde k vypnutí časovače TO6 a přesunu ONU do inicializačního stavu (O1).

### 4.3.5 Stav přerušení – (O6)

Výpadek synchronizace v sestupném směru, selhání ověření pole Psync a SFC, vede k přesunu do tohoto stavu a aktivace časovačů TO2 a TO3. Hodnota časovačů závisí na implementaci výrobce a jednotlivá doporučení nedefinují ani minimální hodnotu. Dojde-li k opětovné synchronizaci (dojde k úspěšné kontrole Psync a SFC v M-1 po sobě následujících rámcích) v sestupném směru před vypršením časovačů TO2 a TO3, přejde ONU zpátky do operačního stavu (O5). Při vypršení časovače TO2 se ONU dostane do inicializačního stavu (O1), naopak po vypršení časovače TO3 se ONU přesune do ladicího stavu v sestupném směru (O8).

### 4.3.6 Nouzový stav – (O7)

Přechod do nouzového stavu (O7) je podmíněn přijetím PLOAM zprávy „Disable Serial Number ONU“ v sestupném směru s identifikátorem „disable“ s konkrétní hodnotou ONU-ID. Přijetí PLOAM zprávy Disable Serial Number ONU vede k vypnutí laseru na straně ONU. Popis vybraných polí zprávy Disable Serial Number ONU zobrazuje tabulka 4.8.

Tab. 4.8: Popis vybraných polí obsažených ve zprávě Disable Serial Number ONU [60].

Oktet	Obsah	Popis
1–2	ONU-ID	0x03FF, broadcast ONU-ID
3	ID zprávy	0x06, Disable Serial Number ONU
4	Sekvence	8bitové sekvenční číslo PLOAM zprávy
5	Zakázat / povolit	0xFF = ONU s tímto SN nemá povolený vzestupný směr, 0x00 ONU s tímto SN má povolený vzestupný směr.
6–9	ID výrobce	
10–13	VSSN	Unikátní část sériového čísla.
...	...	...

Nouzový stav udržuje pouze synchronizaci v sestupném směru, ONU nemůže vyslat žádná data ani odpovídat na výzvy OLT. Dojde-li ke ztrátě synchronizace na daném kanále (vlnové délce), ONU z extrakce kanálového profilu vyhledá nový kanál v sestupném směru, na který se může přeladit, aby byla udržena synchronizace v sestupném směru. Ladění sestupného směru může také začínat z výchozího – definovaného – kanálu. Nouzový stav je perzistentní a zůstává i po výpadku napájení nebo restartu zařízení.

### 4.3.7 Ladicí stav v sestupném směru – (O8)

Po přesunu do tohoto stavu ONU aktivuje časovač TO4. Jednotka si zachovává uložené parametry přenosové vrstvy, zejména profil a dochází k ladění na jiný kanál v sestupném směru. Jednotka si může pamatovat své předchozí nastavení, čili má uložené parametry předchozího kanálu v sestupném směru. Nebude-li přeladění úspěšné, lze se vrátit k předchozím parametrům. Naopak dojde-li během přeladování k vypršení časovače TO4<sup>7</sup>, ONU přejde do inicializačního stavu (O1) a dojde ke smazání konfigurace přenosové vrstvy.

Může se stát, že požadavek na přeladění v sestupném směru dorazí během fragmentace rámců. Potvrzením zprávy Tuning Control jsou zaznamenány konečné vlnové délky (ladění aktuálně probíhá pouze pro sestupný směr) a plánovaný SFC (vybraná pole jsou popsána v tabulce 4.9). Jedná se o 16bitová hodnota, která se používá k vytvoření interní události pro spuštění postupu ladění. ONU dokončí přenos dat ve vztupném směru, jejichž fragmentace již započala a v případě potřeby použije další fragmentaci, aby bylo dosaženo přenosu všech dat v dané fragmentaci. ONU však nezačíná fragmentaci žádných nových dat a je započat proces ladění.

Tab. 4.9: Popis vybraných polí obsažených ve zprávě Tuning Control [60].

Oktet	Obsah	Popis
1–2	ONU-ID	Adresováno konkrétní ONU.
3	ID zprávy	0x15, Tuning Control
4	Sekvence	8bitové sekvenční číslo PLOAM zprávy
...	...	...
8	Příznak návratu	Oktet ve tvaru 0000 000R, kde R: 0 = není možné se vrátit na původní vlnovou délku; 1 = návrat na původní vlnovou délku umožněn.
...	...	...

### 4.3.8 Ladicí stav ve vztupném směru – (O9)

Vstup do tohoto stavu vyžaduje přijetí zprávy Adjust Tx Wavelength nebo Tuning Control řídicí PLOAM zprávy (vybraná pole zprávy obsahuje tabulka 4.10), čímž dochází k aktivaci časovače TO5 (hodnota časovače je na výrobci systému). Zmíněný časovač slouží k zajištění maximální doby, po kterou se jednotka ONU snaží přeladit svůj vysílač na novou vlnovou délku, případně jej zkalibrovat na požadovanou vlnovou délku vlivem driftování. Řídicí jednotka OLT může dotazovat

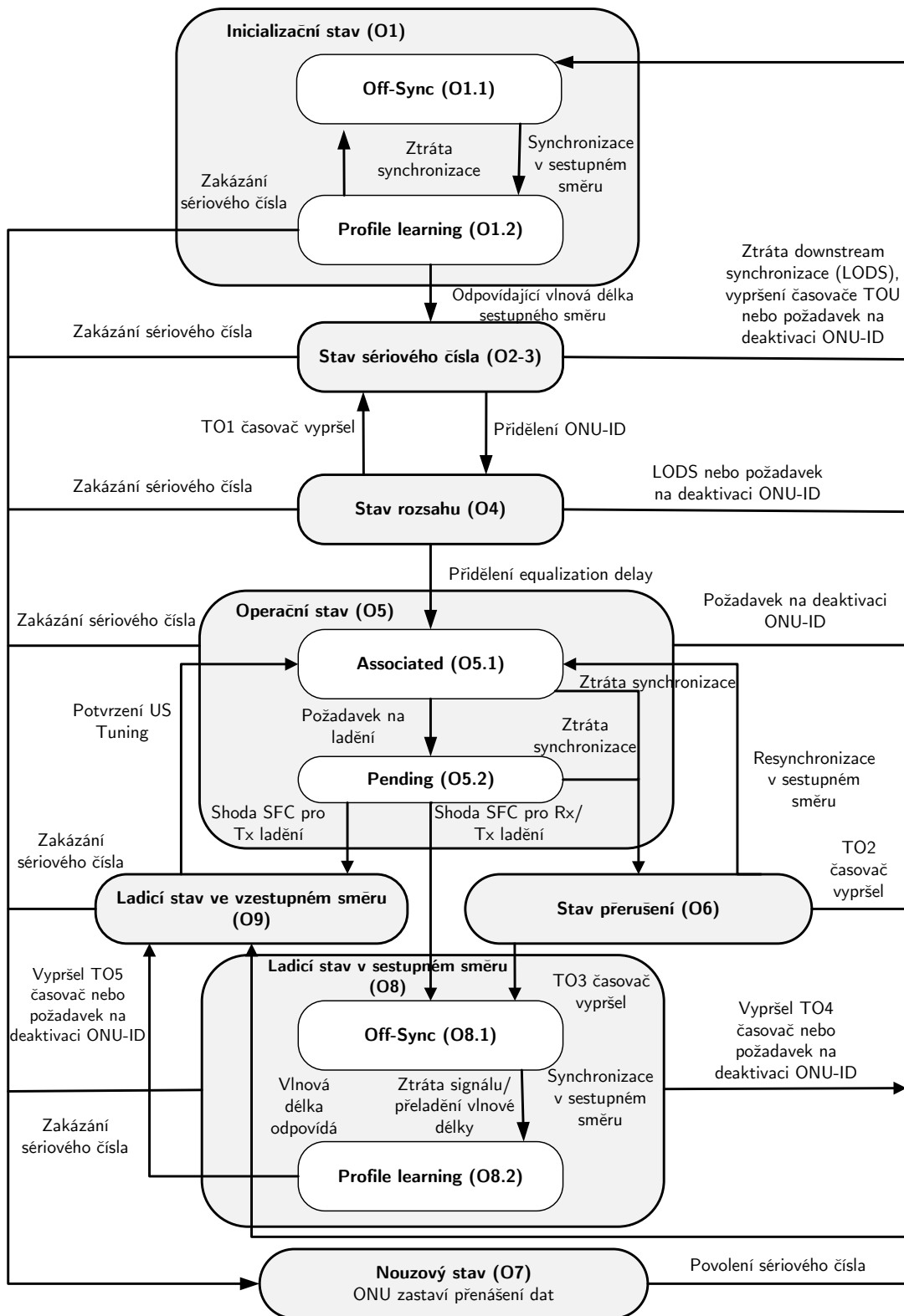
<sup>7</sup>Hodnota časovače není definována, záleží na implementaci výrobce.

ONU pomocí přiděleného časového slotu pro vysílání dat (vzestupný směr). Má-li ONU přeladěno podle pokynů OLT, odpovídá odesláním příslušných dat doplněných o PLOAM zprávu Tuning Response s příznakem (kompletní). Nedojde-li k přeladění vlnové délky, může se ONU vrátit na svou původní vlnovou délku a odeslat PLOAM zprávu Tuning Response s příznakem (Rollback). Neproběhne-li proces přeladění vlnové délky před uplynutím časovače TO5, ONU se přesune do inicializačního stavu (O1).

Tab. 4.10: Popis vybraných polí obsažených ve zprávě Adjust Tx Wavelength [60].

Oktet	Obsah	Popis
1–2	ONU-ID	Adresováno konkrétní ONU.
3	ID zprávy	0x14, Adjust Tx Wavelength.
4	Sekvence	8bitové sekvenční číslo PLOAM zprávy.
5–8	ID výrobce	
9–12	VSSN	Unikátní část sériového čísla.
...	...	...
19	Nastavení upstream frekvence	Oktet ve tvaru 0000 000D, kde D: 0 = nastavit ONU vysílač na nižší frekvenci; 1 = nastavit ONU vysílač na vyšší frekvenci.
20–21	Krok posunu frekvence	Krok posunu odpovídá násobkům 0,1 GHz.
...	...	...

Jednotlivé návaznosti na dílčí stavy zobrazuje obrázek 4.6. Z obrázku je patrné, že dojde-li ke ztrátě synchronizace (nesouhlasí pole Psync nebo SFC) a vyprší časovač, ONU se přesouvá do inicializačního stavu. Předchozí doporučení, GPON a XG-PON, měla značně jednodušší aktivační proces, neboť nebyl zohledněn proces přeladování vlnových délek pro sestupný/vzestupný směr.



Obr. 4.6: Návaznost dílčích stavů během aktivace koncové jednotky ONU v sítích NG-PON2 [60].

### 4.3.9 Časování koncové jednotky

Komunikace v sestupném směru je založena na metodě přenosu broadcast, tedy každá ONU obdrží veškerá data a zpracovává pouze data, náležící této jednotce. Vzestupný směr je komplikovanější, využívající metodu přenosu unicast, proto je nezbytné přidělit každé ONU odpovídající časový slot pro komunikaci. Veškerá komunikace probíhá na sdílené infrastruktuře, dodržování časových slotů je tedy povinné.

Začátek rámce PHY v sestupném směru je dán příjmem prvního bitu pole Psync. Referenční čas začátku upstream burstu je okamžik přenosu prvního slova nebo bloku identifikovaném v poli StartTime z dané alokační struktury. Veškerá komunikace ve vzestupném směru, od konkrétní ONU, je navázána na začátek rámce PHY v sestupném směru, konkrétně na pole nesoucí informaci o BWmap. Řídící jednotka OLT pracuje s režimy tzv. tichých oken, jedná se o časový úsek, který je dán začátkem rámce v sestupném směru (obsahující přidělení ke konkrétnímu sériovému číslu nebo grant pro výpočet ekvalizačního zpoždění) a nejzazším začátkem přenosu PLOAM zprávy ve vzestupném směru nesoucí odpověď na tuto řídicí zprávu.

K přenosu jak dat, tak řídicích zpráv je nutné zohledňovat minimální vzdálenost a maximální vzdálenost v ODN. Celková vzdálenost ONU v ODN splňuje [60]:

$$L_{\min} \leq L_i \leq L_{\min} + D_{\max}, \quad (4.3)$$

kde  $L_{\min}$  definuje minimální vzdálenost (km),  $D_{\max}$  uvádí maximální rozdíl vzdáleností (km),  $L_i$  reprezentuje vzdálenost (km) konkrétní ONU. Výše uvedená rovnice musí být splněna již během návrhu PON sítě.

V rámci stavu sériového čísla je posun (offset) tichého okna během získávání sériového čísla jednotky ONU dán minimálním zpožděním v PON systému, zahrnující round-trip zpoždění a čas potřebný ke zpracování na straně ONU a také dynamicky generovanou hodnotou StartTime. Posun tichého okna  $W_0^{SN}$  lze určit vztahem (4.4) [60]:

$$W_0^{SN} = RspTime_{\min} + \frac{L_{\min}(n_{ds} + n_{us})}{c} + StartTime \cdot Q_0, \quad (4.4)$$

kde  $RspTime_{\min}$  je minimální doba odezvy konkrétní ONU,  $n_{ds}$  a  $n_{us}$  udávají skupinovou rychlost indexu lomu pro vlnovou délku v sestupném a vzestupném směru,  $c$  reprezentuje rychlost světla a  $Q_0$  uvádí minimální čas k odeslání 32 bitů s přenosovou rychlostí 2,48 Gbit/s.

Velikost tichého okna během získávání sériového čísla jednotky ONU je dána maximální hodnotou neznámého round-trip zpoždění a dobou odezvy s odpovědí se sériovým číslem v rámci PLOAM zprávy. Reakce na výzvu odeslání sériového čísla obsahuje preambuli, oddělovač, záhlaví FS upstream se zprávou Serial Number ONU

PLOAM a návěští FS. Velikost tichého okna lze vyjádřit pomocí vztahu (4.5) [60]:

$$W_{\Delta}^{SN} = RspTime_{var} + \frac{D_{max}(n_{ds} + n_{us})}{c} + Rand_{max} + T_{SN}, \quad (4.5)$$

kde  $RspTime_{var}$  je odchylka doby odezvy ONU,  $Rand_{max}$  udává maximální náhodné zpoždění a  $T_{SN}$  definuje dobu trvání odeslání zprávy serial number response – pravidla je hodnota nižší než  $0,3 \mu s$  a lze ji, s ohledem na další parametry, zanedbat.

V rámci distribuční sítě ODN, s rozdílem vzdálenosti vláken  $20 \text{ km}$ , lze brát v potaz následující hodnoty:

- $200 \mu s$  pro round-trip zpoždění,
- $2 \mu s$  definující čas odeslání odpovědi ONU,
- $48 \mu s$  pro maximální náhodné zpoždění ONU.

Z výše uvedených hodnot vyplývá, že doporučená doba tichého okna, pro ODN  $20 \text{ km}$ , odpovídá  $250 \mu s$ .

V rámci distribuční sítě ODN, s rozdílem vzdálenosti vláken  $40 \text{ km}$ , lze brát v potaz následující hodnoty:

- $400 \mu s$  pro round-trip zpoždění,
- $2 \mu s$  definující čas odeslání odpovědi ONU,
- $48 \mu s$  pro maximální náhodné zpoždění ONU.

Z výše uvedených hodnot vyplývá, že doporučená doba tichého okna, pro ODN  $40 \text{ km}$ , odpovídá  $450 \mu s$ .

Dalším stavem, jenž vyžaduje tiché okno, je stav rozsahu (O4), do kterého přechází ONU po přidělení identifikátoru ONU-ID. V rámci něj ONU očekává hodnotu ekvalizačního zpoždění. Aby nedocházelo ke kolizím mezi ranging grantem na určení vzdálenosti a pravidelně přidělovanými časovými sloty pro vzestupný směr v operačním stavu (O5), otevře OLT tiché okno, aby dočasně potlačilo přijímání burstů od ONU nacházející se v operačním stavu (O5).

Posun tichého okna, během stavu rozsahu, je odvozováno jako minimální round-trip propagačního zpoždění a minimální – potřebný čas – ke zpracování rámce na straně ONU a také dynamicky generované hodnoty  $StartTime$  v rámci ranging požadavku, pak lze posun tichého okna  $W_0^{SN}$  určit vztahem (4.6) [60]:

$$W_0^{SN} = RspTime_{min} + \frac{L_{min}(n_{ds} + n_{us})}{c} + StartTime \cdot Q_0. \quad (4.6)$$

Velikost tichého okna při určování rozsahu vzdálenosti je určena maximální odchylkou neznámých složek zpoždění při obousměrném přenosu a dobou trvání burstu s odpovědí na požadavek ranging. Odpověď na požadavek ranging obsahuje preambuli, oddělovač, hlavičku s registrační zprávou PLOAM a FS návěští. Velikost tichého okna pro stav rozsahu je dán vztahem (4.7) [60]:

$$W_{\Delta}^{SN} = RspTime_{var} + \frac{D_{max}(n_{ds} + n_{us})}{c} + Rand_{max} + T_{RG}, \quad (4.7)$$

kde  $T_{RG}$  definuje dobu trvání odeslání zprávy ranging response – zpravidla je hodnota nižší než  $0,3 \mu\text{s}$  a lze ji, s ohledem na další parametry, zanedbat.

V rámci distribuční sítě ODN, s rozdílem vzdálenosti vláken 20 km, lze brát v potaz následující hodnoty:

- $200 \mu\text{s}$  pro round-trip zpoždění,
- $2 \mu\text{s}$  definující čas odeslání odpovědi ONU.

Z výše uvedených hodnot vyplývá, že doporučená doba tichého okna, pro ODN 20 km, odpovídá  $202 \mu\text{s}$ .

V rámci distribuční sítě ODN, s rozdílem vzdálenosti vláken 40 km, lze brát v potaz následující hodnoty:

- $400 \mu\text{s}$  pro round-trip zpoždění,
- $2 \mu\text{s}$  definující čas odeslání odpovědi ONU.

Z výše uvedených hodnot vyplývá, že doporučená doba tichého okna, pro ODN 40 km, odpovídá  $450 \mu\text{s}$ .

Konečná hodnota může být ještě zkrácena, dojde-li k měření propagačního zpoždění, již během stavu sériového čísla, neboť ONU také neprodleně odpovídá na výzvu, případně zná-li OLT hodnotu již z dřívějších pokusů o aktivaci ONU.

Jednotka OLT následně volí posun (offset) mezi bursty ve vzestupném směru na základě vztahu (4.8) [60].

$$T_{eqd} \geq RspTime_{\max} + (L_{\min} + D_{\max}) \frac{(n_{ds} + n_{us})}{c}. \quad (4.8)$$

Hodnota  $T_{eqd}$  se může měnit v závislosti na vzdálenosti a zarovnání dílčích hodnot ekvalizačního zpoždění. K výpočtu ekvalizačního zpoždění OLT využívá dostupnosti známého času odeslání rámce v sestupném směru (Ranging request) a čas přijetí odpovědi (ACK) od konkrétní ONU (vyjádřeno  $\Delta_i^{RNG}$ ). Na základě těchto časů lze definovat ekvalizační zpoždění dle vztahu (4.9) [60]:

$$EqD_i = T_{eqd} - RTD_i = T_{eqd} - (\Delta_i^{RNG} - StartTime \cdot Q_0). \quad (4.9)$$

Vypočtená hodnota  $EqD_i$  je následně předána ONU ve PLOAM zprávě Ranging Time.

### 4.3.10 DBA

Mechanismus DBA se opírá o spravedlivé přidělování časových slotů doprovázených jejich sdělením v rámci BWmap. Spravedlivé přidělování sestává z deskriptorů provozu pro jednotlivé T-CONT, jež jsou získávány prostřednictvím ohlašování statusu na straně ONU (obsazenost front) a dynamického monitorování odchozího provozu (ve smyslu vytížení) v periodicky se opakujícím cyklu ( $125 \mu\text{s}$ ). Informace o přidělené šířce pásma (časovém slotu) jsou předány do bloku BWmap generátoru.



Jsou-li údaje získávány dynamicky na základě SR a TM od dílčí ONU, jsou parametry deskriptorů pro T-CONT pevné. Dochází-li k plánování časových slotů, výhradně na straně OLT (bez reportování), pak se parametry deskriptorů T-CONT dynamicky mění.

### Referenční model pro dynamickou alokaci šířky pásma (časových slotů)

K definici referenčního modelu jsou použity následující parametry [60]:

$A$  – příchozí provoz do fronty na straně ONU [bit],

$B$  – logická obsazenost fronty [bit],

$R$  – celková přidělená šířka pásma – dynamická [bit/s],

$R_G$  – přiřazená garantovaná šířka pásma – dynamická [bit/s],

$R_L$  – nabízené vytížení provozu – dynamické [bit/s],

$R_{NA}$  – přidělená nezaručená šířka pásma – dynamická [bit/s],

$R_{BE}$  – přidělená šířka pásma pro Best-Effort – dynamická [bit/s],

$S_{NA}$  – přebytečná šířka pásma dostupná pro nezajištěné přidělení – dynamická [bit/s],

$S_{BE}$  – Přebytečná šířka pásma dostupná pro Best-Effort – dynamická [bit/s].

V případě potřeby, horní index u parametru, udává konkrétní Alloc-ID.

Nabízené provozní vytížení je charakteristické pro Alloc-ID a lze jej definovat parametrem  $R_L(t)$  s průměrnou rychlostí, která je nezbytná k odbavení logické fronty konkrétního Alloc-ID, aby došlo k odbavení fronty za přidělený čas  $\Delta$ . Uvedené požadavky lze shrnout vztahem (4.10) [60]:

$$R_L(t) = \frac{B(t) + A(t, t + \Delta)}{\Delta}, \quad (4.10)$$

kde  $B(t)$  je logická obsazenost fronty v čase  $t$ ,  $A(t, t + \Delta)$  představuje nepovinný parametr další fronty.

Šířka pásma  $R^i(t) \geq 0$ , dynamicky přidělená pro Alloc-ID  $i$ , je složena z garantované a doplňkové složky. Garantovaná šířka pásma  $R_G^i(t)$  může mít podoby pevné nebo dynamicky přidělené šířky pásma. Doplňková šířka pásma může být ve formě nezajištěné šířky pásma  $R_{NA}^i(t)$  nebo best-effort  $R_{BE}^i(t)$  dána vztahem (4.11) pro Alloc-ID plnicí  $\chi_{AB}^i = NA$  [60]:

$$R^i(t) = R_G^i(t) + R_{NA}^i(t) \quad (4.11)$$

Pro Alloc-ID vyhovující  $\chi_{AB}^i = BE$  platí vztah (4.12) [60]:

$$R^i(t) = R_G^i(t) + R_{BE}^i(t) \quad (4.12)$$

Pro Alloc-ID vyhovující  $\chi_{AB}^i = \emptyset$  platí vztah (4.13) [60]:

$$R^i(t) = R_G^i(t) \quad (4.13)$$

Pro přidělení garantované šířky pásma používá referenční model kritéria založená na parametrech poskytované rychlosti. Pevná část garantované šířky pásma se přiděluje staticky. Přiřazená část garantované šířky pásma je přidělována dynamicky na základě nabízeného zatížení konkrétního Alloc-ID. Pro přidělování dodatečné šířky pásma podporuje referenční model jak kritérium založené na poměru sazeb, tak kritérium založené na poskytované prioritě a vahách.

Přiřazování garantované šířky pásma v rámci dynamické alokace je dána vztahem (4.14) [60]:

$$R_G^i(t) = \min \left\{ R_F^i + R_A^i; \max \left\{ R_F^i; R_L^i(t) \right\} \right\}, \quad (4.14)$$

kde  $R_G^i(t)$  je šířka pásma k dispozici danému Alloc-ID bez ohledu na celkové podmínky vytížení provozem.  $R_F^i$  je spodní hranice přidělené šířky pásma a  $R_F^i + R_A^i$  je horní hranice přidělené šířky pásma.

Nezajištěná šířka pásma,  $R_{NA}$ , je podoba dodatečné šířky pásma, kterou může OLT dynamicky přidělit dané Alloc-ID.

Velikost nadbytečné šířky pásma, která se může podílet na přidělení nezajištěné šířky pásma, odpovídá části kapacity použité pro vzestupný směr. Velikost alokace je dána vztahem (4.15) [60]:

$$S_{NA}(t) = C - \sum_i R_G^i(t), \quad (4.15)$$

kde  $R_G^i(t)$  vyjádření pro odpovídá vztahu (4.14).

Šířka pásma best-effort je forma dodatečné šířky pásma, kterou může OLT dynamicky přidělovat danému Alloc-ID v poměru k negarantované části přiděleného pásma tohoto Alloc-ID.

Dodatečné přidělení v rámci Best-Effort obdrží Alloc-ID v případě, že všechna přidělená Alloc-ID, která mají nárok na nezajištěné přidělení, jsou saturována. Dodatečná alokace je závislá na kapacitě spoje ve vzestupném směru, která zůstane k dispozici poté. Množství alokace je dáno vztahem (4.16) [60]:

$$S_{BE}(t) = C - \sum_{i \in \{\chi_{AB}^i = NA\}} R^i(t) - \sum_{i \notin \{\chi_{AB}^i = NA\}} R_G^i(t), \quad (4.16)$$

kde  $R_G^i(t)$  vyhovuje vztahu (4.14) a  $R^i(t)$  vztahu (4.17) [60]:

$$R^i(t) = \min \left\{ R_M^i; \max \left\{ R_L^i(t); R_F^i \right\} \right\}. \quad (4.17)$$

### 4.3.11 Simulace aktivačního procesu v sítích NG-PON2

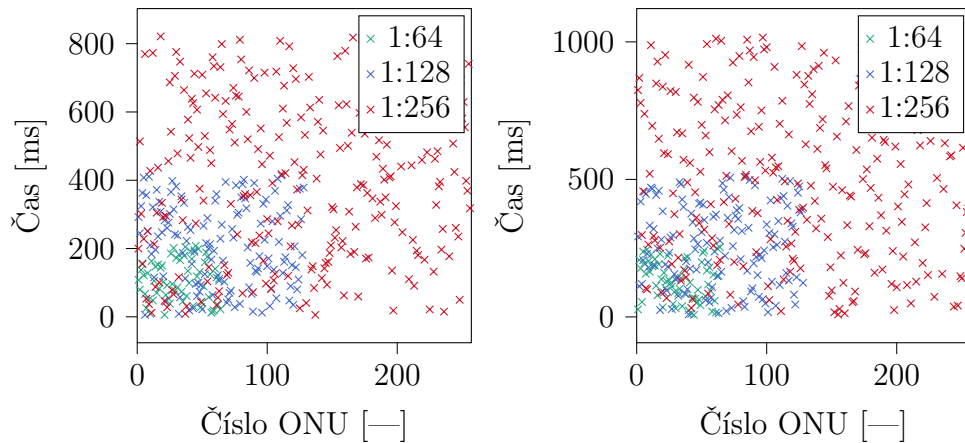
Simulace, v prostředí MATLAB, je založena na popisu aktivačního procesu uvedeného v kapitole 4.3. Aktivační proces začíná v inicializačním stavu (O1) a lze definovat parametr  $M$ , který udává množství po sobě jdoucích rámců, jenž je nezbytné přijmout a porovnat SFC, aby bylo možné přejít do stavu sériového čísla (O2–3).

Doporučení [60] udává rozdílné hodnoty tichého okna, v závislosti na maximální délce vlákna (popsáno v kapitole 4.3) Z tohoto důvodu byly vytvořeny dílčí scénáře, uvedené v tabulce 4.11. Délkou ODN se rozumí maximální vzdálenost jedné ONU od OLT. Jednotky jsou generovány do náhodných vzdáleností menších než zadaná délka ODN.

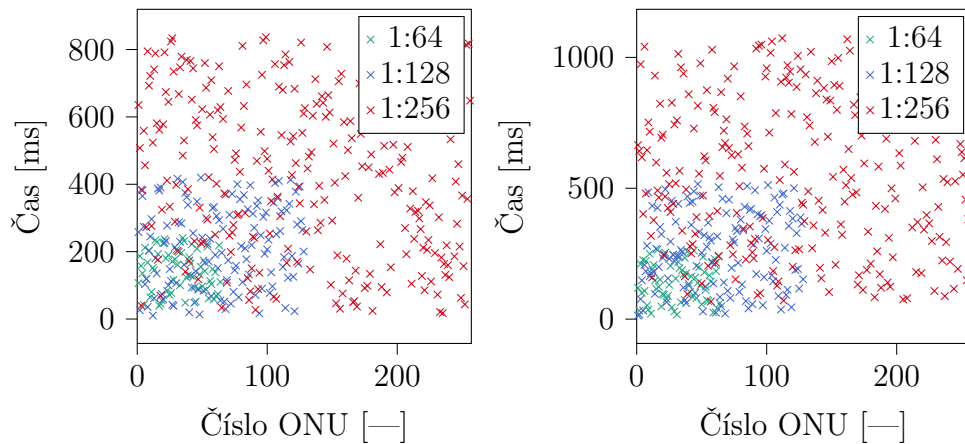
Tab. 4.11: Navržené scénáře pro simulace aktivačního procesu ONU v sítích NG-PON2.

Scénář	Hodnota $M$	Počet ONU	Délka ODN (km)
1	3, 6, 9, 12	64	20
2	3, 6, 9, 12	128	20
3	3, 6, 9, 12	256	20
4	3, 6, 9, 12	64	40
5	3, 6, 9, 12	128	40
6	3, 6, 9, 12	256	40

Dosah distribuční sítě, respektive maximální vzdálenost, mezi OLT a ONU je volen ve dvou krocích, neboť každé ze vzdáleností odpovídá jiná velikost tichého okna. Na základě výsledků (viz obrázek 4.7) je zřejmé, že prodloužení tichého okna nutně nevede k přímo úměrnému prodloužení času na aktivaci koncových jednotek. Velikost tichého okna se projevuje pouze minoritně (hodnota v  $\mu\text{s}$ ). Hodnota parametru  $M$  se rovněž projeví pouze nepatrně na celkovém výsledku, definuje pouze počet po sobě následujících rámců, které musí ONU přijmout než se přesune do dalšího stavu.



Obr. 4.7: Aktivační čas pro 64/128/256 ONU v sítích NG-PON2 ( $M=3$ ). Vlevo ODN = 20 km, vpravo ODN = 40 km.

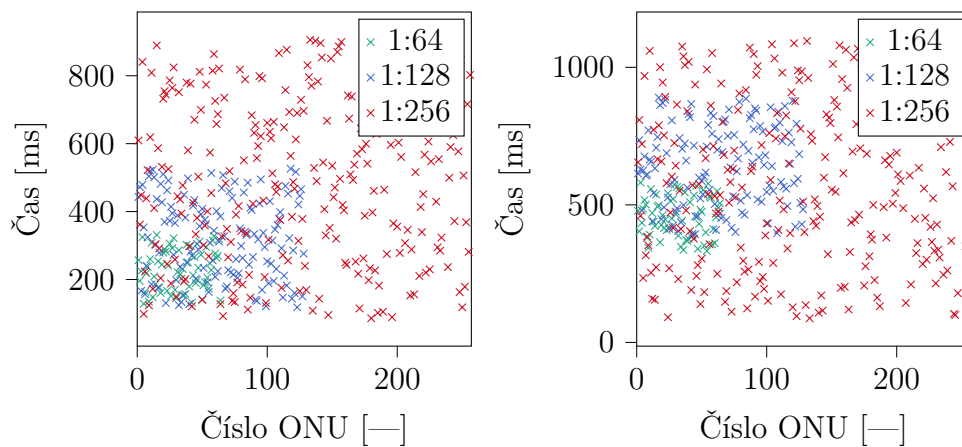


Obr. 4.8: Aktivační čas pro 64/128/256 ONU v sítích NG-PON2 ( $M=6$ ). Vlevo ODN = 20 km, vpravo ODN = 40 km.

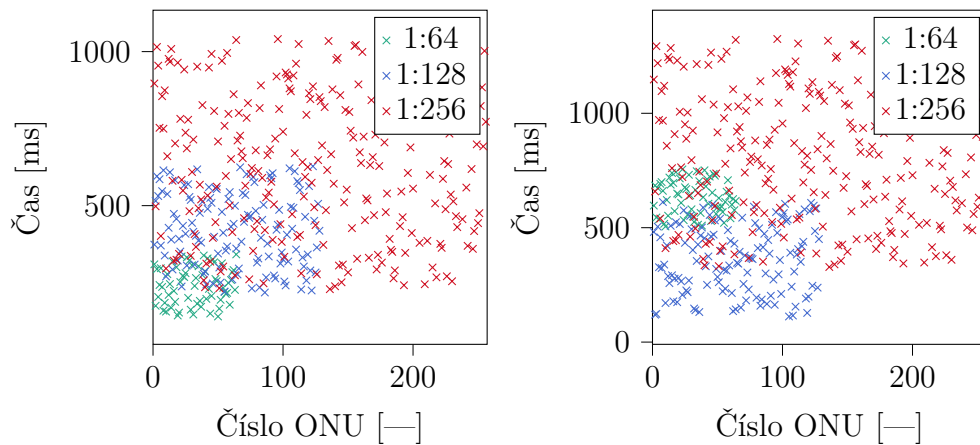
Výsledky simulací, z obrázků 4.7, 4.8, 4.9 a 4.10, lze shrnout ve formě tabulky 4.12, s porovnáním časů aktivace poslední ONU. Jelikož je celý aktivační proces ve formě „soutěže“ neplatí, že poslední aktivovaná ONU musí být nejvzdálenější od OLT.

## Závěr

Výsledky simulací aktivačního procesu (viz obrázky 4.7, 4.8, 4.9 a 4.10) potvrzují, že parametr  $M$  má nepatrný vliv na celkový čas aktivace. Jednotka ONU nebude schopna obousměrně komunikovat, dokud nedojde ke kompletní aktivaci. Jedná se o dílčí procesy k zajištění unikátních identifikátorů pro dílčí služby (přenosové kontejnery) a jejich prioritizaci podle doporučení [60], minimální množství přidělených alokačních identifikátorů Alloc-ID je 1, jenž vždy odpovídá hodnotě ONU-ID. Hod-



Obr. 4.9: Aktivační čas pro 64/128/256 ONU v sítích NG-PON2 ( $M=9$ ). Vlevo ODN = 20 km, vpravo ODN = 40 km.



Obr. 4.10: Aktivační čas pro 64/128/256 ONU v sítích NG-PON2 ( $M=12$ ). Vlevo ODN = 20 km, vpravo ODN = 40 km.

Tab. 4.12: Přehled maximálních časů pro dokončené aktivace ONU.

M	Počet ONU	Délka ODN (km)	Čas k aktivaci (ms)
3	64	20	208
3	64	40	254
6	128	20	418
6	128	40	517
9	256	20	905
9	256	40	1100
12	256	20	1044
12	256	40	1329

nota parametru  $M$  nemá přesně definovanou hodnotu a je pouze na výrobci, kolik po sobě následujících rámců bude ONU vyžadovat k přechodu do dalšího stavu. Simulační scénář s  $M = 12$  je extrémním scénářem, který se v praxi používat nebude<sup>8</sup>. Má informativní charakter s důrazem na jeho minoritní podíl v celkovém čase aktivace koncové jednotky. Operátor má mnohdy připojených  $N$  násobků maximálního dělicího poměru (pro NG-PON2 1:256) zákazníků. Nejedná se však o scénář, kde by musela proběhnout, při 8portové kartě NG-PON2, aktivace  $8 \times 256 = 2048$  ONU. Aktivace celkového počtu jednotek probíhá, avšak v 8, na sobě nezávislých, procesech, proto je celkový počet simulovaných ONU omezen na hodnotu 256.

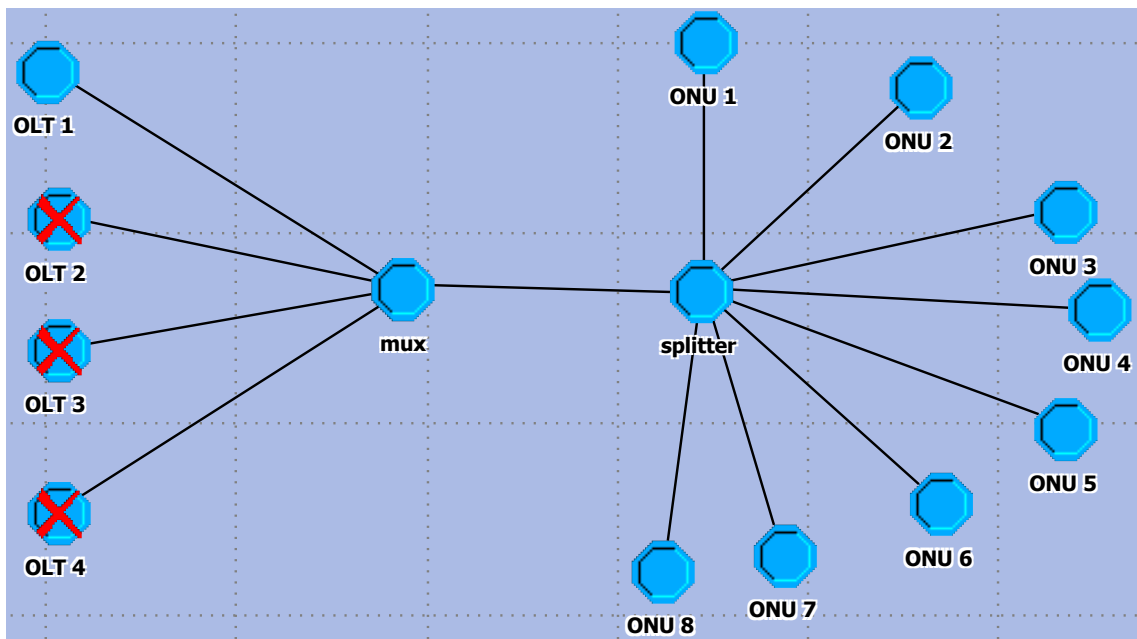
## 4.4 Simulace alokace časových slotů

Alokace časových slotů je již podmíněna kompletním projitím aktivačního procesu (do operačního stavu O5). Simulační prostředí OPNET Modeler nedisponuje vlastní implementací optických sítí – přístupových ani transportních. Povaha simulátorů je zaměřena čistě na datové přenosy s vyhodnocováním datových jednotek, vytížení spojů nebo aktivních prvků<sup>9</sup> [65, 82, 146]. Popis implementace optické sítě je nad rámec tohoto textu a detaily jsou shrnuty v publikacích [Atr16, Atr19].

Simulační model obsahuje 4 OLT jednotky, optický mux, optický spoj, splitter a 8 ONU. Navrženou topologii zobrazuje obrázek 4.11. Simulační topologie se nebude měnit, změny budou zajištěny v konfiguraci koncových jednotek, respektive jejich přiřazení k jiné OLT jednotce. Minimalistický počet ONU je dán přehledností výsledného grafu z prostředí OPNET Modeler.

<sup>8</sup>Po diskuzi s prodejcem hardwaru Huawei se využívá hodnota  $M = 3$ .

<sup>9</sup>Kompletní seznam podporovaných protokolů a technologií lze dohledat v [102].



Obr. 4.11: Navržená topologie pro statickou a dynamickou alokaci.

Řídicí jednotka OLT podporuje nastavení následujících parametrů:

- ONU-ID – atribut definující počáteční hodnotu přiřazené ONU, obsahující právě takový identifikátor ONU-ID. Pro zjednodušení implementace ONU-ID, jeho počáteční číslo, definuje i kanál WDM. ONU s ONU-ID = 101 je přiřazená OLT 1, ONU-ID = 201 je přiřazená OLT 2 apod.
- Ochranný interval – definuje ochranný interval mezi dvěma rámcí.
- Mód – přepínač mezi přístupy k řízení přenosu ve vzestupném směru (0 – statická alokace časových slotů, 1 – dynamická alokace slotů).
- Modifikace – povolením tohoto nastavení dochází ke změně přístupu v rámci DBA max-min fair algoritmu. Popis modifikace je shrnut v kapitole 4.4.2.
- ONU 1-8 – aktivace dílčích koncových ONU (0 – jednotka není aktivní, 1 – jednotka je aktivní).
- Perioda – parametr definující celkový – maximálně dostupný – časový úsek, který bude rozdělen ve statickém a dynamickém scénáři v jedné periodě.

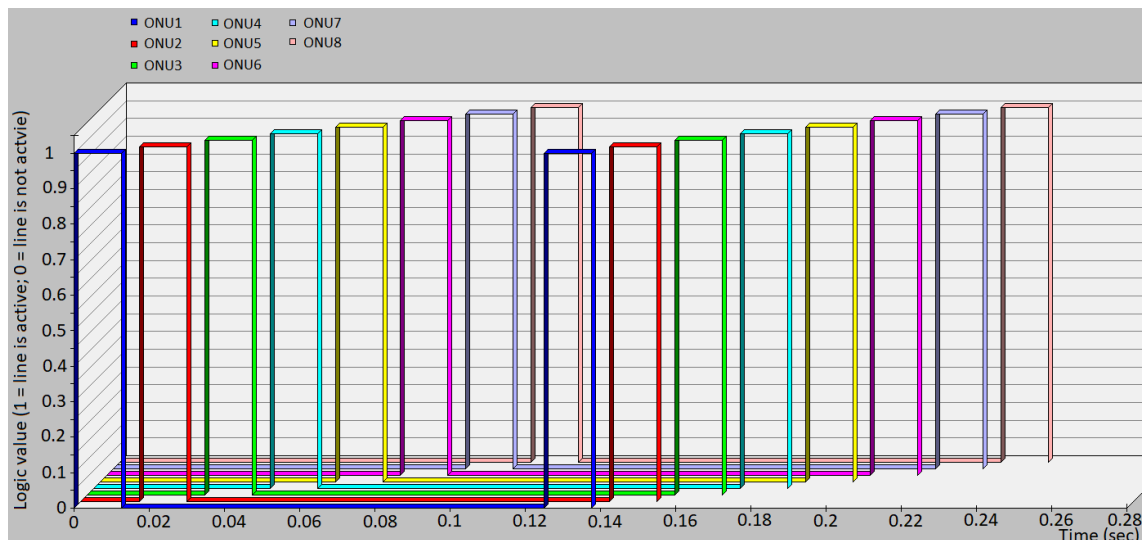
Jednotky ONU lze modifikovat následujícími parametry:

- ONU-ID – unikátní identifikátor ONU-ID daného uzlu.
- Seed – inicializační hodnota z generátoru náhodných čísel. Parametr se využívá při dynamické alokaci, kdy je parametr nastaven jednotlivým ONU.
- Velikost rámce – atribut povoluje změnu času pro fyzický rámec a každá ONU může požadovat maximálně 40% upstream burstu.

### 4.4.1 Statická alokace

Statická alokace nezohledňuje požadavky dílčích ONU jednotek. Bez ohledu, jestli jsou požadavky nižší nebo vyšší, obdrží ONU vždy stejný časový slot. Výsledky simulací statické metody zobrazuje obrázek 4.12. Čas, zobrazený na ose x, je záměrně reprezentován v sekundách, jakožto nejmenší časovou jednotkou v prostřední OPNET Modeler. V reálné síti se přenos burstů, ve vzestupném směru, udává v  $\mu$ s. Simulační model pracuje s časovým údajem v milisekundách. Hlavním důvodem je přehlednost výsledných grafů. Reálná síť se opírá o aktivační proces (popsaný v kapitole 4.3). Jak již bylo řečeno, prostředí OPNET Modeler neobsahuje žádné modely optických komponent, aktivních prvků ani přenosových médií. Primárním cílem je verifikovat statickou metodu přidělování časových grantů (slotů) ONU.

Jednotlivé ONU jsou uvažovány, že se již nacházejí v operačním stavu (O5) a jsou plně aktivní, nepředpokládá se ani rozpad synchronizace (nesoulad SFC rámců). V definici parametrů OLT je nadefinována délka periody, jenž udává celkový čas, který je možné rozdělit mezi koncové jednotky. Obrázek 4.12 potvrzuje nastavení periody na 125 ms, která je staticky rozdělena mezi 8 koncových ONU, na dílčí jednotky připadá časový slot v délce trvání 15,625 ms pro přenos dat v rámci vzestupného směru.

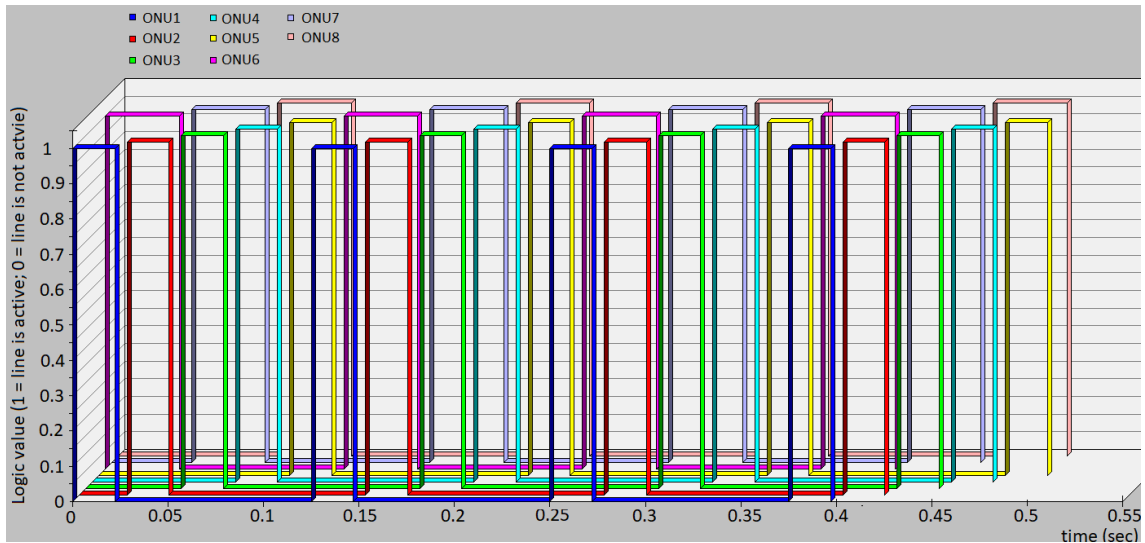


Obr. 4.12: Statické přidělování časových slotů ve vzestupném směru pro 8 ONU jednotek v sítích NG-PON2.

Navazující scénář statického přidělování časových slotů povoluje druhou OLT, ke které jsou připojeny 3 ONU. Z povahy sítě NG-PON2 je zřejmá podpora jak různých vlnových délek pro OLT, tak pro ONU. Simulace s využitím více vlnových délek je zjednodušena do podoby, kdy ONU je již přeladěna na konkrétní vlnovou délku. Obrázek 4.13 zobrazuje průběhy alokací pro vzestupné směry dílčích ONU. První čtyři



periody simulace, omezeno v rámci zobrazení časového okna, se vzájemně překrývají. Pokud by ONU komunikovaly na shodné vlnové délce docházelo by ke kolizím, avšak časové sloty by se poskládaly za sebe, neboť by ONU byly přiřazeny jedné OLT. Překryv časových slotů povoluje technologie WDM. Doba periody, definována na OLT jako 125 ms, se rozdělí pro 5 a 3 jednotky ve dvou instancích. Prvních 5 ONU je přiřazených OLT1 (lze také uvažovat odlišný PON port – nemusí se nutně jednat o další – kompletní, aktivní prvek OLT) a dochází k alokaci 25 ms pro každou ONU, v případě zbylých 3 ONU se alokace rozdělí na  $3 \times 41,6$  ms pro každou ONU.



Obr. 4.13: Statické přidělování časových slotů ve vzestupném směru pro 8 ONU jednotek, rozdělených (5 vs. 3) k dílčím OLT, v sítích NG-PON2.

#### 4.4.2 Dynamická alokace

Algoritmus max-min fair byl původně navržen pro síť GPON. Jeho modifikace umožnila nasazení v sítích XG-PON [36]. Způsob přidělování časových slotů podporuje jak SR (reportování stavu – Status Reporting), tak TM (monitorování přenosu – Traffic Monitoring):

- SR – jednotka ONU pravidelně oznamuje svou obsazenost front pro konkrétní Alloc-ID.
- TM – jednotka ONU neodesílá řídicí OLT žádné reporty, protože OLT sleduje odesílání prázdných rámců (idle frame) pro identifikátory Alloc-ID.

Přidělování šířky pásma musí splňovat definované podmínky [36]:

- Přidělená šířka pásma je menší nebo rovna velikosti vyrovnávací paměti pro konkrétní Alloc-ID, není možné přidělit větší hodnotu než je velikost vyrovnávací paměti.

- Zbylé ONU, které nemají plně obsazené vyrovnávací paměti, se rozdělí o zbývající podíl šířky pásma.

Princip fungování algoritmu, pro přidělení šířky pásma pro jednotku  $n$  v rámci  $t$  s velikostí  $GrantSize W_t^n$ , lze shrnout následovně [36]:

1. Inicializační fáze: jednotky ONU jsou seříděny dle požadované kapacity  $R_t^n$  v rostoucím pořadí v dané množině  $S$ . Parametr  $W_t^n$  pro každou ONU je nastaven na 0.
2. Výpočet dostupné šířky pásma podle rovnice (4.18) [36]:

$$B_L = \frac{BW - \sum_{k=1}^m W_t^k}{|S|}, \quad (4.18)$$

kde  $BW$  je celková šířka pásma pro vzestupný směr,  $m$  udává celkový počet ONU a  $|S|$  je počet prvků v množině  $S$ .

3. Obnovení  $GrantSize W_t^n$  pro všechny ONU podle vztahu (4.19) [36]:

$$W_t^k = \min\{R_t^k, W_t^k + B_L\}. \quad (4.19)$$

4. V tomto kroku dojde k odstranění všech ONU z množiny  $S$ , po kompletním nasycení, viz vztah (4.20) [36]:

$$W_t^k = R_t^k. \quad (4.20)$$

5. Bude-li  $|S| > 0$ , dojde k zopakování algoritmu od kroku 2, v opačném případě se algoritmus ukončí.

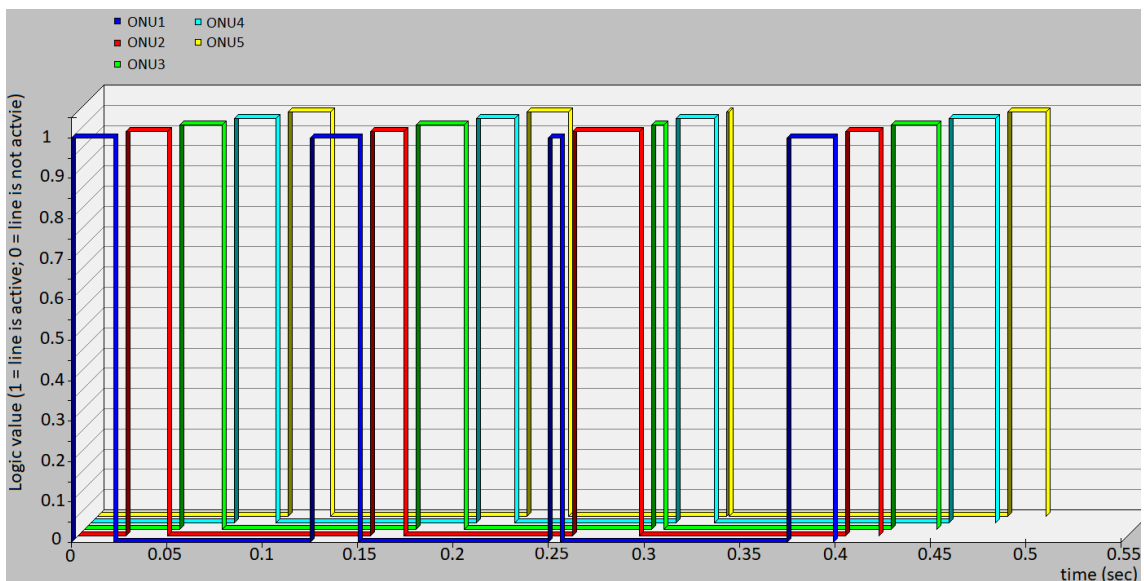
Dynamický scénář, implementovaný v prostředí OPNET Modeler, je založen na metodě SR. Každá jednotka ONU pravidelně reportuje svou obsazenost front. Obsazenost front je definována parametrem seed (nastavené hodnoty zobrazuje tabulka 4.13), jenž slouží jako vstupní hodnota generátoru pseudonáhodných čísel. V každé periodě (period = 125 ms) je vygenerováno nové číslo a podle této váhy se přiděluje časový slot konkrétní ONU.

Tab. 4.13: Nastavené hodnoty parametru seed pro simulaci dynamické alokace.

Jednotka ONU <sub>n</sub>	1	2	3	4	5
Hodnota	10	20	10	40	50

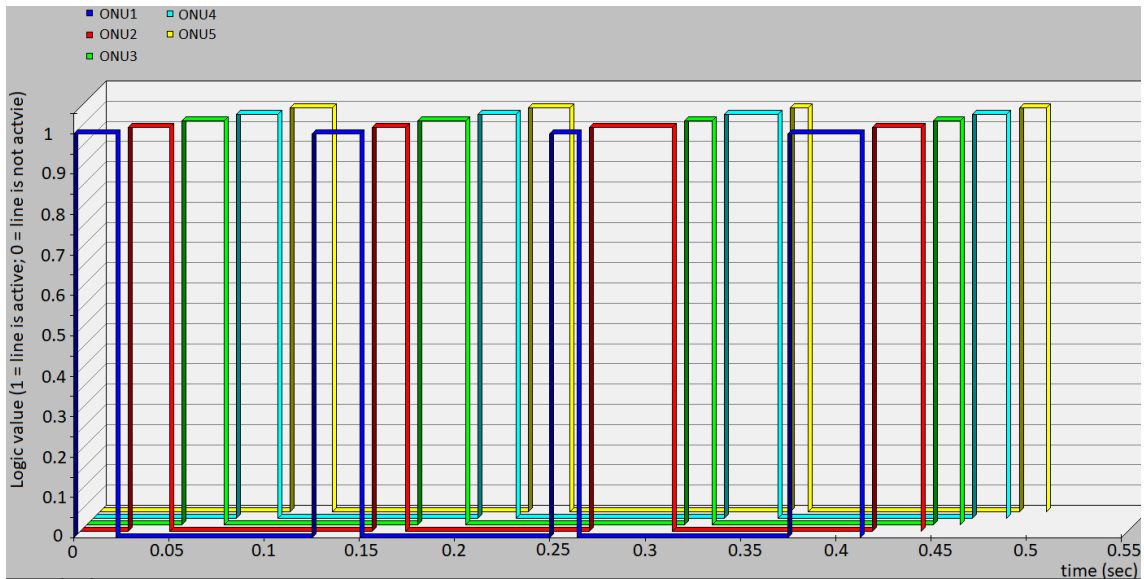
Topologie zapojení zůstala zachována podle obrázku 4.11. Pro přehlednost došlo k povolení pouze 5 ONU s definicí parametru seed podle tabulky 4.13. Výsledky simulace zobrazuje obrázek 4.14. Na základě získaných výsledků je zřejmé, že dynamická alokace neprobíhá již od první periody – statické přidělení v rámci dynamického scénáře. Algoritmus v první periodě nezná obsazenost front pro jednotlivé ONU, proto

je časový úsek rozdělen rovnoměrně. Od druhé periody je evidentní zohlednění vytíženosti dílčích ONU (v prostředí simulace parametrem seed), přiřazené časové sloty pro ONU<sub>1</sub> a ONU<sub>3</sub> si odpovídají, neboť mají – záměrně – nastavenou shodnou hodnotu parametru seed. V třetí periodě je nejvýznamnější průběh pro ONU<sub>5</sub>. Odeslání krátkého rámce (neodpovídá malému požadavku na odeslání či nízké obsazenosti fronty) je dáno tím, že ONU<sub>5</sub> ve třetí periodě nemá žádná data k odeslání. Z přenosové vrstvy NG-PON2 sítě, viz kapitola 4, nemůže ONU „mlčet“/nevysílat nic, proto dojde k odeslání výplňového rámce (tzv. idle frame) ve vzestupném směru. Tímto rámcem ONU oznamuje, že nemá data k odeslání a v přiděleném časovém slotu (definovaném v BWmap – viz kapitola 4.1) odešle rámec výplně. Po odeslání rámce výplně dochází k tomu, že zbývající část časového slotu je nevyužita.



Obr. 4.14: Dynamické přidělování časových slotů ve vzestupném směru pro 5 ONU jednotek v sítích NG-PON2.

Nevyužitý časový slot by bylo možné využít pro přetížené ONU. V praxi by se tento scénář příliš nevyužil, neboť by bylo nezbytné eliminovat „náročné“ uživatele, kteří soustavně vytěžují vzestupný směr. Z pohledu úpravy přidělování časových slotů by došlo k alokaci nepoužitého časového okamžiku pro jiné ONU. Výsledky pro modifikovaný scénář zobrazuje obrázek 4.15. Na základě pravidelného SR by řídicí OLT vždy zjistila plné využití periody alokované pro vzestupný směr (v simulacích dáno parametrem period na straně OLT). Shodně s předchozím scénářem je i modifikovaný scénář stejný pro první periodu, nelze odhadnout vytížení ONU ihned po spuštění algoritmu. Od druhé periody je patrné plné vytížení definovaného času, který má být rozdělen, mezi všemi ONU. Modifikace zajišťuje vždy plné využití časového slotu (period parametru).



Obr. 4.15: Modifikované dynamické přidělování časových slotů ve vzestupném směru pro 5 ONU jednotek v sítích NG-PON2.

## Závěr

Simulátor OPNET Modeler nenabízí (ve verzi 14.5) podporu optických sítí. Vlastní implementaci je potřeba značně zjednodušit, vynecháním aktivačního procesu ONU, definicí parametru period, jenž bude sloužit jako maximální čas přenosu ve vzestupném směru, který bude rozdělen mezi všechny ONU. Optická linka nezavádí žádné zpoždění v přenosu, zpoždění přenosu a rozdílná vzdálenost ONU, v reálné síti, je vyrovnána během aktivačního procesu ve stavu (O4). V rámci statického přidělování bylo ověřeno, že při provozu 8 ONU v distribuční síti a jediné OLT je perioda rovnoměrně rozdělena všem ONU. Statický scénář pro 2 OLT jednotky (OLT<sub>1</sub> s 5 ONU a OLT<sub>2</sub> s 3 ONU) umožňuje zohlednit implementaci WDM, čili přenosy se mohou v čase překrývat bez vzniku kolize. Dynamický scénář s algoritmem max-min fair byl simulován pro jedinou OLT s 5 připojenými ONU s různými požadavky na přenosovou kapacitu (dáno parametrem seed). Simulace pokrývá i variantu, kdy ONU nemá žádná data k odeslání a proto odesílá výplňový rámeček (idle frame). Poslední scénář obsahuje modifikovaný max-min fair algoritmus, kdy nedochází k nedočerpaní časového slotu. V praxi by tato modifikace zapříčinila, že by vždy přetížená ONU měla „garantovaný“ maximální možný čas k odeslání dat ve vzestupném směru, což nevystihuje zcela reálný scénář. Jedná se o demonstrativní účel sloužící výhradně pro účely výuky v předmětu služby komunikačních systémů.

## 5 Bezpečnostní rizika PON sítí

Bezpečnost PON sítí se opírá o povahu optického přenosu, který je mnohdy chybně, považován za bezpečný přenos. Bezpečnostní rizika PON sítí lze shrnout do několika oblastí [6]:

- odposlech komunikace – odposlech komunikace v sestupném směru představuje nejjednodušší variantu útoku na PON síť. Povaha přenosu dat v sestupném směru je dána samotnou topologií sítě – čili každá ONU obdrží všechny rámce v sestupném směru a podle ONU-ID zpracovává pouze rámce určené této jednotce. K realizaci útoku stačí mít přístup k volnému portu na splitteru nebo vydělit signál u své koncové ONU – například pomocí splitteru nebo coupleru. Zákazník bude stále zpracovávat legitimní data, patřící jeho jednotce a na druhé – modifikované – jednotce může obdržet veškerá data. V sestupném směru lze získat kompletní informace z řídicích zpráv, které mají ONU obdržet. Hlavním rizikem je přenos nového klíče ke konkrétní ONU. Odposlech vzestupného směru je náročnější na provedení a vyžaduje přímý přístup k infrastruktuře. Infrastrukturu je nutno rozpojit a připojit další pasivní prvek mezi stávající ODN. Tento úkon povede k deaktivaci všech ONU na PON portu. Opětovná aktivace všech koncových jednotek zabere čas, viz kapitola 4.3, což způsobí výpadek služeb. K účelu odposlechu obou směrů lze využít zařízení, vyvinuté ve spolupráci se společností DFC Design, v rámci bezpečnostního výzkumu pod Ministerstvem vnitra [Atr45, Atr58].
- odepření služby – nejjednoduššího provedení tohoto útoku lze docílit pomocí permanentního vysílání dat, případně CW zdrojem záření ve vzestupném směru. V případě GPON sítě, vzestupný směr využívá standardní vlnovou délku 1310 nm. Při dostatečně silném signálu lze zaručit komunikaci na daném PON portu. Obrana proti tomuto útoku neexistuje a je prakticky nemožné takový zdroj záření lokalizovat. Společnost Orange SK se s tímto útokem setkala v roce 2018 a jediným řešením bylo obvolávat všechny koncové zákazníky, aby postupně vypínali své ONU. Jedna z těchto jednotek se přepnula do režimu CW a vysílala kontinuálně. Publikované výsledky dokazují, že OLT takovou ONU může rozpoznat, nikoli lokalizovat [Atr24], [73, 78].
- spoofing útok – jakmile útočnickova jednotka ONU začne odposlouchávat provozní data, může je dešifrovat a ukrást identitu legitimní ONU. Útočník získává plný přístup do sítě a maskuje se jako poškozená jednotka ONU. V případě, že škodlivá jednotka ONU není schopna dešifrovat data, může přesto způsobit narušení sítě tím, že přešle data, která shromáždila a dojde k plýtvání přidělených slotů, případně ke kolizi mezi jinými sloty. Útok spoofing lze eliminovat za použití šifrování a generování veřejného klíče k potvrzení identity uživatele

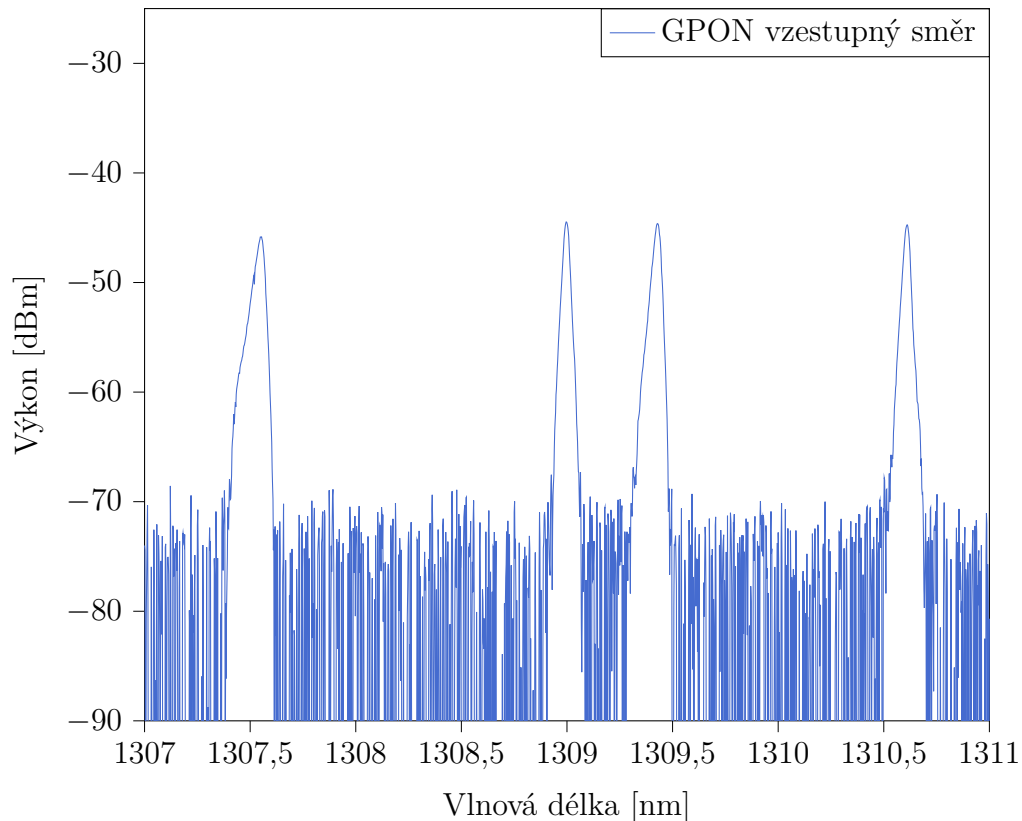
[89].

- degrační útok – při přenosu dat v PON, ve vzestupném směru, se obvykle používá TDMA, který umožňuje sdílení kanálu mezi jednotkami ONU. Každý provoz ve vzestupném směru je odeslán během příslušného časového intervalu. Každé jednotce ONU je přidělen přesný a nepřekrývající se časový úsek pro odesílání dat, a to buď staticky, nebo dynamicky prostřednictvím OLT [Atr16, Atr19]. Proto je přenos ve vzestupném směru bez kolizí, když všechny jednotky ONU dodržují časový interval. Degradační útok začíná, když útočnicková jednotka ONU odmítne dodržovat přidělený časový slot a začne vysílat zprávy mimo svůj časový slot [4, 5, 24].

Článek [24] popisuje útok v síti EPON. Obdobný útok, lze použít na libovolné PON síť, protože princip přenosu je shodný. Sestupný směr se přenáší broadcastem (data obdrží všechny ONU), zatímco vzestupný směr je nezbytné řídit časovými sloty. Neexistuje způsob, jak zaručovat kontrolu dodržování časových slotů [24]. Bude-li útočnicková jednotka ONU soustavně vysílat, dojde k poklesu FER (rámcová chybovost – Frame Error Rate) na zbývajících ONU. Autoři v [24] prezentují obranný mechanismus pro síť EPON, kdy po čase dojde k reakci na straně OLT, čímž se začne potlačovat i útočnicková jednotka ONU.

Autoři v [38] se snaží zabezpečit přenos v sestupném směru, založeném na broadcastu, pomocí využití více vlnových délek s jejich přeskokováním v daný čas. Rámce v sestupném směru se posílají pravidelně každých 125  $\mu$ s, největším omezením bude doba přepínání mezi vlnovými délkami [11]. Nevýhodou řešení bude jeho komplexnost, výhodou naopak zachování současných ONU.

Významnou bezpečnostní hrozbu představuje modifikovaná ONU jednotka, nerespektující přidělené časové sloty [44]. Jedná se o značné bezpečnostní riziko, protože celkový počet připojených ONU, k řídicí OLT na daném portu, nebude schopno komunikovat. Příjem dat v sestupném směru není omezen, využívá odlišnou vlnovou délku. OLT neobdrží odpověď jak na řídicí data, tak potvrzení ke zprávám PLOAM. V publikaci [Atr24] byl připojen zdroj CW záření – simulující jednotku, která nerespektuje časové sloty. Koncové jednotky jsou vybaveny levnými zdroji záření a je pravděpodobné, že nebudou stabilní (jak dokládá obrázek 5.1). Samotná detekce ONU není problematická, OLT zaznamenaná přítomnost jednotky, nedokáže ji však lokalizovat. V případě, že se jedná o CW záření, neexistuje prakticky žádná obrana proti takovému útoku. Naopak útok sám vyžaduje technické vybavení a přístup k pasivní infrastruktuře. Jedná-li se o modifikovanou koncovou jednotku, lze veškeré jednotky obeslat zprávou PLOAM disable serial number ONU s příznakem aktivní, čili koncová jednotka s odpovídajícím ONU-ID se neprodleně, po přijetí zprávy, přesune do stavu O7.



Obr. 5.1: Spektrum vzestupného směru v síti GPON se 4 ONU.

Navazující publikace [78], v níž autoři představili návrh nové metody analýzy optického spektra v reálném čase založenou na 1D-CNN (konvoluční neuronová síť – Convolutional Neural Network), která umožňuje identifikovat rogue ONU. Výsledky ukazují, že průměrná doba zpracování ROI (identifikace rogue ONU – Rogue ONU Identification) na Raspberry Pi je 12,6 ms na vzorek se 100% přesností identifikace [78].

Obdobný pokus, vlivu CW na PON síť, představili autoři v [85]. Autoři využili shodnou vlnovou délku s upstream signálem pro CW zdroj záření. V experimentu bylo prokázáno, že OFDM-PON je citlivější na CW než TDM-PON. Výstupem zkoumání je rovněž návrh protopatření, zachovávající pasivní ODN, avšak s využitím fotovoltaických modulů. Vrstvový model PON se opírá o povahu optického přenosu a jeho „nemožnosti“ odposlechu nebo náročnosti realizace převodu signálu a jeho zpětné rekonstrukce. Publikace [37, 145] prezentují metodu s klíčovým prostorem  $4 \times 10^{90}$  [37]. Prezentované řešení není realizováno pro konvenční síť TDM-PON.

Článek [Atr3] představuje koncept procesu aktivace jednotek ONU založený na PUF (fyzická neklonovatelná funkce – Physical Unclonable Function) pro NG-PON2. Použití PUF zvyšuje bezpečnost v NG-PON2. Kromě toho se registrační identifikátor (ID) neukládá do nevolatilní paměti, ve srovnání s řešením specifikovaným

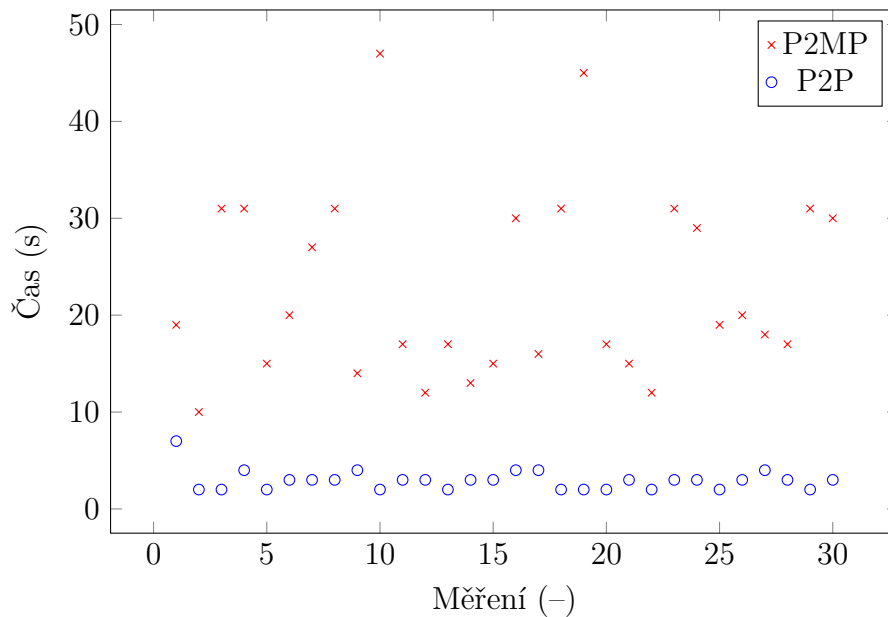
v [60]. Útočník nemůže provést útok reverzním inženýrstvím, aby získal registrační ID. Z tohoto důvodu nemůže útočník ONU naklonovat. Navržený model využívá standardní implementaci přenosové vrstvy NG-PON2 s novými zprávami PLOAM. Vlastní zprávy povoluje i doporučení [60], neboť nejsou použity veškeré identifikátory zpráv (ID).

Publikace [4] optimalizuje DBA algoritmus, aby nedocházelo k protěžování jediné ONU s TCP (spojově orientovaný protokol – Transmission Control Protocol) – zpravidla útočnickova jednotka [5], která soustavně zaplavuje vzestupný směr opětovnými pokusy o vysílání. Výsledky simulací ukázaly, že díky bezpečnostnímu prvku, který mechanismus nabízí, se propustnost zvýšila až o 63 % a došlo ke snížení zpoždění ve vzestupném směru – v závislosti na jednotlivých přenosových kontejnerech [4].

Při volném přístupu k splitteru může útočník rozpojit síť a vložit svůj splitter, aby došlo k vydělení vzestupného směru od ostatních koncových jednotek [Atr52, Atr53]. Pasivní optická síť je založena na jednoduché topologii PtMP, vložení dalšího splitteru povede k navýšení celkového útlumu v trase a dočasnému výpadku spojení na dané větvi. V rámci experimentu bylo celkově provedeno vložení splitteru do ODN 30× a celkové časy – obnovení spojení – reaktivace sledované ONU byly zaznamenány do grafu na obrázku 5.2 [Atr52, Atr53]. Obdobné měření, se shodným počtem pokusů, bylo provedeno v rámci PtP topologie. Na základě naměřených časů v obrázku 5.2 je zřejmé, že potřebný čas k opětovnému navázání spojení je podstatně delší v případě PtMP sítě. Výsledky jsou zcela dle očekávání, neboť se nejedná o přímé spojení bob-bod, ale jedno vlákno je sdíleno více koncovými ONU a „rozpadem“ spojení vyvolán aktivační proces, který byl, pro síť NG-PON2, popsán v kapitole 4.3.

V publikacích [Atr32], [43] byl popsán vývoj PON sítí spolu s detailní datovou analýzou. Uvedená analýza pocházela z laboratorního měření s omezeným počtem koncových ONU. Stěžejním faktorem celé analýzy byla forma post-processing, čili došlo k zachycení dat v reálném čase a následně extrahovaná data byla odeslána výrobcí zařízení, jenž poskytl finální report. Měření v reálném čase se omezuje na jednoduché parametry (ONU-ID, vysílací výkon a stav ONU – aktivní/v aktivaci). Jedná se pouze o informativní parametry, které mají usnadnit orientaci technikovi v terénu. Zároveň je aktivační proces limitován počátečním stavem (nevychází zcela z inicializačního stavu O1, nýbrž ze stavu sériového čísla O2–3). Hlavním důvodem je omezení lokálního úložiště – zpravila FPGA (programovatelná hradlová pole – Field Programmable Gate Array).





Obr. 5.2: Výsledky měření pro P2MP a P2P síť s vkládáním splitteru.

## 5.1 Bezpečnostní výzkum na poli pasivních optických sítí

Bezpečnost optických sítí je obecně opřena o samotnou povahu přenosu, kdy je vlákno – mylně – považováno za zcela bezpečné [20, 29, 90]. Z pohledu infrastruktury, pro přístupovou síť, je možnost útoku ještě usnadněna teoretickým přístupem k volnému portu splitteru. Na tuto skutečnost reagoval již skončený projekt [125]. Hlavní motivace podání projektu byla v bezpečnostních hrozbách na aktivních prvcích „jistých“ výrobců [96, 101, 107]. Uvedený projekt se nezabýval datovým přenosem v optické části sítě, zabýval se pouze aktivními prvky s jejich dlouhodobým monitorováním. Paralelní projekt [126], ve spolupráci se společností DFC Design, si kladl za cíl analyzovat provoz mezi OLT a ONU. Výsledkem projektu byla FPGA karta s podpůrnými software (bude popsáno dále). Poslední projekt [127], ve spolupráci se společností DFC Design, zabývající se přístupovými sítěmi, si kladl za cíl hloubkovou analýzu přenášených dat s využitím strojového učení a real-time analýzou.

Jak bylo uvedeno výše, výsledkem projektu byla vysoce výkonná FPGA karta sloužící pro verifikaci provozu, aktivačního procesu a analýzu kontrolních zpráv. Karta FPGA (pojmenovaná Cecílie) je speciálně navržena pro zpracování a přenos datových toků z rozhraní xPON a Ethernet až do rychlosti 100 Gbit/s. Karta je vybavena FPGA střední třídy Kintex UltraScale+ společnosti Xilinx – XCKU11/15P-2FFVE1517 a poskytuje 20 párů gigabitových transceiverů GTY pracujících rych-

lostí až 28,21 Gbit/s a 32 páry gigabitových transceiverů GTH s maximálně dosažitelnou přenosovou rychlostí až 16,375 Gbit/s. Obrázek 5.3 znázorňuje finální podobu FPGA karty.



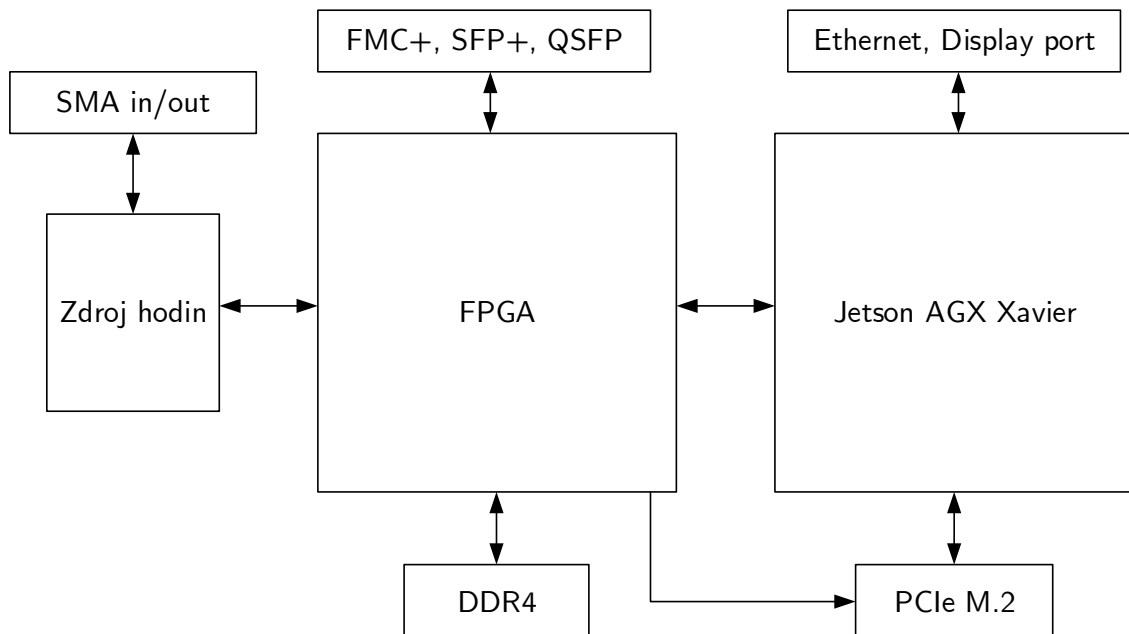
Obr. 5.3: Detailní pohled na výslednou kartu [22].

Software pro parsování dat využívá dva vysílače GTH připojené ke klecím SPF+ [Atr17, Atr33]. Jedna klec se používá pro monitorování vzestupného a druhá pro monitorování a zachycování dat v sestupném směru. Zachycená data jsou přenášena přímo do hlavní paměti hostitelského počítače pomocí rozhraní PCIe (sběrnice PCI express – Peripheral Component Interconnect Express) [Atr12]. Vzhledem k nízké rychlosti toku může být rozhraní PCIe nakonfigurováno jako rozhraní  $\times 4$ , aby se šetřily zdroje FPGA a snížila se spotřeba energie. Implementace firmwaru je rozdělena do tří bloků. První blok zachycuje data ze sestupného směru a poskytuje nezpracovaná data monitorovacímu bloku, který zpracovává mapování ONU a generování resetů pro komunikaci ve vzestupném směru. Blok zachycení sestupného směru převzorkovává vstupní tok a digitálně obnovuje příchozí data. Data s časovým razítkem jsou odesílána prostřednictvím podsystému PCIe do hlavní paměti hostitelského počítače. Obecně lze tento typ aplikací zpracovávat pomocí ASIC (zákaznický integrovaný obvod – Application Specific Integrated Circuit) nebo síťových procesorů. PCIe je flexibilnější a dává velkou volnost při vývoji nových monitorovacích technik. Klíčové vlastnosti FPGA karty lze shrnout následovně [22]:

- dva kanály ITU-T G.984/G.987 až 10 Gbit/s se zpětnou kompatibilitou po-malejších PON sítí,
- $\times 16$  PCIe 3. generace – přenosová rychlost až 128 Gbit/s,

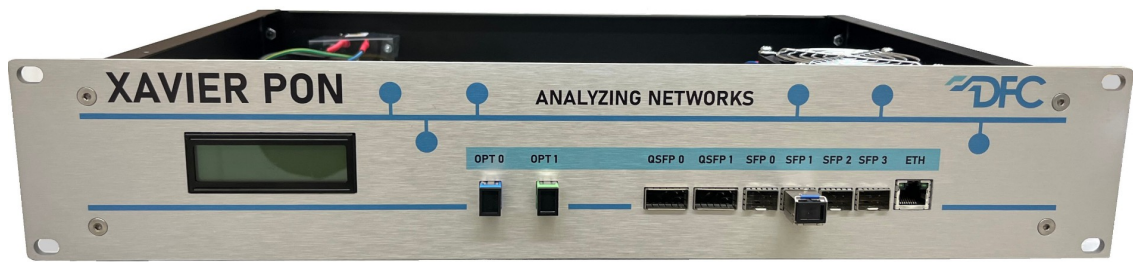
- založeno na FPGA Kintex UltraScale+ XCKU11P nebo XCKU15P-2FFVE1517,
- dvě QSFP28 rozhraní až  $4 \times 28$  Gbit/s
- správa hodin,
- dvě nezávislé paměti typu DDR4,
- konektor FMC+ s 12 transceivery GTY a 12 transceivery GHT,
- správa napájení,
- samostatný provoz (nevyžaduje hostitelský systém).

Finální výsledek – funkční vzorek – projektu byl pokročilý analyzátor (dále jen Xavier) založen na FPGA spolu s „modulem“ pro standalone řešení. Zjednodušené blokové schéma konečného výsledku zobrazuje obrázek 5.4. Blokové schéma sestává z hlavních komponent, tedy FPGA a modulu Jetson Xavier AGX (bližší informace k modulu Jetson lze nalézt v [97]), FPGA je připojeno sběrnici PCIe  $\times 8$  a Jetson pomocí PCIe  $\times 8/\times 4$  – dochází k částečnému sdílení s M.2 slotem pro připojení úložiště typu SSD (pevný disk bez mechanických částí – Solid-State Drive).



Obr. 5.4: Zjednodušené blokové schéma zapojení (s poděkováním firmě DFC Design).

Standalone řešení nabízí výhodu v porovnání s konkurencí, neboť současně nabízená řešení se mnohdy opírají o post-processing a poskytují omezenou kapacitu. Xavier je vhodným řešením pro všechny ISP, neboť poskytuje jak základní, tak pokročilou analýzu řídicích zpráv. Operátor může svou síť hlídat podle definovaných pravidel (nestandardní formát PLOAM zprávy nebo jiné incidenty) v reálném čase, neboť Xavier je vybaven podpůrnými software [Atr44, Atr33, Atr12, Atr29, Atr48, Atr57, Atr58]. Obrázek 5.5 zobrazuje přední pohled na analyzátor Xavier určený pro PON síť.



Obr. 5.5: Přední pohled na výsledný funkční vzorek (s poděkováním firmě DFC Design).

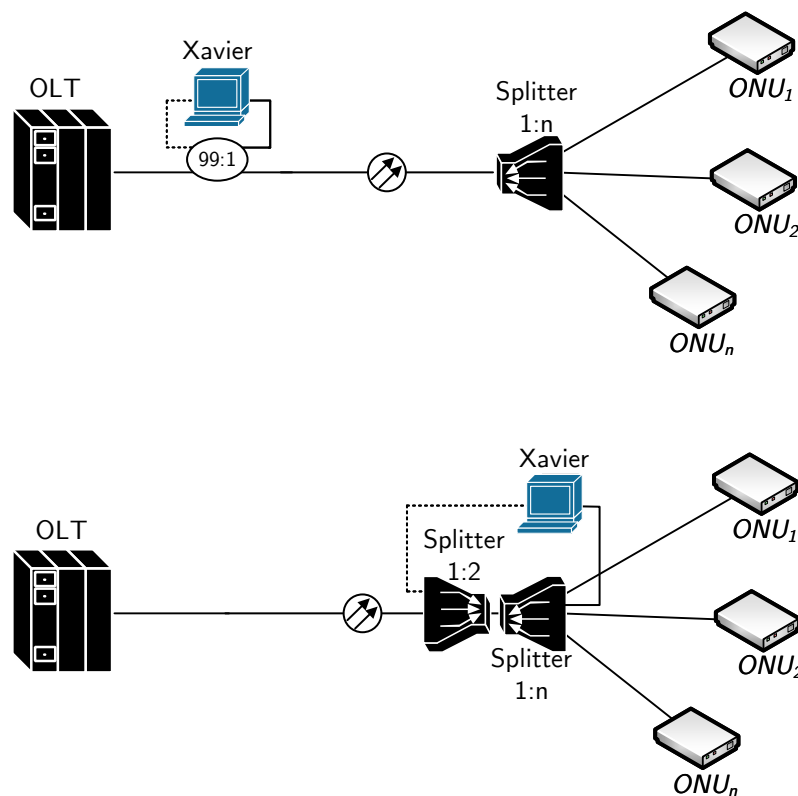
Základní parametry Xavier analyzátoru lze shrnout následovně:

- Procesorová jednotka pro analýzu a zpracování dat: NVIDIA Jetson AGX Xavier.
- FPGA pro převod a zpracování dat: Kintex Ultrascale+ XCKU11P-2FFVE1517E nebo XCKU15P-2FFVE1517E.
- 4 GB DDR4 (512M×64b) 1200 MHz alternativně možno 1333 MHz, bez ECC (kód opravující chyby – Error Correction Code) pro FPGA.
- Frekvenční syntetizér SI5348B-D-GM pro rekonstrukci a zavěšení hodin z GPON pro FPGA.
- Gigabit Ethernet (s podporou 10/100 Mbit/s) zapojený do Jetson modulu.
- 4× SFP+ 16,375 Gbit/s klece FPGA.
- 2× QSFP+ 28,21 Gbit/s klece FPGA.
- M.2 SSD PCIe×4/×2 (sdílené na Jetson modulu s PCIe ×4/×2 do FPGA) pro Jetson modul.
- DisplayPort 1.4 (až 5,4 Gbit/s) z Jetson modulu.
- 3 LED pro indikaci provozního stavu.
- Napájení platformy: ATX EPS12V 8pin 12 V/8 A.
- Maximální ztrátový výkon je 55 W bez připojených rozšiřujících periférií a Jetson modulu (max. 40 W).
- Pracovní teplota od +5 °C do 45 °C, maximální teplota FPGA 95 °C.

### 5.1.1 Zapojení analyzátoru do pasivní optické sítě

Pasivní optická síť je založena na stromové struktuře, kde je nezbytné, aby nevznikaly smyčky, zároveň je tímto ochuzena o přímou komunikaci mezi dvěma ONU, která je realizována vždy přes řídicí jednotku OLT [32, 149]. Možné způsoby zapojení do živé sítě zobrazuje obrázek 5.6. Zobrazená zapojení zohledňují zachycení kompletního vzestupného provozu – od všech koncových jednotek ONU. Předsunutím analyzátoru blíže ke koncovým ONU povede k omezenému zachytávání vzestupného

směru. Vrchní varianta z obrázku 5.6 zobrazuje zapojení analyzátoru v centrálním bodě – tedy v prostorech ISP – připojení probíhá pomocí pasivního děliče výkonu. Přístupová síť je definována útlumovou třídou, v níž bude provozována, není vhodné překračovat stanovené hodnoty útlumů, neboť nebude garantována funkčnost celé sítě. Obrázek 5.6 zobrazuje nejjednodušší variantu zapojení, neobsahuje kaskádní zapojení splitterů v rámci ODN. Kaskádní zapojení splitterů je v reálných podmínkách hojně využíváno, neboť málokdy nastane scénář, že by k jedinému PON portu byl připojen maximální počet zákazníků v jediném domě. Druhá varianta zapojení, z obrázku 5.6, by zachytávala odpovídající množství komunikací koncových ONU podle umístění analyzátoru. Poslední splitter by zachytával pouze komunikaci od jednotek, které jsou připojeny k tomuto splitteru. Analýza sestupného směru by byla vždy kompletní, protože pro jeho detekci na pozici analyzátoru nesejde. Oba způsoby zapojení analyzátoru povedou k navýšení vložného útlumu mezi aktivními prvky OLT a ONU přibližně o  $\approx 3,8$  dB. Druhá varianta zapojení je soustředěna blíže k zákazníkům a vyžaduje vložení dalšího splitteru do distribuční části sítě. Obě varianty zapojení povedou k dočasnému výpadku spojení mezi všemi aktivními prvky na dané větvi (testováno v laboratorních podmínkách v rámci kapitoly 5, obrázek 5.2).



Obr. 5.6: Možné způsoby připojení analyzátoru Xavier do sítě PON.

Při zjednodušeném pohledu na analyzovanou PON síť by měl být Xavier připojen k prvnímu splitteru, aby bylo dosaženo zachytávání veškerého provozu všech

koncových ONU. Není-li kontrola vzestupného směru žádoucí, pak stačí připojit pouze sestupný směr do jednoho z portů označeného jako SFP (technický standard optických vložných transceiverů – Small Form-factor Pluggable), podle obrázku 5.5 – tento port musí být připojen vždy. Délka vláken mezi pasivním děličem výkonu a Xavierem není rozhodující, avšak je vhodné udržovat shodnou vzdálenost mezi oběma porty. Významný rozdíl mezi vzdálenostmi by mohl vést ke snížení přesnosti výpočtu časových poměrů v síti a v krajních případech vést k chybnému přijetí kontrolních zpráv. Těmito případy se rozumí násobně větší rozestupy mezi jednotlivými vzdálenostmi, přičemž rozdíl v řádu metrů lze zanedbat. Naopak během aktivačního procesu je minimální rozdíl vzdáleností žádoucí – měření citlivá na čas – „serial number acquisition“, kdy dochází k měření RTD (obousměrné zpoždění – Round-Trip Delay) [54].

Během připojení Xaviera do analyzované sítě, obsluze displej poskytuje zjednodušené informace o stavu analyzátoru a monitorované sítě. Při prvotním připojení a zapnutí analyzátoru se může objevit červeně podsvícený displej indikující problém, přičemž zobrazený text definuje příčinu možného problému. Ukázkový výstup zobrazuje obrázek 5.7a), kde je patrné, že v SFP0 kleci není přítomný modul, nebo není dobře zasunut, (stav absent), zatímco port OPT1 je připojen. Navazující stav b), s modrým podsvícením a výpisem OK, indikuje, že oba moduly jsou detekovány. V dalším kroku je ověřeno, že ONU transceiver detekuje signál v sestupném směru, přičemž jsou možné čtyři scénáře. První je zobrazen na obrázku 5.7c) a je patrné, že ONU port nedetekuje signál. Detekce signálu je prováděna pomocí LOS (ztráta signálu – Loss of Signal) SFP modulu, jenž odpovídá výkonové úrovni menší než –39 dBm a je smazán při –30 dBm. Druhý scénář, viz obrázek 5.7d), zobrazuje, že LOS SFP modul signál detekuje, nepodařilo se však na něj „zavěsit“. Další varianta, viz obrázek 5.7e), uvádí detekci signálu i „zavěšení“ se na něj. Poslední varianta, viz obrázek 5.7f), již obsluhu informuje o výkonové úrovni signálu, která je vyčtena ze SFP modulu, přičemž výkonová úroveň pro vzestupný směr je reprezentována nejslabší výkonovou úrovní. Analyzátor následně přijímá signál v sestupném směru a provádí nezbytné kroky k ukládání vzestupného směru. Dochází ke střídavému zobrazení stavů z obrázku 5.7g) a h), neboť ve stavu g) se čeká na zachycení PLOAMd zpráv s profily pro příjem vzestupného směru. Stav h) informuje o probíhajícím měření vztahu začátku rámců v sestupném a vzestupném směru. Teprve po úspěšné detekci potřebných parametrů se podsvícení displeje změní na zelenou barvu a dojde k výpisu zobrazeném na obrázku 5.7i). Není-li dosaženo stavu sync, není možné zobrazit data o vzestupném směru (viz obrázek 5.7j)). Další možnost udává stav k), kdy dojde k synchronizaci, avšak nejsou dostupná data o vzestupném směru. Nemusí se nutně jednat o chybu – příčinou může být i nepřítomnost aktivní ONU jednotky. Finální stav po synchronizaci a vyčítání výkonové úrovně ve vzestupném směru dokládá

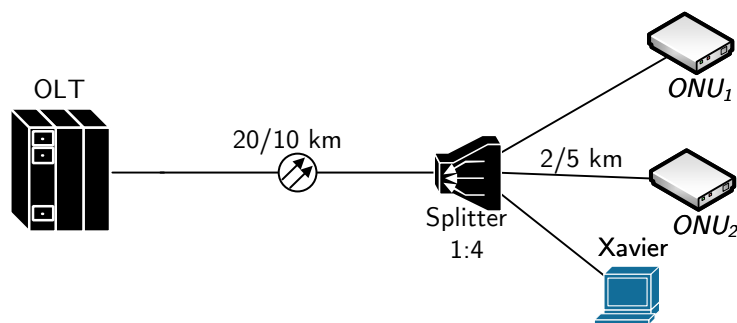
obrázek 5.7i) – jedná se o ideální a provozní stav na živé síti.

a)	OLTport: SFP0 Abs ONUport: OPT1 OK	g)	Status: Learning
b)	OLTport: SFP0 OK ONUport: OPT1 OK	h)	Status: US Not Sync
c)	OLTport: NA ONUport: No sig.	i)	Status: Synced
d)	OLTport: NA ONUport: No Lock	j)	Sig. US: NA Sig. DS: -15,6 dBm
e)	OLTport: NA ONUport: Locked	k)	Sig. US: NA Sig. DS: -15,6 dBm
f)	Sig. US: NA Sig. DS: -15,6 dBm	i)	Sig. US: -22,3 dBm Sig. DS: -15,6 dBm

Obr. 5.7: Varianty výpisů na displeji analyzátoru Xavier.

### Evaluace analyzátoru PON sítě

Prvotní verifikace analyzátoru proběhla v rámci GPON sítě, kde se podle hodnot ekvalizačního zpoždění dopočítávala vzdálenost mezi OLT a ONU jednotkami. Jelikož je hodnota ekvalizačního zpoždění přidělována v sestupném směru, nebylo zapotřebí, dané ONU, zachytávat vzestupný směr. Analyzátor byl zapojen k volnému portu – v rámci laboratorní sítě – obsahující 2 ONU jednotky. Došlo tím k eliminaci překryvných přidělování ekvalizačního zpoždění a pro prvotní verifikaci 2 ONU dostačují. Topologii testovací sítě v laboratoři zobrazuje obrázek 5.8. Na obrázku 5.8 lze spatřit konfiguraci pro měření. V prvním scénáři byla délka ODN 20 km a jedna ONU byla připojena optickým patch-cordem do splitteru a ONU<sub>2</sub> byla ve vzdálenosti od splitteru 2 km. Délka ODN byla 20 km pro ONU<sub>1</sub> a 22 km pro ONU<sub>2</sub>. Druhý scénář vedl ke zkrácení délky ODN z 20 na 10 km a prodloužení vzdálenosti mezi splitterem a ONU<sub>2</sub> z 2 na 5 km. Délka ODN v posledním scénáři tvořila 0 km a pro zajištění bezpečného provozu mezi OLT a ONU byl připojen útlumový člen, aby nedošlo k poškození ONU jednotek a respektování útlumových tříd pro provoz GPON sítě.



Obr. 5.8: Zapojení laboratorní sítě s analyzátořem.

Extrahované hodnoty v rámci aktivačního procesu dílčích ONU jednotek zobrazuje tabulka 5.1. Z výsledků je patrné, že vzdálenější ONU získává kratší hodnotu ekvalizačního zpoždění, neboť dojde k připočtení propagačního zpoždění. Na základě známé přenosové rychlosti v sestupném směru pro GPON sítě 2,488 Gbit/s, rychlosti šíření světla 299792458 m/s a indexu lomu pro jednovidové vlákno 1,4682, došlo k výpočtu vzdálenosti jednotky ONU<sub>2</sub>. Pro první scénář vypočtená vzdálenost, ze zachycených dat v rámci ranging procesu, odpovídá 2018 metrům. Druhému scénáři, se zkrácením ODN na 10 km ke splitteru a 5 km od splitteru k ONU<sub>2</sub>, vychází vzdálenost 5217 m. Poslední scénář, kdy jsou jednotky připojeny „na přímo“, je rozdíl vzdáleností 7 m. V rámci posledního scénáře byly ONU připojeny se vzdáleností 2m patch-cord od OLT ke splitteru a 2m patch-cordem ze splitteru k dílčím ONU jednotkám. Celková délka ODN tvořila minimálně 4 m.

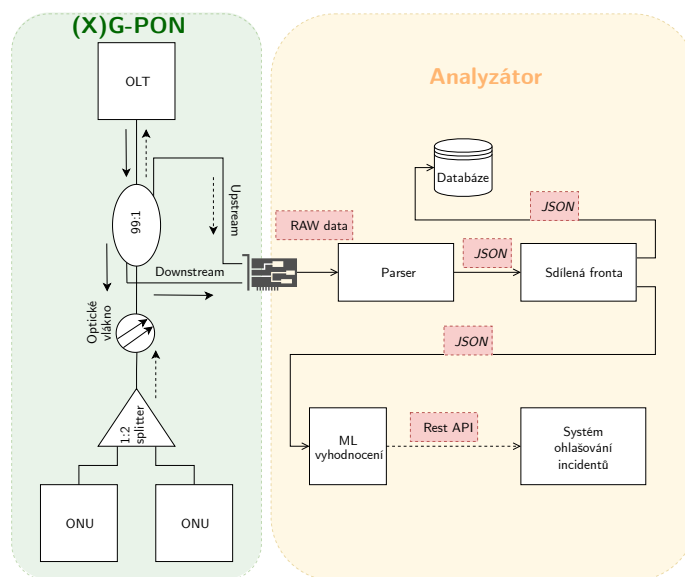
Tab. 5.1: Naměřené hodnoty ekvalizačního zpoždění pro jednotlivé ONU v síti GPON.

Délka ODN (km)	Splitter <—> ONU	EqD (ONU <sub>x</sub> ) (-)	EqD (ONU <sub>y</sub> ) (-)	Bitová vzdálenost (-)	Obousměrné zpoždění (ns)	Vzdálenost ONU (km)
20	2	65090	40490	24600	9,8861	2,01866
10	5	186889	123302	63587	25,5541	5,21792
0	0	309493	309407	86	0,0345	0,00705

### Zachycení a analýza kontrolních zpráv v síti XG-PON

K verifikaci funkčnosti analyzátořu Xavier sloužilo zapojení zobrazené na obrázku 5.9. Zapojení sestává ze dvou částí – XG-PON sítě a analyzátořu [Atr25]. Pasivní síť





Obr. 5.9: Zjednodušené schéma XG-PON sítě s připojeným analyzátořem Xavier.

XG-PON byla pouze doplněna o kapler  $2 \times 2$ , aby došlo k vydělení signálů v obou směrech. Analyzátoř – zvýrazněný žlutou barvou – obsahuje celkem 5 dílčích bloků:

1. Parser – slouží ke zpracování dat z FPGA karty pro sestupný a vzestupný směr a převedení na bitovou sekvenci [Atr17, Atr33].
2. Sdílená fronta – blok pro předávání dílčích dat bloku strojovému učení a předání kompletního rámce do databáze.
3. Blok strojového učení pro vyhodnocení anomálií na síti [Atr29, Atr57].
4. Databáze – ukládání kompletní podoby a daného rámce [Atr12, Atr13].
5. Systém ohlašování incidentů do bezpečnostních aplikací (např. The Hive) [Atr44].

Výsledky zpracování dat jsou zobrazeny v tabulce 5.2. Alokační identifikátor (Alloc-ID) reprezentuje jedinečný identifikátor koncové ONU (ONU-ID). První hodnota Alloc-ID odpovídá ONU-ID. Unikátní identifikátor ONU-ID je získáváno od OLT během procesu aktivace (viz kapitola 4.3). První sloupec obsahuje přidělené identifikátory Alloc-ID (14336, 10, 2570, 3082, 14337, 9, 2569 a 3081). Na základě těchto hodnot je možné určit počet unikátních ONU-ID (9 a 10). Na základě této znalosti je patrné, že přístupová síť je tvořena dvěma koncovými jednotkami. Hodnoty Alloc-ID vyšší než 1024 jsou rezervovány, pokud ONU potřebuje více než jednu alokační strukturu Alloc-ID, například, když ONU zpracovává více přenosových kontejnerů (T-CONT) – reprezentující jednotlivé služby (viz kapitola 4.1). Jednotka ONU může hlásit obsazenost vyrovnávací paměti, pokud je přítomen bit „flag“ (flag bit = 1), v opačném případě dynamická hlášení šířky pásma vzhůru (DBRu) nejsou přenášena. Další sloupec identifikuje StartTime pro bitové vyjádření počátku komunikace ve vzestupném směru. Pole GrantSize obsahuje 16bitové číslo pro celkovou

délku přenosu užitečných dat (payload) XGTC s polem DBRu. Sloupec GrantSize odpovídá 0 během aktivačního procesu ONU s řídicími zprávami (PLOAM). Pole FWI ukazuje na nucené probuzení ONU, pokud je bit nastaven na 1. Pro zachycenou sekvenci dat je FWI rovno 0, což znamená, že ONU nejsou v režimu nízké spotřeby. Burst Profile označuje index burst profilu na straně OLT. Poslední sloupec reprezentuje pole HEC daného rámce.

Tab. 5.2: BWmap alokace pro separátní Alloc-ID.

Alloc-ID	Flags	StartTime	GrantSize	FWI	Burst Profile	HEC
0x3800	0x00	0x0000	0x0001	0x00	0x00	0x1D9F
0x000A	0x00	0x002F	0x0005	0x00	0x01	0x0D10
0x0A0A	0x00	0xFFFF	0x03D1	0x00	0x01	0x0E72
0x0C0A	0x02	0xFFFF	0x0002	0x00	0x01	0x1D9E
0x3801	0x00	0x04AB	0x0004	0x00	0x00	0x009D
0x0009	0x00	0x04C1	0x0014	0x00	0x01	0x1500
0x0A09	0x00	0xFFFF	0x0F42	0x00	0x01	0x0187
0x0C09	0x02	0xFFFF	0x0005	0x00	0x01	0x123A

### Kontrola aktivačního procesu v laboratorní síti

V rámci kapitoly 5.1 byl představen funkční vzorek – výsledek projektu zabývající se bezpečností v přístupových sítích. Evaluace výsledku proběhla v laboratorní síti, s nízkým dělicím poměrem, zobrazené na obrázku 5.9. Zpočátku byla připojena jediná koncová ONU a zachycen aktivační proces této jednotky. Tabulka 5.3 obsahuje soupis po sobě jdoucích řídicích zpráv v testované síti. Pro zachování přehlednosti je každá zpráva zapsána pouze jednou, i když se vyskytovala několikrát. Na prvním řádku došlo k zachycení PLOAM zprávy s ID = 1, reprezentující zprávu s profilem. Tato zpráva je periodicky odesílána s všesměrovou nebo unikátní hodnotou ONU-ID, v případě aktivace koncové ONU se jedná o zprávu s ONU-ID = 1023, jak dokládá tabulka 5.3. Doposud neaktivovaná ONU je „rozpoznatelná“ pouze svou všesměrovou hodnotou ONU-ID 1023. Navazující PLOAM zpráva s ID = 3 již obsahuje unikátní hodnotu ONU-ID. Odeslání přidělené ONU-ID, která se nachází ve fázi aktivace, probíhá pomocí odeslání zprávy s PLOAM ID = 3 – přidělení ONU-ID. Zpráva obsahuje všesměrovou ONU-ID (1023), ID zprávy (3), sekvenční číslo uvedené PLOAM zprávy – lze řetězit, nově přidělenou hodnotu ONU-ID pro konkrétní „směrování“, ID výrobce, unikátní část sériového čísla a blok kontroly integrity přenášené zprávy. Délku a význam jednotlivých oktetů zobrazuje tabulka 5.4.

V tomto konkrétním případě je přidělená hodnota ONU-ID rovna 9. Další přenos řídicích zpráv probíhá již na unikátní hodnotě ONU-ID (9). Navazující PLOAM

Tab. 5.3: Zachycené PLOAMd zprávy pro jedinou ONU jednotku.

ONU-ID	PLOAMd ID
1023	1
1023	3
9	4
9	9
9	10

Tab. 5.4: Formát zprávy přidělení ONU-ID specifikované v [54].

Oktet	Obsah	Popis
1–2	0x03FF	Všesměrová ONU-ID (1023).
3	0x03	ID zprávy (3) – „Přidělení ONU-ID“.
4	Sekvence	Sekvenční číslo PLOAM zprávy.
5–6	ONU-ID	10bitová hodnota přiřazeného ONU-ID (0–1022) s 6bitovou výplní.
7–10	ID výrobce	Prefix výrobce ONU jednotky.
11–14	VSSN	Unikátní část sériového čísla.
15–40	Výplň	Vyplň (nulami).
41–48	MIC	Kontrola integrity zprávy.

zpráva s ID = 4 odpovídá přenosu zprávy typu Ranging Time. Detailní popis dílčích oktetů ve zprávě je obsažen v tabulce 4.6. Kritickou část nesou oktety 6–9 s hodnotou ekvalizačního zpoždění. Díky znalosti zpoždění, lze určit i konkrétní vzdálenost dílčích ONU nacházejících se v síti. Doposud přenesené zprávy byly mandatorní, tedy povinné. PLOAM zpráva s ID = 9 je volitelná a její implementace a přístup k odvození MSK (hlavní klíč relace – Master Session Key) je závislá na výrobci [54]. Obsah oktetů této zprávy zobrazuje tabulka 5.5. Řídicí jednotka OLT může zprávu „registrační požadavek“ vyžádat:

- v průběhu aktivace,
- jako závěrečný handshake po dokončení bezpečného postupu vzájemného ověření odesláním zprávy Request Registration ke konkrétní ONU.

Poslední zpráva z aktivačního procesu 1 ONU, v tabulce 5.3, s PLOAM ID = 10, reflektuje zprávu přidělení Alloc-ID. Popis jednotlivých oktetů je obsažen v tabulce 5.6, kde v rámci oktetu 7 lze definovat konkrétní typ. Nejčastěji – během aktivace – bude nastavena hodnota na 1, protože se bude jednat o přenos dat XGEM (zapouzdřovací metoda XG-PON sítí – XG-PON Encapsulation Method). Během deaktivace ONU – například přijetím zprávy „Disable serial number ONU“ může dojít k následnému přijetí zprávy přidělení Alloc-ID s hodnotou 255 v sedmém oktetu.

Tab. 5.5: Formát zprávy registračního požadavku specifikované v [54].

Oktet	Obsah	Popis
1–2	ONU-ID	Unikátní hodnota ONU-ID.
3	0x09	ID zprávy (9) – „Přidělení Alloc-ID“
4	Sekvence	Sekvenční číslo PLOAM zprávy
5–40	Výplň	Výplň (nulami)
41–48	MIC	Kontrola integrity zprávy.

Ostatní hodnoty jsou rezervovány a nemají specifickou vlastnost [54].

Tab. 5.6: Formát zprávy přidělení Alloc-ID specifikované v [54].

Oktet	Obsah	Popis
1–2	ONU-ID	Unikátní hodnota ONU-ID.
3	0x0A	ID zprávy (10) – „Přidělení Alloc-ID.“
4	Sekvence	Sekvenční číslo PLOAM zprávy
5–6	Alloc-ID hodnota	14bitová hodnota přiděleného Alloc-ID s 2bitovou výplní nulami.
7	Alloc-ID typ	1 = XGEM zapouzdření, 255 = dealokace tohoto Alloc-ID.
8–40	Výplň	Výplň (nulami).
41–48	MIC	Kontrola integrity zprávy.

Při opakovaném měření byly k síti XG-PON připojeny 2 ONU. Z níže uvedené tabulky 5.7 je patrné, že se dílčí zprávy přenášejí pouze více koncovým jednotkám, a to odděleně. Nebyly detekovány žádné odlišnosti a aktivace dílčích ONU probíhaly zcela v souladu s doporučením. V rámci aktivního testování aktivačního procesu došlo k detekci nespecifikované PLOAM zprávy v síti GPON s ID (27). I když zpráva není přímo doporučením G.984.3 specifikována, nemusí se nutně jednat o bezpečnostní hrozbu. Informace k zachycené zprávě byly předány výrobcí, který nijak nereagoval. Samotná sada doporučení volně připouští, že si výrobci aktivních prvků mohou sami implementovat vlastní řídicí zprávy, musí však zachovat zprávy definované, aby bylo možné zajistit zpětnou kompatibilitu dílčích zařízení. Praxe a reálné zkušenosti však dokládají, že změna výrobce/dodavatele s sebou nese kompletní výměnu jak koncových, tak řídicích jednotek a začistění homogenity sítě.

Tab. 5.7: Zachycené PLOAMd zprávy pro dvě připojené ONU jednotky.

ONU-ID	PLOAMd ID
1023	1
1023	3
11	4
9	4
11	9
11	10
9	9
9	10

### 5.1.2 Závěr

V rámci kapitoly byla představena bezpečnostní rizika pasivních optických sítí. Povaha sítě – stromová struktura – umožňuje relativně snadný odposlech sestupného směru – z pohledu přístupu k médiu. Dekódování provozu – řídicích zpráv – není zcela triviální a vyžaduje znalosti a odpovídající technické vybavení. Z pohledu přístupu k volnému portu na splitteru lze dostatečně výkonným laserem, na vlnové délce  $\approx 1310$  nm, zajistit výpadek celé větve z daného xPON portu (zpravidla GPON portu). Obrana proti tomuto útoku je prakticky nemožná, neboť koncové ONU vysílají na této vlnové délce a nelze ji tedy filtrovat (došlo by ke kompletnímu odflitrování vzestupného směru).

Představený analyzátor, pojmenovaný Xavier, je výsledkem projektové činnosti ve spolupráci se společností DFC Design a Vysokým učením technickým v Brně. Jedná se o zcela unikátní výsledek, jenž lze nazvat jako nadčasový, protože svým hardware vybavením bude dostačovat i v sítích NG-PON2. Tyto sítě však stále nejsou hojně nasazovány a větší preferenci po GPON mají sítě XG(S)-PON, tedy symetrické sítě s rychlostí 10 Gbit/s v obou směrech. V České republice, pro běžnou domácnost ve vybraných lokalitách, dokáže společnost CETIN nabídnout optické připojení s přenosovými rychlostmi 2 Gbit/s pro sestupný a 1 Gbit/s pro vzestupný směr. Stále se jedná o nasazení na GPON sítích. Analyzátor dokáže zachytávat a vyhodnocovat data v reálném čase. Jedná se zejména o kontrolu aktivačního procesu jednotlivých ONU, monitorování obsahu vybraných polí a hlášení bezpečnostních incidentů (neznámá PLOAM zpráva, neznámý formát rámce apod.). Další výhodou je ukládání kompletních rámců, je-li žádoucí, do připravené databáze pro pozdější analýzu. Operátor může mít přehled o vybraných polích v reálném čase a následně lze zpracovat kompletní obsah rámce formou post-processing s využitím strojového učení nebo jiných metod.

## 6 Směr vývoje PON sítí

Současné vědecké výzvy na poli PON sítí lze shrnout v několika bodech. První z nich by byla virtualizace. Autoři [86] se zaměřili na demonstraci řešení, které dosahuje nízké latence na disagregovaných PON pomocí programovatelnosti v datové rovině a na virtualizované softwarové platformy. Řešení podporuje virtualizované PON a aplikace vyžadující nízkou latenci a jitter. K tomuto řešení využívá kombinaci programovatelných síťových zařízení s podporou jazyka P4 a Intel DPDK. Většina plánovacích výpočtů DBA algoritmu je prováděna jako virtualizovaná síťová funkce pomocí Intel DPDK. Hlavní výpočty k DBA algoritmu jsou realizovány na programovatelném síťovém zařízení s podporou jazyka P4 pro snížení latence. Publikace [114] popisuje výhody NFV/SDN a zaměřuje se na rozšíření softwarově definované oblasti OLT se zaměřením na funkce fyzické vrstvy pro architekturu flexibilního přístupového systému. Navržená architektura využívá dvě grafické karty, každá pro jeden směr komunikace pro zpracování dat v reálném čase [115]. Jedná se o implementaci přípravy a zpracování rámce pro sestupný a vzestupný směr. Z dosažené hodnoty zpoždění 10  $\mu$ s se nemusí jednat o optimální řešení pro současné aplikace [80]. Abstrakce PON sítí podle definic ITU má dominantní zastoupení. Článek [116] popisuje implementaci sítí podle organizace IEEE. Navržený adaptér a technologický profil úspěšně spravují komerčně dostupné aktivní prvky OLT/ONU prostřednictvím API.

Habilitační práce se zabývá cenově dostupnými řešeními pro PON sítě. Značnou výzvu na poli vědy a výzkumu představují také koherentní systémy PON [28]. Autoři [66] demonstrují přenos 200 Gbit/s/ $\lambda$  pro sestupný směr s optimalizovaným koherentním přijímačem v jednotce ONU. Nenáročný přijímač v ONU využívá heterodynní detekci a vyžaduje jedinou fotodiodu, optickou spojku 3 dB a lokální oscilátor. Experimentálně byl prokázán přenos s vložitelným útlumem na trase ODN 29 dB. Publikace [12] porovnává PON sítě 25G EPON a CPON (koherentní pasivní optická síť – Coherent Passive Optical Network), z hlediska nákladů na pořízení je favoritem 25G EPON. Dlouhodobé hledisko, vyšší přenosová rychlost a prodloužení dosahu dominují pro systémy CPON [12]. Autoři [144] popisují nedávné pokroky v oblasti CPON sítích s ohledem k rychlosti přístupu, architektuře a scénářům nasazení. Dále se zmiňují o výzvách, které brání širšímu nasazení koherentní optiky v přístupových sítích, jako jsou vysoké náklady a složitost koherentních transceiverů, vysoká spotřeba energie a problematický burst-mode v koherentní detekci. Další vědeckou výzvou je ochrana infrastruktury a minimalizace doby výpadku. Článek [39] se zabývá záložním spojením pro PON síť. Dojde-li k výpadku v PON, má být použit bezdrátový spoj k obnovení komunikace. Navazující publikace [68] zavádí kruhový spoj od OLT k ONU, aby byla zajištěna plná dostupnost konektivity pro výpadek

spojení. Omezujícím faktorem je maximální počet 50 obslužených zákazníků po výpadku hlavní trasy (optického vlákna) [68]. V neposlední řadě nelze ani opomenout využití strojového učení k různým účelům v PON sítích [140, 48, 99].

K přerušení služby v systému PON obvykle dochází zejména v důsledku přerušení optických vláken a/nebo poruch vysílačů/přijímačů jednotek ONU. Pokud jsou jednotky ONU umístěny v různých vzdálenostech od OLT, lze chybnou jednotku ONU nebo větev identifikovat analýzou zaznamenaných náměrů OTDR (optický reflektometr – Optical Time-Domain Reflectometer) [141]. Využití reflektometru v přístupových sítích se splitterem má svá omezení. Společnost EXFO představila reflektometr, který vyžaduje  $\approx 2\text{m}$  rozdílnost na dílčích větvích, aby došlo ke správnému vyhodnocení. Vyhodnocování náměrů lze využít strojové učení. Článek [1] navrhuje využití strojové učení k monitorování sítě. Základem je přetrénování sítě při jakékoli změně topologie. Stejnou problematikou, s jiným přístupem, se zabývá publikace [121]. Další přístup monitorování PON sítě využívá senzor s Braggovou mřížkou pro získávání monitorovacích dat používaných k trénování strojového učení pro efektivní charakterizaci topologie [122]. Navržené řešení má výhodu v tom, že má samostatný monitorovací zdroj, který je nezávislý na přenosovém signálu dat a zaručuje transparentní přenos informací. Navržená technika založená na strojovém učení vykazuje až 99% přesnost při identifikaci poškození vlákna v ODN [122]. Přehledový článek popisuje možné nasazení strojového učení pro přístupové sítě s řízením DBA a minimalizaci latence během jednotlivých úkonů řízení [138]. Aktivační proces koncových ONU bude nadále nedílnou součástí všech typů PON od standardních (popsaných v této práci) po koherentní CPON [100].

S rozvojem průmyslu 4.0 se mění i požadavky jak na konektivitu pro průmysl, tak požadavky na vnitřní sítě a jejich kvalitativní parametry [92, 120, 139]. Publikace [16] představuje klasickou TDM-PON síť pracující podle standardů průmyslové třídy. Pomocí vhodně nakonfigurované PON a kompenzace kolísání zpoždění autoři dosáhli konstantního přenosu s nízkou RTT latencí ( $< 1\ \mu\text{s}$ ) ve vzestupném směru a úspěšného propojení se sítí náročnou na časové prodlevy (průmyslová síť). Tradiční průmyslové sítě se zaměřují především na provoz zařízení na místě a bezpečnost pracovníků. Nezapojují se do probíhající digitální transformace s dálkovým ovládáním strojů a zpracováním velkých objemů dat. Očekává se, že nová generace průmyslových sítí nabídne vysokorychlostní připojení, inteligentní správu a flexibilní architekturu, která se přizpůsobí technologickému pokroku a obchodní konkurenci. V publikaci [62] je navržena síťová architektura založená na technologii PON – průmyslová PON. Tato síť spravuje síťové prostředky prostřednictvím třívrstvé struktury. V rámci využití PON pro průmyslové sítě vyvstává otázka ohledně řízení časových slotů s ohledem na vysokou citlivost pro kolísání zpoždění. Autoři [113, 112] navrhli vylepšený DBA algoritmus, který porovnali s konvenčním algoritmem a do-

sáhli zvýšení efektivity využití časových slotů, o 20,6 % vyšší než u tradičního přístupu s menším zpožděním.



## 7 Závěr

V habilitační práci byly podrobně analyzovány vysokorychlostní PON sítě z pohledu fyzické a přenosové vrstvy. Byly nalezeny parametry odpovídající dosavadním specifikacím a jejich omezení jak z hlediska dosahu, tak dělicího poměru. Vysokorychlostní PON sítě nejsou stále v České republice hojně zastoupené. Většina operátorů využívá pasivní optické sítě GPON s teoretickou přenosovou rychlostí (2,5 Gbit/s v sestupném směru). Z pohledu dosavadního vývoje na poli vědecké komunity lze očekávat, že PON sítě najdou stále hojnější využití jak pro spotřebitelský segment, tak pro realizaci 5G mobilní sítě nebo v průmyslu. Poslední dvě uvedené možnosti si nekladou za cíl pouze vysokou přenosovou rychlost, ale přednost dávají nízké latenci (na což sítě podle ITU reagují – zkrácením délky v ODN).

V rámci simulací došlo k ověření funkčnosti navrženého modelu jak pro sítě podle IEEE, tak i ITU. Organizace IEEE se nezaměřuje na vysoké dělicí poměry, ale na jednoduchost celého systému, díky využití Ethernet rámců. Cílem finalizace nového doporučení je implementace současných poznatků a nalezení vhodných vlnových délek pro oba směry. Zvolením architektury 1+3 jsou IEEE sítě relativně jednoduché a dobře škálovatelné. Obsahují násobky kanálů pro sestupný směr s přenosovou rychlostí 25 Gbit/s/kanál. Výsledky simulací (25G/50G a 100G EPON) potvrzují funkčnost sítě (z pohledu fyzické vrstvy) do dělicího poměru až 1:64 s délkou ODN 15 km. Uvedený dělicí poměr je nad rámec současné specifikace, která není finální a lze očekávat její rozšíření o vyšší dělicí poměr. S povolenou dopřednou korekcí chyb FEC je možné dosah prodloužit, při zachování dělicího poměru 1:64, až na 26 km. Jedná se však o limit teoretický, protože je zapotřebí brát v potaz řízení přístupu k médiu a fyzické zarovnání ONU jednotek. Simulační model pro ITU 50G HSP-TDM-PON naopak dokládá, že sestupný směr má teoretický limit při dělicím poměru 1:256 s délkou ODN 25 km. V případě využití FEC je dosah až 40 km při dělicím poměru 1:256. Vzestupný směr zaznamenává značná omezení a podle výsledků bude povolení FEC prakticky nutností. K realizaci spojení, ve vzestupném směru (s FEC), je hraniční hodnotou dělicí poměr 1:128 s délkou ODN 20 km (1270 nm) případně 25 km (1300 nm).

Přenosová vrstva, zejména ITU PON sítí, je charakteristická vlastní skladbou rámce pro sestupný směr a burstu pro vzestupný směr. Obě varianty připouští odesílání zapouzdřených kontrolních zpráv pro vzdálené řízení sítě (aktivace ONU, změna tarifu apod.). Simulace dokládají, že parametr  $M$  má pouze nepatrný vliv na celkovou dobu aktivace všech koncových jednotek. Běžná hodnota  $M = 3$ , čímž je definovaný minimální počet po sobě jdoucích rámců, které je nutné správně přijmout (kontrola probíhá podle pole SFC), aby bylo možné pokročit do stavu sériového čísla. V tomto stavu se již ONU stává aktivní (odpovídá na řídicí zprávy – není aktivní

v datové komunikaci). Výsledky simulací aktivačního procesu prokazují vliv délky ODN na čas aktivace. Navazující simulace přenosové vrstvy se zabývá implementací statického a dynamického přidělování časových slotů v sítích NG-PON2. Simulace se nezabývá aktivačním procesem ONU a předpokládá se, že ONU se již nachází v operačním stavu a mohou komunikovat v obou směrech. Statické rozdělení časových slotů není příliš perspektivní a mnohdy dochází k plýtvání časovými sloty pro jednotky, která nemají uživatelská data k odeslání. Dynamický scénář, založený na max-min fair algoritmu, tento nedostatek odstraňuje a umožňuje efektivnější přidělování časových slotů potřebným jednotkám. Dílčí potřeby získává pomocí SR – reprezentované pseudonáhodnou hodnotou ze vstupní hodnoty seed. Modifikace dynamické alokace je zaměřená pro edukativní účely, neboť slouží k přerozdělování volných časových slotů „přetíženým“ ONU.

Habilitační práce pokrývala bezpečnostní rizika PON sítí v rámci teoretického rozboru. Praktická část práce se zaměřuje na nasazení analyzátoru Xavier v laboratorní XG(S)-PON síti a zachycení aktivačního procesu dvou ONU jednotek. Zmíněný analyzátor je výsledkem projektu mezi společnostmi DFC Design a Vysokým učením technickým v Brně. Ze zachycených dat lze určit vzdálenost ONU od OLT, kontrolovat řídicí zprávy a hledat anomálie v provozu. Nalezené anomálie mohou být předány autoritám spolu se zachycenými rámci.

Poslední část práce tvořila popis směrů vývoje v oblasti PON sítí. Nelze opomenout směr vývoje disagregovaným způsobem nebo plnou virtualizací OLT jednotky. Dosavadní virtualizace se zaměřovaly na síť IEEE PON, oblíbenost ITU PON neustále narůstá a již nyní jsou k dispozici implementace obou variant. Pro zachování nízké ceny jak řídicí, tak koncové jednotky jsou doposud využívány pouze linkové kódy, lze však očekávat, že přesun k CPON je jen otázkou času v širším horizontu. Využití CPON dovolí prodloužení ODN a zvýšení dělicího poměru vykoupeného vyššími pořizovacími náklady na aktivní prvky (OLT a ONU). Monitorování infrastruktury se splittersy bylo doposud komplikovanější. Společnost EXFO představila reflektometr, který vyžaduje  $\approx 2\text{m}$  rozdíl na dílčích větvích, aby došlo ke správnému vyhodnocení. Prezentované techniky dokládají využití strojového učení k hlídání infrastruktury v PON síti. S rozvojem Průmyslu 4.0 jsou vyžadovány další kvalitativní parametry přenosu, zejména nízká latence. Přiblížením optického vlákna k zákazníkovi může dojít k uspokojení těchto požadavků. Pro průmyslové aplikace není natolik žádoucí přenosová rychlost jako zmíněná latence, proto dochází i k navrhování „průmyslových“ DBA algoritmů. Z pohledu vývoje je patrné, že PON síť od svého objevení nenacházejí již uplatnění pouze pro koncové zákazníky (domácnosti), ale nacházejí stále větší uplatnění také na poli průmyslu a v budování 5G/6G mobilních sítí.

## Poděkování

Rád bych vyjádřil svou vděčnost své ženě Lucii za to, jakou mi byla oporou a podporou nejen během náročného psaní habilitační práce. Lucie neúnavně pracovala jako korektorka prvních raných verzí textů. Tvá trpělivost a důslednost mi byly velkou inspirací. Dále bych rád vyjádřil své poděkování svým rodičům a sestře (Dagmaře, Janovi a Petře), kteří mi byli vždy nablízku a poskytovali mi nejen finanční, ale i morální oporu během mých studií.

Poděkování patří mému kolegovi a příteli Petrovi Münsterovi. Tvoje podnětné rady a přínosné diskuze mě neustále inspirují. Byl jsi tím, kdo mi pomohl překonat různé výzvy a nabídl nápady, které mi otevřely nové perspektivy. Vždy jsem si cenil Tvé ochoty naslouchat a poskytnout pomoc v klíčových momentech (profesních i osobních).

Nerad bych zapomněl na kolegy z Ústavu telekomunikací, Vysokého učení technického v Brně. Vaše odborná rada a konstruktivní připomínky byly pro mě klíčové a pomohly mi přinést do mé práce nové poznatky. Kolegiální prostředí a otevřená komunikace mi poskytly inspiraci a motivaci ke zdokonalování se.

## Autorovy publikace

- [Atr1] BAO, Ning-Hai, SAHOO, Subhadeep, KUANG, Ming, LI, Guo-Ping, a HORVATH, Tomas. *Synchronous Evacuation for Dual Virtual Machines Under Disaster Risks*. In 2020 43rd International Conference on Telecommunications and Signal Processing (TSP), s. 27–30. Milán, Itálie: IEEE, 2020. ISBN: 978-1-7281-6376-5. DOI: 10.1109/TSP49548.2020.9163586.  
Dostupné z URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9163586/>
- [Atr2] BARCIK, Peter, MUNSTER, Petr, DEJDAR, Petr, HORVATH, Tomas, a VOJTECH, Josef. *Measurement of Polarization Transient Effects Caused by Mechanical Stress on Optical Fiber*. In 2019 International Workshop on Fiber Optics in Access Networks (FOAN), s. 26–28. Sarajevo, Bosna a Hercegovina: IEEE, 2019. ISBN: 978-1-7281-1563-4. DOI: 10.1109/FOAN.2019.8933658.  
Dostupné z URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8933658/>
- [Atr3] CLUPEK, Vlastimil, HORVATH, Tomas, MUNSTER, Petr, a OUJEZSKY, Václav. *New Security Improvements in Next-Generation Passive Optical Networks Stage 2*. Applied Sciences, 9(20):1–16, 2019. ISSN: 2076-3417. DOI: 10.3390/app9204430.  
Dostupné z URL: <https://www.mdpi.com/2076-3417/9/20/4430>
- [Atr4] DEJDAR, Petr, HORSKY, Tomas, MUNSTER, Petr, HORVATH, Tomas, a OUJEZSKY, Václav. *Model of Fiber Optic Transmission System Based on the Red Pitaya*. In 2019 International Workshop on Fiber Optics in Access Networks (FOAN), s. 83–85. Sarajevo, Bosna a Hercegovina: IEEE, 2019. ISBN: 978-1-7281-1563-4. DOI: 10.1109/FOAN.2019.8933694.  
Dostupné z URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8933694/>
- [Atr5] DEJDAR, Petr, MOKRY, Ondrej, CIZEK, Martin, RAJMIC, Pavel, MUNSTER, Petr, SCHIMMEL, Jiri, PRAVDOVA, Lenka, HORVATH, Tomas, a CIP, Ondrej. *Characterization of sensitivity of optical fiber cables to acoustic vibrations*. Scientific Reports, 13(1):1–12, 2023. ISSN: 2045-2322. DOI: 10.1038/s41598-023-34097-9.  
Dostupné z URL: <https://www.nature.com/articles/s41598-023-34097-9>
- [Atr6] DEJDAR, Petr, MUNSTER, Petr, a HORVATH, Tomas. *High-speed Data Acquisition and Signal Processing Using Cost Effective ARM FPGA Processors*. In 2019 42nd International Conference on Telecommunications and Signal

Processing (TSP), s. 593–596. Budapešť, Maďarsko: IEEE, 2019. ISBN: 978-1-7281-1864-2. DOI: 10.1109/TSP.2019.8769055.

Dostupné z URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8769055/>

- [Atr7] DEJDAR, Petr, TOMASOV, Adrian, MUNSTER, Petr, HORVATH, Tomas, SANDERS, Glen A., LIEBERMAN, Robert A., a SCHEEL, Ingrid U. *Vibration caused by train detection using state-of-polarization changes measurement*. In *Fiber Optic Sensors and Applications XVIII*, s. 47–51. Orlando, Florida, USA: SPIE, 2022. ISBN: 9781510650862. DOI: 10.1117/12.2618739.

Dostupné z URL: <https://shorturl.at/eFTU1>

- [Atr8] DEJDAR, Petr, ZÁVIŠKA, Pavel, VALACH, Soběslav, MÜNSTER, Petr, a HORVÁTH, Tomáš. *Image Edge Detection Methods in Perimeter Security Systems Using Distributed Fiber Optical Sensing*. *Sensors*, 22(12):1–13, 2022. ISSN: 1424-8220. DOI: 10.3390/s22124573.

Dostupné z URL: <https://www.mdpi.com/1424-8220/22/12/4573>

- [Atr9] HAVLIS, Ondrej, RADIL, Jan, SLAPAK, Martin, SKODA, Pavel, VOHNOUT, Rudolf, SMOTLACHA, Vladimír, MÜNSTER, Petr, HORVATH, Tomas, KUNDRAT, Jan, HRABINA, Jan, PRAVDOVÁ, Lenka, CIZEK, Martin, RERUCHA, Simon, CIP, Ondrej, ALTMANN, Michal, ALTMANNOVA, Lada, VELC, Radek, HAZLINSKY, Michal, SLAVIK, Radan, VOJTECH, Josef, a KIRK, Maureen S. *Multi-purpose infrastructure for dissemination of precise stable optical frequency*. In *Infrared Remote Sensing and Instrumentation XXVI*, s. 8–12. San Diego, USA: SPIE, 2018. ISBN: 9781510621015. DOI: 10.1117/12.2321333.

Dostupné z URL: <https://shorturl.at/bzPS3>

- [Atr10] HOLIK, Martin, HORVATH, Tomas, a OUJEZKY, Vaclav. *GPON Frame Data Processing*. In *2019 International Workshop on Fiber Optics in Access Networks (FOAN)*, s. 98–100. Sarajevo, Bosna a Hercegovina: IEEE, 2019. ISBN: 978-1-7281-1563-4. ISSN: 2378-8488. DOI: 10.1109/FOAN.2019.8933659.

Dostupné z URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8933659/>

- [Atr11] HOLIK, Martin, HORVATH, Tomas, a OUJEZSKY, Vaclav. *Application for GPON Frame Analysis*. *Electronics*, 8(6):1–11, 2019. ISSN: 2079-9292. DOI: 10.3390/electronics8060700.

Dostupné z URL: <https://www.mdpi.com/2079-9292/8/6/700>

- [Atr12] HOLIK, Martin, HORVATH, Tomas, OUJEZSKY, Vaclav, MUNSTER, Petr, TOMASOV, Adrian, a VALACH, Sobeslav. *MongoDB Database as Storage*

for GPON Frames. *Sensors*, 20(21):1–13, 2020. ISSN: 1424-8220. DOI: 10.3390/s20216208.

Dostupné z URL: <https://www.mdpi.com/1424-8220/20/21/6208>

- [Atr13] HOLIK, Martin, HORVATH, Tomas, OUJEZSKY, Vaclav, MUNSTER, Petr, a VAIS, Zdenek. *Storage for Traffic from xPON Networks*. In 2020 43rd International Conference on Telecommunications and Signal Processing (TSP), s. 77–80. Milán, Itálie: IEEE, 2020. ISBN: 978-1-7281-6376-5. DOI: 10.1109/TSP49548.2020.9163502.

Dostupné z URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9163502/>

- [Atr14] HORVATH, Tomas, CHLAPEK, Jan, MUNSTER, Petr, VOJTECH, Josef, a FILKA, Miloslav. *High Speed (100G) Access Networks*. *Journal of Communications Software and Systems*, 14(3):258–263, 2018. ISSN: 18456421. DOI: 10.24138/jcomss.v14i3.523.

Dostupné z URL: <https://jcoms.fesb.unist.hr/10.24138/jcomss.v14i3.523/>

- [Atr15] HORVATH, Tomas, CLUPEK, Vlastimil, MUNSTER, Petr, a OUJEZSKY, Vaclav. *Key Exchange with PUF in NG-PON2 Networks*. In 2019 42nd International Conference on Telecommunications and Signal Processing (TSP), s. 118–121. Budapešť, Maďarsko: IEEE, 2019. ISBN: 978-1-7281-1864-2. DOI: 10.1109/TSP.2019.8769082.

Dostupné z URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8769082/>

- [Atr16] HORVATH, Tomas, CYMOREK, Patrik, MUNSTER, Petr, OUJEZSKY, Vaclav, a VOJTECH, Josef. *Simulations of Grant Allocation in NG-PON2 Networks Using OPNET Modeler*. *Journal of Communications Software and Systems*, 14(4):281–289, 2018. ISSN: 18456421. DOI: 10.24138/jcomss.v14i4.525.

Dostupné z URL: <https://jcoms.fesb.unist.hr/10.24138/jcomss.v14i4.525/>

- [Atr17] HORVATH, Tomas, JURCIK, Michal, OUJEZSKY, Vaclav, a SKORPIL, Vladislav. *GPON Analyzer - Frame Parser Module*. In 2019 42nd International Conference on Telecommunications and Signal Processing (TSP), s. 748–752. Budapešť, Maďarsko: IEEE, 2019. ISBN: 978-1-7281-1864-2. DOI: 10.1109/TSP.2019.8768882.

Dostupné z URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8768882/>

- [Atr18] HORVATH, Tomas, MUNSTER, Petr, a BAO, Ning-Hai. *Lasers in Passive Optical Networks and the Activation Process of an End Unit*. *Electronics*,

9(7):1–18, 2020. ISSN: 2079-9292. DOI: 10.3390/electronics9071114.

Dostupné z URL: <https://www.mdpi.com/2079-9292/9/7/1114>

[Atr19] HORVATH, Tomas, MUNSTER, Petr, CYMOREK, Patrik, OUJEZSKY, Vaclav, a VOJTECH, Josef. *Implementation of NG-PON2 transmission convergence layer into OPNET modeler*. In 2017 International Workshop on Fiber Optics in Access Network (FOAN), s. 1–5. Munich, Germany: IEEE, 2017. ISBN: 978-1-5386-2413-5. ISSN: 2378-8488. DOI: 10.1109/FOAN.2017.8215254. Dostupné z URL: <http://ieeexplore.ieee.org/document/8215254/>

[Atr20] HORVATH, Tomas, MUNSTER, Petr, OUJEZSKY, Vaclav, a BAO, Ning-Hai. *Passive Optical Networks Progress*. Electronics, 9(7):1–31, 2020. ISSN: 2079-9292. DOI: 10.3390/electronics9071081. Dostupné z URL: <https://www.mdpi.com/2079-9292/9/7/1081>

[Atr21] HORVATH, Tomas, MUNSTER, Petr, OUJEZSKY, Vaclav, HOLIK, Martin, a CYMOREK, Patrik. *Time and Memory Complexity of Next-Generation Passive Optical Networks in NS-3*. In 2019 International Workshop on Fiber Optics in Access Networks (FOAN), s. 68–71. Sarajevo, Bosna a Hercegovina: IEEE, 2019. ISBN: 978-1-7281-1563-4. ISSN: 2378-8488. DOI: 10.1109/FOAN.2019.8933749. Dostupné z URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8933749/>

[Atr22] HORVATH, Tomas, MUNSTER, Petr, OUJEZSKY, Vaclav, a VOJTECH, Josef. *Activation Process of ONU in EPON/GPON Networks*. In 2018 41st International Conference on Telecommunications and Signal Processing (TSP), s. 1–5. Athény, Řecko: IEEE, 2018. ISBN: 978-1-5386-4695-3. DOI: 10.1109/TSP.2018.8441216. Dostupné z URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8441216/>

[Atr23] HORVATH, Tomas, MUNSTER, Petr, OUJEZSKY, Vaclav, a VOJTECH, Josef. *Activation Process of ONU in EPON/GPON/XG-PON/NG-PON2 Networks*. Applied Sciences, 8(10):1–18, 2018. ISSN: 2076-3417. DOI: 10.3390/app8101934. Dostupné z URL: <http://www.mdpi.com/2076-3417/8/10/1934>

[Atr24] HORVATH, Tomas, MUNSTER, Petr, OUJEZSKY, Vaclav, VOJTECH, Josef, HOLIK, Martin, DEJDAR, Petr, a LATAL, Michal. *GPON Network with Simulated Rogue ONU*. In 2019 International Conference on Software, Telecommunications and Computer Networks (SoftCOM), s. 1–5. Split, Chorvatsko: IEEE, 2019. ISBN: 978-953-290-088-0. ISSN: 1847-358X. DOI:

10.23919/SOFTCOM.2019.8903811.

Dostupné z URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8903811/>

- [Atr25] HORVATH, Tomas, MUNSTER, Petr, TOMASOV, Adrian, DEJDAR, Petr, OUJEZSKY, Vaclav, a VALACH, Sobeslav. *Transmission convergence layer analysis of passive optical networks with a novel FPGA card*. In Seventeenth Conference on Education and Training in Optics and Photonics: ETOP 2023, vol. 12723, str. 127230R. International Society for Optics and Photonics, SPIE, 2023. DOI: 10.1117/12.2668427.

Dostupné z URL: <https://doi.org/10.1117/12.2668427>

- [Atr26] HORVATH, Tomas, MUNSTER, Petr, VOJTECH, Josef, a SMOTLACHA, Vladimír. *Simultaneous Transmission of Photonic Services over One Fiber with an ITU 100 GHz Grid*. *Sensors*, 19(7):1–14, 2019. ISSN: 1424-8220. DOI: 10.3390/s19071601.

Dostupné z URL: <https://www.mdpi.com/1424-8220/19/7/1601>

- [Atr27] HORVATH, Tomas, MUNSTER, Petr, VOJTECH, Josef, VELC, Radek, a OUJEZSKY, Vaclav. *Simultaneous transmission of accurate time, stable frequency, data, and sensor system over one fiber with ITU 100 GHz grid*. *Optical Fiber Technology*, 40(1):139–143, 2018. ISSN: 10685200. DOI: 10.1016/j.yofte.2017.11.016.

Dostupné z URL: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1068520017303851>

- [Atr28] HORVATH, Tomas, RADIL, Jan, MUNSTER, Petr, a BAO, Ning-Hai. *Optical Amplifiers for Access and Passive Optical Networks*. *Applied Sciences*, 10(17):1–28, 2020. ISSN: 2076-3417. DOI: 10.3390/app10175912.

Dostupné z URL: <https://www.mdpi.com/2076-3417/10/17/5912>

- [Atr29] HORVATH, Tomas, TOMASOV, Adrian, MUNSTER, Petr, DEJDAR, Petr, a OUJEZSKY, Vaclav. *Unsupervised Anomaly Detection Using Bidirectional GRU Autoencoder Neural Network for PLOAM Message Sequence Analysis in GPON*. In 2022 International Conference on Electrical, Computer, Communications and Mechatronics Engineering (ICECCME), s. 1–5. Male, Maledivy: IEEE, 2022. ISBN: 978-1-6654-7095-7. DOI: 10.1109/ICECCME55909.2022.9988508.

Dostupné z URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9988508/>

- [Atr30] HORVATH, Tomás, SIMA, Jaromír, RADIL, Jan, a VOJTECH, Josef. *Coherent data system and slow data transmission in a single fiber with ITU grid spacing*. In *Optical Modeling and Performance Predictions XIII*, s. 1–6.



USA: SPIE, 2023-9-22. ISBN: 9781510665422. DOI: 10.1117/12.2676743.  
Dostupné z URL: <https://www.spiedigitallibrary.org/conference-proceedings-of-spie/12664/2676743/Coherent-data-system-and-slow-data-transmission-in-a-single/10.1117/12.2676743.full>

- [Atr31] HORVÁTH, Tomáš. *Fyzická a přenosová vrstva PON*. In Optoelektronika pro telekomunikace a informatiku, s. 263–300. Brno: Centa, 2017, druhé, rozšířené vydání ed. ISBN: 978-80-86785-29-5.
- [Atr32] HORVÁTH, Tomáš, MÜNSTER, Petr, a VOJTĚCH, Josef. *Deployment of PON in Europe and Deep Data Analysis of GPON*. In Telecommunication Systems - Principles and Applications of Wireless-Optical Technologies, s. 1–20. Velká Británie: IntechOpen, 2019, první ed. ISBN: 978-1-78984-294-4.
- [Atr33] JURCIK, Michal, HORVATH, Tomas, OUJEZSKY, Vaclav, SKORPIL, Vladislav, a HOLIK, Martin. *GPON Parser for Database Analysis*. In 2019 42nd International Conference on Telecommunications and Signal Processing (TSP), s. 347–350. Budapešť, Maďarsko: IEEE, 2019. ISBN: 978-1-7281-1864-2. DOI: 10.1109/TSP.2019.8768849.  
Dostupné z URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8768849/>
- [Atr34] KLICNIK, Ondrej, MUNSTER, Petr, HORVATH, Tomas, HAJNY, Jan, a MALINA, Lukas. *Quantum Key Distribution Polygon*. In 2021 13th International Congress on Ultra Modern Telecommunications and Control Systems and Workshops (ICUMT), s. 263–266. Brno, Česká republika: IEEE, 2021. ISBN: 978-1-6654-0219-4. ISSN: 2157-023X. DOI: 10.1109/ICUMT54235.2021.9631732.  
Dostupné z URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9631732/>
- [Atr35] KLICNIK, Ondrej, TOMASOV, Adrian, MUNSTER, Petr, HORVATH, Tomas, a HAJNY, Jan. *Long-term Parameters Monitoring of the IDQ Clavis 3 QKD System*. In 2022 International Conference on Software, Telecommunications and Computer Networks (SoftCOM), s. 1–4. Split, Chorvatsko: IEEE, 2022. ISBN: 978-953-290-117-7. DOI: 10.23919/SoftCOM55329.2022.9911354.  
Dostupné z URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9911354/>
- [Atr36] LATAL, Michal, DEJDAR, Petr, HORVATH, Tomas, a MUNSTER, Petr. *Simultaneous Transmission of Data and Sensory Signal with Gradual Increase in Channel Spacing*. In 2020 43rd International Conference on Telecommunications and Signal Processing (TSP), s. 488–491. Milán, Itálie: IEEE, 2020.

ISBN: 978-1-7281-6376-5. DOI: 10.1109/TSP49548.2020.9163554.

Dostupné z URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9163554/>

- [Atr37] MUNSTER, Petr a HORVATH, Tomas. *Intelligent Technical Textiles Based on Fiber Bragg Gratings for Strain Monitoring*. Sensors, 20(10):1–9, 2020. ISSN: 1424-8220. DOI: 10.3390/s20102951.

Dostupné z URL: <https://www.mdpi.com/1424-8220/20/10/2951>

- [Atr38] MUNSTER, Petr, HORVATH, Tomas, DEJDAR, Petr, a SKALJO, Edvin. *Remote Pumping in Point to Multi-point Networks*. Journal of Communications Software and Systems, 18(1):54–62, 2022. ISSN: 18456421. DOI: 10.24138/jcomss-2021-0188.

Dostupné z URL: <https://jcoms.fesb.unist.hr/10.24138/jcomss-2021-0188/>

- [Atr39] MUNSTER, Petr, HORVATH, Tomas, a VOJTECH, Josef. *Distributed Sensing Based on Interferometry and Polarization Methods for Use in Fibre Infrastructure Protection*. Sensors, 19(8):1–11, 2019. ISSN: 1424-8220. DOI: 10.3390/s19081810.

Dostupné z URL: <https://www.mdpi.com/1424-8220/19/8/1810>

- [Atr40] MUNSTER, Petr, PRINOSIL, Jiri, HELAN, Radek, SIFTA, Radim, a HORVÁTH, Tomás. *Modular FBG based technical textile for temperature and strain monitoring*. In Sensors and Smart Structures Technologies for Civil, Mechanical, and Aerospace Systems 2021, s. 1–6. USA: SPIE, 2021. ISBN: 9781510640115. ISSN: 0277-786X. DOI: 10.1117/12.2583220.

Dostupné z URL: <https://shorturl.at/djtux>

- [Atr41] MUNSTER, Petr, TOMASOV, Adrian, DEJDAR, Petr, a HORVATH, Tomas. *Deploying Machine Learning in Distributed Sensing to Increase Resilience of Fiber Optic Infrastructure*. In CLEO 2023, s. 1–3. Washington, D.C: Optica Publishing Group, 2023. ISBN: 978-1-957171-25-8. DOI: 10.1364/CLEO-AT.2023.JW2A.102.

Dostupné z URL: <https://opg.optica.org/abstract.cfm?URI=CLEO-AT-2023-JW2A.102>

- [Atr42] OUJEZSKY, Vaclav, CHAPCAK, David, HORVATH, Tomas, a MUNSTER, Petr. *Security Testing Of Active Optical Network Devices*. In 2019 42nd International Conference on Telecommunications and Signal Processing (TSP), s. 9–13. Budapešť, Maďarsko: IEEE, 2019. ISBN: 978-1-7281-1864-2. DOI: 10.1109/TSP.2019.8768811.

Dostupné z URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8768811/>

- [Atr43] OUJEZSKY, Vaclav a HORVATH, Tomas. *Traffic Similarity Observation Using a Genetic Algorithm and Clustering*. Technologies, 6(4):1–10, 2018. ISSN: 2227-7080. DOI: 10.3390/technologies6040103.  
Dostupné z URL: <http://www.mdpi.com/2227-7080/6/4/103>
- [Atr44] OUJEZSKY, Vaclav, HORVATH, Tomas, a HOLIK, Martin. *Security Incident Response Automation for xPON Networks*. Journal of Communications Software and Systems, 18(2):144–152, 2022. ISSN: 18456421. DOI: 10.24138/jcomss-2022-0033.  
Dostupné z URL: <https://jcoms.fesb.unist.hr/10.24138/jcomss-2022-0033/>
- [Atr45] OUJEZSKY, Vaclav, HORVATH, Tomas, JURCIK, Michal, SKORPIL, Vladislav, HOLIK, Martin, a KVAS, Marek. *Fpga Network Card And System For Gpon Frames Analysis At Optical Layer*. In 2019 42nd International Conference on Telecommunications and Signal Processing (TSP), s. 19–23. Budapešť, Maďarsko: IEEE, 2019. ISBN: 978-1-7281-1864-2. DOI: 10.1109/TSP.2019.8769054.  
Dostupné z URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8769054/>
- [Atr46] OUJEZSKY, Vaclav, HORVATH, Tomas, a MUNSTER, Petr. *Application for Determining whether IP Addresses belong to a Map by Coordinates*. In 2019 42nd International Conference on Telecommunications and Signal Processing (TSP), s. 14–18. Budapešť, Maďarsko: IEEE, 2019. ISBN: 978-1-7281-1864-2. DOI: 10.1109/TSP.2019.8769100.  
Dostupné z URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8769100/>
- [Atr47] OUJEZSKY, Vaclav, SKORPIL, Vladislav, a HORVATH, Tomas. *GPON Frame Analysis with Artificial Immune System*. In 2019 11th International Congress on Ultra Modern Telecommunications and Control Systems and Workshops (ICUMT), s. 1–4. Dublin, Irsko: IEEE, 2019. ISBN: 978-1-7281-5764-1. ISSN: 2157-023X. DOI: 10.1109/ICUMT48472.2019.8970923.  
Dostupné z URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8970923/>
- [Atr48] OUJEZSKY, Vaclav, TOMASOV, Adrian, HOLIK, Martin, SKORPIL, Vladislav, HORVATH, Tomas, a JURCIK, Michal. *GPON Traffic Analysis with TensorFlow*. In 2020 43rd International Conference on Telecommunications and Signal Processing (TSP), s. 69–72. Milán, Itálie: IEEE, 2020. ISBN: 978-1-7281-6376-5. DOI: 10.1109/TSP49548.2020.9163575.  
Dostupné z URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9163575/>

- [Atr49] OUJEZSKY, Václav a HORVATH, Tomáš. *Aequor Tracer – Network Analysis Application*. In 2019 27th Telecommunications Forum (TELFOR), s. 1–4. Bělehrad, Srbsko: IEEE, 2019. ISBN: 978-1-7281-4790-1. DOI: 10.1109/TELFOR48224.2019.8971079.  
Dostupné z URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8971079/>
- [Atr50] SIFTA, Radim, LATAL, Michal, MUNSTER, Petr, a HORVATH, Tomas. *POL-MUX System for Noncoherent Optical Networks*. Applied Sciences, 11(12):1–17, 2021. ISSN: 2076-3417. DOI: 10.3390/app11125582.  
Dostupné z URL: <https://www.mdpi.com/2076-3417/11/12/5582>
- [Atr51] SIKORA, Pavel, HORVATH, Tomas, MUNSTER, Petr, a OUJEZSKY, Vaclav. *Efficiency Tests of DBA Algorithms in XG-PON*. Electronics, 8(7):1–17, 2019. ISSN: 2079-9292. DOI: 10.3390/electronics8070762.  
Dostupné z URL: <https://www.mdpi.com/2079-9292/8/7/762>
- [Atr52] SPURNY, Vladimir, MUNSTER, Petr, HORVATH, Tomas, a SKALJO, Edvin. *Leakage of Information Through Passive Components in Optical Fiber Infrastructures*. In 2021 13th International Congress on Ultra Modern Telecommunications and Control Systems and Workshops (ICUMT), s. 271–273. Brno, Česká republika: IEEE, 2021. ISBN: 978-1-6654-0219-4. DOI: 10.1109/ICUMT54235.2021.9631702.  
Dostupné z URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9631702/>
- [Atr53] SPURNY, Vladimir, MUNSTER, Petr, TOMASOV, Adrian, HORVATH, Tomas, a SKALJO, Edvin. *Physical Layer Components Security Risks in Optical Fiber Infrastructures*. Sensors, 22(2):1–15, 2022. ISSN: 1424-8220. DOI: 10.3390/s22020588.  
Dostupné z URL: <https://www.mdpi.com/1424-8220/22/2/588>
- [Atr54] TOMASOV, Adrian, DEJDAR, Petr, CEM, Ali, MUNSTER, Petr, a HORVATH, Tomas. *Event classification from distributed interferometric sensor using neural network*. In 27th International Conference on Optical Fiber Sensors, s. 58–62. Washington, D.C: Optica Publishing Group, 2022. ISBN: 978-1-957171-14-2. DOI: 10.1364/OFS.2022.Th4.58.  
Dostupné z URL: <https://opg.optica.org/abstract.cfm?URI=OFS-2022-Th4.58>
- [Atr55] TOMASOV, Adrian, DEJDAR, Petr, HORVATH, Tomas, a MUNSTER, Petr. *Physical fiber security by the state of polarization change detection*. In Fiber Optic Sensors and Applications XVIII, s. 10–14. Orlando, Florida, USA:

SPIE, 2022. ISBN: 9781510650862. DOI: 10.1117/12.2618490.

Dostupné z URL: <https://shorturl.at/pDU39>

[Atr56] TOMASOV, Adrian, DEJDAR, Petr, MUNSTER, Petr, HORVATH, Tomas, BARCIK, Peter, a DA ROS, Francesco. *Enhancing fiber security using a simple state of polarization analyzer and machine learning*. Optics & Laser Technology, 167:109668, 2023. ISSN: 0030-3992. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2023.109668>.

Dostupné z URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0030399223005613>

[Atr57] TOMASOV, Adrian, HOLIK, Martin, OUJEZSKY, Vaclav, HORVATH, Tomas, a MUNSTER, Petr. *GPON PLOAMd Message Analysis Using Supervised Neural Networks*. Applied Sciences, 10(22):1–12, 2020. ISSN: 2076-3417. DOI: 10.3390/app10228139.

Dostupné z URL: <https://www.mdpi.com/2076-3417/10/22/8139>

[Atr58] TOMASOV, Adrian, HORVATH, Tomas, MUNSTER, Petr, HOLIK, Martin, a OUJEZSKY, Vaclav. *FPGA xPON Traffic Analysis*. In 2021 44th International Conference on Telecommunications and Signal Processing (TSP), s. 58–61. Brno, Česká republika: IEEE, 2021. ISBN: 978-1-6654-2933-7. DOI: 10.1109/TSP52935.2021.9522610.

Dostupné z URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9522610/>

[Atr59] VELC, Radek, KUNDRÁT, Jan, VOHNOUT, Rudolf, ŠKODA, Pavel, ALTMANN, Michal, SMOTLACHA, Vladimír, HAŽLINSKÝ, Michal, ČÍP, Ondřej, ČÍŽEK, Martin, HRABINA, Jan, PRAVDOVÁ, Lenka, HUCL, Václav, ŠIMON ŘEŘUCHA, VOJTECH, Josef, HAVLIŠ, Ondřej, ŠLAPÁK, Martin, RADIL, Jan, MUNSTER, Petr, HORVÁTH, Tomáš, ALTMANNOVÁ, Lada, a ZEMÁNEK, Pavel. *Optical amplification for quantum sources of ultra-stable optical frequency*. In 21st Czech-Polish-Slovak Optical Conference on Wave and Quantum Aspects of Contemporary Optics, s. 1–. Lednice, Czech Republic: SPIE, 2018. ISBN: 9781510626072. DOI: 10.1117/12.2513641.

Dostupné z URL: <https://shorturl.at/cduxY>

[Atr60] VOHNOUT, Rudolf, BUKOVSKY, Ivo, CHOU, Shuo-Yan, GEYER, Jakub, BUDIK, Ondrej, SHARMA, Rohit, PROKYSEK, Milos, HORVATH, Tomas, a WYCKMANS, Annemie. *Living Lab Long-Term Sustainability in Hybrid Access Positive Energy Districts - A Prosumer Smart Fog Computing Perspective*. IEEE Internet of Things Journal, 10(21):18898–18908, 2023. ISSN:

2327-4662. DOI: 10.1109/JIOT.2023.3280594.

Dostupné z URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/10137645>

[Atr61] VOJTECH, Josef, HAVLIŠ, Ondrej, ŠLAPAK, Martin, SMOTLACHA, Vladimír, HORVATH, Tomas, ALTMANNOVA, Lada, VELC, Radek, KUNDRAT, Jan, VOHNOUT, Rudolf, BHOWMICK, Sarbojeet, HAZLINSKY, Michal, CIZEK, Martin, HRABINA, Jan, PRAVDOVA, Lenka, CIP, Ondrej, a ROZTOCIL, Jaroslav. *Large scale infrastructure for precise time and frequency bidirectional transmission*. In *Infrared Remote Sensing and Instrumentation XXIX*, s. 1–5. San Diego, USA: SPIE, 2021. ISBN: 9781510644984. ISSN: 0277-786X. DOI: 10.1117/12.2592328.

Dostupné z URL: <https://shorturl.at/rGUX7>

[Atr62] VOJTECH, Josef, HAVLIS, Ondrej, BHOWMICK, Sarbojeet, SLAPAK, Martin, MUNSTER, Petr, HORVATH, Tomas, VELC, Radek, KUNDRAT, Jan, ALTMANNOVA, Lada, VOHNOUT, Rudolf, SKODA, Pavel, a SMOTLACHA, Vladimír. *White Rabbit Single Fibre Bidirectional Transmission of Precise Time Using Unconventional Wavelengths*. In *2020 Joint Conference of the IEEE International Frequency Control Symposium and International Symposium on Applications of Ferroelectrics (IFCS-ISAF)*, s. 1–4. USA: IEEE, 2020. ISBN: 978-1-7281-6430-4. ISSN: 2375-0448. DOI: 10.1109/IFCS-ISAF41089.2020.9234815.

Dostupné z URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9234815/>

[Atr63] VOJTECH, Josef, HAVLIS, Ondrej, SLAPAK, Martin, BHOWMICK, Sarbojeet, RADIL, Jan, MUNSTER, Petr, HORVATH, Tomas, VELC, Radek, KUNDRAT, Jan, ALTMANNOVA, Lada, SMOTLACHA, Vladimír, VOHNOUT, Rudolf, HRABINA, Jan, CIZEK, Martin, PRAVDOVA, Lenka, RERUCHA, Simon, CIP, Ondrej, SLAVIK, Radan, MARECEK, Libor, SKODA, Pavel, a HAZLINSKY, Michal. *Alternative spectral windows for photonic services distribution*. In *Infrared Remote Sensing and Instrumentation XXVII*, s. 1–8. San Diego, USA: SPIE, 2019. ISBN: 9781510629493. ISSN: 1996-756X. DOI: 10.1117/12.2529713.

Dostupné z URL: <https://www.spiedigitallibrary.org/conference-proceedings-of-spie/11128/2529713/>

[Alternative-spectral-windows-for-photonic-services-distribution/10.1117/12.2529713.full](https://www.spiedigitallibrary.org/conference-proceedings-of-spie/11128/2529713/)

[Atr64] VOJTECH, Josef, HAVLIS, Ondrej, SLAPAK, Martin, RADIL, Jan, MUNSTER, Petr, HORVATH, Tomas, a ALTMANNOVA, Lada. *Raman amplification for ultra-stable coherent frequency transmission in S band*. In *IOP Conference*

Series: Materials Science and Engineering, vol. 490, s. 1–5. Čína: IOP Publishing, 2019. ISSN: 1757-899X. DOI: 10.1088/1757-899X/490/7/072035.

Dostupné z URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/490/7/072035>

[Atr65] VOJTECH, Josef, SLAPAK, Martin, BHOWMICK, Sarbojeet, KUNDRAT, Jan, MUNSTER, Petr, HORVATH, Tomas, HAVLIS, Ondrej, VOHNOUT, Rudolf, ROZTOCIL, Jaroslav, a SMOTLACHA, Vladimir. *Direct clock optical transmission using commercial SFP transceivers for metropolitan network*. In 2020 IEEE Photonics Conference (IPC), s. 1–2. Vancouver, Kanada: IEEE, 2020. ISBN: 978-1-7281-5891-4. DOI: 10.1109/IPC47351.2020.9252458.

Dostupné z URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9252458/>

[Atr66] VOJTECH, Josef, SLAPAK, Martin, HORVATH, Tomas, ALTMANN, Michal, HAVLIS, Ondrej, SKODA, Pavel, MUNSTER, Petr, KUNDRAT, Jan, VELC, Radek, SMOTLACHA, Vladimir, RADIL, Jan, ALTMANNOVA, Lada, VOHNOUT, Rudolf, HAZLINSKY, Michal, a SLAVIK, Radan. *Transmission Delay Stabilization Using Commercial Pluggable Small Form Factor Transceiver Based on V-Cavity Laser*. In 2018 41st International Conference on Telecommunications and Signal Processing (TSP), s. 1–5. Athény, Řecko: IEEE, 2018. ISBN: 978-1-5386-4695-3. DOI: 10.1109/TSP.2018.8441487.

Dostupné z URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8441487/>

[Atr67] VOJTECH, Josef, SMOTLACHA, Vladimir, BHOWMICK, Sarbojeet, HAVLIS, Ondrej, SLAPAK, Martin, VOHNOUT, Rudolf, MUNSTER, Petr, HORVATH, Tomas, VELC, Radek, KUNDRAT, Jan, ALTMANNOVA, Lada, MICHAL, Martin, SKODA, Pavel, HAZLINSKY, Michal, KUBERNAT, Vaclav, SLAVÍK, Radan, a ROZTOCIL, Jaroslav. *Alternative Spectral Window for Precise Time Fibre Based Transport*. In Proceedings of the 51st Annual Precise Time and Time Interval Systems and Applications Meeting, s. 187–190. San Diego, USA: ION, 2020. DOI: 10.33012/2020.17313.

Dostupné z URL: <https://www.ion.org/publications/abstract.cfm?articleID=17313>

[Atr68] VOJTECH, Josef, SMOTLACHA, Vladimir, HAVLIS, Ondrej, SLAPAK, Martin, KUNDRAT, Jan, BHOWMICK, Sarbojeet, VOHNOUT, Rudolf, VELC, Radek, ALTMANNOVA, Lada, HORVATH, Tomas, CIZEK, Martin, HRABINA, Jan, RERUCHA, Simon, PRAVDOVA, Lenka, LAZAR, Josef, CIP, Ondrej, KUNA, Alexander, a AND, Jaroslav Roztocil. *Towards Czech national research infrastructure for Clock Network Services*. In Optical Sensors 2021, s. 50–54. USA: SPIE, 2021. ISBN: 9781510643789. ISSN: 0277-786X. DOI:

10.1117/12.2589156.

Dostupné z URL: <https://shorturl.at/cmyAB>

- [Atr69] VOJTECH, Josef, VOHNOUT, Rudolf, HAVLIS, Ondrej, POSPISIL, Petr, SLAPAK, Martin, VELC, Radek, ALTMANNOVÁ, Lada, HORVATH, Tomas, KUNDRAT, Jan, HAZLINSKY, Michal, ANDRIANTSARAZO, Elisabeth, a RIDLICHOWSKI, Piotr. *First cross-border trial of quantum key distribution sharing fiber line with data and accurate time transmissions*. In Quantum Communications and Quantum Imaging XX, s. 31–35. San Diego, USA: SPIE, 2022. ISBN: 9781510654600. DOI: 10.1117/12.2633616.

Dostupné z URL: <https://shorturl.at/qBFS1>

- [Atr70] VOJTECH, Josef, VOHNOUT, Rudolf, HORVÁTH, Tomáš, BHOWNICK, Sarbojeet, SLAPAK, Martin, MUNSTER, Petr, HAVLIS, Ondrej, VELC, Radek, KUNDRAT, Jan, SKODA, Pavel, ALTMANNOVA, Lada, HAZLINSKY, Michal, USENKO, Vladyslav, a SMOTLACHA, Vladimir. *Sustainable QKD transmissions over fiber infrastructures shared with data and real-time transfers*. In Conference on Lasers and Electro-Optics, s. 1–3. Washington, D.C: Optica Publishing Group, 2020. ISBN: 978-1-943580-76-7. ISSN: 2160-8989. DOI: 10.1364/CLEO-AT.2020.JW2A.15.

Dostupné z URL: <https://opg.optica.org/abstract.cfm?uri=CLEO-AT-2020-JW2A.15>



## Literatura

- [1] ABDELLI, Khouloud, TROPSCHUG, Carsten, GRIESSER, Helmut, a PACHNICKE, Stephan. *Faulty branch identification in passive optical networks using machine learning*. Journal of Optical Communications and Networking, 15(4):187–196, 2023. ISSN: 1943-0620. DOI: 10.1364/JOCN.475882.  
Dostupné z URL: <https://opg.optica.org/abstract.cfm?URI=jocn-15-4-187>
- [2] ADIB, Md Mosaddek Hossain, FULLNER, Christoph, KEMAL, Juned N., MARIN-PALOMO, Pablo, RAMDANE, Abderrahim, KOOS, Christian, FREUDE, Wolfgang, a RANDEL, Sebastian. *Colorless Coherent TDM-PON Based on a Frequency-Comb Laser*. Journal of Lightwave Technology, 40(13):4287–4299, 2022-7-1. ISSN: 0733-8724. DOI: 10.1109/JLT.2022.3164168.  
Dostupné z URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9747997/>
- [3] ALAELDDIN, Fuad Yousif Mohammed, NEWAZ, S.H. Shah, AL-HAZEMI, Fawaz, a CHOI, Jun Kyun. *Grant management procedure for energy saving TDM-PONs*. Optical Fiber Technology, 40(1):118–129, 2018. ISSN: 10685200. DOI: 10.1016/j.yofte.2017.11.014.  
Dostupné z URL: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1068520017301840>
- [4] ATAN, F. M., ZULKIFLI, N., IDRUS, S. M., ISMAIL, N. A., ZIN, A. M., RAMLI, A., a YUSOFF, N. Md. *Security enhanced dynamic bandwidth allocation algorithm against degradation attacks in next generation passive optical networks*. Journal of Optical Communications and Networking, 13(12):301–311, 2021. ISSN: 1943-0620. DOI: 10.1364/JOCN.434739.  
Dostupné z URL: <https://opg.optica.org/abstract.cfm?URI=jocn-13-12-301>
- [5] ATAN, Fadila Mohd, ZULKIFLI, Nadiatulhuda, IDRUS, Sevia Mahdaliza, M. ZIN, Nor Affida, a ISMAIL, Nur Asfahani. *TCP Capacity Utilization In Next Generation Passive Optical Network During Degradation Attack*. In 2022 IEEE 6th International Symposium on Telecommunication Technologies (ISTT), s. 44–49. Johor Bahru, Malaysia: IEEE, 2022-11-14. ISBN: 978-1-6654-8942-3. DOI: 10.1109/ISTT56288.2022.9966544.  
Dostupné z URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9966544/>
- [6] ATAN, F.M., ZIN, A.M, ISMAIL, N.A., ZULKIFLI, N., a IDRUS, S. M. *An Overview on Security Issues in The Optical Access Network*. In 2018 IEEE

- 7th International Conference on Photonics (ICP), s. 1–3. Langkawi, Malaysia: IEEE, 2018. ISBN: 978-1-5386-1187-6. ISSN: 2330-5665. DOI: 10.1109/ICP.2018.8533171.  
Dostupné z URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8533171/>
- [7] BIDKAR, Sarvesh, CHRISTODOULOPOULOS, Konstantinos, PFEIFFER, Thomas, a BONK, Rene. *Evaluating Bandwidth Efficiency and Latency of Scheduling Schemes for 5G Fronthaul over TDM-PON*. In 2022 European Conference on Optical Communication (ECOC), s. 1–4. Švýcarsko: IEEE, 2022. ISBN: 978-1-957171-15-9.
- [8] BONK, Rene, GENG, Dan, KHOTIMSKY, Denis, LIU, Dekun, LIU, Xiang, LUO, Yuanqiu, NESSET, Derek, OKSMAN, Vladimir, STROBEL, Rainer, HOOF, Werner Van, a WEY, Jun Shan. *50G-PON: The First ITU-T Higher-Speed PON System*. IEEE Communications Magazine, 60(3):48–54, 2022. ISSN: 0163-6804. DOI: 10.1109/MCOM.001.2100441.  
Dostupné z URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9743347/>
- [9] BUI, Ngoc-Dung, LE, Anh-Hung, a TRAN, Nguyen-Cac. *Improving Power Efficiency and Down-Up Bandwidth Symmetry in GPON and XG-PON Coexistence*. In 2022 RIVF International Conference on Computing and Communication Technologies (RIVF), s. 596–599. Vietnam: IEEE, 2022. ISBN: 978-1-6654-6166-5. ISSN: 2162-786X. DOI: 10.1109/RIVF55975.2022.10013850.  
Dostupné z URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/10013850/>
- [10] BUTT, Rizwan Aslam, IDRUS, Sevia Mahdaliza, QURESHI, Kashif Naseer, SHAH, Pir Meher Ali, a ZULKIFLI, Nadiatulhuda. *An energy efficient cyclic sleep control framework for ITU PONs*. Optical Switching and Networking, 27(1):7–17, 2018. ISSN: 15734277. DOI: 10.1016/j.osn.2017.06.002.  
Dostupné z URL: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1573427717300024>
- [11] BUUS, J. a MURPHY, E.J. *Tunable lasers in optical networks*. Journal of Lightwave Technology, 24(1):5–11, 2006. ISSN: 0733-8724. DOI: 10.1109/JLT.2005.859839.  
Dostupné z URL: <http://ieeexplore.ieee.org/document/1589026/>
- [12] CAMPOS, Luis Alberto, JIA, Zhensheng, ZHANG, Haipeng, a XU, Mu. *Coherent optics for access from P2P to P2MP [Invited]*. Journal of Optical Communications and Networking, 15(3):A114–A123, 2023. ISSN: 1943-0620. DOI: 10.1364/JOCN.469869.

Dostupné z URL: <https://opg.optica.org/abstract.cfm?URI=jocn-15-3-A114>

- [13] CENTOFANTI, Carlo, MAROTTA, Andrea, CASSIOLI, Dajana, GRAZIOSI, Fabio, SAMBO, Nicola, VALCARENGHI, Luca, BERNARD, Chris, a ROBERTS, Hal. *Slice Management in SDN PON Supporting Low-Latency Services*. In 2022 European Conference on Optical Communication (ECOC), s. 1–4. 2022.
- [14] CHEN, Ling, DAHLFORT, Stefan, a HOOD, Dave. *Evolution of PON*. In Asia Communications and Photonics Conference and Exhibition, s. 709–711. Shanghai, China: IEEE, 2010. ISBN: 978-1-4244-7111-9. DOI: 10.1109/ACP.2010.5682701.  
Dostupné z URL: <http://ieeexplore.ieee.org/document/5682701/>
- [15] CHEN, Xue, ZHANG, Zhiguo, a HU, Xintian. *The evolution trends of PON and key techniques for NG-PON*. In 9th International Conference on Information, Communications & Signal Processing, s. 1–6. Tainan, Taiwan: IEEE, 2013. ISBN: 978-1-4799-0434-1. DOI: 10.1109/ICICS.2013.6782905.  
Dostupné z URL: <http://ieeexplore.ieee.org/document/6782905/>
- [16] CHRISTODOULOPOULOS, K., BIDKAR, S., LAUTENSCHLAEGER, W., PFEIFFER, Th., a BONK, R. *Demonstration of Industrial-grade Passive Optical Network*. In Optical Fiber Communication Conference (OFC) 2022, s. 1–3. Washington, D.C: Optica Publishing Group, 2022. ISBN: 978-1-55752-466-9. DOI: 10.1364/OFC.2022.Tu2G.6.  
Dostupné z URL: <https://opg.optica.org/abstract.cfm?URI=OFC-2022-Tu2G.6>
- [17] CHUNG, HwanSeok, LEE, Han Hyub, KIM, Kwang Ok, DOO, Kyeong-Hwan, RA, YongWook, a PARK, ChanSung. *TDM-PON-Based Optical Access Network for Tactile Internet, 5G, and Beyond*. IEEE Network, 36(2):76–81, 2022. ISSN: 0890-8044. DOI: 10.1109/MNET.008.2100641.  
Dostupné z URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9785743/>
- [18] CIBIRA, Gabriel, GLESK, Ivan, a DUBOVAN, Jozef. *Dynamic Bandwidth Allocation for C-Band Shared FBG Sensing and Telecommunications*. IEEE Internet of Things Journal, 9(22):23272–23284, 2022. ISSN: 2327-4662. DOI: 10.1109/JIOT.2022.3188385.  
Dostupné z URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9815049/>

- [19] COATES, R.F.W., JANACEK, G.J., a LEVER, K.V. *Monte Carlo simulation and random number generation*. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 6(1):58–66, 1988. ISSN: 07338716. DOI: 10.1109/49.192730.  
Dostupné z URL: <http://ieeexplore.ieee.org/document/192730/>
- [20] DAHAN, David a MAHLAB, Uri. *Security threats and protection procedures for optical networks*. IET Optoelectronics, 11(5):186–200, 2017. ISSN: 1751-8776. DOI: 10.1049/iet-opt.2016.0150.  
Dostupné z URL: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1049/iet-opt.2016.0150>
- [21] DESANTI, Claudio, DU, Liang, GUARIN, Jhon, BONE, Jason, a LAM, Cedric F. *Super-PON an evolution for access networks [Invited]*. Journal of Optical Communications and Networking, 12(10):D66–D77, 2020. ISSN: 1943-0620. DOI: 10.1364/JOCN.391846.  
Dostupné z URL: <https://opg.optica.org/abstract.cfm?URI=jocn-12-10-D66>
- [22] DFCDESIGN. *Cecilie - xPON module*, c2023.  
Dostupné z URL: <https://www.dfcdesign.cz/en/cecilie-xpon-module>
- [23] DIAS, Imali, RUAN, Lihua, RANAWEERA, Chathurika, a WONG, Elaine. *From 5G to beyond: Passive optical network and multi-access edge computing integration for latency-sensitive applications*. Optical Fiber Technology, 75(1):1–12, 2023. ISSN: 10685200. DOI: 10.1016/j.yofte.2022.103191.  
Dostupné z URL: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1068520022003753>
- [24] DRAKULIC, Sanda, TORNATORE, Massimo, a VERTICALE, Giacomo. *Degradation attacks on Passive Optical Networks*. In 2012 16th International Conference on Optical Network Design and Modelling (ONDM), s. 1–6. Colchester, UK: IEEE, 2012. ISBN: 978-1-4673-1442-8. DOI: 10.1109/ONDM.2012.6210184.  
Dostupné z URL: <http://ieeexplore.ieee.org/document/6210184/>
- [25] EFFENBERGER, Frank J. *Industrial Trends and Roadmap of Access*. Journal of Lightwave Technology, 35(5):1142–1146, 2017-3-1. ISSN: 0733-8724. DOI: 10.1109/JLT.2016.2636246.  
Dostupné z URL: <http://ieeexplore.ieee.org/document/7776811/>
- [26] EFFENBERGER, Frank J. a ZHANG, Dezhi. *WDM-PON for 5G Wireless Fronthaul*. IEEE Wireless Communications, 29(2):94–99, 2022. ISSN: 1536-1284.

DOI: 10.1109/MWC.001.2100420.

Dostupné z URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9801726/>

- [27] ELTAIF, Tawfig, ALAGHBARI, Khaled A., ELMABROK, Osama, a HAMIDA, Belal A. *Performance Comparison of Various Optical Codes for Optical CDMA-PON Systems*. In 2021 IEEE 15th Malaysia International Conference on Communication (MICC), s. 71–74. Malajsie: IEEE, 2021-12-1. ISBN: 978-1-6654-2676-3. ISSN: 2694-5282. DOI: 10.1109/MICC53484.2021.9642147.

Dostupné z URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9642147/>

- [28] ERKILINC, M. S., LAVERY, D., SHI, K., THOMSEN, B. C., KILLEY, R. I., SAVORY, S. J., a BAYVEL, P. *Bidirectional wavelength-division multiplexing transmission over installed fibre using a simplified optical coherent access transceiver*. Nature Communications, 8(1):1–10, 2017. ISSN: 2041-1723. DOI: 10.1038/s41467-017-00875-z.

Dostupné z URL: <https://www.nature.com/articles/s41467-017-00875-z>

- [29] FURDEK, Marija, SKORIN-KAPOV, Nina, ZSIGMOND, Szilard, a WOSINSKA, Lena. *Vulnerabilities and security issues in optical networks*. In 2014 16th International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON), s. 1–4. Graz, Rakousko: IEEE, 2014. ISBN: 978-1-4799-5601-2. ISSN: 2161-2064. DOI: 10.1109/ICTON.2014.6876451.

Dostupné z URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/6876451>

- [30] GARG, Amit Kumar a JANYANI, Vijay. *Adaptive bandwidth mechanism using dual rate OLT for energy efficient WDM-TDM passive optical network*. Telecommunication Systems, 66(4):657–670, 2017. ISSN: 1018-4864. DOI: 10.1007/s11235-017-0316-1.

Dostupné z URL: <http://link.springer.com/10.1007/s11235-017-0316-1>

- [31] GARG, Amit Kumar, JANYANI, Vijay, ALY, Moustafa H., ABIDIN, N.H. Zainol, KAMIL, Yasmin Mustapha, a RADHOUENE, Massoudi. *Flexible energy-efficient and direct intra-ODN/OPN communication capable TWDM PON architecture with centralized OLT sharing among multiple optical networks*. Optical Fiber Technology, 72(1):1–14, 2022. ISSN: 10685200. DOI: 10.1016/j.yofte.2022.102999.

Dostupné z URL: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1068520022001821>

- [32] GARG, Sukriti a DIXIT, Abhishek. *Bin-Packing-Based Online Dynamic Bandwidth and Wavelength Allocation Algorithm in Super-PON*. IEEE

- Access, 9(1):139379–139392, 2021. ISSN: 2169-3536. DOI: 10.1109/ACCESS.2021.3118461.  
Dostupné z URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9562548/>
- [33] GARIMA, JHA, Vivekanand, a SINGH, Rakesh Kumar. *A novel dynamic bandwidth allocation scheme towards improving the performance of XG-PON system*. Optical Switching and Networking, 47:1–14, 2023. ISSN: 15734277. DOI: 10.1016/j.osn.2022.100715.  
Dostupné z URL: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1573427722000510>
- [34] GERLA, M. a FRATTA, L. *Tree structured fiber optics MANs*. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 6(6):934–943, 1988. ISSN: 07338716. DOI: 10.1109/49.1956.  
Dostupné z URL: <http://ieeexplore.ieee.org/document/1956/>
- [35] GIORGETTI, Alessio, SGAMBELLURI, Andrea, CASELLAS, Ramon, MORRO, Roberto, CAMPANELLA, Andrea, a CASTOLDI, Piero. *Control of open and disaggregated transport networks using the Open Network Operating System (ONOS) [Invited]*. Journal of Optical Communications and Networking, 12(2):A171–A181, 2020. ISSN: 1943-0620. DOI: 10.1364/JOCN.12.00A171.  
Dostupné z URL: <https://opg.optica.org/abstract.cfm?URI=jocn-12-2-A171>
- [36] GRAVALOS, Ilias, YIANNOPOULOS, Konstantinos, PAPADIMITRIOU, Georgios, a VARVARIGOS, Emmanouel A. *A modified max-min fair dynamic bandwidth allocation algorithm for XG-PONs*. In 2014 19th European Conference on Networks and Optical Communications - (NOC), s. 57–62. Milan, Italy: IEEE, 2014. ISBN: 978-1-4799-3872-8. DOI: 10.1109/NOC.2014.6996828.  
Dostupné z URL: <http://ieeexplore.ieee.org/document/6996828/>
- [37] HAN, Shun, LIU, Bo, MAO, Yaya, REN, Jianxin, WU, Xiangyu, XU, Xing, JIANG, Lei, ZHANG, Jingyi, a ZHAO, Jianye. *High-Security Multi-Slot Chaos Encryption With Dynamic Probability for 16-CAP PON*. IEEE Photonics Journal, 12(3):1–10, 2020. ISSN: 1943-0655. DOI: 10.1109/JPHOT.2020.2985662.  
Dostupné z URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9060879/>
- [38] HARRIS, Alan, JONES, David R., HORBATUCK, Keith H., a SIERRA, Andres. *A Novel Wavelength Hopping Passive Optical Network (WH-PON) for Provision of Enhanced Physical Security*. Journal of Optical Communications and Networking, 4(3):289–295, 2012. ISSN: 1943-0620. DOI: 10.1364/JOCN.4.000289.

- Dostupné z URL: <https://opg.optica.org/abstract.cfm?URI=jocn-4-3-289>
- [39] HAYLE, Stotaw Talbachew, MANIE, Yibeltal Chanie, SHAO, Guan-Ming, CHIU, Po-Han, YEH, Tsung-Yuan, YOU, Song-Lin, a PENG, Peng-Chun. *Integration of fiber and FSO network with fault-protection for optical access network*. Optics Communications, 484(1):1–5, 2021. ISSN: 00304018. DOI: 10.1016/j.optcom.2020.126676.  
Dostupné z URL: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0030401820310944>
- [40] HIRAFUJI, Raisa O. C., DA CUNHA, Kelvin B., CAMPELO, Divanilson R., DHAINI, Ahmad R., a KHOTIMSKY, Denis A. *The watchful sleep mode*. IEEE Communications Magazine, 53(8):150–157, 2015. ISSN: 0163-6804. DOI: 10.1109/M-COM.2015.7180522.  
Dostupné z URL: <http://ieeexplore.ieee.org/document/7180522/>
- [41] HO, Keang-Po, WAY, Winston I., TONG, Franklin F., CHAN, Chun-Kit, TONG, Franklin F., WILLNER, Alan E., a CHEN, Lian-Kuan. *Exact analysis of homodyne-cross-talk-induced penalty in optical networks*. In Proc. SPIE 3420, Optical Fiber Communication, s. 72–76. USA: SPIE, 1998. DOI: 10.1117/12.312832.  
Dostupné z URL: <http://proceedings.spiedigitallibrary.org/proceeding.aspx?doi=10.1117/12.312832>
- [42] HOOD, Dave a TROJER, Elmar. Gigabit-capable passive optical networks. Hoboken: Wiley, c2012, 1st edition ed. ISBN: 978-0470936870.
- [43] HORVATH, Tomas, KRKOS, Radko, a DUBRAVEC, Lubos. *Deep data analysis in gigabit passive optical networks*. Optica Applicata, 47(1):157–170, 2017. DOI: 10.5277/oa170114.
- [44] HORVATH, Tomas, MUNSTER, Petr, DUBRAVEC, Lubos, a FILKA, Miloslav. *Novel rogue optical network unit detection algorithm for gigabit passive optical networks*. Optica Applicata, 46(3):421–433, 2016. DOI: 10.5277/oa160309.
- [45] HOSSEN, Monir a HANAWA, Masanori. *Dynamic Bandwidth Allocation Algorithm With Proper Guard Time Management Over Multi-OLT PON-Based Hybrid FTTH and Wireless Sensor Networks*. Journal of Optical Communications and Networking, 5(7):802–812, 2013. ISSN: 1943-0620. DOI: 10.1364/JOCN.5.000802.

Dostupné z URL: <https://opg.optica.org/abstract.cfm?URI=jocn-5-7-802>

- [46] HOUTSMA, Vincent, VAN VEEN, Doutje, a HARSTEAD, Ed. *Recent Progress on Standardization of Next-Generation 25, 50, and 100G EPON*. Journal of Lightwave Technology, 35(6):1228–1234, 2017. ISSN: 0733-8724. DOI: 10.1109/JLT.2016.2637825.  
Dostupné z URL: <http://ieeexplore.ieee.org/document/7779079/>
- [47] HUMBLET, P.A. a AZIZOGLU, M. *On the bit error rate of lightwave systems with optical amplifiers*. Journal of Lightwave Technology, 9(11):1576–1582, 1991. ISSN: 07338724. DOI: 10.1109/50.97649.  
Dostupné z URL: <http://ieeexplore.ieee.org/document/97649/>
- [48] HUNG, Nguyen T., STANTON, Scott, LE, Son T., HAIGH, Paul A., TIEN, Ho P., VIEN, Nguyen D.N., a TUAN, Nguyen V. *High-speed PAM4 transmission using directly modulated laser and artificial neural network nonlinear equaliser*. Optics & Laser Technology, 157:108642, 2023. ISSN: 0030-3992. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2022.108642>.  
Dostupné z URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0030399222007885>
- [49] IDATE. *IDATE DigiWorld*, 2022.  
Dostupné z URL: <https://en.idate.org/tag/ftth-en/>
- [50] IEEE. *IEEE P802.3ca 50G-EPON Task Force Baseline Proposals & Technical Motions*, 2016.  
Dostupné z URL: [https://www.ieee802.org/3/ca/public/living\\_documents/motions.shtml](https://www.ieee802.org/3/ca/public/living_documents/motions.shtml)
- [51] IEEE. *IEEE P802.3ca 50G-EPON Task Force Meeting Materials*, 2016.  
Dostupné z URL: [https://www.ieee802.org/3/ca/public/meeting\\_archive/2016/05/index.shtml](https://www.ieee802.org/3/ca/public/meeting_archive/2016/05/index.shtml)
- [52] INOUE, K., NAKANISHI, K., ODA, K., a TOBA, H. *Crosstalk and power penalty due to fiber four-wave mixing in multichannel transmissions*. Journal of Lightwave Technology, 12(8):1423–1439, 1994. ISSN: 07338724. DOI: 10.1109/50.317531.  
Dostupné z URL: <http://ieeexplore.ieee.org/document/317531/>
- [53] ISMAIL, N. A., ZIN, N. A. M., IDRUS, S. M., IQBAL, F., a BUTT, R. A. *Review on Dynamic Bandwidth Allocation and Energy Efficient Schemes for ITU PON*.



- In 2018 International Conference on Radar, Antenna, Microwave, Electronics, and Telecommunications (ICRAMET), s. 131–134. Serpong, Indonésie: IEEE, 2018. ISBN: 978-1-5386-6519-0. DOI: 10.1109/ICRAMET.2018.8683920.  
Dostupné z URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8683920/>
- [54] ITU. *G.987.3: 10-Gigabit-capable passive optical networks (XG-PON): Transmission convergence (TC) layer specification*, 2014.  
Dostupné z URL: <https://www.itu.int/rec/T-REC-G.987.3/en>
- [55] ITU. *International Telecommunication Union G.984.5: Gigabit-capable passive optical networks (G-PON): Enhancement band*, 2014.  
Dostupné z URL: <https://www.itu.int/rec/T-REC-G.984.5-201405-I/en>
- [56] ITU. *G.9804.1: Higher speed passive optical networks - Requirements*, 2019.  
Dostupné z URL: <https://www.itu.int/rec/T-REC-G.9804.1-201911-I/en>
- [57] ITU. *G.Sup64: PON transmission technologies above 10 Gb/s per wavelength*. online, 2019.  
Dostupné z URL: <https://www.itu.int/rec/T-REC-G.Sup64-201802-I>
- [58] ITU. *G.9804.2: Higher speed passive optical networks - Common transmission convergence layer specification*, 2021.  
Dostupné z URL: <https://www.itu.int/rec/T-REC-G.9804.2/en>
- [59] ITU. *G.9804.3: 50-Gigabit-capable passive optical networks (50G-PON): Physical media dependent (PMD) layer specification*, 2021.  
Dostupné z URL: <https://www.itu.int/rec/T-REC-G.9804.3/en>
- [60] ITU. *G.989.3: 40-Gigabit-capable passive optical networks (NG-PON2): Transmission convergence layer specification*, 2021.  
Dostupné z URL: <https://www.itu.int/rec/T-REC-G.989.3/en>
- [61] JAIN, Shweta, EFFENBERGER, Frank, SZABO, Andrea, FENG, Zhishan, FORCUCCI, Albert, GUO, Wei, LUO, Yuanqiu, MAPES, Robert, ZHANG, Yixin, a O'BYRNE, Vincent. *World's First XG-PON Field Trial*. *Journal of Lightwave Technology*, 29(4):524–528, 2011. ISSN: 0733-8724. DOI: 10.1109/JLT.2010.2104313.  
Dostupné z URL: <http://ieeexplore.ieee.org/document/5692799/>
- [62] JIANG, Ming, LUO, Yuanqiu, ZHANG, Dezhi, EFFENBERGER, Frank, JIN, Jialiang, a ANSARI, Nirwan. *Enabling Next-Generation Industrial Networks with Industrial PON*. *IEEE Communications Magazine*, 61(4):129–135, 2023. ISSN:

0163-6804. DOI: 10.1109/MCOM.005.2200331.

Dostupné z URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/10018331/>

- [63] KAVEHRAD, M. a SUNDBERG, C. *A passive star-configured optical local area network using carrier sense multiple access with a novel collision detector*. Journal of Lightwave Technology, 5(11):1549–1563, 1987. ISSN: 0733-8724. DOI: 10.1109/JLT.1987.1075450.  
Dostupné z URL: <http://ieeexplore.ieee.org/document/1075450/>
- [64] KNUTH, Donald Ervin. The art of computer programming. Upper Saddle River, NJ: Addison-Wesley, c1998, 3rd ed ed. ISBN: 978-0201896848.
- [65] KONSHIN, Sergey, YAKUBOVA, M.Z., NISHANBAYEV, T.N., a MANANKOVA, O.A. *Research and Development of an IP network model based on PBX Asterisk on the Opnet Modeler simulation package*. In 2020 International Conference on Information Science and Communications Technologies (ICISCT), s. 1–5. Tashkent, Uzbekistan: IEEE, 2020-11-4. ISBN: 978-1-7281-9969-6. DOI: 10.1109/ICISCT50599.2020.9351405.  
Dostupné z URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9351405/>
- [66] KOVACS, Istvan Bence, FARUK, Md. Saifuddin, a SAVORY, Seb J. *A Minimal Coherent Receiver for 200 Gb/s/λ PON Downstream With Measured 29 dB Power Budget*. IEEE Photonics Technology Letters, 35(5):257–260, 2023-3-1. ISSN: 1041-1135. DOI: 10.1109/LPT.2023.3238666.  
Dostupné z URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/10023536/>
- [67] KOYAMA, F. a OGA, K. *Frequency chirping in external modulators*. Journal of Lightwave Technology, 6(1):87–93, 1988. ISSN: 07338724. DOI: 10.1109/50.3969.  
Dostupné z URL: <http://ieeexplore.ieee.org/document/3969/>
- [68] KUMARI, Meet a ARYA, Vivek. *Design of ring-based 1 Tbps hybrid PON-FSO fault protection system using add/drop multiplexer*. Optical and Quantum Electronics, 55(2):1–45, 2023. ISSN: 0306-8919. DOI: 10.1007/s11082-022-04408-x.  
Dostupné z URL: <https://link.springer.com/10.1007/s11082-022-04408-x>
- [69] KUNDRAT, Jan, HAVLIS, Ondrej, JEDLINSKY, Jaroslav, a VOJTECH, Josef. *Opening up ROADMs: Let Us Build a Disaggregated Open Optical Line System*. Journal of Lightwave Technology, 37(16):4041–4051, 2019. ISSN: 0733-8724.

DOI: 10.1109/JLT.2019.2906620.

Dostupné z URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8675347/>

- [70] KUNDRÁT, Jan, VAŠKO, Michal, KREJČÍ, Radek, KUBERNÁT, Václav, PECKA, Tomáš, HAVLIŠ, Ondřej, ŠLAPÁK, Martin, JEDLINSKÝ, Jaroslav, a VOJTĚCH, Josef. *Opening up ROADMs: streaming telemetry [Invited]*. Journal of Optical Communications and Networking, 13(10):E81–E93, 2021. ISSN: 1943-0620. DOI: 10.1364/JOCN.425167.  
Dostupné z URL: <https://opg.optica.org/abstract.cfm?URI=jocn-13-10-E81>
- [71] LATIF, Md. Faiz Zufadly Bin Hj Abdul, NEWAZ, S. H. Shah, MOHAMMED, Alaelddin F. Y., WAN, Au Thien, a OMAR, Saiful. *Understanding QoS and Energy Saving Performance in FiWi Access Network with Sleep Mode Enabled ONUs*. In 2021 International Conference on Electronics, Communications and Information Technology (ICECIT), s. 1–4. Bangladés: IEEE, 2021. ISBN: 978-1-6654-2363-2. DOI: 10.1109/ICECIT54077.2021.9641433.  
Dostupné z URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9641433/>
- [72] LAU, Alan Pak Tao a KHAN, Faisal Nadeem. *Machine Learning for Future Fiber-Optic Communication Systems*. USA: Academic Press, 2022, first ed. ISBN: 978-0-323-85227-2.
- [73] LEE, Jie Hyun, PARK, Heuk, KANG, Sae-Kyoung, LEE, Joon Ki, a CHUNG, Hwan Seok. *Experimental demonstration of wavelength domain rogue-free ONU based on wavelength-pairing for TDM/WDM optical access networks*. Optics Express, 23(24):31163–31170, 2015. ISSN: 1094-4087. DOI: 10.1364/OE.23.031163.  
Dostupné z URL: <https://opg.optica.org/abstract.cfm?URI=oe-23-24-31163>
- [74] LEENHEER, Marc De, TOFIGH, Tom, a PARULKAR, Guru. *Open and Programmable Metro Networks*. In Optical Fiber Communication Conference, s. Th1A.7–9. Washington, D.C: OSA, 2016. ISBN: 978-1-943580-07-1. DOI: 10.1364/OFC.2016.Th1A.7.  
Dostupné z URL: <https://opg.optica.org/abstract.cfm?URI=OFC-2016-Th1A.7>
- [75] LELIGOU, H. C., LINARDAKIS, Ch., KANONAKIS, K., ANGELOPOULOS, J. D., a ORPHANOUDAKIS, Th. *Efficient medium arbitration of FSAN-compliant GPONs*. International Journal of Communication Systems, 19(5):603–617, 2006. ISSN: 1074-5351. DOI: 10.1002/dac.761.

Dostupné z URL: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/dac.761>

- [76] LI, Borui, NESSET, Derek, LIU, Dekun, YE, Zhicheng, a LI, Liangchuan. *DSP Enabled Next Generation Flexible PON for 50G and Beyond*. In Optical Fiber Communication Conference (OFC) 2022, s. M3G.1–4. Washington, D.C: Optica Publishing Group, 2022. ISBN: 978-1-55752-466-9. DOI: 10.1364/OFC.2022.M3G.1.

Dostupné z URL: <https://opg.optica.org/abstract.cfm?URI=OFC-2022-M3G.1>

- [77] LI, Borui, ZHANG, Kuo, ZHANG, Dechao, HE, Jiale, DONG, Xiaolong, LIU, Qian, a LI, Shengping. *DSP enabled next generation 50G TDM-PON*. Journal of Optical Communications and Networking, 12(9):D1–D8, 2020. ISSN: 1943-0620. DOI: 10.1364/JOCN.391904.

Dostupné z URL: <https://opg.optica.org/abstract.cfm?URI=jocn-12-9-D1>

- [78] LI, Yanlong, HUA, Nan, ZHAO, Chen, WANG, Haotao, LUO, Ruijie, a ZHENG, Xiaoping. *Real-Time Rogue ONU Identification with 1D-CNN-based Optical Spectrum Analysis for Secure PON*. In Optical Fiber Communication Conference (OFC) 2019, s. 1–3. Washington, D.C: OSA, 2019. ISBN: 978-1-943580-53-8. DOI: 10.1364/OFC.2019.Tu3B.3.

Dostupné z URL: <https://opg.optica.org/abstract.cfm?URI=OFC-2019-Tu3B.3>

- [79] LIMA, Solange Rito a BRIZIDO, Andre Domingos. *IEEE 802.1X Virtual Network Function Development for NG-PON Architecture*. In 2022 International Conference on Software, Telecommunications and Computer Networks (SoftCOM), s. 1–6. Chorvatsko: IEEE, 2022. ISBN: 978-953-290-117-7. ISSN: 1847-358X. DOI: 10.23919/SoftCOM55329.2022.9911396.

Dostupné z URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9911396/>

- [80] LIN, Zi a HUANG, Yuanbo. *Research on asymmetric 10g EPON system*. Proceedings of IC-BNMT, Paper, 2011. DOI: 10.1109/ICBNMT.2011.6155884.

- [81] LINGAS, Nurazmina a UDDIN, M. Rakib. *Sleep Mode on Delay Sensitive Traffic on Optical Network Unit*. In 2022 24th International Conference on Advanced Communication Technology (ICACT), s. 407–410. Korea: IEEE, 2022. ISBN: 979-11-88428-08-3. ISSN: 1738-9445. DOI: 10.23919/ICACT53585.2022.9728879.

Dostupné z URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9728879/>

- [82] LIU, Qiang, WANG, Honggang, SUN, Yantao, a HAN, Tingting. *A Multi-UAVs Communication Network Simulation Platform using OPNET Modeler*. In ICC 2020 - 2020 IEEE International Conference on Communications (ICC), s. 1–6. Dublin, Ireland: IEEE, 2020. ISBN: 978-1-7281-5089-5. ISSN: 1938-1883. DOI: 10.1109/ICC40277.2020.9149416.  
Dostupné z URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9149416/>
- [83] LUO, Yuanqiu, ROBERTS, Hal, GROBE, Klaus, VALVO, Maurizio, NESSET, Derek, ASAKA, Kota, ROHDE, Harald, SMITH, Joe, WEY, Jun Shan, a EFFENBERGER, Frank. *Physical Layer Aspects of NG-PON2 Standards—Part 2: System Design and Technology Feasibility [Invited]*. Journal of Optical Communications and Networking, 8(1):43–52, 2016. ISSN: 1943-0620. DOI: 10.1364/JOCN.8.000043.  
Dostupné z URL: <https://opg.optica.org/abstract.cfm?URI=jocn-8-1-43>
- [84] LUO, Yuanqiu, ZHOU, Xiaoping, EFFENBERGER, Frank, YAN, Xuejin, PENG, Guikai, QIAN, Yinbo, a MA, Yiran. *Time- and Wavelength-Division Multiplexed Passive Optical Network (TWDM-PON) for Next-Generation PON Stage 2 (NG-PON2)*. Journal of Lightwave Technology, 31(4):587–593, 2013. ISSN: 0733-8724. DOI: 10.1109/JLT.2012.2215841.  
Dostupné z URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/6289432/>
- [85] LYU, WeiChao, QIU, Yang, HAN, Jun, DENG, Ning, a XU, Jing. *On the security weaknesses of a power splitting-based passive optical network*. Optik, 174(1):623–629, 2018. ISSN: 00304026. DOI: 10.1016/j.ijleo.2018.08.128.  
Dostupné z URL: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0030402618312786>
- [86] MAFIOLETTI, Diego Rossi, SLYNE, Frank, GILLER, Robin, O’HANLON, Michael, COYLE, David, RYAN, Brendan, a RUFFINI, Marco. *Demonstration of a low latency bandwidth allocation mechanism for mission critical applications in virtual PONs with P4 programmable hardware*. In Optical Fiber Communication Conference (OFC) 2022, s. 1–3. Washington, D.C: Optica Publishing Group, 2022. ISBN: 978-1-55752-466-9. DOI: 10.1364/OFC.2022.M3Z.7.  
Dostupné z URL: <https://opg.optica.org/abstract.cfm?URI=OFC-2022-M3Z.7>
- [87] MARCUSE, D. *Derivation of analytical expressions for the bit-error probability in lightwave systems with optical amplifiers*. Journal of Lightwave Technology,

- 8(12):1816–1823, 1990. ISSN: 07338724. DOI: 10.1109/50.62876.  
Dostupné z URL: <http://ieeexplore.ieee.org/document/62876/>
- [88] MARKI, C. F., ALIC, N., GROSS, M., PAPEN, G., ESENER, S., a RADIC, S. *Performance of NRZ and Duobinary Modulation Formats in Rayleigh and ASE-dominated Dense Optical Links*. In Optical Fiber Communication Conference and Exposition and The National Fiber Optic Engineers Conference, str. OFD6. Optica Publishing Group, 2006.  
Dostupné z URL: <https://opg.optica.org/abstract.cfm?URI=OFC-2006-OFD6>
- [89] MARTINEZ-MATEO, Jesus, CIURANA, Alex, a MARTIN, Vicente. *Quantum Key Distribution Based on Selective Post-Processing in Passive Optical Networks*. IEEE Photonics Technology Letters, 26(9):881–884, 2014. ISSN: 1041-1135. DOI: 10.1109/LPT.2014.2308921.  
Dostupné z URL: <http://ieeexplore.ieee.org/document/6762880/>
- [90] MEDARD, M., MARQUIS, D., BARRY, R.A., a FINN, S.G. *Security issues in all-optical networks*. IEEE Network, 11(3):42–48, 1997. ISSN: 08908044. DOI: 10.1109/65.587049.  
Dostupné z URL: <http://ieeexplore.ieee.org/document/587049/>
- [91] MERAYO, Noemi, AGUADO, Juan Carlos, MIGUEL, Ignacio De, BARROSO, Ramon J. Duran, FEMANDEZ, Patricia, LORENZO, Ruben M., a ABRIL, Evaristo J. *Deployment of an SDN-based GPON control agent to manage network configurations*. In 2022 International Conference on Electrical, Computer, Communications and Mechatronics Engineering (ICECCME), s. 1–5. Maldivy: IEEE, 2022. ISBN: 978-1-6654-7095-7. DOI: 10.1109/ICECCME55909.2022.9988201.  
Dostupné z URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9988201/>
- [92] MIHAI, Stefan, YAQOUB, Mahnoor, HUNG, Dang V., DAVIS, William, TOWAKEL, Praveer, RAZA, Mohsin, KARAMANOGLU, Mehmet, BARN, Balbir, SHETVE, Dattaprasad, PRASAD, Raja V., VENKATARAMAN, Hrishikesh, TRESTIAN, Ramona, a NGUYEN, Huan X. *Digital Twins: A Survey on Enabling Technologies, Challenges, Trends and Future Prospects*. IEEE Communications Surveys and Tutorials, 24(4):2255–2291, 2022. ISSN: 1553-877X. DOI: 10.1109/COMST.2022.3208773.  
Dostupné z URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9899718/>
- [93] MINELLI, Leonardo, ABDELLATIF, Ahmed, a GAUDINO, Roberto. *Optimization of 50G-PON APD-based receivers*. In 2022 Italian Conference on Optics and Photonics (ICOP), s. 1–4. Trento, Itálie: IEEE, 2022. ISBN: 978-1-6654-8881-5.

DOI: 10.1109/ICOP56156.2022.9911721.

Dostupné z URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9911721/>

- [94] MOUSTAKAS, S., WITTE, H.-H., BODLAJ, V., a KULICH, V. *Passive optical star bus with collision detection for CSMA/CD-based local-area networks*. Journal of Lightwave Technology, 3(1):93–100, 1985. ISSN: 0733-8724. DOI: 10.1109/JLT.1985.1074137.  
Dostupné z URL: <http://ieeexplore.ieee.org/document/1074137/>
- [95] NISHIMOTO, Keita, ASAKA, Kota, ICHI KANI, Jun, a TERADA, Jun. *Two-stage Abstraction for Disaggregated Modular OLT Architecture Supporting OpenFlow Control*. In Optical Fiber Communication Conference (OFC) 2020, s. M1K.2–5. Washington, D.C: Optica Publishing Group, 2020. ISBN: 978-1-943580-71-2. DOI: 10.1364/OFC.2020.M1K.2.  
Dostupné z URL: <https://opg.optica.org/abstract.cfm?URI=OFC-2020-M1K.2>
- [96] NUKIB. *Software and hardware of Huawei and ZTE is a security threat*, 2018.  
Dostupné z URL: <https://shorturl.at/wxF0T>
- [97] NVIDIA. *AI-Powered Autonomous Machines at Scale | NVIDIA Jetson AGX Xavier*, c2023.  
Dostupné z URL: <https://www.nvidia.com/en-us/autonomous-machines/embedded-systems/jetson-agx-xavier/>
- [98] OHM, Jens-Rainer a LÜKE, Hans Dieter. *Signalübertragung*. Německo: Springer, 1985, 1 ed. ISBN: 978-3-642-53901-5.
- [99] ONODERA, Yukito, INOUE, Yoshiaki, HISANO, Daisuke, YOSHIMOTO, Naoto, a NAKAYAMA, Yu. *Real-time batch processing at a GPU-based edge with a passive optical network*. J. Opt. Commun. Netw., 15(7):404–414, 2023. DOI: 10.1364/JOCN.476116.  
Dostupné z URL: <https://opg.optica.org/jocn/abstract.cfm?URI=jocn-15-7-404>
- [100] POLO, Victor, TABARES, Santiago, CANALS, Xavier, SEGARRA, Josep, a PRAT, Josep. *Practical Fast and Non-Intrusive ONU Activation Procedure in Coherent udWDM-PON*. IEEE Photonics Technology Letters, 35(8):414–417, 2023-4-15. ISSN: 1041-1135. DOI: 10.1109/LPT.2023.3252274.  
Dostupné z URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/10058589/>

- [101] REUTERS. *U.S. bans new Huawei, ZTE equipment sales, citing national security risk*, 2022.  
Dostupné z URL: <https://shorturl.at/zHLY7>
- [102] RIVERBED. *Digital Experience Innovation & Acceleration / Riverbed*, c2023.  
Dostupné z URL: <https://www.riverbed.com/>
- [103] RÓKA, Rastislav. *Performance Analysis of TDM-PON Protection Schemes by Means of the PON Network Availability Evaluator*. In Proceedings of Seventh International Congress on Information and Communication Technology, s. 295–303. Singapore: Springer Nature Singapore, 2023. ISBN: 978-981-19-2393-7. DOI: 10.1007/978-981-19-2394-4\_27.  
Dostupné z URL: [https://link.springer.com/10.1007/978-981-19-2394-4\\_27](https://link.springer.com/10.1007/978-981-19-2394-4_27)
- [104] RORABAUGH, C. Britton. *Digital filter designer's handbook*. New York: McGraw-Hill, c1997, 2nd ed ed. ISBN: 978-0070538061.
- [105] ROSALES, Ricardo, CANO, Ivan, NESSET, Derek, BRENOT, Romain, DUBROVINA, Natalia, DURÁN-VALDEIGLESIAS, Elena, a DEBREGEAS, Helene. *Achieving high budget classes in the downstream link of 50G-PON*. *Journal of Optical Communications and Networking*, 13(8):D13–D21, 2021. ISSN: 1943-0620. DOI: 10.1364/JOCN.426009.  
Dostupné z URL: <https://opg.optica.org/abstract.cfm?URI=jocn-13-8-D13>
- [106] ROSLYAKOV, Aleksandr V., MARYKOV, Mikhail V., BURDIN, Vladimir A., BOURDINE, Anton V., MOROZOV, Oleg G., a SULTANOV, Albert. *OLT virtualization in 5G networks*. In *Optical Technologies for Telecommunications 2021*, s. 30–34. USA: SPIE, 2021. ISBN: 9781510656451. DOI: 10.1117/12.2631986.  
Dostupné z URL: <https://www.spiedigitallibrary.org/conference-proceedings-of-spie/12295/2631986/OLT-virtualization-in-5G-networks/10.1117/12.2631986.full>
- [107] ROZHLAS. *Speciál: Výrobky Huawei jako bezpečnostní hrozba?*, 2018.  
Dostupné z URL: <https://plus.rozhlas.cz/special-vyrobky-huawei-jako-bezpecnostni-hrozba-7710288>
- [108] SARKAR, Debanjan, METYA, Sanjeev Kumar, NAGARAJ, Subramanyam, a PREM, P. K. Anand. *Evolution of TDM-PON to WDM-PON Using Downstream MSK and Remodulated Upstream ASK*. In *Optical and Wireless Technologies*, s. 133–141. Singapore: Springer Nature Singapore, 2023. ISBN:



- 978-981-19-1644-1. DOI: 10.1007/978-981-19-1645-8\_14.  
 Dostupné z URL: [https://link.springer.com/10.1007/978-981-19-1645-8\\_14](https://link.springer.com/10.1007/978-981-19-1645-8_14)
- [109] SHARMA, Raju, PATHAK, Monika, a GUPTA, Anuj Kumar. *Performance Analysis of TDM-PON and WDM-PON*. In Mobile Radio Communications and 5G Networks, s. 243–253. Singapore: Springer Nature Singapore, 2022. ISBN: 978-981-16-7017-6. DOI: 10.1007/978-981-16-7018-3\_19.  
 Dostupné z URL: [https://link.springer.com/10.1007/978-981-16-7018-3\\_19](https://link.springer.com/10.1007/978-981-16-7018-3_19)
- [110] SIKDER, Somali, SARKAR, Madhumita, a GHOSH, Shila. *Design and performance analysis of BPON using transposed modified walsh code*. Optik, 261(1):1–13, 2022. ISSN: 00304026. DOI: 10.1016/j.ijleo.2022.169047.  
 Dostupné z URL: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S003040262200417X>
- [111] STERN, J.R., HOPPITT, C.E., PAYNE, D.B., REEVE, M.H., a OAKLEY, K. *TPON-a passive optical network for telephony*. In 1988 Fourteenth European Conference on Optical Communication, ECOC 88 (Conf. Publ. No.292), s. 203–206 vol.1. 1988.
- [112] SU, Chen, ZHANG, Jiawei, a JI, Yuefeng. *Time-aware deterministic bandwidth allocation scheme in TDM-PON for time-sensitive industrial flows*. Journal of Optical Communications and Networking, 15(5):255–267, 2023. ISSN: 1943-0620. DOI: 10.1364/JOCN.481996.  
 Dostupné z URL: <https://opg.optica.org/abstract.cfm?URI=jocn-15-5-255>
- [113] SU, Chen, ZHANG, Jiawei, YU, Hao, TALEB, Tarik, a JI, Yuefeng. *Time-Aware Deterministic Bandwidth Allocation Scheme for Industrial TDM-PON*. In 2022 European Conference on Optical Communication (ECOC), s. 1–4. 2022.
- [114] SUZUKI, Takahiro, KIM, Sang-Yuep, ICHI KANI, Jun, a TERADA, Jun. *Demonstration of Fully Softwarized 10G-EPON PHY Processing on a General-Purpose Server for Flexible Access Systems*. Journal of Lightwave Technology, 38(4):777–783, 2020-2-15. ISSN: 0733-8724. DOI: 10.1109/JLT.2019.2948333.  
 Dostupné z URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8877816/>
- [115] SUZUKI, Takahiro, KIM, Sang-Yuep, ICHI KANI, Jun, a YOSHIDA, Tomoaki. *Low-Latency PON PHY Implementation on GPUs for Fully Software-Defined Access Networks*. IEEE Network, 36(2):108–114, 2022. ISSN: 0890-8044. DOI:

- 10.1109/MNET.002.2100538.  
Dostupné z URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9785744/>
- [116] SUZUKI, Takahiro, KOYASAKO, Yushi, NISHIMOTO, Keita, ASAKA, Kota, YAMADA, Takashi, ICHI KANI, Jun, SHIMADA, Tatsuya, a YOSHIDA, Tomoaki. *Demonstration of IEEE PON Abstraction for SDN Enabled Broadband Access (SEBA)*. Journal of Lightwave Technology, 39(20):6434–6442, 2021. ISSN: 0733-8724. DOI: 10.1109/JLT.2021.3104298.  
Dostupné z URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9512472/>
- [117] T-MOBILE. *Nová éra internetu je tady!*, 2023.  
Dostupné z URL: <https://www.t-mobile.cz/fiber8000>
- [118] TAN, A.H.H. *SUPER PON-a fiber to the home cable network for CATV and POTS/ISDN/VOD as economical as a coaxial cable network*. Journal of Lightwave Technology, 15(2):213–218, 1997. ISSN: 07338724. DOI: 10.1109/50.554326.  
Dostupné z URL: <http://ieeexplore.ieee.org/document/554326/>
- [119] TAN, Li. Digital signal processing: fundamentals and applications. Boston: Academic Press, c2008, 1 ed. ISBN: 978-0-12-374090-8.
- [120] TANG, Lun, DU, Yucong, LIU, Qinghai, LI, Jinyu, LI, Shirui, a CHEN, Qianbin. *Digital Twin: Assisted Resource Allocation for Network Slicing in Industry 4.0 and Beyond Using Distributed Deep Reinforcement Learning*. IEEE Internet of Things Journal, 1(10):1–8, 2023. ISSN: 2327-4662. DOI: 10.1109/JIOT.2023.3274163.
- [121] USMAN, Auwalu, ZULKIFLI, Nadiatulhuda, SALIM, Mohd Rashidi, a KHAIRI, Kharina. *Fiber Fault Monitoring for Passive Optical Network using a Kernel-Based Support Vector Machine*. In 2021 26th IEEE Asia-Pacific Conference on Communications (APCC), s. 211–216. Kuala Lumpur, Malajsie: IEEE, 2021-10-11. ISBN: 978-1-7281-7254-5. ISSN: 2163-0771. DOI: 10.1109/APCC49754.2021.9609856.  
Dostupné z URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9609856/>
- [122] USMAN, Auwalu, ZULKIFLI, Nadiatulhuda, SALIM, Mohd Rashidi, a KHAIRI, Kharina. *Fault monitoring in passive optical network through the integration of machine learning and fiber sensors*. International Journal of Communication Systems, 35:1–8, 2022. DOI: 10.1002/dac.5134.
- [123] VAN DER BERG, Rudolf. *Internet Traffic Growth Is Not Out of Control, and Nothing Like Telcos Want You To Believe*, 2022.

Dostupné z URL: <https://www.project-disco.org/european-union/112822-internet-traffic-growth-is-not-out-of-control/>

- [124] VERMA, Dinesh Kumar a GARG, Amit Kumar. *Next-generation WDM-PON optimized architecture for FTTH network with maximal resources for high throughput*. Journal of Optical Communications, 0(0):1–12, 2022-04-20. ISSN: 0173-4911. DOI: 10.1515/joc-2022-0122.  
Dostupné z URL: <https://www.degruyter.com/document/doi/10.1515/joc-2022-0122/html>
- [125] VI20172019072. *Detekce bezpečnostních hrozeb na aktivních prvcích kritických infrastruktur*, 2020.  
Dostupné z URL: [https://starfos.tacr.cz/cs/project/VI20172019072?query\\_code=vidyaac6jjea](https://starfos.tacr.cz/cs/project/VI20172019072?query_code=vidyaac6jjea)
- [126] VI20172020110. *Redukce bezpečnostních hrozeb v optických sítích (člen řešitelského týmu)*, 2017.  
Dostupné z URL: [https://starfos.tacr.cz/cs/project/VI20172020110?query\\_code=sf6iaac6pnoq](https://starfos.tacr.cz/cs/project/VI20172020110?query_code=sf6iaac6pnoq)
- [127] VI20192022135. *Hlubková hardwarová detekce síťového provozu pasivních optických sítí nové generace v kritických infrastrukturách*, 2022.  
Dostupné z URL: [https://starfos.tacr.cz/cs/project/VI20192022135?query\\_code=6mdiaac5xbia](https://starfos.tacr.cz/cs/project/VI20192022135?query_code=6mdiaac5xbia)
- [128] VPIPHOTONICS. *Module reference VPI*, c2023. VPI.
- [129] WANG, Chonggang, WEI, Wei, ZHANG, Weiyi, JIANG, Hongbo, QIAO, Chunming, a WANG, Ting. *Optimal Wavelength Scheduling for Hybrid WDM/TDM Passive Optical Networks*. Journal of Optical Communications and Networking, 3(6):522–532, 2011. ISSN: 1943-0620. DOI: 10.1364/JOCN.3.000522.  
Dostupné z URL: <https://opg.optica.org/abstract.cfm?URI=jocn-3-6-522>
- [130] WANG, Ning, LI, Junwei, LIU, Dekun, WU, Yu, ZHU, Jinglong, LIU, Da, BAI, Lirong, ZHANG, Dechao, LI, Han, a LI, Borui. *A Field Trial of 50G TDM-PON Based 5G Small Cell Backhaul*. In Optical Fiber Communication Conference (OFC) 2022, s. Tu3F.2–5. Washington, D.C: Optica Publishing Group, 2022. ISBN: 978-1-55752-466-9. DOI: 10.1364/OFC.2022.Tu3F.2.  
Dostupné z URL: <https://opg.optica.org/abstract.cfm?URI=OFC-2022-Tu3F.2>

- [131] WEISSBERGER, Alan. *Technology Blog – ComSoc Technology Blog*, 2023.  
Dostupné z URL: <https://techblog.comsoc.org/2023/06/09/ftth-60-of-france-fixed-broadband-market-in-q1-2023/>
- [132] WENKE, Gerhard a KLIMMEK, Marcus. *Considerations on the  $\alpha$ -Factor of Nonideal, External Optical Mach-Zehnder Modulators*. *Journal of Optical Communications*, 17(2):42–48, 1996. ISSN: 2191-6322. DOI: 10.1515/JOC.1996.17.2.42.  
Dostupné z URL: <https://www.degruyter.com/document/doi/10.1515/JOC.1996.17.2.42/html>
- [133] WEY, Jun Shan. *The Outlook for PON Standardization*. *Journal of Lightwave Technology*, 38(1):31–42, 2020. ISSN: 0733-8724. DOI: 10.1109/JLT.2019.2950889.  
Dostupné z URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8889715/>
- [134] WEY, Jun Shan, NESSET, Derek, VALVO, Maurizio, GROBE, Klaus, ROBERTS, Hal, LUO, Yuanqiu, a SMITH, Joe. *Physical Layer Aspects of NG-PON2 Standards—Part 1: Optical Link Design [Invited]*. *Journal of Optical Communications and Networking*, 8(1):33–42, 2016. ISSN: 1943-0620. DOI: 10.1364/JOCN.8.000033.  
Dostupné z URL: <https://opg.optica.org/abstract.cfm?URI=jocn-8-1-33>
- [135] WICHMANN, B. A. a HILL, I. D. *Algorithm AS 183: An Efficient and Portable Pseudo-Random Number Generator*. *Applied Statistics*, 31(2):188–190, 1982. ISSN: 00359254. DOI: 10.2307/2347988.  
Dostupné z URL: <https://www.jstor.org/stable/10.2307/2347988?origin=crossref>
- [136] WONG, Elaine. *Next-Generation Broadband Access Networks and Technologies*. *Journal of Lightwave Technology*, 30(4):597–608, 2012. ISSN: 0733-8724. DOI: 10.1109/JLT.2011.2177960.  
Dostupné z URL: <http://ieeexplore.ieee.org/document/6094146/>
- [137] WONG, Elaine. *Survivable architectures for time and wavelength division multiplexed passive optical networks*. *Optics Communications*, 325(1):152–159, 2014. ISSN: 00304018. DOI: 10.1016/j.optcom.2014.03.084.  
Dostupné z URL: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0030401814003150>

- [138] WONG, Elaine, MONDAL, Sourav, a RUAN, Lihua. *Machine learning enhanced next-generation optical access networks—challenges and emerging solutions [Invited Tutorial]*. Journal of Optical Communications and Networking, 15(2):A49–A62, 2023. ISSN: 1943-0620. DOI: 10.1364/JOCN.470902.  
Dostupné z URL: <https://opg.optica.org/abstract.cfm?URI=jocn-15-2-A49>
- [139] XIAN, Wei, YU, Kan, HAN, Fengling, FANG, Le, HE, Dehua, a HAN, Qing-Long. *Advanced Manufacturing in Industry 5.0: A Survey of Key Enabling Technologies and Future Trends*. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 1(10):1–15, 2023. ISSN: 2327-4662. DOI: 10.1109/TII.2023.3274224.
- [140] ZHANG, Chuanbiao, TANG, Xiongyan, ZHANG, He, ZHANG, Min, SHEN, Shikui, YAN, Shi, a TANG, Yu. *Dynamic fault monitoring method for passive optical network*. Optical Engineering, 62(5):054103, 2023. DOI: 10.1117/1.OE.62.5.054103.  
Dostupné z URL: <https://doi.org/10.1117/1.OE.62.5.054103>
- [141] ZHANG, Chuanbiao, TANG, Xiongyan, ZHANG, Min, a SHEN, Shikui. *Multi-branch monitoring technology of PON based on OTDR*. In Gangxiang Shen, Yongli Zhao, a Minming Zhang, editors, AOPC 2022: Optical Information and Networks, vol. 12562, str. 1256202. International Society for Optics and Photonics, SPIE, 2023. DOI: 10.1117/12.2642507.  
Dostupné z URL: <https://doi.org/10.1117/12.2642507>
- [142] ZHANG, Dezhi, LIU, Dekun, WU, Xuming, a NESSET, Derek. *Progress of ITU-T higher speed passive optical network (50G-PON) standardization*. Journal of Optical Communications and Networking, 12(10):D99–D108, 2020. ISSN: 1943-0620. DOI: 10.1364/JOCN.391830.  
Dostupné z URL: <https://opg.optica.org/abstract.cfm?URI=jocn-12-10-D99>
- [143] ZHANG, Jiawei, LIU, Xiaozhu, LIANG, Minghui, YU, Hao, a Ji, Yuefeng. *Low Latency DWBA Scheme for Mini-Slot Based 5G new Radio in a Fixed and Mobile Converged TWDM-PON*. Journal of Lightwave Technology, 40(1):3–13, 2022. ISSN: 0733-8724. DOI: 10.1109/JLT.2021.3117972.  
Dostupné z URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9563942/>
- [144] ZHANG, Junwen, LI, Guoqiang, XING, Sizhe, a CHI, Nan. *Flexible and adaptive coherent PON for next-generation optical access network [Invited]*. Optical Fiber Technology, 75(1):1–8, 2023. ISSN: 10685200. DOI: 10.1016/j.yofte.2022.103190.

Dostupné z URL: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1068520022003741>

- [145] ZHAO, Jianye, LIU, Bo, MAO, Yaya, REN, Jianxin, XU, Xing, WU, Xiangyu, JIANG, Lei, HAN, Shun, a ZHANG, Jingyi. *High-Security Physical Layer in CAP-PON System Based on Floating Probability Disturbance*. IEEE Photonics Technology Letters, 32(7):367–370, 2020-4-1. ISSN: 1041-1135. DOI: 10.1109/LPT.2020.2974661.

Dostupné z URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9001060/>

- [146] ZHOU, Te, YANG, Chao, CHEN, Honghu, HAN, Yang, BAO, Weihang, a CHENG, Qing. *Performance research on ZigBee wireless sensor network self-organizing network for 220 kV four-circuit transmission lines on the same tower*. Sustainable Energy Technologies and Assessments, 53(1):1–11, 2022. ISSN: 22131388. DOI: 10.1016/j.seta.2022.102302.

Dostupné z URL: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S221313882200354X>

- [147] ZHU, Guojun, PENG, Yunfeng, a JI, Tonghui. *Efficient bandwidth allocation scheme for PON system enabling LAN emulation*. Optics Communications, 526(1):1–5, 2023. ISSN: 00304018. DOI: 10.1016/j.optcom.2022.128900.

Dostupné z URL: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0030401822005697>

- [148] ZHU, Min, GU, Jiahua, CHEN, Bin, a GU, Pingping. *Dynamic Subcarrier Assignment in OFDMA-PONs Based on Deep Reinforcement Learning*. IEEE Photonics Journal, 14(2):1–11, 2022. ISSN: 1943-0655. DOI: 10.1109/J-PPHOT.2022.3148259.

Dostupné z URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9705139/>

- [149] ZHU, Min, GU, Jiahua, a LI, Guixin. *PWC-PON*. IEEE Access, 8(1):206848–206865, 2020. ISSN: 2169-3536. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.3037753.

Dostupné z URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9257494/>

- [150] ZOU, Jim, ELBERS, Jorg-Peter, VEISLLARI, Raimena, BRAUTE, Jan Petter, FONTAINE, Mickael, BJORNSTAD, Steinar, a RITOSA, Patrik. *Field-Trial Evaluation of Low-Latency and Timing-Accurate 100G Ethernet Aggregator for Converged Mobile X-haul*. In 2018 European Conference on Optical Communication (ECOC), s. 1–3. Řím, Itálie: IEEE, 2018. ISBN: 978-1-5386-4862-9. DOI: 10.1109/ECOC.2018.8535392.

Dostupné z URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8535392/>

## Seznam symbolů, veličin a zkratek

<b>Alloc-ID</b>	alokační identifikátor – Allocation Identifier
<b>APD</b>	lavinová dioda – Avalanche Photodiode
<b>ASIC</b>	zákaznický integrovaný obvod – Application Specific Integrated Circuit
<b>BER</b>	bitová chybovost – Bit Error Rate
<b>BIP</b>	sudá parita s prokládáním bitů – Bit-Interleaved even Parity
<b>BufOcc</b>	obsazenost front – Buffer Occupancy
<b>BWmap</b>	přídělení šířky pásma – Bandwidth map
<b>CNN</b>	konvoluční neuronová síť – Convolutional Neural Network
<b>CPON</b>	koherentní pasivní optická síť – Coherent Passive Optical Network
<b>C-RAN</b>	centralizovaná rádiová přístupová síť – Centralized Radio Access Network
<b>CRC</b>	cyklický redundantní součet – Cyclic Redundancy Check
<b>CSM</b>	cyklický režim spánku – Cyclic Sleep Mode
<b>CO</b>	centrální bod poskytovatele služeb – Central Office
<b>CDMA-PON</b>	pasivní přístupová síť založená na kódovém multiplexu – Code-Division Multiple-Access Passive Optical Network
<b>CW</b>	spojitá vlna – Continuous Wave
<b>DBA</b>	dynamická alokace časových slotů – Dynamic Bandwidth Allocation
<b>DBRu</b>	report obsahující aktuální vytížení pro vzestupný směr – Dynamic Bandwidth Report upstream
<b>DFB</b>	laser s rozprostřenou zpětnou vazbou – Distributed Feedback
<b>DGD</b>	skupinové zpoždění – Differential Group Delay
<b>DML</b>	laser s přímou modulací – Directly Modulated Laser
<b>DSL</b>	digitální účastnická přípojka – Digital Subscriber Line
<b>DU</b>	distribuovaná jednotka – Distributed Unit
<b>ECC</b>	kód opravující chyby – Error Correction Code
<b>EDFA</b>	vláknový erbiem dopovaný zesilovač – Erbium Doped Fiber Amplifier
<b>EML</b>	externě modulovaný laser – Externally Modulated Laser
<b>EPON</b>	pasivní optická síť na technologii Ethernet – Ethernet capable Passive Optical Network
<b>FBG</b>	vláknová Braggova mřížka – Fiber Bragg Grating
<b>FEC</b>	dopředná korekce chyb – Forward Error Correction
<b>FER</b>	rámcová chybovost – Frame Error Rate
<b>FS</b>	rámcová podvrstva – Framing Sublayer
<b>FSAN</b>	služby přístupových sítí – Full Service Access Network
<b>FTTA</b>	optické vlákno ukončené v anténě – Fiber to the Antenna

<b>FTTB</b>	optické vlákno do budovy – Fiber to the Building
<b>FTTH</b>	optické vlákno do bytu – Fiber to the Home
<b>FTTx</b>	optické vlákno do ... – Fiber to the ...
<b>FPGA</b>	programovatelná hradlová pole – Field Programmable Gate Array
<b>FWHM</b>	maximální šířka průběhu v polovině jeho výšky – Full Width Half Maximum
<b>FWI</b>	indikace nuceného probuzení – Forced Wake-up Indication
<b>GIANT</b>	algoritmus pro dynamické přidělování časových slotů ve vzestupném směru – GigaPON Access Network
<b>GPON</b>	gigabitová pasivní optická síť – Gigabit capable Passive Optical Network
<b>HEC</b>	hybridní korekce chyb – Hybrid Error Coding
<b>HSP</b>	vysokorychlostní pasivní optické sítě – Higher Speed Passive Optical Network
<b>IEEE</b>	Institut pro elektrotechnické a elektronické inženýrství – Institute of Electrical and Electronics Engineers
<b>IPTV</b>	přenos televize přes Internetový protokol – Internet Protocol Television
<b>ISP</b>	Internet Service Provider – poskytovatel připojení k Internetu
<b>ITU</b>	Mezinárodní telekomunikační unie – International Telecommunication Union
<b>LSB</b>	nejméně významný bit – Least Significant Bit
<b>LOS</b>	ztráta signálu – Loss of Signal
<b>MPM</b>	vzájemná koexistence dílčích doporučení pasivních optických sítí v rámci jedné distribuční sítě – Multi PON Module
<b>MSB</b>	nejvýznamnější bit – Most Significant Bit
<b>MSK</b>	hlavní klíč relace – Master Session Key
<b>MZM</b>	Machův–Zehnderův modulátor – Mach–Zehnder Modulator
<b>NG-PON2</b>	pasivní optická síť druhé generace – Next Generation PON Stage 2
<b>NRZ</b>	linkový kód bez návratu k nule – Non Return Zero
<b>OBBA</b>	abstrakce širokopásmového připojení – Open Broadband Broadband Access Abstraction
<b>OC</b>	řízení provozu – Operation Control
<b>ODN</b>	optická distribuční síť – Optical Distribution Network
<b>OFC</b>	konference zaměřená na optické komunikace – Optical Fiber Communication Conference
<b>OFDM-PON</b>	pasivní optická síť na principu ortogonálně děleném multiplexu – Orthogonal Frequency Division Multiplexing Passive Optical Network
<b>OLT</b>	optické linkové zakončení – Optical Line Termination

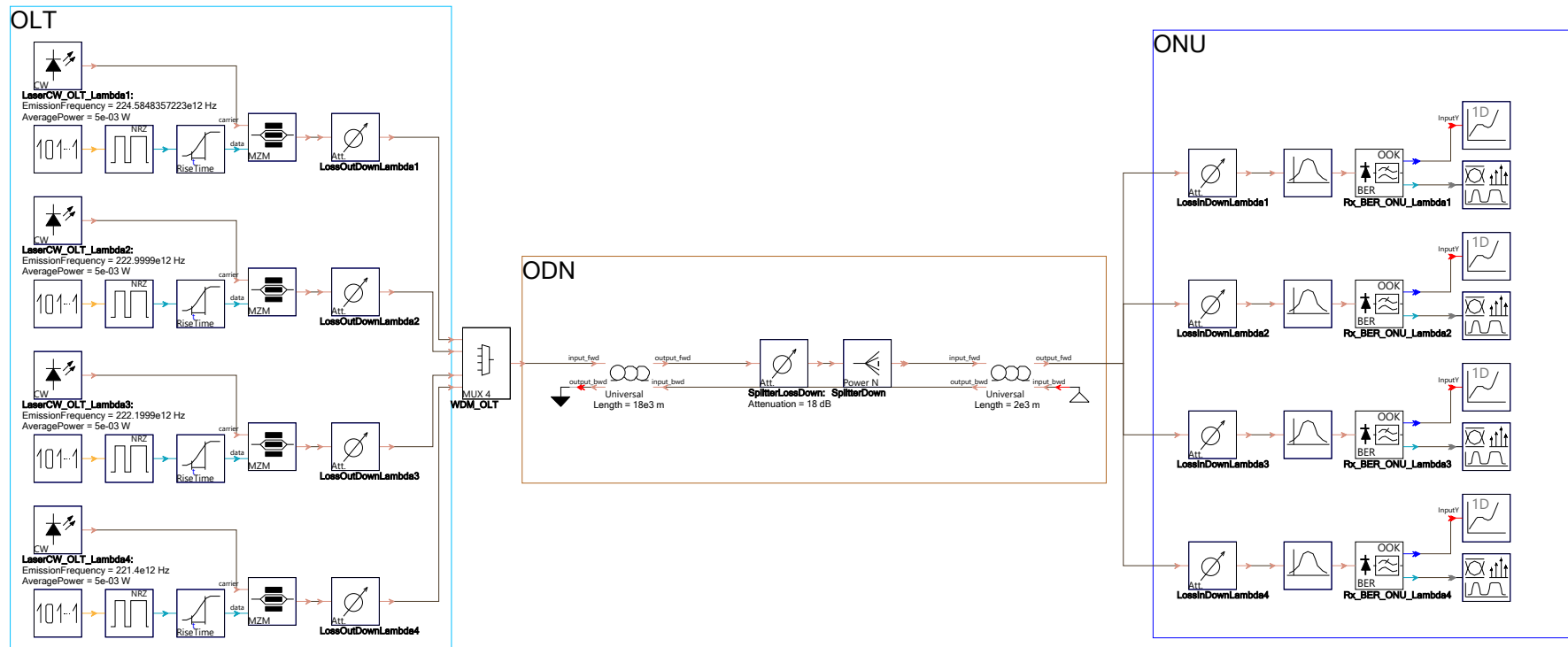


<b>OMCI</b>	řídící rozhraní koncových jednotek – ONU Management Control Interface
<b>ONU</b>	optická síťová jednotka – Optical Network Unit
<b>ONU-ID</b>	identifikátor optické síťové jednotky – Optical Network Unit Identifier
<b>OTDR</b>	optický reflektometr – Optical Time-Domain Reflectometer
<b>PCIe</b>	sběrnice PCI express – Peripheral Component Interconnect Express
<b>PLOAM</b>	správa fyzické vrstvy – Physical Layer Operations, Administrations and Maintenance
<b>PLOAMd</b>	správa fyzické vrstvy v sestupném směru – Physical Layer Operations, Administrations and Maintenance upstream
<b>PLOAMu</b>	správa fyzické vrstvy ve vzestupném směru – Physical Layer Operations, Administrations and Maintenance upstream
<b>PMD</b>	vrstva závislá na fyzickém médiu – Physical Media Dependent
<b>PMD</b>	polarizační vidová disperze – Polarisation Mode Dispersion
<b>PON</b>	pasivní optická síť – Passive Optical Network
<b>PON-ID</b>	identifikátor pasivní optické sítě – Passive Optical Network Identifier
<b>PRBS</b>	generátor pseudonáhodných binárních sekvencí – Pseudorandom Binary Sequence Generator
<b>PSBd</b>	synchronizační blok pro sestupný směr – Physical Synchronization Block downstream
<b>PSBu</b>	synchronizační blok pro vzestupný směr – Physical Synchronization Block upstream
<b>PSP</b>	základní stavy polarizace – Principal States of Polarization
<b>Psync</b>	pole pro synchronizaci v sestupném směru – Physical synchronization
<b>PtMP</b>	bod mnohobod – Point to Multi Point
<b>PtP</b>	bod bod – Point to Point
<b>PUF</b>	fyzická neklonovatelná funkce – Physical Unclonable Function
<b>QAM</b>	kvadrurní amplitudová modulace – Quadrature Amplitude Modulation
<b>QPSK</b>	kvadrurní fázová modulace – Quadrature Phase Shift Keying
<b>QoS</b>	kvalita služby – Quality of Service
<b>RLLR</b>	reaktivní rezervace s nízkou latencí – Reactive Low-Latency Reservation
<b>ROI</b>	identifikace rogue ONU – Rogue ONU Identification
<b>RTD</b>	obousměrné zpoždění – Round-Trip Delay
<b>RU</b>	rádiová jednotka – Radio Unit
<b>SDN</b>	softwarově definovaná síť – Software Defined Networking
<b>SDU</b>	datová jednotka služby – Service Data Unit

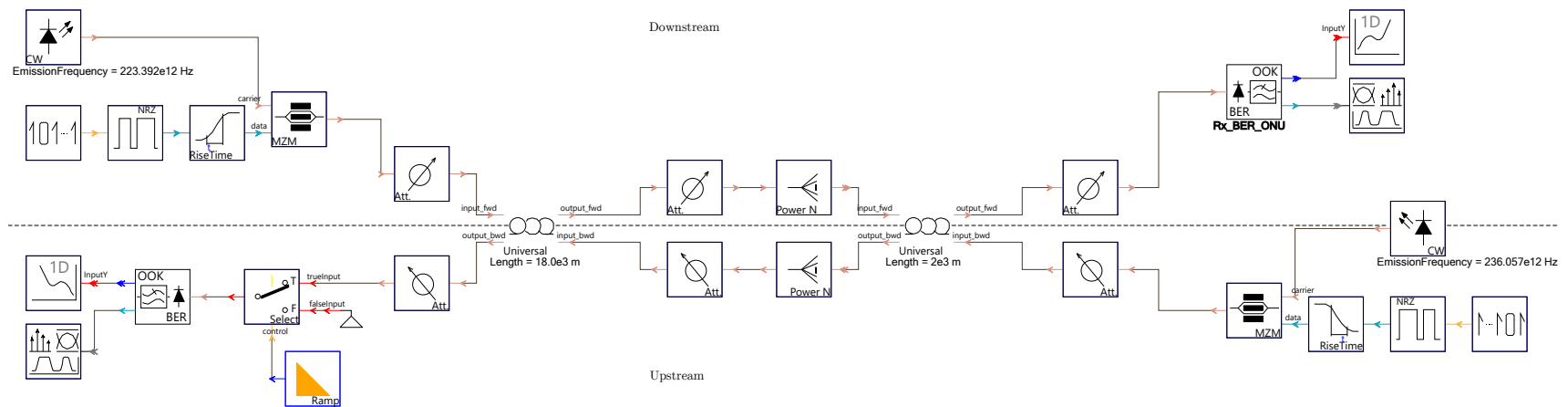
<b>SFC</b>	počítadlo rámců – Super Frame Counter
<b>SFP</b>	technický standard optických vložných transceiverů – Small Form-factor Pluggable
<b>SOP</b>	stav polarizace – State of Polarization
<b>SR</b>	reportování stavu – Status Reporting
<b>SSD</b>	pevný disk bez mechanických částí – Solid-State Drive
<b>TC</b>	přenosová vrstva – Transmission Convergence
<b>TCP</b>	spojově orientovaný protokol – Transmission Control Protocol
<b>T-CONT</b>	přenosový kontejner – Transmission Container
<b>TDM</b>	časově dělený multiplex – Time Division Multiplex
<b>TDMA</b>	vícenásobný přístup s časovým dělením – Time Division Multiple Access
<b>TM</b>	monitorování přenosu – Traffic Monitoring
<b>TDM-PON</b>	pasivní přístupová síť založená na časovém multiplexu – Time Division Multiplex Passive Optical Network
<b>TWDM</b>	Časový a vlnový multiplex – Time Wavelength Division Multiplex
<b>TWDM-PON</b>	pasivní optická síť na principu časového a vlnového multiplexu – Time Wavelength Division Multiplexing Passive Optical Network
<b>UDWDM-PON</b>	pasivní optická síť s využitím hustého vlnového multiplexu – Ultra Dense Wavelength Division Multiplexing Passive Optical Network
<b>VNF</b>	virtualizované síťové funkce – Virtual Network Functions
<b>VoIP</b>	přenos hlasu přes Internetový protokol – Voice over Internet Protocol
<b>vOLTHA</b>	virtuální hardwarová abstrakce OLT jednotky – Virtual Optical Lite Termination Hardware Abstraction
<b>WiFi</b>	obchodní označení pro IEEE 802.11b – WiFi
<b>WDM</b>	vlnově dělený multiplex – Wavelength Division Multiplexing
<b>WDM-PON</b>	pasivní přístupová síť založená na vlnovém multiplexu – Wavelength Division Multiplex Passive Optical Network
<b>XG-PON</b>	pasivní optická síť další generace – Next Generation Passive Optical Network
<b>XGEM</b>	zapouzdřovací metoda XG-PON sítí – XG-PON Encapsulation Method
<b>XG(S)-PON</b>	symetrická pasivní optická síť další generace – Next Generation Symmetric Passive Optical Network

# **A Přílohy**

## **A.1 Finální simulační modely PON sítí**



Obř. A.1: Finální model sítě 100G EPON (simulace pouze sestupného směřu).



Obr. A.2: Finální model obousměrné komunikace v síti HSP-TDM-PON v prostředí VPIphotonics Design Suite™.

## B Obsah přiloženého CD

Habilitace-Horvath .....	kořenový adresář přiloženého CD
└─ bib.....	literatura ve formátu .bib
└─ literatura.bib	
└─ figures.....	obrázky
└─ 50G-ITU-9804-BiDi-komplet-schema-div.pdf	
└─ 50G-ITU-9804-BiDi-ODN-schema-div.pdf	
└─ 50G-ITU-9804-BiDi-OLT-schema-div.pdf	
└─ 50G-ITU-9804-BiDi-ONU-schema-div.pdf	
└─ 100G-EPON-all-in-one-ODN.pdf	
└─ 100G-EPON-all-in-one-OLT.pdf	
└─ 100G-EPON-all-in-one-ONU.pdf	
└─ 100G-EPON-architektura.pdf	
└─ 100G-EPON-VPI.pdf	
└─ Blokove-schema-FPGA.pdf	
└─ Bwmap-NG-PON2.pdf	
└─ cecilie-1200x673.jpg	
└─ dynamic.pdf	
└─ dynamic2.pdf	
└─ GPONtopologieHAB.pdf	
└─ GPONtopologieHAB2.pdf	
└─ Graf_pripojek_habilitace-2015.pdf	
└─ Graf_pripojek_habilitace-2021.pdf	
└─ Graf-rychlosti-habilitace.pdf	
└─ graf-vyvoj-pripojek-cas.pdf	
└─ HSPON-architektura.pdf	
└─ HSPON-vrstvovy-model.pdf	
└─ Lambdy-HSP-pon.pdf	
└─ NG-PON2-stavy.pdf	
└─ 01-machine-state.pdf	
└─ PLOAMd-NG-PON2.pdf	
└─ RiseTime-blok-VPI-funkce.pdf	
└─ Sestupny-FS-ramec.pdf	
└─ static.pdf	
└─ Static1.pdf	
└─ static2.pdf	
└─ Stavy-Xavier.pdf	
└─ tabulka-HSP-pozadavky.pdf	
└─ vzestupny-FS-burst.pdf	
└─ XAVIER-pon.pdf	
└─ Xavier-PON-testy.pdf	
└─ Xavier-PON-zapojeni.pdf	
└─ xgpon-setup.pdf	
└─ XG-PON-Xavier-final.pdf	
└─ loga .....	loga školy a fakulty

		VUT_symbol_barevne_PANTONE_CZ	
		FEKT-spec-color.pdf	
		text .....	zdrojové textové soubory
			bezp-rizika.tex
			budouci-vyvoj.tex
			cile.tex
			literatura.tex
			prilohy.tex
			reseni.tex
			stav.tex
			uvod.tex
			vysledky.tex
			zaver.tex
			zkratky.tex
		vysledky .....	zdrojové soubory pro grafy
			25G-BER-vs-ODN
			25G-ITU-1270-US
			50G-BER-vs-ODN
			50G-ITU-DS
			100G-BER-vs-ODN
			GPON-OSA
			NG-PON2-M3
			NG-PON2-M6
			NG-PON2-M9
			NG-PON2-M12
			Spektrum-25G
			Spektrum-25G-1270-ITU-9804-US
			Spektrum-25G-1270-ITU-9804-US-nm
			Spektrum-25G-1300-ITU-9804-US
			Spektrum-25G-1300-ITU-9804-US-nm
			Spektrum-25G-EPON
			Spektrum-50G
			Spektrum-50G-EPON
			Spektrum-50G-ITU-9804-DS
			Spektrum-50G-ITU-9804-DS-nm
			Spektrum-100G
			Spektrum-100G-EPON
			Time-P2P-P2MP
			ITU-1270-upstream.txt
			ITU-1300-upstream.txt
		navod.tex .....	návod na používání šablony
		sablona-obhaj.tex .....	hlavní soubor pro sazbu prezentace k obhajobě
		sablona-prace.tex .....	hlavní soubor pro sazbu habilitační práce
		thesis.sty .....	balíček pro sazbu kvalifikačních prací
		variable.tex .....	soubor pro výsázení abstraktů, klíčových slov apod.