



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

NÁVRH LABORATORNÍCH ÚLOH PRO PŘEDMĚT SLUŽBY TELEKOMUNIKAČNÍCH SÍTÍ

DESIGN OF LABORATORY ASSIGNMENTS FOR THE COURSE SERVICES OF TELECOMMUNICATION
NETWORKS

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Tomáš Rubínek

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Tomáš Horváth, Ph.D.

BRNO 2025

Diplomová práce

magisterský navazující studijní program **Telekomunikační a informační technika**

Ústav telekomunikací

Student: Bc. Tomáš Rubínek

ID: 195425

Ročník: 2

Akademický rok: 2024/25

NÁZEV TÉMATU:

Návrh laboratorních úloh pro předmět Služby telekomunikačních sítí

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Cílem práce je navrhnout laboratorní úlohy pro předmět Služby telekomunikačních sítí. Hlavním cílem je rozšířit výuku v oblasti služeb telekomunikačních sítí, se zvláštním důrazem na tvorbu laboratorních úloh. V teoretickém úvodu student zpracuje aktuální požadavky na metalické a optické sítě a popíše jejich přístup k poskytování jednotlivých služeb. Zvláštní pozornost bude věnována nasazení pasivních optických sítí (PON). Teoretická část práce bude obsahovat podrobný popis současných vědeckých výzev v oblasti pasivních optických sítí. V praktické části student navrhne laboratorní úlohu zaměřenou na problematiku sítí PON, přičemž bude možné porovnat jednotlivé typy pasivních optických sítí v závislosti na délce optických tras, počtu připojených uživatelů a rychlosti připojení. Cílem diplomové práce je návrh a realizace tří laboratorních úloh pro předmět Služby telekomunikačních sítí.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] CVIJETIC, Milorad. Optical Transmission Systems Engineering. 1. USA: Artech House Print on Demand, 2003. ISBN 978-1580536363.

[2] HOOD, D. a E. TROJER. Gigabit-capable passive optical networks. Hoboken: Wiley, c2012, xi, 431 p. ISBN 978-047-0936-870.

Termín zadání: 10.2.2025

Termín odevzdání: 27.5.2025

Vedoucí práce: doc. Ing. Tomáš Horváth, Ph.D.

prof. Ing. Jiří Mišurec, CSc.
předseda rady studijního programu

UPOZORNĚNÍ:

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

ABSTRAKT

Práce je věnována přípravě materiálů pro laboratorní cvičení předmětu Služby telekomunikačních sítí. Celkem jsou v diplomové práci navrženy tři laboratorní úlohy pro práci v předmětu. Text je rozdělen do sedmi kapitol.

První část práce se věnuje návrhu laboratorní úlohy s tematikou pasivních optických sítí. Laboratorní úloha je koncipována jako vstupní úloha, která by měla především umožnit lépe pochopit princip fungování dané problematiky a porozumění jednotlivým prvkům v pasivní optické síti. Dále umožnit seznámení se základními parametry jednotlivých standardů a jejich srovnání.

V druhé laboratorní úloze se pracuje s daty vyčtenými z koherentního optického systému ADVA FSP3000C. Úloha je zaměřena na porozumění fungování koherentního přenosu dat a možnosti vícestavové modulace v optických sítích. V úloze se pracuje s daty z optického přijímače při koherentním přenosu dat v situaci, kdy bylo pomocí robotické ruky silou působeno na optické vlákno. V úloze je využit programovací jazyk Python pro zpracování zadaných dat a s jeho pomocí je úkolem vytvořit grafické závislosti, s jejichž pomocí je možné určit, jak se mění parametry přenosového systému při tlaku na optické vlákno.

Poslední laboratorní úloha je navržena pro vyzkoušení práce se zařízením VeEX VePAL TX300S. Cílem úlohy je vyzkoušet si práci s přístrojem, zjistit, jaké možnosti a druhy testů daný přístroj nabízí, a jaké telekomunikační technologie jsou daným přístrojem podporovány. Při testování různých parametrů je pracováno s přenosem po optickém médiu a pracuje se s technologiemi Ethernet, OTN a Fibre Channel.

Celkově je cílem práce navrhovat úlohy s možností širšího přesahu, které povedou k pochopení daných témat v širokém kontextu. Úlohy by tak neměly být zaměřeny na přesný popis jednotlivých technologií a přesnou definici daných pojmů, ale měly by umožnit dané problematice lépe porozumět a pochopit některé základní parametry a vlastnosti daných technologií, se kterými se pracuje.

KLÍČOVÁ SLOVA

pasivní optické sítě, Služby komunikačních systémů, optická distribuční síť, útlumová bilance, laboratorní cvičení, ADVA FSP3000C, koherentní optický přenos, VePAL TX300S, Python

ABSTRACT

The thesis is focused on the preparation of materials for laboratory exercises in the subject Services of Communication Systems. In total, the thesis proposes three laboratory exercises for the course work. The text is divided into seven chapters.

The first part of the thesis is devoted to the design of a laboratory task with the topic of passive optical networks. The laboratory task is designed as an introductory laboratory task, which should primarily allow a better understanding of the working principle of the topic and an understanding of the individual elements in a passive optical network. Furthermore, it will allow to get familiar with the basic parameters of the different standards and their comparison.

In the second laboratory task, data read from the ADVA FSP3000C coherent optical system is used to understand the operation of coherent data transmission and the possibility of multi-state modulation in optical networks. The task works with data from an optical receiver during coherent data transmission in a situation where a force was applied to an optical fiber using a robotic arm. The task uses the Python programming language to process the given data and with the help of Python, the task is to create graphical dependencies to determine how the parameters of the transmission system change when pressure is applied to the optical fiber.

The last laboratory task is designed to test the work with the VeEX VePAL TX300S. The goal of the exercise is to try working with the device, to find out what options and types of tests the device offers, and what telecommunication technologies are supported by the device. When testing various parameters, the transmission over optical media is worked with and Ethernet, OTN and Fibre Channel technologies are used.

Overall, the aim of the thesis is to design tasks with the possibility of a wider overlap that will lead to an understanding of the topics in a broad context. Therefore, the tasks should not be focused on the exact description of the individual technologies and the exact definition of the concepts, but should allow a better understanding of the topic and some basic parameters and characteristics of the technologies involved.

KEYWORDS

passive optical networks, Services of Communication Systems, optical distribution network, attenuation balance, laboratory exercise, ADVA FSP3000C, coherent optical transmission, VePAL TX300S, Python

RUBÍNEK, Tomáš. *Návrh laboratorních úloh pro předmět Služby telekomunikačních sítí*. Diplomová práce. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav telekomunikací, 2025. Vedoucí práce: doc. Ing. Tomáš Horváth, Ph.D.

Prohlášení autora o původnosti díla

Jméno a příjmení autora: Bc. Tomáš Rubínek
VUT ID autora: 195425
Typ práce: Diplomová práce
Akademický rok: 2024/25
Téma závěrečné práce: Návrh laboratorních úloh pro předmět
Služby telekomunikačních sítí

Prohlašuji, že svou závěrečnou práci jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucí/ho závěrečné práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené závěrečné práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této závěrečné 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*

*Autor podepisuje pouze v tištěné verzi.

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych poděkoval vedoucímu diplomové práce panu doc. Ing. Tomáši Horváthovi, Ph.D. za odborné vedení, konzultace, trpělivost a podnětné návrhy k práci.

Obsah

Úvod	14
1 Přístupové sítě	16
1.1 Fiber to the x	16
1.1.1 Fiber to the home	16
1.2 Pasivní optické sítě (PON)	17
1.2.1 GPON	19
1.2.2 Útlumové třídy v GPON	19
1.2.3 XG-PON	20
1.2.4 XGS-PON	21
1.2.5 NG-PON2	21
1.2.6 HSP	22
1.2.7 Super-PON	22
2 Popis laboratorní úlohy PON	24
2.1 Motivace a cíle laboratorní úlohy	24
2.2 Popis laboratorní úlohy	24
2.3 Odpovědi na vybrané otázky	25
2.4 Příklad řešení	27
3 Zadání laboratorní úlohy PON	37
3.1 Zadání	37
3.2 Teoretický úvod	37
3.3 Pracovní postup	42
3.4 Kontrolní otázky	45
4 Popis laboratorní úlohy Koherentní optický systém	46
4.1 Motivace a cíle laboratorní úlohy	46
4.2 Popis laboratorní úlohy	46
4.3 Řešení a výsledky	48
4.4 Odpovědi na vybrané otázky	57
5 Zadání laboratorní úlohy Koherentní optický systém	59
5.1 Zadání	59
5.2 Teoretický úvod	60
5.2.1 Optické systémy	60
5.2.2 Koherentní optické systémy	61
5.2.3 Optické senzory	62

5.2.4	Distribuované optické senzory	63
5.3	Popis laboratorní úlohy	64
5.3.1	Získání dat pro úlohu	64
5.4	Pracovní postup	67
5.5	Kontrolní otázky	79
6	Popis laboratorní úlohy Měřicí přístroj VeEX VePAL TX300S	80
6.1	Motivace a cíle laboratorní úlohy	80
7	Zadání laboratorní úlohy Měřicí přístroj VeEX VePAL TX300S	81
7.1	Potřebné vybavení	81
7.2	Popis laboratorní úlohy	81
7.3	Zadání	82
7.4	Teoretický úvod	82
7.4.1	Standardizované transceivery	82
7.4.2	Ethernet	83
7.4.3	Synchronous Digital Hierarchy	84
7.4.4	Fibre Channel	84
7.4.5	Optical Transport Network	85
7.5	Pracovní postup	86
7.6	Kontrolní otázky	102
	Závěr	103
	Literatura	106
	Seznam symbolů a zkratk	115
	Seznam příloh	117
A	Laboratorní úloha 1: Šablona pro řešení laboratorní úlohy	118
B	Laboratorní úloha 1: Vyřešená šablona pro řešení úlohy	119
C	Laboratorní úloha 1: Generátor počtu uživatelů v síti	120
D	Laboratorní úloha 2: Zadané soubory pro první část	121
E	Laboratorní úloha 2: Zadané soubory pro druhou část	122
F	Laboratorní úloha 2: Zadaný soubor pro třetí část	123
G	Laboratorní úloha 2: Skript Python pro extrakci dat v první části	124

H	Laboratorní úloha 2: Skript Python pro grafické zobrazení naměřených dat v závislosti na čase v první části	125
I	Laboratorní úloha 2: Skript Python pro extrakci dat v druhé části	126
J	Laboratorní úloha 2: Skript Python pro grafické zobrazení naměřených dat v závislosti na čase v druhé části	127

Seznam obrázků

2.1	Výsledná ztráta v ODN	28
2.2	ODN v úloze (venkovní část) se zvýrazněnou trasou do 4. domu	29
2.3	ODN v úloze (vnitřní část) se zvýrazněnou trasou k ONU	29
2.4	Legenda k obrázkům 2.2 a 2.3	29
2.5	Maximální překlenutelný útlum – řešení	30
2.6	ODN v úloze (venkovní část) se sníženým útlumem a se zvýrazněnou trasou k ONU	32
2.7	ODN v úloze (vnitřní část) se sníženým útlumem a se zvýrazněnou trasou k ONU	32
2.8	Legenda k obr. 2.6 a 2.7	32
2.9	Výsledná ztráta v upravené ODN	33
2.10	Maximální průměrná rychlost na jednoho uživatele – výsledek	34
2.11	Příklad rozdělení 128 uživatelů pro GPON a XGS-PON	36
3.1	ODN v úloze (venkovní část)	41
3.2	ODN v úloze (vnitřní část)	41
3.3	Legenda k obr. 3.1 a 3.2	41
4.1	Závislosti na čase – SNR, Q faktor	48
4.2	Závislosti na čase – výkon, BER, opravené chyby	49
4.3	Závislosti na čase – neopravené bloky	50
4.4	Závislosti na síle – SNR, diferenciální skupinové zpoždění	51
4.5	Závislosti na síle – CFO, Q faktor, výkon	52
4.6	Závislosti na síle – BER, opravené chyby, neopravené bloky	53
4.7	Proměnlivá síla – SNR, diferenciální skupinové zpoždění	54
4.8	Proměnlivá síla – CFO, Q faktor, výkon	55
4.9	Proměnlivá síla – BER, opravené chyby, neopravené bloky	56
5.1	Srovnání konstelačních diagramů jednotlivých druhů modulační [46]	62
5.2	Blokové schéma distribuovaného sensorického systému [49]	63
5.3	Schéma zapojení měření se systémem ADVA a robotickou rukou	64
5.4	Robotická ruka se senzorem tlaku	65
5.5	Senzor tlaku s optickým vláknem	66
5.6	Detail promáčklého vlákna	66
5.7	Optická vlákna méně citlivá na ohyb [59]	67
5.8	Graf časové závislosti výkonu optického signálu na přijímači	75
5.9	Poměr signálu a šumu (SNR) v závislosti na síle působící na vlákno	78
7.1	Příklad SFP modulu – MikroTik S-31DLC20D [66]	82
7.2	Výchozí obrazovku měřicího přístroje VePAL TX300s	86
7.3	Pohled na kartu TX340s	87

7.4	Obrazovka s výběrem testů	88
7.5	Testování optických transceiverů	89
7.6	Ukázka spojky na jednom z LC konektorů	90
7.7	Úvodní obrazovka se spuštěným testem	92
7.8	Úvodní obrazovka s druhým testem nastaveným na Loopback	94
7.9	Nastavení hlavičky u testu Throughput	94
7.10	Spuštěný BERT test s výsledky	97
7.11	Připravená dvě měření současně	99
7.12	Nastavení přenosu OTN	99
7.13	Nastavení testu ODUflex s možností flexibilního přenosové rychlosti	102

Seznam tabulek

1.1	Srovnání standardů pro PON sítě	18
1.2	Hodnoty překlenutého útlumu pro jednotlivé třídy GPON [22]	20
2.1	Určení ztráty optického výkonu	28
2.2	Vysílací výkon a citlivost pro GPON zařízení	30
2.3	Vysílací výkon a citlivost pro XG(S)-PON zařízení	30
2.4	Určení ztráty optického výkonu	31
2.5	Možné rychlosti připojení k internetu	35
3.1	Útlum optického výkonu v optickém vlákně α [dB/km] [31]	39
3.2	Útlum optického výkonu na konektorovém spoji A_C [dB] [31]	39
3.3	Útlum optického výkonu ve sváru A_{Sp} [dB] [31]	39
3.4	Typická ztráta na optickém rozbočovači [31]	40
4.1	Přiřazení nastavené síly robotické ruky a označení souboru v zadání	50

Úvod

Práce je věnována přípravě materiálů pro laboratorní cvičení předmětu Služby telekomunikačních sítí. Celkem jsou v diplomové práci navrženy tři laboratorní úlohy pro práci v předmětu. Text je rozdělen do sedmi kapitol.

První část práce se věnuje návrhu laboratorní úlohy s tematikou pasivních optických sítí.

V první kapitole jsou rozebrány druhy pasivních optických sítí a jejich rozvoj v současnosti. Primárně se věnuje protokolům a technologiím, které jsou využívány i pro samotnou laboratorní úlohu.

Druhá kapitola se již zabývá přímo laboratorním cvičením, které je věnováno pasivním optickým sítím. Nejprve jsou specifikovány cíle a motivace laboratorní úlohy a přínosy, které by samotná úloha měla pro studenty mít. Laboratorní úloha k PON je koncipována jako vstupní laboratorní úloha, která by měla především umožnit lépe pochopit princip fungování dané problematiky a porozumění jednotlivým prvkům v pasivní optické síti. Dále umožnit seznámení se základními parametry jednotlivých standardů a jejich srovnání.

Dále jsou uvedeny kontrolní otázky k dané úloze. Ty jsou jednou ze zásadních částí laboratorní úlohy. Samotná úloha je koncipována právě tak, aby byl student po jejím absolvování schopen na dané otázky odpovědět a aby mu řešení dané úlohy pomohlo zorientovat se v reálné podobě optické distribuční sítě. Porozumět, co nejvíce ovlivňuje útlum optického signálu, jaký úbytek je na jednotlivých prvcích a kolik uživatelů se reálně může připojit k jedné větvi pasivní optické sítě.

Poté je uveden postup, jak může být úloha realizována, včetně uvedení výsledných hodnot a komentářů, pro možnost využití vyučujícím laboratorních cvičení.

Ve třetí kapitole je již uvedena samotná laboratorní úloha, tedy její zadání včetně daných úkolů, teoretického úvodu a postupu, který by měl studentům pomoci při jejím řešení.

V druhé laboratorní úloze v práci se pracuje s daty vyčtenými z koherentního optického systému ADVA FSP3000C. Úloha je zaměřena na porozumění fungování koherentního přenosu dat a možnosti vícecestavové modulace v optických sítích. V úloze se pracuje s daty z optického přijímače při koherentním přenosu dat v situaci, kdy bylo pomocí robotické ruky silou působeno na optické vlákno. V úloze je využit programovací jazyk Python pro zpracování zadaných dat. S jeho pomocí je úkolem vytvořit grafické závislosti. Z těch je možné určit, jak se mění parametry přenosového systému při tlaku na optické vlákno.

Ve čtvrté kapitole je poté popsána úloha, včetně motivací k úloze. Dále jsou zde uvedeny ukázky řešení grafických výstupů, řešení jako pomůcka pro vedoucího laboratorního cvičení a odpovědi na kontrolní otázky k úloze.

V páté kapitole je již samotné zadání laboratorní úlohy, včetně teoretického rozboru k dané problematice. Celá úloha vede k závěrečnému úkolu, kdy je zadáno měření, kdy na vlákno bylo působeno proměnlivou silou. Cílem je na základě získaných údajů popsat, jak bylo s vláknem manipulováno a jak velká síla a jak dlouho na vlákno působila. V závěru kapitoly jsou uvedeny otázky k samotné úloze.

Poslední laboratorní úloha je navržena pro vyzkoušení práce se zařízením VeEX VePAL TX300S. Cílem úlohy je vyzkoušet si práci s přístrojem, zjistit, jaké možnosti a druhy testů daný přístroj nabízí, a jaké telekomunikační technologie jsou daným přístrojem podporovány. Při testování různých parametrů je pracováno s přenosem po optickém médiu a jsou využívány technologie Ethernet, OTN a Fibre Channel.

V šesté kapitole jsou popsány cíle a možnosti dané úlohy.

V sedmé kapitole je již samotné zadání úlohy. V teoretickém úvodu jsou popsány především technologie, které jsou potřebné pro samotnou práci na úloze. Následují jednotlivé úkoly a pracovní postup pro laboratorní úlohu. Na závěr úlohy jsou přidány kontrolní otázky pro shrnutí laboratorní úlohy.

Celkově je cílem práce navrhovat úlohy s možností širšího přesahu, které povedou k pochopení daných témat v širokém kontextu. Úlohy by tak neměly být zaměřeny na přesný popis jednotlivých technologií a přesnou definici daných pojmů, ale měly by umožnit dané problematice lépe porozumět a pochopit některé základní parametry a vlastnosti daných technologií, se kterými se pracuje.

Otázky na závěr úloh jsou koncipovány tak, aby navedly studenty hlouběji se zamyslet nad částí dané úlohy a vedly je k pochopení dané problematiky.

1 Přístupové sítě

Přístupové sítě jsou telekomunikační sítě zajišťující účastníkům připojení k poskytovatelům telekomunikačních služeb.

S ohledem na zvyšující se požadavky na větší šířku pásma, se v minulosti výrazně rozvíjely technologie, které umožňovaly navyšovat přenosové rychlosti v metalických rozvodech. Díky zdokonalování výroby optických vláken, které umožňovalo snižovat útlum v optických sítích, bylo umožněno zvyšovat maximální překlenutelnou vzdálenost. Díky tomu začaly být právě optické technologie nasazovány v telekomunikačních sítích. Optické sítě přináší výrazně větší šířku pásma ve srovnání s metalickými technologiemi. [1]

1.1 Fiber to the x

Pojmem Fiber to the x jsou označovány optické přístupové sítě, kde posledním písmenem jsou rozlišeny různé konfigurace přístupové sítě. V reálném prostředí se můžeme setkat nejčastěji s označením: [2]

- **FFTN (Fiber to the node)** – optické vlákno je zakončeno v šachtě (poslední až 1 km je řešen jinou technologií)
- **FTTC (Fiber to the cabinet)** – optické vlákno je zakončeno v šachtě (posledních až 300 m je řešeno jinou technologií)
- **FFTP (Fiber to the premises)** – používá se ve více případech (nejčastěji jako společné označení pro FTTB a FTTH)
- **FTTB (Fiber to the building/basement)** – optické vlákno je zakončeno v budově (např. v suterénu), na poslední úsek je použita jiná technologie
- **FTTH (Fiber to the home)** – optické vlákno je zakončeno v obytném prostoru nebo kanceláři

1.1.1 Fiber to the home

Fiber to the home bývají označovány sítě, kdy je optické vlákno dovedeno až k obytnému či kancelářskému prostoru. Na rozdíl od FTTB nebo FTTC není na poslední „míli“ použita jiná technologie (metalické vedení), ale optické vlákno je dovedeno přímo na hranici např. bytu. [3]

Fiber to the home je typickým příkladem, kdy jsou využívány pasivní optické sítě pro připojení k internetu.

1.2 Pasivní optické sítě (PON)

Nejtypičtějším příkladem optických sítí jsou aktivní optické sítě (AON – Active Optical Networks). Každý prvek, který je zapojen do aktivní optické sítě, musí být napájen elektrickou energií. V těchto sítích je typicky využíváno propojení **bod – bod** (**PTP** někdy označován též **P2P**). [4] Výhodou spojení bod – bod je vynikající šířka pásma, přináší ovšem vyšší cenu z důvodu většího potřebného množství optických vláken a potřeby napájení jednotlivých prvků elektrickou energií.

Na rozdíl od aktivních optických sítí umožňují pasivní optické sítě, neboli **PON**, rozdělit jednu přístupovou linku mezi více budov nebo uživatelů s minimálními náklady a bez potřeby napájení jednotlivých prvků v síti. Jedná se tak o zástupce **mnohabodových PTM (Point to Multipoint)** sítí. [2] Distribuce signálu je řešena pomocí levných pasivních prvků. Splittery (rozbočovače), které pracují nejen v sestupném směru, kdy je jeden signál z OLT (optického linkového zakončení) rozdělen do požadovaného počtu dílčích vláken k účastníkům, ale i ve vzestupném směru, kdy je signál od účastníků sloučen směrem k linkovému zakončení (OLT). [2]

Pro návrh ODN (optické distribuční sítě) je zásadním faktorem maximální útlum optické sítě. Návrh vychází z překlenutého útlumu mezi jednotkami ONU a OLT — neboli z útlumové třídy prvků. [5] Výpočet útlumu, tzv. útlumové bilance, vychází z vlastností splitterů, svárů, konektorů a optického vlákna.

V současnosti se můžeme potkat se dvěma různými rodinami standardů pro pasivní optické sítě. Jedna z nich je definována Mezinárodní telekomunikační unií ITU, využívá zapouzdření GPON Encapsulation Method (GEM). Druhou z nich jsou standardy zastřešované IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers), které využívají ethernetové rámce. Srovnání jednotlivých standardů je v tabulce 1.1.

Při přímém srovnání GEAPON a GPON můžeme zjistit, že GEAPON se v minulosti rozšířil primárně v Asii. GPON byl využíván především v Severní Americe a v Evropě. [6] I z toho důvodu je v laboratorní úloze pracováno se standardy ITU.

Při srovnání efektivity přenášených dat je výhodou GPON vyšší efektivita využití šířky pásma. U GEAPON se teoretická efektivita pohybuje okolo 60 – 70 %, u GPON je efektivita datového přenosu 80 – 90 %. [6]

Tab. 1.1: Srovnání standardů pro PON sítě

ITU

	GPON [7]	XG-PON [8], [9]	XGS-PON [10]	NG-PON2 [12]	HSP [13]
	G.984	G.987	G.9807.1	G.989	G.9804.x
Rok uvedení	2003	2010	2016	2015	2018
Rychlost stahování [Gbit/s]	2,5	10	10	až 8 · 10	až 50
Rychlost nahrávání [Gbit/s]	1,25/2,5	2,5	10	až 8 · 10	až 50
Vlnová délka download [nm]	1490	1577	1577	1596 – 1603	1340 – 1344
Vlnová délka upload [nm]	1310	1270	1270	1528 – 1540	1260 – 1280 1290 – 1310
Maximální dosah [km]	20	20	20	40	–
Maximální dělicí poměr [-]	1:64	1:256	1:256	1:256	–

IEEE

	1G-EPON [14], [15], [16]	10G-EPON [17], [18]	25G/50G-EPON [19]
	802.3ah	802.3av	802.3ca
Rok uvedení	2003	2009	2020
Rychlost stahování [Gbit/s]	1	10	25/50
Rychlost nahrávání [Gbit/s]	1	1/10	25/50
Vlnová délka download [nm]	1480 – 1500	1575 – 1580	–
Vlnová délka upload [nm]	1260 – 1360	1260 – 1280	–
Maximální dosah [km]	20	20	–

1.2.1 GPON

GPON (gigabit-capable passive optical network) je novější verzí z roku 2003 navazující na standard BPON (z roku 2001). Šířka pásma jednoho spojení je nejčastěji 2,5 Gbit/s download a 1,25 Gbit/s upload. Zřídka se můžeme setkat i se symetrickou variantou 2,5 Gbit/s v obou směrech. [20] Šířka pásma může být sdílána až mezi 64 uživateli s využitím TDMA (time division multiple acces).

Pro download směr je využívána vlnová délka 1490 nm. Pro upload směr je využívána vlnová délka 1310 nm. [21]

1.2.2 Útlumové třídy v GPON

Pro správnou volbu aktivních prvků pro použití v PON byly definovány 3 základní útlumové třídy (označené A, B a C). Ty byly v doporučení ITU-T G.984.2 určeny pro různé rozsahy pasivních optických sítí. [22]

Třída A byla určena pro krátké vzdálenosti a nízké hodnoty překlenutého útlumu.

Třída B byla určena pro střední vzdálenosti a střední hodnoty překlenutého útlumu.

Třída C byla určena pro velké vzdálenosti a velké hodnoty překlenutého útlumu.

V doporučení byly dále specifikovány minimální a maximální hodnoty vysílaného a přijímaného výkonu, který byl specifikován zvláště pro každý směr přenosu. Minimální hranice je určena s ohledem na minimální citlivost optického detektoru tak, aby byla zajištěna menší než maximální požadovaná chybovost přenosu. [22] Maximální hodnota na druhé straně omezuje přebuzení fotodetektoru a jeho poškození.

V praktickém použití třída A nedosáhla širokého využití z důvodu vhodnosti pouze pro velmi malé sítě s limitovaným dosahem. Největšího uplatnění dosáhla třída B, která představovala vyvážené řešení mezi překlenutým útlumem distribuční sítě a pořizovacími a provozními náklady. Problém nastával v případě použití větších rozbočovacích poměrů 1:32 a 1:64, kde při vloženém útlumu na rozbočovači až 16 dB, respektive až 19 dB, vyvolaly potřebu pro použití vyšší třídy C. [22] Ta ale dle specifikací vyžadovala náročnější, a tedy i dražší fotodiody, čímž se zvyšovaly náklady na celou síť.

Řešením byly dva dodatky definující třídu B+ a C+. Třída B+ vyplňuje prostor mezi třídami B a C a umožňuje využití novějších optických prvků, které přinášejí zvýšení překlenutého útlumu. Třída C+ je určena pro použití s vysokými hodnotami rozbočovacích poměrů a překlenutých vzdáleností. [22]

Tab. 1.2: Hodnoty překlenutého útlumu pro jednotlivé třídy GPON [22]

Třída GPON	Rozsah útlumu [dB]
A	5 – 20
B	10 – 25
B+	13 – 28
C	15 – 30
C+	17 – 32

1.2.3 XG-PON

XG-PON je další technologií optických přístupových sítí a poskytuje rychlejší připojení než její předchůdce GPON. Bývá často označován také jako 10G-PON. Je definován v doporučení ITU-T G.987 Mezinárodní telekomunikační unie ITU a vychází ze staršího GPON. V doporučení je pro XG-PON podporována ve standardu maximální délku ODN sítě 20 km. [8] Dělicí poměr na rozbočovači je v porovnání s GPON větší, může dosahovat až 1:256.

Oproti GPON zde byla zvýšená rychlost, kdy download dosahuje 10 Gbit/s a upload 2,5 Gbit/s. Na rozdíl od GPON využívá XG-PON vlnové délky 1577 nm pro download a 1270 pro upload. To umožňuje provozovat současně jak standard GPON, tak i XG-PON pro možnost přechodu ze staršího typu PON na novější. Pro využití více standardů v jedné ODN je třeba na straně OLT zařadit WDM filtr pro rozdělení jednotlivých pásem. [18]

WDM filtry se využívají pro možnost zvýšení přenosové kapacity optického vlákna. Díky jejich použití je možné přenášet více optických signálů s rozdílnými vlnovými délkami přes jedno optické vlákno. Pro multiplexování se využívají nejčastěji dva typy WDM filtrů. Prvním z nich je TFF (Thin-Film Filter), kdy se využívá tenkovrstvých optických filtrů k separaci jednotlivých vlnových délek. Nanášením tenkých vrstev materiálů s rozdílnými indexy lomu dochází ke vzniku interferenčního filtru, který způsobuje, že některé vlnové délky jsou propuštěny a některé jsou odraženy od filtru. [23] Mohou tak být využívány pro multiplexování a i pro demultiplexování optických signálů.

Druhým typem je AWG (Arrayed Waveguide Grating), které jsou složeny z polí vlnovodů. Každý vlnovod má svou specifickou délku a je spojen v mřížkovém uspořádání s ostatními vlnovody. Světelné signály procházející jednotlivými vlnovody mají rozdílnou fázi při výstupu. Dochází tak k vzájemným interferencím a k tomu, že na různých výstupních kanálech jsou obsaženy rozdílné vlnové délky. [24] AWG

filtr může být také použit jak k multiplexaci, tak i k demultiplexaci signálů. Každá vlnová délka (vlnový kanál) může být směřována do specifického výstupního portu a umožňuje tak vytvářet struktury s větším počtem vstupních i výstupních signálů. [25]

TFT filtry bývají využity pro filtraci úzkých vlnových délek. AWG filtry umožňují vytvářet strukturu s větším počtem kanálů i proměnlivou strukturu. TFT filtry jsou naopak jednodušší na výrobu, typická podoba je multiplexace dvou signálů do jednoho výstupu či demultiplexace do dvou výstupů. TFT filtry tak nabízejí ekonomickou variantu pro méně náročné aplikace. AWG filtry naopak umožňují použití v náročnějších situacích s potřebou desítek i stovek kanálů (DWDM a CWDM). [23]

1.2.4 XGS-PON

Je novější verzí standardu XG-PON vydaná v roce 2016. Jedná se o v současnosti nejvíce nasazovaný typ PON. Byl definován jako doporučení ITU-T G.9807.1. Umožňuje symetrické rychlosti pro stahování i nahrávání. Je tak možné využít pro stahování rychlost 10 Gbit/s a stejně tak 10 Gbit/s i pro nahrávání. Využívá stejné vlnové délky jako XG-PON, tedy 1577 nm pro download a 1270 nm pro upload. [10] XGS-PON podporuje současný souběh s technologiemi G-PON, XG-PON i novějším NG-PON2. XGS-PON je na transportní vrstvě založen na stejných transportních vrstvách jako NG-PON2 a XG-PON. Není tedy nutné provádět hardwarové úpravy v transportní vrstvě zařízení pro XGS-PON. Pro downstream jsou prvky ve fyzické vrstvě definovány stejně jako v XG-PON. [10]

1.2.5 NG-PON2

NG-PON2 je doporučení ITU-T z roku 2015. Umožňuje kromě časového multiplexu nově pracovat i s vlnovým multiplexem. NG-PON2 umožňuje spojit až celkem 4 linky o rychlosti 10 Gbit/s na různých vlnových délkách. Může tak být dosaženo rychlosti 40 Gbit/s download a 10 Gbit/s upload. Celkově umožňuje standard i zvýšení na maximálně 8 linek 10 Gbit/s s celkovou rychlostí 80 Gbit/s pro download a 20 Gbit/s pro upload ve specifikaci „extended“ NG-PON2. [26]

V doporučení je umožněna i symetrická verze s maximálními rychlostmi 40 Gbit/s, respektive 80 Gbit/s, pro download i upload. NG-PON2 využívá pro provoz vlnové délky 1596 až 1603 nm pro download směr a 1528 až 1540 nm pro upload. Opět je tedy díky jiným voleným vlnovým délkám umožněna koexistence jak se starším GPON, tak i novějším XG-PON nebo XGS-PON. [27]

1.2.6 HSP

Higher Speed PON, definován Mezinárodní telekomunikační unií ITU jako G.9804, označován též zkráceně jako HSP, je doporučení pro pasivní optické sítě, které dosahují rychlosti až 50 Gbit/s. Na rozdíl od NG-PON2, který využívá TWDM technologii pro zvýšení přenosové rychlosti, je v případě HSP využíváno jednovlnné spojení pro dosažení vysokých přenosových rychlostí.

Důležitou vlastností pro vysokorychlostní optické sítě je možnost koexistence se současnými standardy. HSP systémy je tak možné provozovat v síti se současnými systémy G-PON, XG-PON a XGS-PON nebo 10G-EPON. Pro download směr je v případě 50 Gbit/s HSP vyčleněno pásmo 1340 – 1344 nm. Pro upload je z důvodu koexistence HSP buď se systémem G-PON určen širokopásmový rozsah 1260 – 1280 nm a pro koexistenci s XGS-PON volen rozsah 1290 – 1310 (1298 – 1302 nm úzkopásmově). [19]

Důvodem pro volbu dvou různých šířek pásma je problém s chlazením laserových zdrojů na straně ONU. Volba širokopásmové definice (20 nm) přináší možnost využívat nechlazené vysílače a tím snížit náklady na straně uživatelské jednotky. Úzkopásmová varianta vyžaduje chlazení vysílače v ONU, čímž zvyšuje náklady na pořízení a provoz. Na druhé straně ale přináší vyšší vysílací výkon a díky tomu umožňuje dosáhnout delších překlenutelných optických tras. [28]

1.2.7 Super-PON

Super-PON neboli IEEE P802.3sc je standard, jehož hlavním úkolem byla možnost navýšení dosahu optické sítě z aktuálních 20 km na 50 km. Hlavní motivací je ušetření nákladů na výstavbu a možnost zvýšení pokrytí až na 1024 uživatelů. Přenosové rychlosti umožňují download o rychlosti 10 GBit/s a upload s rychlostí 10 Gbit/s nebo 2,5 Gbit/s. Zásadními prvky jsou možnosti multiplexování, využití pasivních směrovačů pro dělení různých vlnových délek a využití optických zesilovačů.

Super-PON cílí na zvýšení pokrytí oblasti z jediné CO (Central Office – ústředny). Tím je umožněno zjednodušit a zlevnit výstavbu pasivních optických sítí. Rozšíření dosahu je dle ITU specifikací možné i pro technologie GPON a XG(S)-PON. Jedná se ale primárně o možnosti prodloužení dosahu pro odlehlé oblasti, vyžadující aktivní člen vložený do cesty PON. Nedosáhly proto velkého komerčního uplatnění. [19]

Technologie Super-PON přináší možnost přenášet větší množství kanálů přes jedno optické vlákno. Vyžaduje tedy méně optických vláken na pokrytí plochy území. Dále možnost redukovat počet centrálních ústředen, díky čemuž se snižují náklady na výstavbu.

Zásadní nevýhodou Super-PON technologie je vyšší cena ONU jednotky ve srovnání s technologiemi XG(S)-PON nebo 10G-EPON, protože z důvodu WDM potřebuje Super-PON na straně ONU pracovat se zdrojem se stabilizovanými vlnovými délkami laserového vysílače.

Velkou výhodou pro Super-PON je snížení nákladů na budování sítě. To umožňuje WDM, kdy je možné na jedno vlákno připojit až 1024 uživatelů a je tak potřeba méně optických vláken, které by byly v případě využití jiné technologie potřebné pro připojení daného množství uživatelů. Snižují se díky tomu i náklady na pokládku kabelových tras. [19]

2 Popis laboratorní úlohy PON

2.1 Motivace a cíle laboratorní úlohy

Úloha pro pasivní optické sítě je zamýšlena jako vstupní úloha pro především prvotní seznámení s technologií PON. Hlavním cílem je, aby se student seznámil a porozuměl technologii PON a fyzické vrstvě optické sítě, na které je PON provozováno. Úloha by měla zlepšit obecné znalosti o PON, maximálním dosahu a kapacitě sítě.

Konkrétně se seznámí s aktivními a pasivními prvky používanými v PON sítích a na reálném příkladu se pokusí určit maximální rozsah sítě a maximální počet uživatelů, které je možné připojit na jedno vlákno vedoucí z OLT.

Cílem je především seznámení s parametry PON a reálné porovnání parametrů tří standardů PON: GPON, XG-PON a XGS-PON.

2.2 Popis laboratorní úlohy

V úloze se pracuje s konkrétním příkladem 4 bytových domů, do kterých je třeba zavést pasivní optickou síť a zprovoznit ji.

Při výstavbě bytových domů je navržena pasivní optická síť. Celkem se jedná o 4 bytové domy, každý o 32 bytech. Celkem se tedy jedná o 128 bytových jednotek. Úkolem je seznámit se se zadanou topologií a na základě teoretických hodnot útlumu optického výkonu určit úbytek na optické síti. Tuto hodnotu porovnat s parametry zadaných aktivních prvků a navrhnout, jak snížit celkový útlum ODN vypočtený v útlumové bilanci sítě.

Na příkladu této sítě je ukázáno, jaké prvky se v síti PON nachází. Student je seznámen s tím, jaké jsou typické úbytky na jednotlivých prvcích v optické síti.

Dále je cílem dle zadaných parametrů určit reálnou potřebu šířky pásma pro zapojení všech ONU jednotek dle zadání. Na základě těchto hodnot určit potřebné množství konkrétních SFP modulů v OLT jednotce a počet vláken vedoucí z CO pro dodržení požadované agregace.

Na závěr srovnat možnost zapojení při použití GPON a XGS-PON a dále navrhnout řešení s možností kombinace GPON a XGS-PON v jednom optickém vlákně.

2.3 Odpovědi na vybrané otázky

- Jaké prvky v ODN měly největší vliv na útlum optického signálu a jakých hodnot útlum dosahoval?

Optické splittery (20 – 26 dB)
Konektorové spoje (1 – 6 dB)
Sváry (0,3 – 1 dB)
Optické vlákno (1 – 4 dB)

- Kolik vláken z OC v hlavním kabelu v příkladu 6 muselo být použito pro GPON standard a kolik pro kombinaci GPON a XGS-PON?

10 vláken pro GPON standard
2 vlákna pro kombinaci GPON a XGS-PON

- Fungovala by síť dle zadání při dělicím poměru 1:128?

Ne.

- Jakým způsobem mohlo být dosaženo snížení útlumu v ODN v úkolu?

Snížení počtu dělicího poměru ve splitterech (počet uživatelských odboček).
Snížením počtu konektorů.
Zkrácením optické trasy – menší vzdálenost do CO.

- Jaký přibližný maximální překlenutelný útlum mohou standardní PON sítě dosahovat?

Přibližně 28 až 31,5 dB

- U XG-PON se často uvádí, že je možné dosáhnout délky až 100 km a dělicího poměru až 1:256. Napadne vás specifická situace, kdy takových hodnot můžeme s prvky s parametry jako v úloze dosáhnout? [11]

V případě, že by se v ODN nenacházel žádný splitter (síť by byla provozována jako PTP), tak je útlum na 100 km dlouhém optickém vlákně $100 \cdot 0,3 = 30\text{dB}$ při 1310 nm a $100 \cdot 0,17 = 17\text{dB}$ při 1550 nm. Při dělicím poměru 1:256 může útlum dosáhnout například zapojením pomocí splitterů 1:8 a 1:32: $11 + 19 = 30\text{ dB}$.

- Liší se nějak v PON útlum optického výkonu v sestupném (download) a vzešupném (upload) směru a proč?

Útlum v ODN je závislý na vlnové délce. Protože se používají odlišné vlnové délky pro donwload a upload, tak i útlum bude pro tyto dvě odlišné vlnové délky rozdílný.

- Je útlum optického splitteru symetrický – směr download i upload?

Ano. Útlum v optickém splitteru je symetrický, jak ve směru k uživatelům, tak i ve směru od uživatelů.

- Jaké typy optických vláken se používají v PON? (SM, MM)

SM (single mode) neboli jednovidová vlákna.

- Jaká/jaké vlnové délky se používají v PON? (Není třeba znát přesná čísla.)

Zásadní je informace, že pro downstream a upstream se používají dvě rozdílné vlnové délky pro zajištění duplexního provozu. Dále se pro upload používají nejčastěji vlnové délky v okolí 1300 nm a pro download v okolí 1500 nm.

- Co nejvíce ovlivňuje maximální možný počet uživatelů v PON síti?

Maximální překlenutelný úbytek optického výkonu v síti a celková ztráta optického výkonu. A také maximální možná agregace v závislosti na maximální rychlosti jednotlivých přípojek a PON standardu.

- Čím je umožněn vyšší dosah u SuperPON (50 km) a větší možný dělicí poměr (1:1024)?

Je umožněn díky využití vlnového multiplexu a optických zesilovačů.

- Co umožňuje větší šířku pásma u SuperPON a NG-PON2 v porovnání s XG-PON?

Je umožněn díky využití vlnového multiplexu.

- Přineslo by v případě topologie ODN v úloze nějakou výhodu použití SuperPON namísto GPON a XG(S)-PON?

U Super-PON je možné využít WDM pro zvýšení dosahu sítě. Místo klasického splitteru, který vnáší nemalý útlum do ODN, je možné využít WDM filtr, který rozdělí jedno vlákno do více částí dle vlnové délky. Tento filtr pracuje s výrazně menším útlumem než klasický splitter a umožňuje tak zvětšit překlenutelnou vzdálenost PON.

- Lze v PON síti provozovat více druhů (standardů) PON souběžně? Je k tomu potřebný nějaký speciální prvek?

Ano. Ve většině nových standardů je myšleno na kompatibilitu se staršími standardy. To umožňuje souběžně provozovat např. GPON a XG(S)-PON v jedné optické síti. Je to způsobeno využitím rozdílných vlnových délek v těchto standardech tak, aby mohly být provozovány souběžně.

K tomu je zapotřebí na straně OLT použít speciální optický prvek pro rozdělení vlnových délek.

- Jaký rozdíl přináší XGS-PON oproti XG-PON?

Symetrická rychlost uploadu a downloadu. XG-PON umožňuje download 10 Gbit/s a upload maximálně 2,5 Gbit/s. XGS-PON umožňuje již upload 10 Gbit/s.

- Byl v úloze plně využit potenciál rychlosti u XGS-PON standardu? Nebo by bylo možné navrhnout nějaké zlepšení s ohledem na maximální rychlosti uploadu?

Ne. V úloze se maximální rychlost uploadu u XGS-PON využívala jen z 50 %. Bylo by možné změnit rychlosti uploadu u XGS-PON na stejné, jako byly rychlosti downloadu. (Např. 1000/1000 Mbit/s, 2000/2000 Mbit/s)

2.4 Příklad řešení

Pro práci s laboratorní úlohou je využita šablona pro výpočty v softwaru Microsoft Excel s názvem Lab_PON Šablona.xls, která je přílohou této práce.

1. Topologie sítě je zobrazena v zadání laboratorní úlohy na obrázcích 3.1 a 3.2.

2. Je třeba určit celkový počet prvků v cestě optického signálu. Ten je potřeba zjistit z dané topologie sítě pro optickou trasu z OC do nejvzdálenějšího domu č. 4 a poté až do bytu v rámci budovy. To je patrné na obrázcích 2.2 a 2.3.

Celkově se tak jedná o 4 úseky optického vlákna (o délkách 8 km, 300 m, 100 m a 50 m) celkem 8,450 km optického vlákna, 10 konektorových spojů typu SC, 8 svárů, jeden splitter 1:4 a jeden splitter 1:32 viz tabulka 2.4.

Z tabulek 3.1, 3.2 a 3.3 je třeba doplnit ztráty na jednotlivých prvcích ODN a určit ztrátu na splitterech dle jejich dělicích poměrů z tabulky 3.4.

Tab. 2.1: Určení ztráty optického výkonu

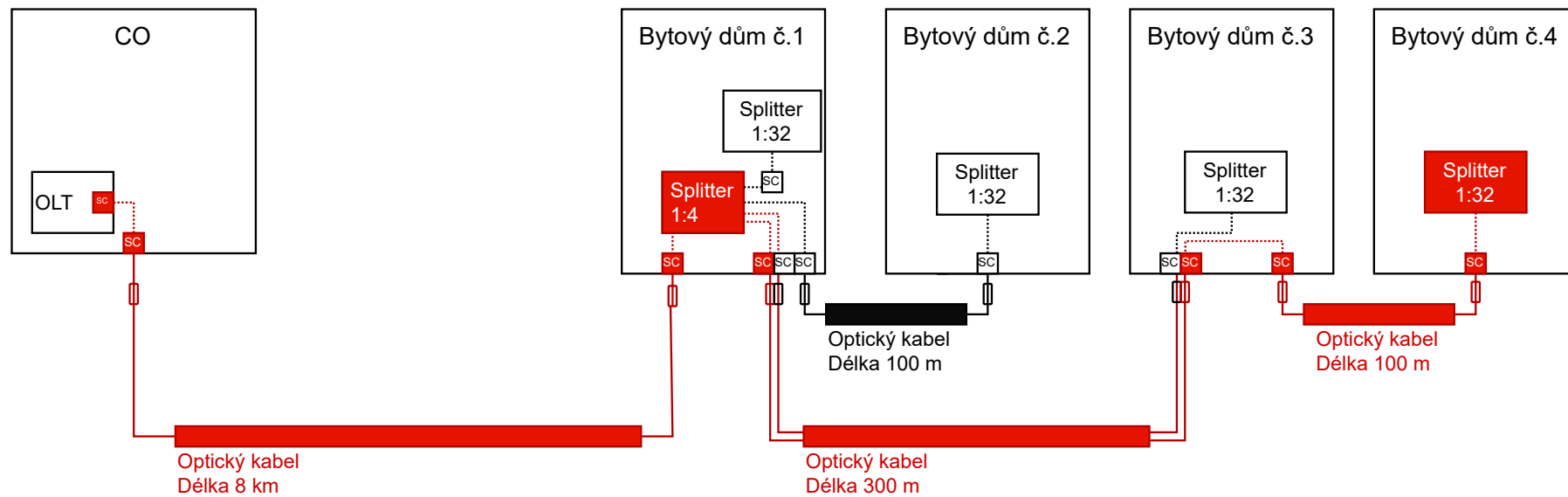
Délka optického vlákna	8,45 km
Počet konektorových spojů	10
Počet svárů	8
Ztráta na prvním splitteru (1:4)	7 dB
Ztráta na druhém splitteru (1:32)	19 dB

Poté jsou dopočítány hodnoty dle zadaných parametrů celkové ztráty v ODN dle obrázku 2.1.

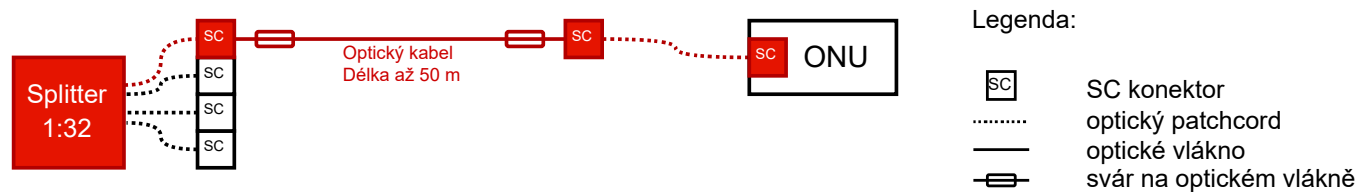
CELKOVÁ ZTRÁTA 1310 nm			
	minimální	typická	maximální
Optický kabel	2,535 dB	3,211 dB	4,225 dB
Konektory	4 dB	6 dB	10 dB
Sváry	0,16 dB	0,8 dB	1,6 dB
Optické splittery	26 dB		
Rezervy	0 dB		
CELKEM	32,695 dB	36,011 dB	41,825 dB

CELKOVÁ ZTRÁTA 1550 nm			
	minimální	typická	maximální
Optický kabel	1,4365 dB	1,859 dB	3,38 dB
Konektory	2 dB	3,5 dB	7 dB
Sváry	0,08 dB	0,4 dB	0,8 dB
Optické splittery	26 dB		
Rezervy	0 dB		
CELKEM	29,5165 dB	31,759 dB	37,18 dB

Obr. 2.1: Výsledná ztráta v ODN



Obr. 2.2: ODN v úloze (venkovní část) se zvýrazněnou trasou do 4. domu



Obr. 2.3: ODN v úloze (vnitřní část) se zvýrazněnou trasou k ONU

Obr. 2.4: Legenda k obrázkům 2.2 a 2.3

3. Ze zadané dokumentace k jednotlivým aktivním prvkům mohou být určeny základní parametry pro určení překlenutelného úbytku v ODN. Pro GPON (tabulka 2.2) a XG(S)-PON (tabulka 2.3).

Tab. 2.2: Vysílací výkon a citlivost pro GPON zařízení

	Vysílací výkon [dBm]	Citlivost přijímače [dBm]
GPON OLT SFP Modul B+	1,5 až 5	-28 až -8
GPON OLT SFP Modul C+	3 až 7	-30 až -12
ONU Fiber Loco	1,5 to 5	-28 to -8

Tab. 2.3: Vysílací výkon a citlivost pro XG(S)-PON zařízení

	Vysílací výkon [dBm]	Citlivost přijímače [dBm]
Fiber XGS/XG Optical Transceiver	4 až 7	-26 až -9
ONU Fiber XGS	2 to 7	-27 to -9

Pro výpočet jsou využity vždy minimální (nejnižší) hodnoty. Srovnáváme minimální výkon vysílače, jaký může nastat, jenž je definován výrobcem a minimální potřebný výkon pro vybuzení přijímače.

Maximální překlenutelný útlum je poté:

GPON: MAXIMÁLNÍ PŘEKLENUTELNÝ ÚTLUM	
GPON B+	
Download (1490 nm) = $OLT_{TX} - ONU_{RX}$ =	29,5 dB
Upload (1310 nm) = $ONU_{TX} - OLT_{RX}$ =	29,5 dB
GPON C+	
Download (1490 nm) = $OLT_{TX} - ONU_{RX}$ =	31 dB
Upload (1310 nm) = $ONU_{TX} - OLT_{RX}$ =	31,5 dB
XGS-PON: MAXIMÁLNÍ PŘEKLENUTELNÝ ÚTLUM	
XGS-PON	
Download (1270 nm) = $OLT_{TX} - ONU_{RX}$ =	31 dB
Upload (1570 nm) = $ONU_{TX} - OLT_{RX}$ =	28 dB

Obr. 2.5: Maximální překlenutelný útlum – řešení

4. Při srovnání údajů z obrázku 2.1 a 2.5, jsou některé maximální hodnoty překlenutého útlumu nižší než typický útlum v ODN. Je tedy zřejmé, že musíme použít pro GPON technologii třídu C+, která nabízí nejvyšší možný překlenutelný útlum v ODN – 31 dB v downstreamu (1490 nm) a 31,5 dB v upstreamu (1310 nm).

Na vlnové délce 1550 nm je typický útlum necelých 29 dB, ale na vlnové délce 1310 nm přesahuje 33 dB (až 38 dB v nejméně příznivé variantě) (viz obrázek 2.1), tedy vyšší, než je maximální překlenutelný útlum.

S danými prvky je tak pravděpodobné, že by nebylo do nejvzdálenějšího domu navázáno spojení – síť proto **nebude fungovat**.

Pro zprovoznění sítě musí být snížen maximální útlum ODN tak, aby nebyl vyšší než maximální překlenutelný útlum vypočítaný v bodě 3.

To může být učiněno několika způsoby:

- Přidáním **optického zesilovače** do ODN – muselo by být zajištěno aktivní napájení prvku, tím by ale již z principu přestalo jít o pasivní optickou síť. [19]
- Snížením útlumu v síti pomocí snížení prvků, které způsobují největší ztrátu optického signálu. Jak je patrné z obrázku 2.1, největší ztrátu způsobují optické splittery (23 dB), dále konektorové spoje (6 dB pro 1310 nm a 3,5 dB pro 1550 nm) a poté samotné optické vlákno. Přidaný útlum na sváru je již velmi malý.

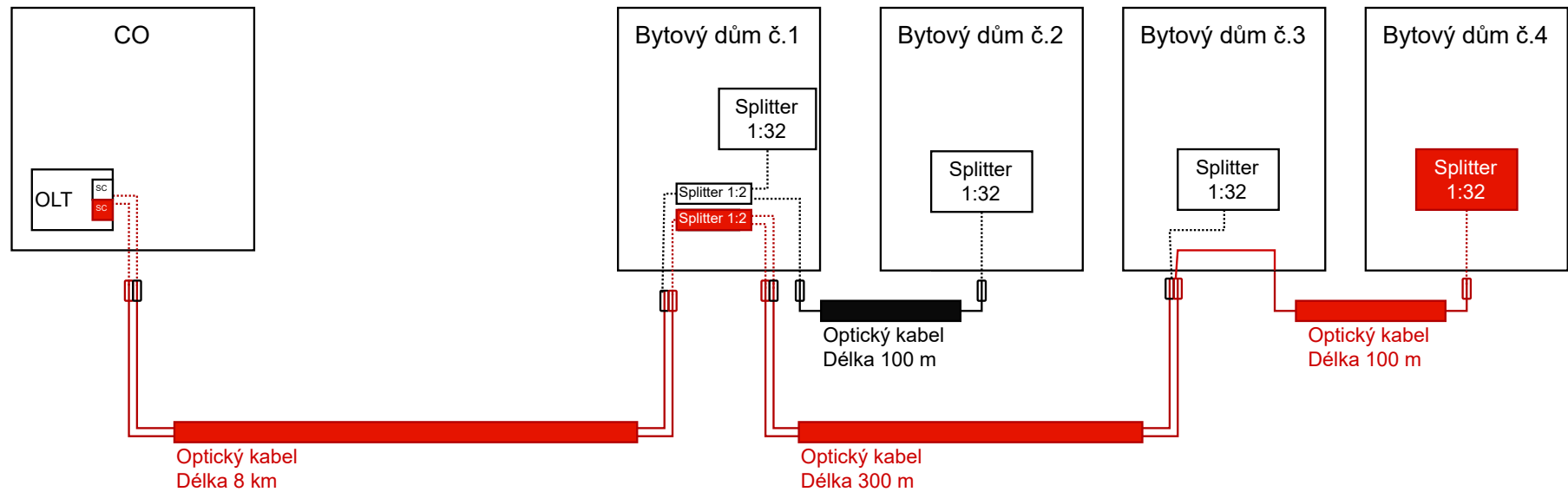
Lze tedy:

- Snížit **dělicí poměr** (počet přípojek uživatelů).
- Snížit **počet konektorových spojů** v optické síti (zrušit přepojovací konektorové pole).

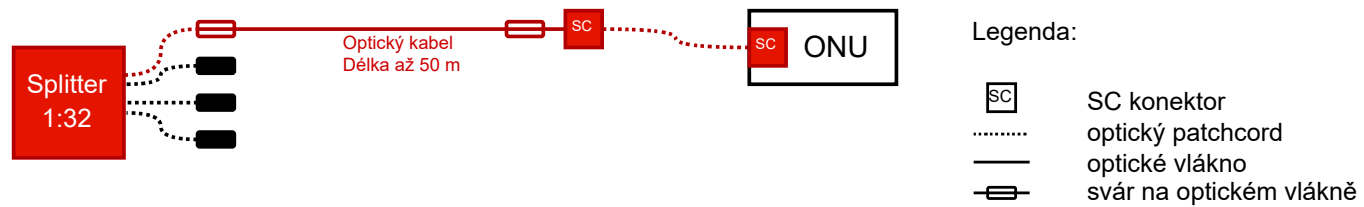
Celkově může být v případě nevyužití přepojovacích polí a použití splitterů, které jsou přímo navařeny na optická vlákna a rozdělením čtyř domů do dvou ODN, z nichž každá má celkem 64 odboček (tedy z CO vedou dvě vlákna a na každém jsou připojeny dva domy přes splitter 1:2), upravena síť do podoby jako na obrázcích 2.6 a 2.7 a dosaženo tak například těchto parametrů ODN:

Tab. 2.4: Určení ztráty optického výkonu

Délka optického vlákna	8,45 km
Počet konektorových spojů	3
Počet svárů	7
Ztráta na prvním splitteru (1:2)	4 dB
Ztráta na druhém splitteru (1:32)	19 dB



Obr. 2.6: ODN v úloze (venkovní část) se sníženým útlumem a se zvýrazněnou trasou k ONU



Obr. 2.7: ODN v úloze (vnitřní část) se sníženým útlumem a se zvýrazněnou trasou k ONU

Obr. 2.8: Legenda k obr. 2.6 a 2.7

Celkově tak může být dosaženo například takových parametrů, jako jsou uvedeny na obrázku 2.9.

CELKOVÁ ZTRÁTA 1310 nm			
	minimální	typická	maximální
Optický kabel	2,535 dB	3,211 dB	4,225 dB
Konektory	1,2 dB	1,8 dB	3 dB
Sváry	0,14 dB	0,7 dB	1,4 dB
Optické splitterly	23 dB		
Rezervy	0 dB		
CELKEM	26,875 dB	28,711 dB	31,625 dB

CELKOVÁ ZTRÁTA 1550 nm			
	minimální	typická	maximální
Optický kabel	1,4365 dB	1,859 dB	3,38 dB
Konektory	0,6 dB	1,05 dB	2,1 dB
Sváry	0,07 dB	0,35 dB	0,7 dB
Optické splitterly	23 dB		
Rezervy	0 dB		
CELKEM	25,1065 dB	26,259 dB	29,18 dB

Obr. 2.9: Výsledná ztráta v upravené ODN

5. Maximální rychlost na jednoho uživatele lze zjistit z maximální rychlosti na jednom portu OLT, počtu uživatelů připojených k tomuto portu a celkové agregace.

Pro maximálních 128 uživatelů a rychlostech 2 488 Mbit/s pro download a 1 244 Mbit/s pro upload u GPON a rychlostech 10 000 Mbit/s pro download i upload u XGS-PON budou jednotlivé rychlosti viz obrázek 2.10.

GPON – Maximální průměrná rychlost na jednoho uživatele		
AGREGACE 1:1		
Download	= $GPON_{MAX} / USERS * 1 =$	19,4 Mbit/s
Upload	= $GPON_{MAX} / USERS * 1 =$	9,7 Mbit/s
AGREGACE 1:3		
Download	= $GPON_{MAX} / USERS * 3 =$	58,3 Mbit/s
Upload	= $GPON_{MAX} / USERS * 3 =$	29,2 Mbit/s
AGREGACE 1:10		
Download	= $GPON_{MAX} / USERS * 10 =$	194,4 Mbit/s
Upload	= $GPON_{MAX} / USERS * 10 =$	97,2 Mbit/s

XGS-PON – Maximální průměrná rychlost na jednoho uživatele		
AGREGACE 1:1		
Download	= $GPON_{MAX} / USERS * 1 =$	78,1 Mbit/s
Upload	= $GPON_{MAX} / USERS * 1 =$	78,1 Mbit/s
AGREGACE 1:3		
Download	= $GPON_{MAX} / USERS * 3 =$	234,4 Mbit/s
Upload	= $GPON_{MAX} / USERS * 3 =$	234,4 Mbit/s
AGREGACE 1:10		
Download	= $GPON_{MAX} / USERS * 10 =$	781,3 Mbit/s
Upload	= $GPON_{MAX} / USERS * 10 =$	781,3 Mbit/s

Obr. 2.10: Maximální průměrná rychlost na jednoho uživatele – výsledek

6. Nyní je cílem pokusit se určit ideální variantu připojení všech 128 uživatelů k internetu dle zadaných rychlostí internetu. 2.5. K určení počtu uživatelů, kteří využívají jednotlivé tarify, může být využit soubor:

Lab_PON Generátor počtu uživatelů.xls.

Úkolem je určit, kolik linek (portů na OLT) je potřeba pro připojení daného počtu uživatelů pomocí GPON, kolik pro připojení pomocí XG(S)-PON a zda je možné využít kombinaci GPON a XG(S)-PON a kolik optických vláken musí vést z CO.

Při zapojení všech uživatelů pomocí GPON technologie by muselo být použito celkem 10 SFP modulů a z CO by muselo být vedeno 10 optických vláken.

Při použití pouze XGS-PON technologie by postačovaly jen 3 SFP moduly a optická vlákna vedoucí z OLT.

Nejnižšího počtu vláken (2) vedoucí z CO může být dosaženo při využití kombinace GPON a XGS-PON technologie. Pro tarify s nižšími rychlostmi využijeme GPON technologii a pro vyšší rychlosti XGS-PON. Na obrázku 2.11 je zobrazeno možné řešení s rozdělením počtu tarifů mezi GPON a XGS-PON technologii.

Tab. 2.5: Možné rychlosti připojení k internetu

Download [Mbit/s]	Upload [Mbit/s]
100	50
300	150
600	300
1000	500
2000	1000

GPON				
Rychlost připojení			Celková rychlost	
Download	Upload	Počet uživatelů	Download	Upload
100 Mbit/s	50 Mbit/s	30	3 000 Mbit/s	1 500 Mbit/s
300 Mbit/s	150 Mbit/s	36	10 800 Mbit/s	5 400 Mbit/s
600 Mbit/s	300 Mbit/s	2	1 200 Mbit/s	600 Mbit/s
1 000 Mbit/s	500 Mbit/s	0	0 Mbit/s	0 Mbit/s
2 000 Mbit/s	1 000 Mbit/s	0	0 Mbit/s	0 Mbit/s
Celkem GPON (bez agregace)			15 000 Mbit/s	7 500 Mbit/s
Maximální celková rychlost (s agregací)			5 000 Mbit/s	2 500 Mbit/s

XGS-PON				
Rychlost připojení			Celková rychlost	
Download	Upload	Počet uživatelů	Download	Upload
100 Mbit/s	50 Mbit/s	0	0 Mbit/s	0 Mbit/s
300 Mbit/s	150 Mbit/s	0	0 Mbit/s	0 Mbit/s
600 Mbit/s	300 Mbit/s	30	18 000 Mbit/s	9 000 Mbit/s
1 000 Mbit/s	500 Mbit/s	18	18 000 Mbit/s	9 000 Mbit/s
2 000 Mbit/s	1 000 Mbit/s	12	24 000 Mbit/s	12 000 Mbit/s
Celkem XGS-PON (bez agregace)			60 000 Mbit/s	30 000 Mbit/s
Maximální celková rychlost (s agregací)			20 000 Mbit/s	10 000 Mbit/s

Obr. 2.11: Příklad rozdělení 128 uživatelů pro GPON a XGS-PON

3 Zadání laboratorní úlohy PON

V laboratorní úloze je zadána topologie PON sítě. Úkolem bude navrhnout zapojení a úpravu dané sítě pro možnost uspokojení potřeb všech uživatelů sítě.

Pokuste se představit si úlohu z pohledu poskytovatele internetového připojení pro čtyři bytové domy. Úkolem je navrhnout, jak zprovoznit pasivní optickou síť pro čtyři bytové domy s celkem 128 byty.

3.1 Zadání

1. Seznamte se s danou topologií sítě.
2. Určete celkovou ztrátu optického výkonu v zadané síti pro nejbližší ONU optické sítě pro vlnové délky 1310 a 1550 nm.
3. Na základě zadaných parametrů použitých aktivních prvků a topologie sítě určete, jaký maximální překlenutelný útlum mohou aktivní prvky v síti pro GPON a XG(S)-PON překonat.
4. Na základě údajů z bodu **2.** a **3.** určete, zda s vypočteným útlumem bude síť fungovat. Navrhněte, jak snížit ztrátu optického výkonu v síti – co má největší vliv na ztrátu signálu v síti?
5. Určete maximální rychlost pro download a upload na jednoho uživatele pro případ maximálního počtu uživatelů (128) v situacích bez agregace a s agregací 1:3 a 1:10.
6. Pro modelovou situaci poskytovatele internetového připojení a počtu uživatelů dle zadání navrhněte optimální variantu zapojení sítě včetně výběru standard PON (případně jejich kombinaci) pro možnost připojení všech 128 uživatelů při zadané maximální agregaci 1:3.
 - S využitím pouze GPON připojení.
 - S využitím pouze XGS-PON.
 - Souběžný provoz umožněn pomocí vlnového dělení GPON i XGS-PON.

3.2 Teoretický úvod

PON

Pasivní optické sítě jsou přístupové sítě typu point-to-multipoint umožňující dělit jedno vlákno vedoucí z ústředny operátora (**CO** – **Central Office**) pomocí optických rozbočovačů (**splitter**) mezi koncové uživatele. Nejčastější počty uživatelů bývají (v závislosti na použité technologii) 16 až 128 ve vzdálenosti do 10 až 20 kilometrů.

V pasivních optických sítích (**PON**) se setkáváme s těmito prvky:

- **OLT (Optical Line Termination)** – optické linkové zakončení
Jedná se o zařízení zakončující linku na straně internetového poskytovatele.
- **ODN (Optical Distribution Network)** – optická distribuční síť
Zajišťuje přenos optického signálu mezi síťovými zakončeními.
- **ONU (Optical Network Unit)** – optická síťová jednotka
Zakončuje ODN na straně zákazníka.
- **ONT (Optical Network Terminal)** – optický síťový zakončovač
Specifický typ ONU pro služby jednoho zákazníka.

V PON se téměř výhradně využívá pouze jedno vlákno pro downstream i upstream s využitím vlnového multiplexu (**WDM**). Pro obousměrný provoz se tedy využívají dvě různé vlnové délky, jedna v sestupném směru a druhá ve vzestupném.

Ve směru k uživateli jsou data více uživatelů přenášena společně v zašifrované podobě pro zabránění odposlechu dalšími účastníky. Ve směru od uživatelů je použita speciální forma časového multiplexu (**TDM**) — je třeba zajistit, aby v jeden čas byla vysílána data pouze od jednoho uživatele. [5]

Ztráta optického výkonu

Nejzásadnějším parametrem pro návrh ODN je tedy určení ztráty optického výkonu a výpočet tzv. **útlumové bilance** pasivní optické sítě. Do té jsou započítávány všechny prvky způsobující útlum optického signálu v ODN. Jedná se o samotná optická vlákna, konektorové spoje, sváry a optické splitterry. Při návrhu sítě se dále často započítává dodatečná rezerva pro případné opravy nebo poškození (např. pro přidání dodatečných svárů).

$$A = m \cdot A_c + n \cdot A_{Sp} + l \cdot \alpha + A_N + A_R \text{ [dB]} \quad [30], [31]$$

Kde:

- A [dB] je celková ztráta na optické trase
 m [-] počet konektorových spojů
 A_C [dB] útlum na jednom konektorovém spoji
 n [-] celkový počet optických svárů na trase
 A_{Sp} [dB] útlum na jednom sváru
 l [km] délka optického kabelu
 α [dB/km] měrný útlum optického kabelu
 A_N [dB/km] útlum všech rozbočovačů
 A_R [dB] dodatečná rezerva (patch kabely, ohyby optických kabelů, poškození kabelů, rezerva pro budoucí opravy – nové sváry apod.)

Tab. 3.1: Útlum optického výkonu v optickém vlákně α [dB/km] [31]

	1310 nm	1550 nm
Minimální	0,3	0,17
Typická	0,38	0,22
Maximální	0,5	0,4

Tab. 3.2: Útlum optického výkonu na konektorovém spoji A_C [dB] [31]

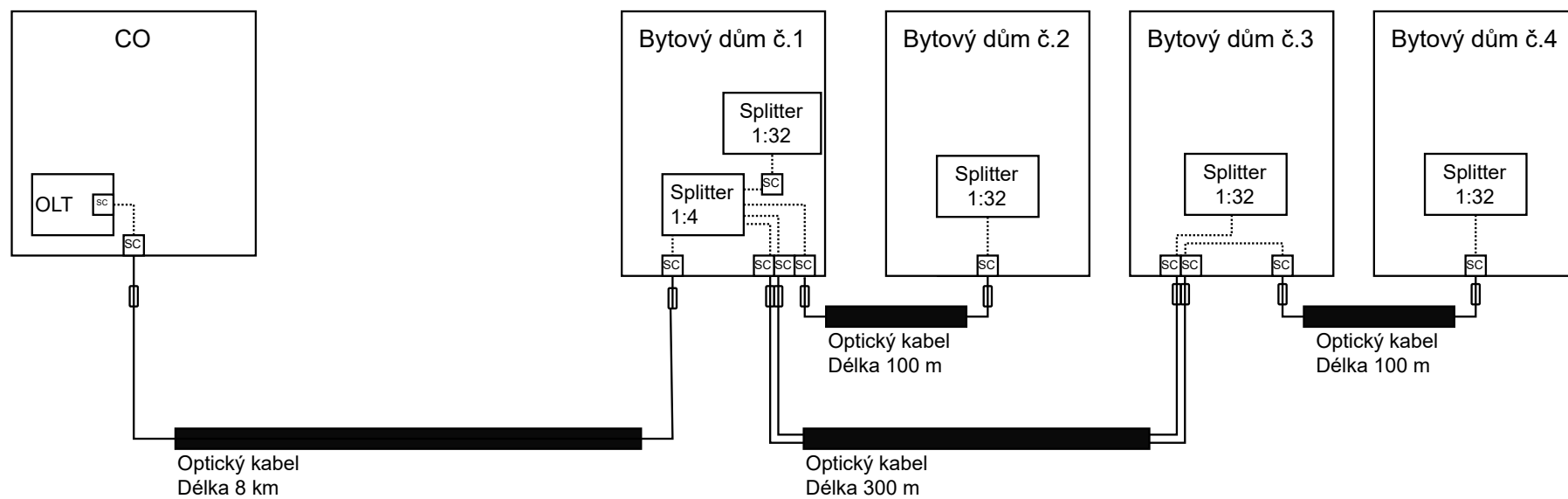
	1310 nm	1550 nm
Minimální	0,4	0,2
Typická	0,6	0,35
Maximální	1	0,7

Tab. 3.3: Útlum optického výkonu ve sváru A_{Sp} [dB] [31]

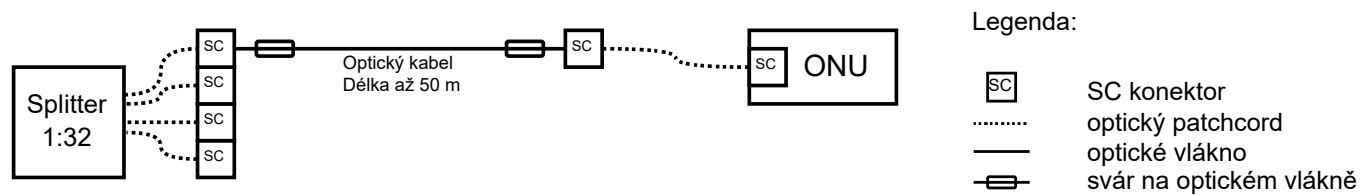
	1310 nm	1550 nm
Minimální	0,02	0,01
Typická	0,1	0,05
Maximální	0,2	0,1

Tab. 3.4: Typická ztráta na optickém rozbočovači [31]

Dělicí poměr [–]	Teoretická ztráta [dB]	Typická ztráta [dB]
1:2	3	4
1:4	6	7
1:8	9	11
1:16	12	15
1:32	15	19



Obr. 3.1: ODN v úloze (venkovní část)



Obr. 3.2: ODN v úloze (vnitřní část)

Obr. 3.3: Legenda k obr. 3.1 a 3.2

3.3 Pracovní postup

Pro práci na úloze jsou předpřipravené tabulky v softwaru Microsoft Excel. Ty lze nalézt v souboru **Lab_PON Šablona.xls**, ve kterém bude prováděna většina výpočtů.

1. Seznamte se zadanou topologií sítě PON. Na obrázku č. 3.1 je topologie sítě od centrální jednotky OLT až po splittery 1:32 v jednotlivých domech. Na obrázku č. 3.2 je vidět jedna větev od splitteru v domě až po koncovou jednotku ONU.

Obrázek 3.1 zobrazuje CO, ve které se nachází OLT jednotka. Kabelové optické trasy jsou zakončeny standardně v optických vanách, kde jsou navařena krátká optická vlákna vedoucí do konektoru v panelu. V našem případě jsou použity konektory SC. Z těchto konektorů jsou již pomocí optických propojovacích kabelů (patchcordů) zapojeny jednotlivé prvky. Na obr. 3.3 je poté zobrazena legenda použitých značek. Pro omezení menšího zpětného odrazu na konektorovém spoji je vhodnější užití APC konektoru (angled physical contact).

2. Určete útlum v zadané optické síti. Za předpokladu, že všechny domy budou připojeny na jedno optické vlákno, lze pracovat s topologií na obr. 3.1 se splitterem 1:4, ze kterého pak vedou optická vlákna do 4 splitterů 1:32 – každý pro jeden bytový dům.

Pro zjištění kritických hodnot úbytku optického výkonu postačuje vypočítat úbytek do nejvzdálenějšího bodu, tedy do nejvzdálenějšího bytu ve 4. domě.

Pro zjištění úbytku optického výkonu v síti PON musí být započítány všechny prvky, které způsobují útlum optického signálu. K tomu využijte první část excelového souboru **2. Ztráta optického signálu**.

3. Zjistěte maximální překlenutelný úbytek v PON. Z již určeného úbytku lze zjistit, zda bude daná síť schopná provozu. Nyní pracujte s druhou záložkou excelového souboru **3. Překlenutelný úbytek v PON**.

Nejprve je třeba zjistit, jaký maximální úbytek zvládnou aktivní prvky, které budou v síti využívány.

Z technických parametrů jednotlivých zařízení zjistěte **minimální vysílací výkon (Tx power)** a **minimální citlivost (Rx power)** jednotlivých komponent.

Seznam aktivních prvků pro návrh GPON

- OLT jednotka – **Ubiquity Fiber OLT XGS**
<https://eu.store.ui.com/.../uisp-fiber-olt-xgs>
- SFP moduly v OLT jednotce – **Ubiquity GPON OLT SFP Modules**
<https://eu.store.ui.com/.../all-fiber/products/uf-gp>
- ONU jednotka – **Ubiquity Fiber Loco**
<https://eu.store.ui.com/.../all-fiber/products/ufiber-loco>

Seznam aktivních prvků pro návrh XGS-PON

- OLT jednotka – **Ubiquity Fiber OLT XGS**
<https://eu.store.ui.com/.../uisp-fiber-olt-xgs>
- SFP moduly v OLT jednotce – **Ubiquity Fiber XGS/XG Optical Transceiver**
<https://eu.store.ui.com/.../all-fiber/products/uacc-uf-om-xgs>
- ONU jednotka – **Ubiquity Fiber XGS**
<https://eu.store.ui.com/.../fiber-xgs-pon/products/uisp-fiber-xgs>

Pro určení maximálního překlenutelného útlumu je nutné určit rozdíl vysílacího výkonu a citlivosti přijímače – tedy pro download směr dvojice: vysílač v OLT a přijímač v ONU a pro upload směr: vysílač v ONU a přijímač v OLT.

4. Určete funkčnost dané sítě. Na základě určených maximálních překlenutelných úbytků v ODN se pokuste určit, zda daná síť bude za daných parametrů (srovnání stránek excelového souboru **2. Ztráta optického signálu** a **3. Překlenutelný úbytek v PON**) funkční.

Navrhněte také na základě údajů, co způsobuje největší útlum optického signálu v ODN, jakou změnou nebo úpravou ODN lze dosáhnout menšího útlumu. Pokuste se určit, jaké úpravy pomohou snížit útlum optické sítě tak, aby mohla být provozuschopná. Za tímto účelem vytvořte kopii listu **2. Ztráta optického signálu** a pokuste se navrhnout změnu topologie z obrázku 3.1 a vypočítat nový útlum ODN.

5. Zjistěte maximální možnou průměrnou rychlost na 1 uživatele. Na základě maximálních možných rychlostí SFP portů v OLT jednotce (viz technické specifikace jednotlivých prvků) zjistěte maximální možnou průměrnou rychlost na 1 uživatele,

pokud k jednomu SFP bude připojeno maximálních 128 uživatelů. Dané rychlosti určete pro agregace 1:1, 1:3 a 1:10.

Pracujte s listem **5. Maximální rychlost připojení**.

6. Určete pro daný počet uživatelů a rychlosti jejich připojení nejvhodnější technologii pro jejich připojení při zachování maximální agregace 1:3.

Vybírat můžete z variant GPON, XG-PON a XGS-PON. Pokuste se najít variantu pro nejmenší počet optických vláken potřebných pro vedení v hlavním optickém kabelu mezi OLT a budovami. K tomu můžete využít list **6. Poskytovatel připojení**.

Celkem mají uživatelé k dispozici 5 tarifů s rychlostmi 100/50 Mbit/s, 300/150 Mbit/s, 600/300 Mbit/s, 1000/500 Mbit/s a 2000/1000 Mbit/s, kde hodnota před lomítkem představuje download a hodnota za lomítkem upload. Počet jednotlivých uživatelů u každého tarifu si můžete vygenerovat v souboru **Lab_PON Generátor počtu uživatelů.xls**.

Uvedenou agregaci 1:3 je třeba uplatnit z důvodu zákona (Nařízení EU 2015/2120), kdy by minimální možná technická rychlost internetové přípojky *neměla* být menší než 30 % maximální (inzerované) rychlosti. Je třeba počítat s rozdílem ca 10 % mezi šířkou pásma na vrstvě síťového rozhraní a mezi reálnou rychlostí dat. Tento rozdíl je již zahrnut v rozdílu mezi hranicí, kdy při agregaci 1:3 je při teoretickém plném zatížení maximální rychlost jednoho účastníka $\frac{1}{3} \cdot 100 = 33, \bar{3} \%$.

- Nejprve určete, kolik portů v OLT je potřeba pro práci s GPON technologií. Mezi kolik GPON linek by museli být daní uživatelé rozděleni, aby mohlo být dosaženo maximální agregace 1:3?
- Stejný úkol určete i pro případ, kdy je využita XGS-PON technologie.
- Na závěr určete, kolik optických vláken musí být vedeno z CO do prvního domu v případě, kdy bychom chtěli využívat zároveň GPON i XGS-PON technologii.

Pro situace, kdy se například přechází v síti ze staršího na novější typ PON, je možnost využít souběhu dvou standardů – např. GPON a XG(S)-PON. Využívá se rozdílných vlnových délek pro dva standardy (celkem tedy 4 – dvě pro download a dvě pro upload). Pro možnost souběhu GPON a XG(S)-PON by byl na vlákno u OLT připojen speciální frekvenční splitter, například:

Ubiquity Fiber Coexistence WDM Filter

<https://eu.store.ui.com/eu/en/category/fiber-xgs-pon/products/uacc-uf-wdm-xgs>

Při způsobení ztráty maximálně 1 dB optického výkonu umožňuje provozovat GPON i XG(S)-PON na jednom optickém vlákně. Na straně ONU již není třeba žádné další úpravy.

3.4 Kontrolní otázky

- Jaké prvky v ODN měly největší vliv na útlum optického signálu a jakých hodnot útlum dosahoval?
- Kolik vláken z OC v hlavním kabelu v příkladu 6 muselo být použito pro GPON standard a kolik pro kombinaci GPON a XGS-PON?
- Fungovala by síť dle zadání při dělicím poměru 1:128?
- Jakým způsobem mohlo být dosaženo snížení útlumu v ODN v úkolu?
- Jaký přibližný maximální překlenutelný útlum mohou standardní PON sítě dosahovat?
- U XG-PON se často uvádí, že je možné dosáhnout délky až 100 km a dělicího poměru až 1:256. Napadne vás specifická situace, kdy takových hodnot můžeme s prvky s parametry jako v úloze dosáhnout? [11]
- Liší se nějak v PON útlum optického výkonu v sestupném (download) a vzešupném (download) směru a proč?
- Je útlum optického splitteru symetrický – download i upload?
- Jaké typy optických vláken se používají v PON? (SM, MM)
- Jaká/jaké vlnové délky se používají v PON? (Není třeba znát přesná čísla.)
- Co nejvíce ovlivňuje maximální možný počet uživatelů v PON síti?
- Čím je umožněn vyšší dosah u Super-PON (50 km) a větší možný dělicí poměr (1:1024)?
- Co umožňuje větší šířku pásma u Super-PON a NG-PON2 v porovnání s XG-PON?
- Přineslo by v případě topologie ODN v úloze nějakou výhodu použití Super-PON namísto GPON a XG(S)-PON?
- Lze v PON síti provozovat více druhů (standardů) PON souběžně? Je k tomu potřebný nějaký speciální prvek?
- Jaký rozdíl přináší XGS-PON oproti XG-PON?
- Byl v úloze plně využit potenciál rychlosti u XGS-PON standardu? Nebo by bylo možné navrhnout nějaké zlepšení s ohledem na maximální rychlosti uploadu?

4 Popis laboratorní úlohy Koherentní optický systém

4.1 Motivace a cíle laboratorní úlohy

Laboratorní úloha Koherentní optický systém cílí na nejmodernější současné tendence v telekomunikačních sítích. V moderních trendech využití optických technologií se v současnosti často pracuje s využitím optických vláken jako senzorů. Příkladem je využití distribuovaných optických senzorů, kdy mohou být pro získávání dat využity již existující optické trasy a data mohou být vyčítána z optických vláken v celé jejich délce. [52]

Laboratorní úloha by měla umožnit seznámit se s možnostmi zpracování dat z vysokorychlostních datových přenosů přes optická vlákna a využití dat z transceiverů využívaných v optických sítích jako senzorů pro využití k získání údajů z měření přímo na optickém vlákně.

Základní motivací by mělo být pochopení informace, jaké údaje je možné získávat z optických transceiverů a jaké informace dokážeme z těchto dat získat a co nám to může říct o optickém vlákně.

Dále se v úloze pracuje s konstelačními diagramy a způsoby vícecestavové modulace pro přenos signálu a možnostmi srovnání s nekoherentním přenosem dat.

4.2 Popis laboratorní úlohy

Pro laboratorní úlohu jsou připraveny soubory z náměrů z koherentního systému ADVA. Dále jsou předchystány skripty v programovacím jazyce Python, které umožňují zpracovat naměřená data ze systému do využitelné podoby, a skripty pro zobrazení výstupů z měření ve formě grafů. Data byla naměřena v laboratoři VUT a pro samotnou úlohu byl proveden výběr dat, se kterými se poté pracuje v úloze. Na optické vlákno bylo tlačeno robotickou rukou.

V první části laboratorní úlohy je cílem ověřit, zda na základě údajů získaných z optického přijímače s koherentním přenosem je možné odhadnout sílu, jakou bylo působeno na optické vlákno. Zadáno je několik vybraných naměřených údajů a cílem úlohy je pokusit se je na základě analýzy dat seřadit podle velikosti působící síly. Data jsou zadána v textové podobě, tak jak byla vyčtena z koherentního systému ADVA. V rámci úlohy je s připravenými skripty třeba data z textových souborů extrahovat. Při tom se studenti seznámí s formátem dat a tím, jaké informace nám může přijímač poskytnout. Poté je potřeba data zpracovat do grafické podoby pro

zobrazení daných údajů. Pro zpracování dat je využit jazyk Python. Pro samotné zobrazení dat je pracováno s modulem *matplotlib*.

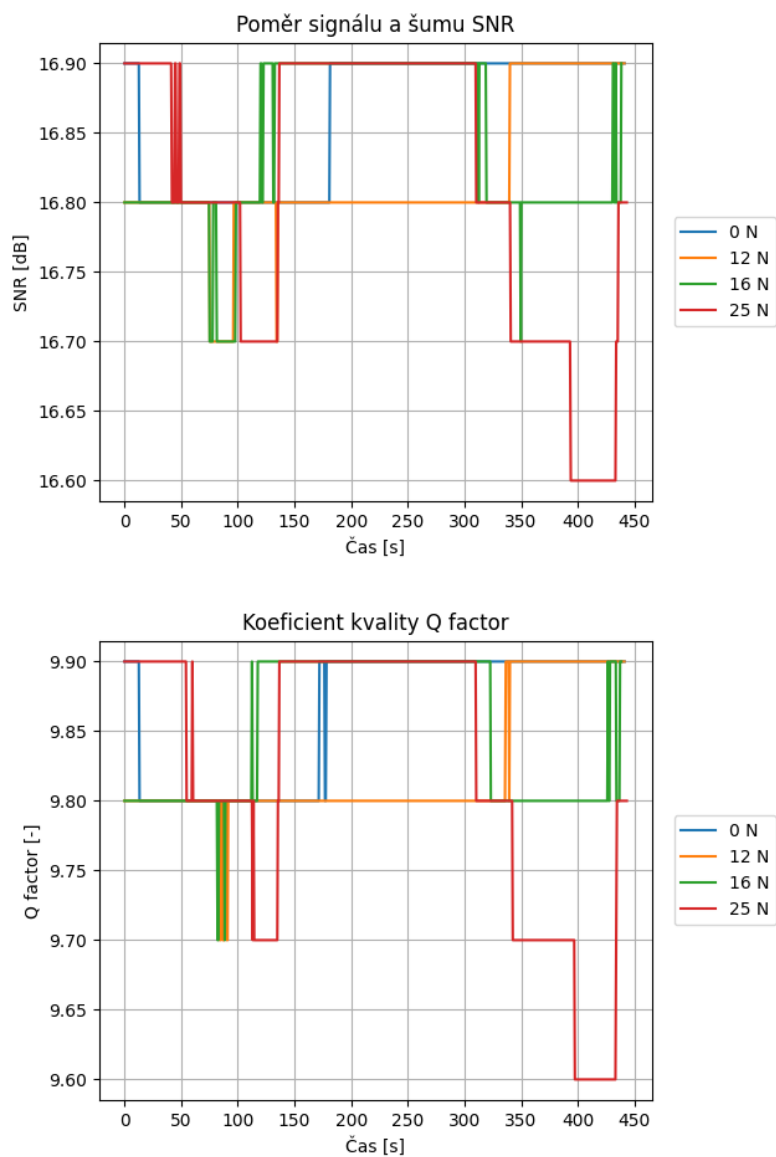
Cílem druhé části je určit závislost síly působící na vlákno z vyčtených parametrů při optickém přenosu. Při větším množství naměřených dat zjistit, zda-li je závislost lineární a pro jaký rozsah síly ji bylo v tomto konkrétním případě možné určovat.

V závěru úlohy jsou poskytnuta data, kdy je tlak na optické vlákno proměnlivý a tlak nebyl vyvíjen robotickou rukou. Cílem této části je pokusit se na základě získaných informací v předchozích částech úlohy určit z dat zaznamenaných na přijímači koherentního systému, co se s optickým vláknem dělo. Jestli na něj bylo tlačeno, jakou silou, jak dlouho.

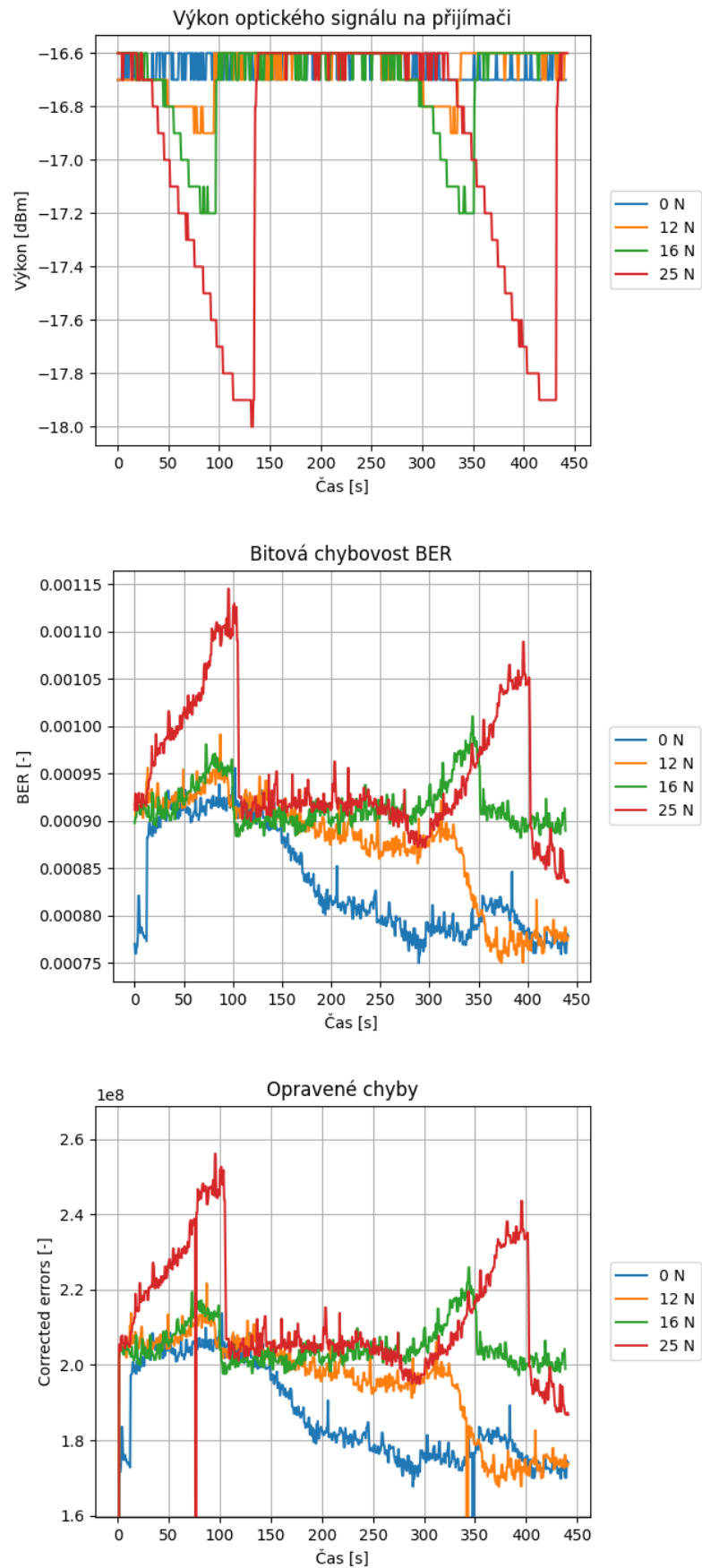
4.3 Řešení a výsledky

Úkol 3: Závislosti na čase

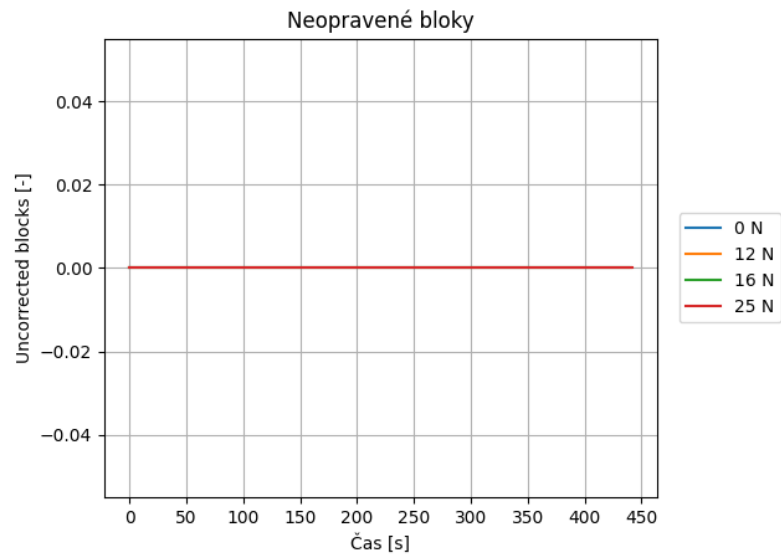
Obr. 4.1: Závislosti na čase – SNR, Q faktor



Obr. 4.2: Závislosti na čase – výkon, BER, opravené chyby



Obr. 4.3: Závislosti na čase – neopravené bloky



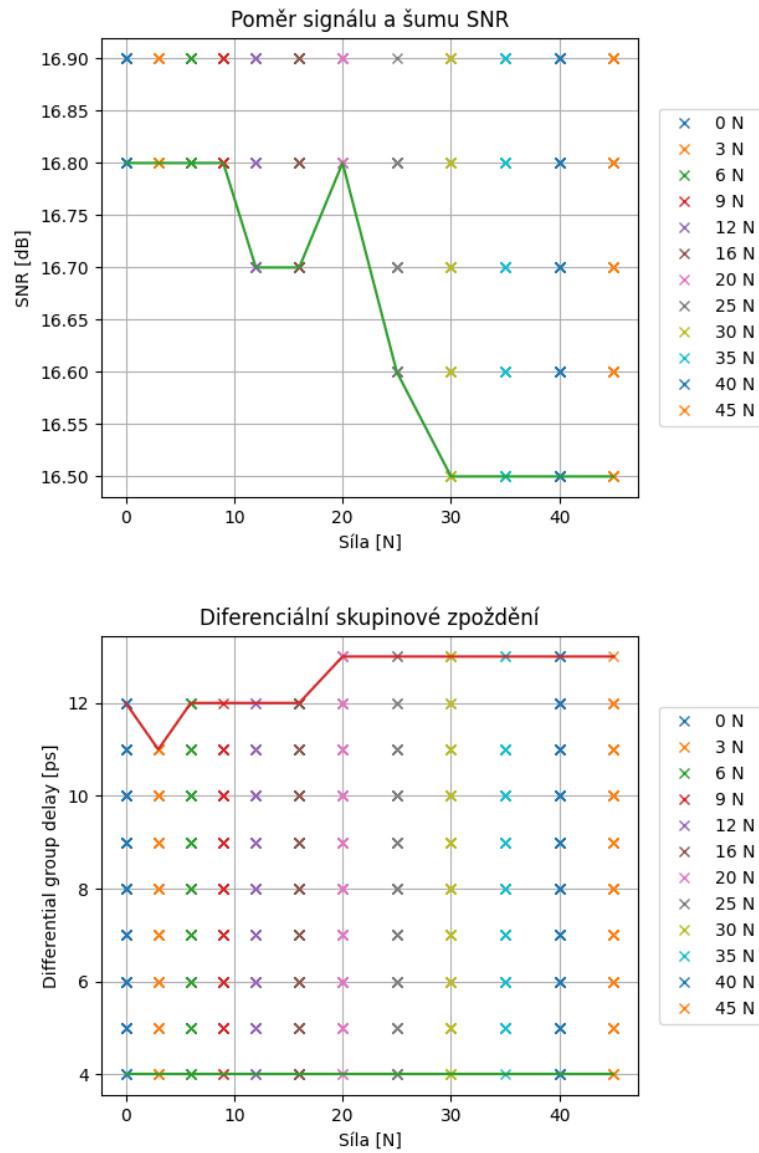
Úkol 4: Srovnání velikostí sil

Označení souboru	A	B	C	D	E	F	G	H
Síla [N]	25	20	16	12	9	6	3	0

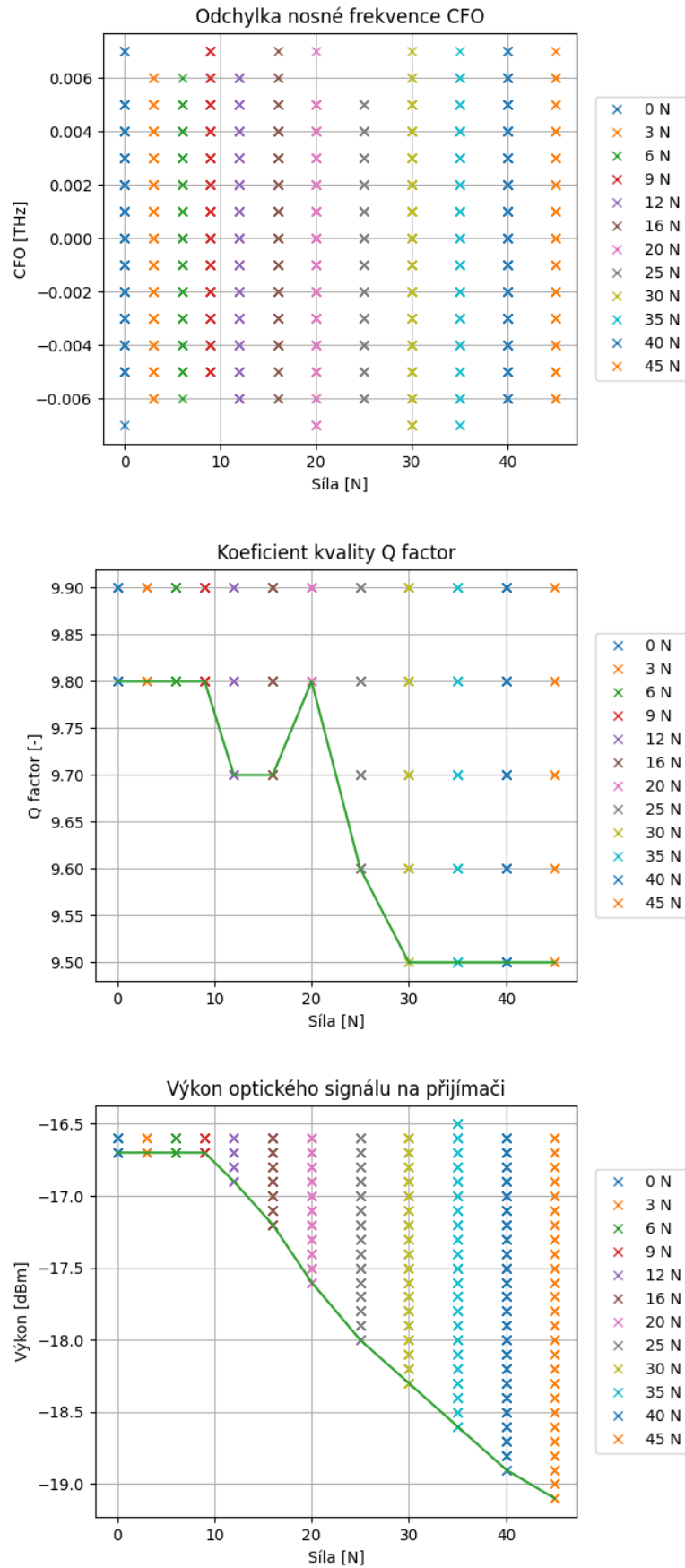
Tab. 4.1: Přiřazení nastavené síly robotické ruky a označení souboru v zadání

Úkol 5: Závislosti na síle

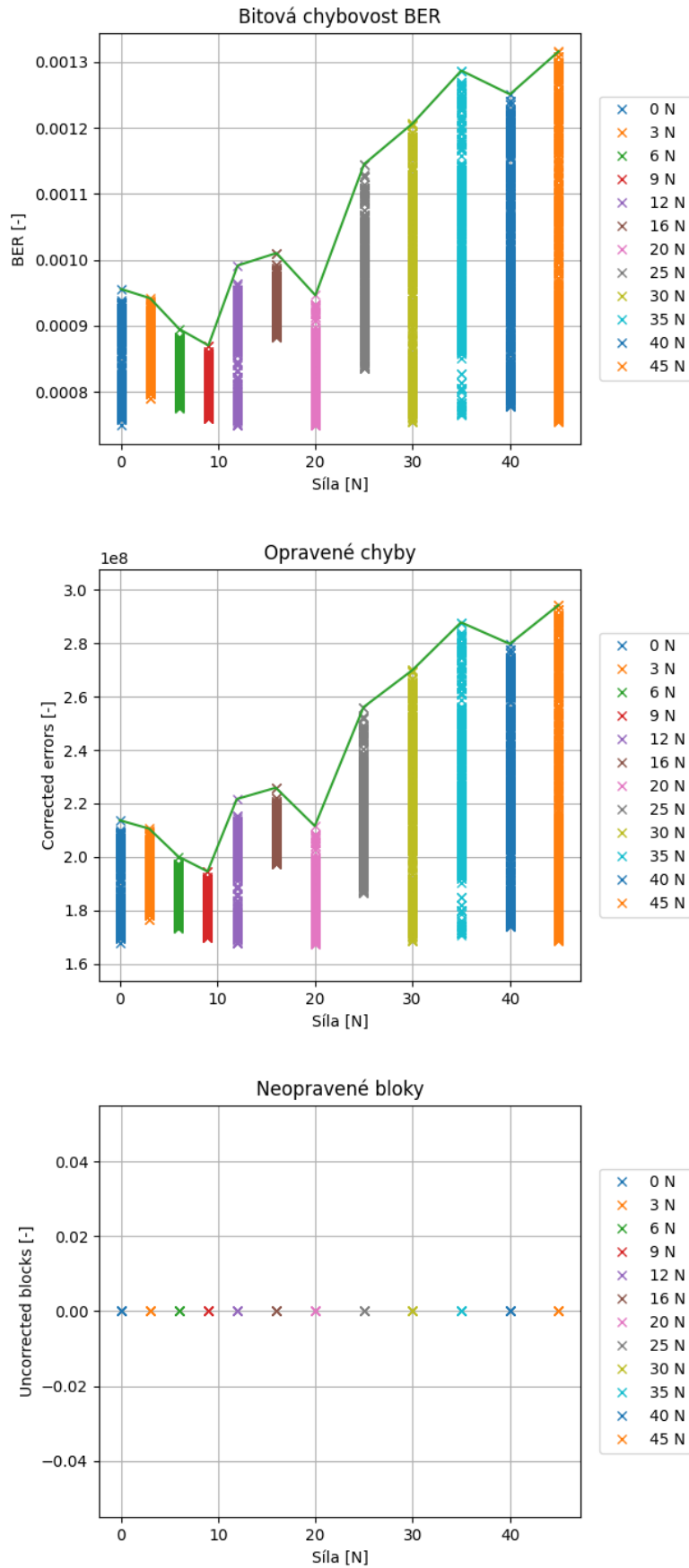
Obr. 4.4: Závislosti na síle – SNR, diferenciální skupinové zpoždění



Obr. 4.5: Závislosti na síle – CFO, Q faktor, výkon

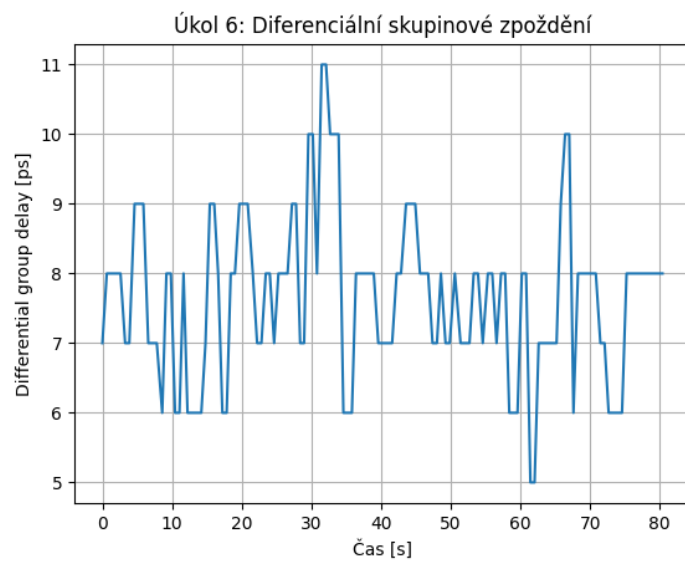
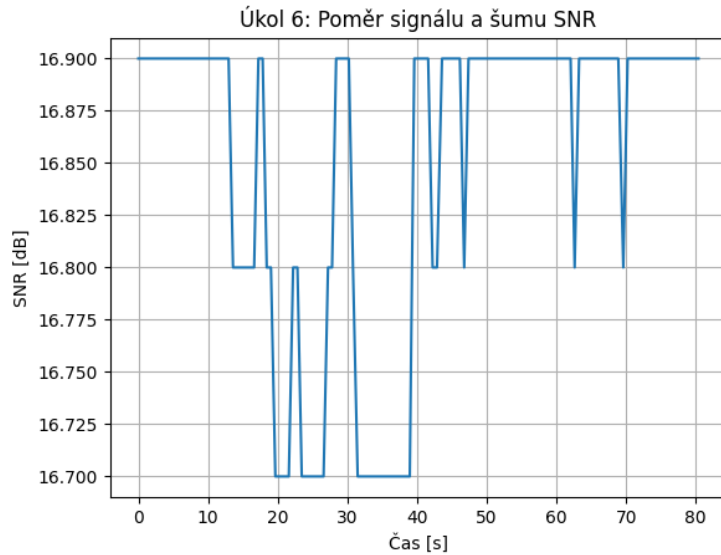


Obr. 4.6: Závislosti na síle – BER, opravené chyby, neopravené bloky

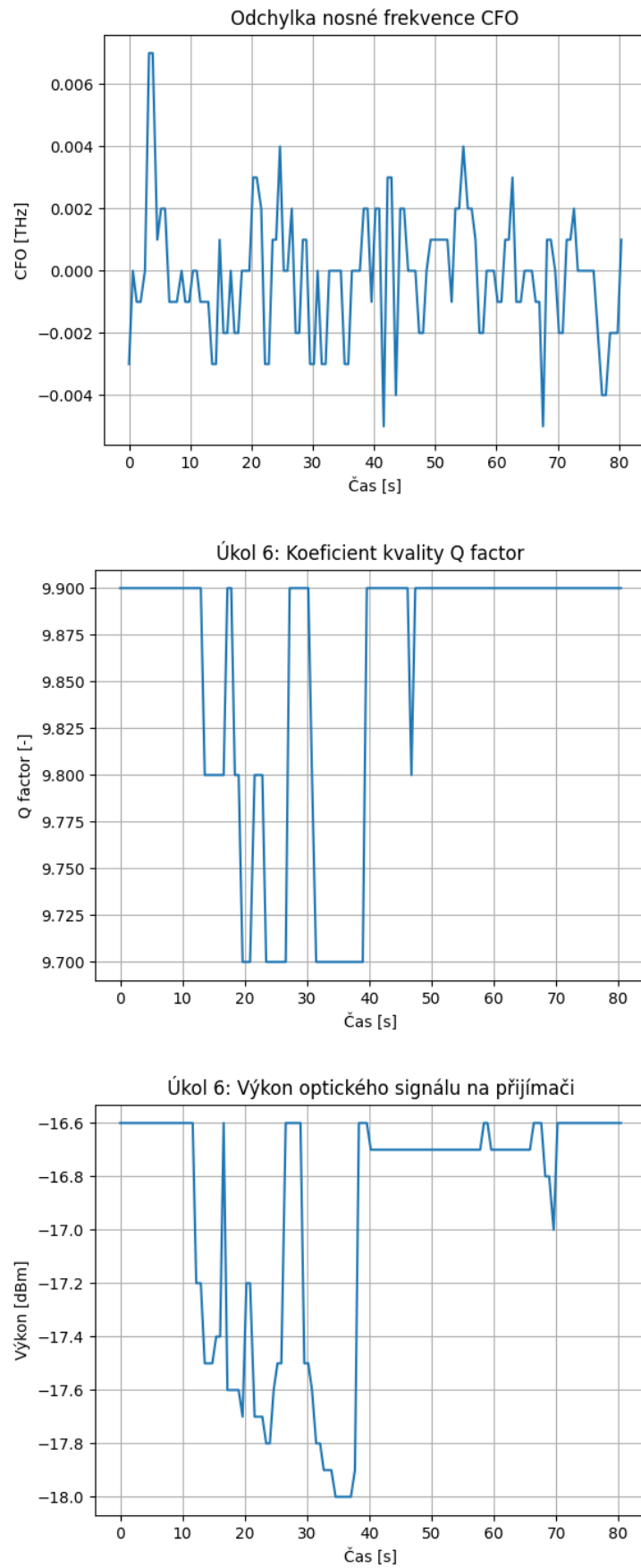


Úkol 6: Proměnlivá síla

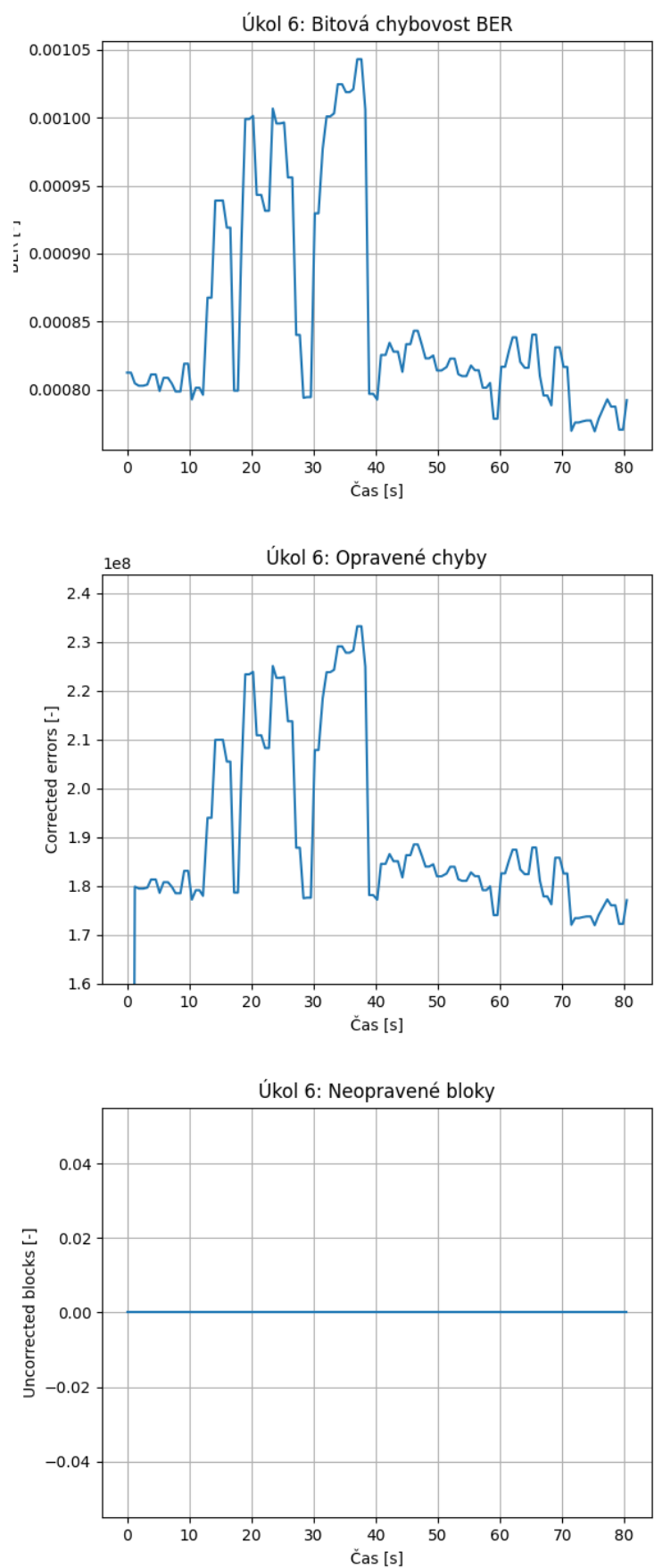
Obr. 4.7: Proměnlivá síla – SNR, diferenciální skupinové zpoždění



Obr. 4.8: Proměnlivá síla – CFO, Q faktor, výkon



Obr. 4.9: Proměnlivá síla – BER, opravené chyby, neopravené bloky



4.4 Odpovědi na vybrané otázky

- V jakých jednotkách je zadán čas v souborech *.perf a kdy probíhalo měření dat?

nanosekundy, 29. dubna 2025

- Jaká modulace byla použita v systému ADVA? Kolik stavů a bitů je tak přenášeno současně?

Vlákno je pomocí systému ADVA využito k přenosu dat rychlostí 200 Gbit/s s modulací 16-QAM.

- Na jakých parametrech se tlak nejvíce projevil?

Optical receive power, Signal to noise ratio, Q factor, Fec BER, Fec corrected errors

- Jaké parametry naopak neovlivnil skoro vůbec?

Fec uncorrected blocks, Differential group delay, Carrier frequency offset

- Co určují parametry *Diferenciální skupinové zpoždění* a *Odchylka nosné frekvence*?

Differential group delay – rozdíl doby zpoždění mezi dvěma hlavními polarizačními módy světla v pikosekundách [ps],
Carrier frequency offset – odchylka mezi skutečnou přenosovou frekvencí optického kanálu a jeho nominální (očekávanou) frekvencí.

- Jak jste seřadili náměry dle velikosti síly v 3. úkolu?

viz kapitola 4.1

- Od jaké úrovně tlaku jste mohli pozorovat změnu v naměřených parametrech?

ca 10 N

- Mohl by mít odlišné použité optické vlákno vliv na změnu chování optického vlákna?

Ano, v úloze bylo použito vlákno s vysokou odolností proti mechanickému zacházení.

- Údaje o BER jsou odečítána před nebo až po FEC (forward error correction)? (Podívejte se na grafy opravených chyb a neopravených bloků.)

Před FEC. Z grafů (opravené chyby a neopravené bloky) je viditelné, že všechny chyby jsou opraveny. Po FEC by byla BER nulová.

- Došlo během měření při vyšších úrovních tlaku (až 45 N) k přerušení přenosu dat?

Ne. Při maximálním tlaku byla BER okolo 10^{-3} . Všechny bloky byly opraveny (viz grafy).

- Došlo během měření při vyšších úrovních tlaku (až 45 N) ke zvýšení chybovosti přenášených dat (za FEC)? Jaká byla chybovost?

Ne, FEC všechny chyby opravila.

- Čím jsou způsobeny „schody“ v měření výkonu optického signálu na přijímači?

Mohou být způsobeny skokovou změnu tlaku robotické ruky nebo nízkým rozlišením odečítaných hodnot (kvantování).

- Jak vypadá konstelační diagram u modulace QPSK a 4-QAM? Je stejný?

Ano, viz teoretický úvod.

- Jaká modulace optického signálu bude mít větší dosah: OOK nebo 16-QAM?

OOK, viz teoretický úvod

5 Zadání laboratorní úlohy Koherentní optický systém

V úloze se seznámíte s tím, co je optický koherentní přenos a v čem se liší od přenosu nekoherentního. V současné době nabývá zásadního rozvoje využití optických vláken jako senzorů. Dozvíte se, jaké mohou existovat optické senzory a několik příkladů distribuovaných optických senzorů, které jsou v současnosti využívány.

V samotné úloze jsou pro vás připravena již naměřená data. Jedná se o data vyčtená z přijímače na optickém koherentním spoji v laboratoři VUT přenášející data s rychlostí 200 Gbit/s. Na optické vlákno bylo tlačeno robotickou rukou a vaším úkolem bude zpracovat naměřená data. Z těchto dat poté určit, jak se mění vyčítaná data z přenosu při rozdílném tlaku. V závěru úlohy jsou data s nepravidelným proměnlivým tlakem (tvořeným ne robotickou, ale lidskou rukou) a vaším úkolem je určit pouze na základě dat z přijímače, co se s optickým vláknem dělo.

5.1 Zadání

Úloha je určena pro seznámení se s koherentními optickými systémy a také s možností získání dat z telekomunikačního systému s koherentním přenosem, která nám umožní používat jej i jako senzor. Dále zjistit, jaká data mohou být u takového systému zpracována. Při zpracování dat budou využívány připravené skripty v jazyce **Python**. Úloha je také zaměřena na ukázkou využití možností jazyka Python pro jednoduché zpracování a zobrazení dat ve formě grafů.

1. Seznamte se s výstupními soubory z měření z koherentního systému ADVA FSP3000C, prostudujte informace o tom, jak data byla naměřena.
2. Pro vybrané soubory z měření (4 - 5) extrahujte data ze souborů *.perf do datových souborů pomocí modulu *pickle* v předpřipraveného skriptu v jazyku **Python**.
3. Ze získaných dat pomocí **Pythonu** zobrazte naměřené údaje: **SNR, diferenciální skupinové zpoždění, odchylka nosné frekvence, koeficient kvality Q, výkon optického signálu na přijímači, bitová chybovost BER, počet opravených chyb a počet neopravených bloků** v závislosti na čase.
4. Na základě získaných dat seřadte vybraných 4 až 5 souborů dle velikosti působící síly na optické vlákno.

5. Pro větší zadaný soubor dat je cílem určit závislost jednotlivých parametrů na síle působící na vlákno.
6. Pokuste se na základě získaných informací zjistit, jakou silou bylo působeno na optické vlákno v případě naměřených dat s proměnlivou silou.

5.2 Teoretický úvod

Optické koherentní systémy v současné době přinášejí zásadní výhodu pro přenos s vysokou přenosovou kapacitou. V současnosti se můžeme setkat s přenosem dat o rychlostech 1,6 Tb/s na jedné vlnové délce. [37]

Za posledních 20 let došlo díky pokroku moderních technologií ke zvýšení přenosové rychlosti koherentních spojů na 40-násobek a ke snížení energetických nároků o 90 % při porovnání energetické náročnosti pro přenesení jednoho bitu. [37] V současnosti je tendence nevyužívat koherentní spojení pouze na velké vzdálenosti, jako jsou např. podmorské kabely – nejmodernější koherentní systémy jsou schopny přenášet na komerčních spojích s rychlostí 1,6 Tb/s až na vzdálenost 700 km – ale také na krátké vzdálenosti v datacentrech a krátkých spojích s vysokou přenosovou kapacitou. V současnosti umožňují systémy s jednoduchou amplitudovou modulací s přímou detekcí (nekoherentní systémy) na krátké vzdálenosti přenášet data rychlostí okolo 10 Tb/s · m. V blízké době může být očekáván rozvoj koherentních systémů na krátkých vzdálenostech, který by mohl umožňovat přenosové kapacity okolo 1 Pb/s · m. [37]

U krátkých spojů s omezeným dosahem bývá uváděna přenosová kapacita jako součin přenosové rychlosti a přenosové vzdálenosti (bandwidth–distance product). Ta nám udává, že daný spoj je schopen přenášet danou rychlostí na danou vzdálenost. Při zvyšování vzdálenosti kapacita úměrně s rostoucí vzdáleností klesá.

Pokud je tedy uváděna šířka pásma 10 Tb/s · m, znamená to, že je schopen systém přenášet 10 Tb/s na vzdálenosti jednoho metru. Při vzdálenosti dvou metrů by šířka pásma klesla na polovinu, tedy jen 5 Tb/s. [38]

5.2.1 Optické systémy

Nekoherentní systémy

Nejčastěji je možnost potkat se s nekoherentními optickými systémy. S nekoherentními systémy, přesněji řečeno se systémy, ve kterých se nepoužívá koherentní detekce optického signálu, se můžeme setkat v celé řadě aplikací, příkladem můžou být tyto:

- **Fiber to the Home** (Pasivní optické sítě – PON)
 - GPON, XG-PON, XGS-PON
 - dvoustavová amplitudová modulace (0 nebo 1)
 - **NRZ OOK** – (Non-Return-to-Zero On-Off Keying) [39], [42]
- **Vysokorychlostní datové optické spoje** 10 – 100 Gbit/s
 - Jedná se o vysokorychlostní datové optické spoje v datacentrech
 - Krátký dosah, ale vysoká šířka pásma. Maximální dosah bývá standardně řádově omezen na stovky metrů.
 - Využívá se nejčastěji, stejně jako u PON sítí, jednoduchá dvoustavová pulzně amplitudová modulace bez návratu k nule **NRZ OOK** nebo čtyřstavová pulzně amplitudová modulace **PAM-4**. [39], [42]
- **Lokální a metropolitní optické sítě**
 - Přenosy na vzdálenosti do 10 – 40 km s rychlostmi do 10 Gbit/s
- **Video a audio přenosy po optickém vlákně**
 - SDI, MADI (**NRZI** – Non-Return-to-Zero Inverted) [40], [41]

U nekoherentních systémů se pro přenos informací využívá pouze intenzita světla (jeho výkon). Nejčastěji se využívá dvoustavová modulace (On-Off Keying), tedy zapnuto/vypnuto, nebo vícestavová amplitudová modulace (Amplitude Shift Keying), např. čtyřstavová PAM-4 modulace. [42]

5.2.2 Koherentní optické systémy

Koherentní systémy se využívají v moderních optických komunikačních systémech. Využití nachází především v situacích, kdy je třeba přenášet velké množství dat na větší vzdálenosti. Typickým příkladem jsou páteřní optické linky.

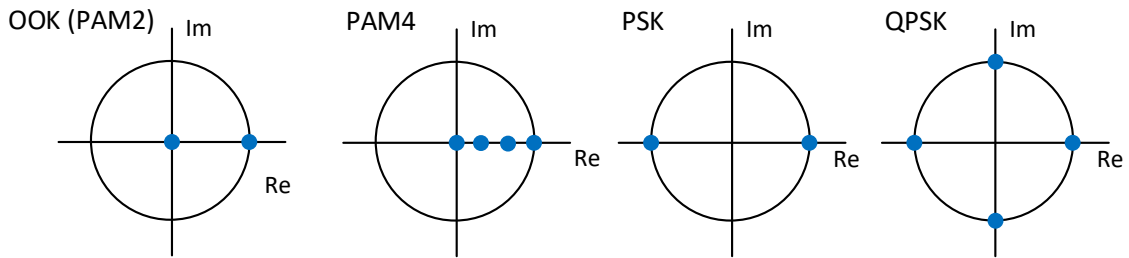
U koherentních optických systémů se navíc, kromě samotné informace o intenzitě signálu (amplitudě světla), pracuje i s informací o jeho fázi a polarizaci.

V nekoherentních optických systémech se jako zdroj světla využívá u méně náročných aplikací LED dioda. U aplikací náročnějších na stabilitu frekvence a užší spektrum se využívá laser. [43]

U koherentních optických systémů je třeba použít laserový zdroj světla, jehož spektrum je velmi úzké a optický výstup je tak co nejvíce koherentní. [44]

Co vlastně znamená slovo koherentní? Může být nahlédnuto např. do Akademického slovníku cizích slov:

„**koherentní** – souvislý, spojitý (opak inkoherentní): konkrétně světlo vycházející z bodového zdroje, monochromatické; konkrétně vlnění mající stejnou frekvenci, stejný směr kmitání a stejnou fázi nebo stejný rozdíl fází“ [45]



Obr. 5.1: Srovnání konstelačních diagramů jednotlivých druhů modulace [46]

U koherentních optických systémů se tedy nezaznamenává pouze intenzita světla, ale pracuje se s pokročilou detekcí optického signálu pro zjištění i fáze a polarizace signálu.

Co to přináší? Je umožněn efektivnější a rychlejší přenos dat. Může tak být využito složitějších modulačních technik, jako jsou QPSK nebo QAM.

Častými variantami používanými v optickém přenosu je např. modulace QPSK (z anglického Quadrature Phase Shift Keying), která je shodná s modulací 4-QAM (Quadrature Amplitude Modulation). V náročnějších přenosech se používají např. modulace 16-QAM. [47]

Jaké jsou rozdíly? Koherentní přenos je rozhodně výrazně dražší variantou ve srovnání s přenosem nekoherentním. U koherentního přenosu je třeba koherentní přijímače a přináší i náročnější požadavky na vysílač. Pokročilejší modulace sice přináší vyšší spektrální účinnost díky možnosti přenášet více bitů v jednom symbolu, zvyšují se ale požadavky na přenosovou trasu. U šestnáctiúrovňové kvadraturní amplitudové modulace (16-QAM) tak bude v porovnání s jednoduchou dvouúrovňovou amplitudovou modulací (OOK) výrazně vyšší požadavek na odstup optického signálu od šumu a systém bude výrazně citlivější na změny v disperzi a na nelinearity způsobené při přenosu. To je způsobeno tím, že v konstelačním diagramu jsou jednotlivé symboly blíže a je tak nižší tolerance k šumu a nelinearitám. [48]

5.2.3 Optické senzory

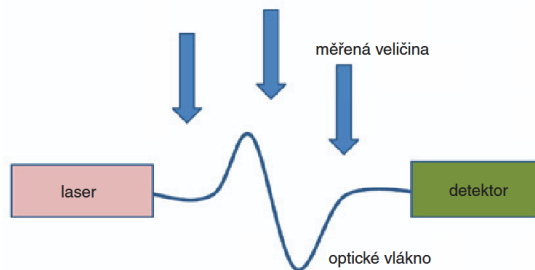
V současné době výrazně narůstá využití optických vláken za účely využití v senzorických a monitorovacích systémech. Optovláknové měřicí systémy nabývají v porovnání se systémy konvenčními mnoho výhod. Optické vlákno je kupříkladu dielektrikum. Je tudíž imunní vůči elektromagnetickému záření a umožňuje galvanické oddělení od vyhodnocovací elektroniky. [49]

Zároveň díky nízkému útlumu optického vlákna je možné senzory umístit ve větší vzdálenosti od vyhodnocovací jednotky. Mohou být vzdáleny jednotky nebo i desítky kilometrů. Optická vlákna umožňují měřit například: [50]

- teplotu
- mechanické napětí a deformace
- tlak kapalin a plynů včetně podtlaku (vakua)
- vibrace, posuv, rotaci, náklon nebo zrychlení
- vlhkost
- viskozitu
- pH [49]

5.2.4 Distribuované optické senzory

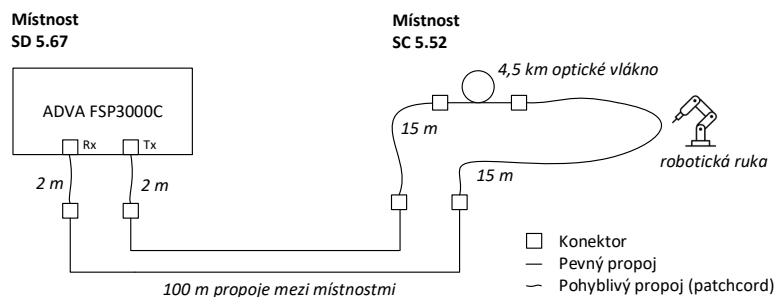
Distribuované optické senzory umožňují měřit danou veličinu v celé délce optického vlákna. Uplatnění najdou tam, kde je snímanou veličinu třeba zaznamenávat ve velké oblasti. Takto může být snímána například teplota (DTS – Distributed Temperature Sensor) nebo akustické vibrace (DAS – Distributed Acoustic Sensor). [49]



Obr. 5.2: Blokové schéma distribuovaného senzorního systému [49]

Konkrétní příklad, v současnosti využívaného a stále se rozvíjejícího systému, je využití distribuovaného akustického senzoru (DAS) pro monitoring seismické aktivity. Jedná se o projekt na využití současných podmořských optických kabelů pro velmi podrobné snímání otřesů. Dají se tak sledovat zemětřesení či sopečná aktivita. [51]

Využití DAS systémů se ale nabízí i při těžbě, stavebních pracích nebo například v případě současných telekomunikačních tras i pro detekci a lokalizaci zdrojů vibrací, např. pohyb vlaků na kolejišti. [52]



Obr. 5.3: Schéma zapojení měření se systémem ADVA a robotickou rukou

5.3 Popis laboratorní úlohy

V této laboratorní úloze se na využití optických vláken jako senzorů pokusíme podívat trochu z jiného úhlu pohledu.

V případě využití optického vlákna jako senzoru, jak bylo uvedeno v předchozí části, je optické vlákno využíváno primárně pouze pro účely senzorické. Tedy jen jako senzor. Nejsou po něm přenášena žádná data. V současnosti existují i systémy, kdy lze např. pomocí OTDR (Optical Time Domain Reflectometry) kontrolovat stav optického vlákna současně s přenosem dat (je tak učiněno pomocí vlnové multiplexace)[53], i tak je ale třeba speciální hardware pro toto měření.

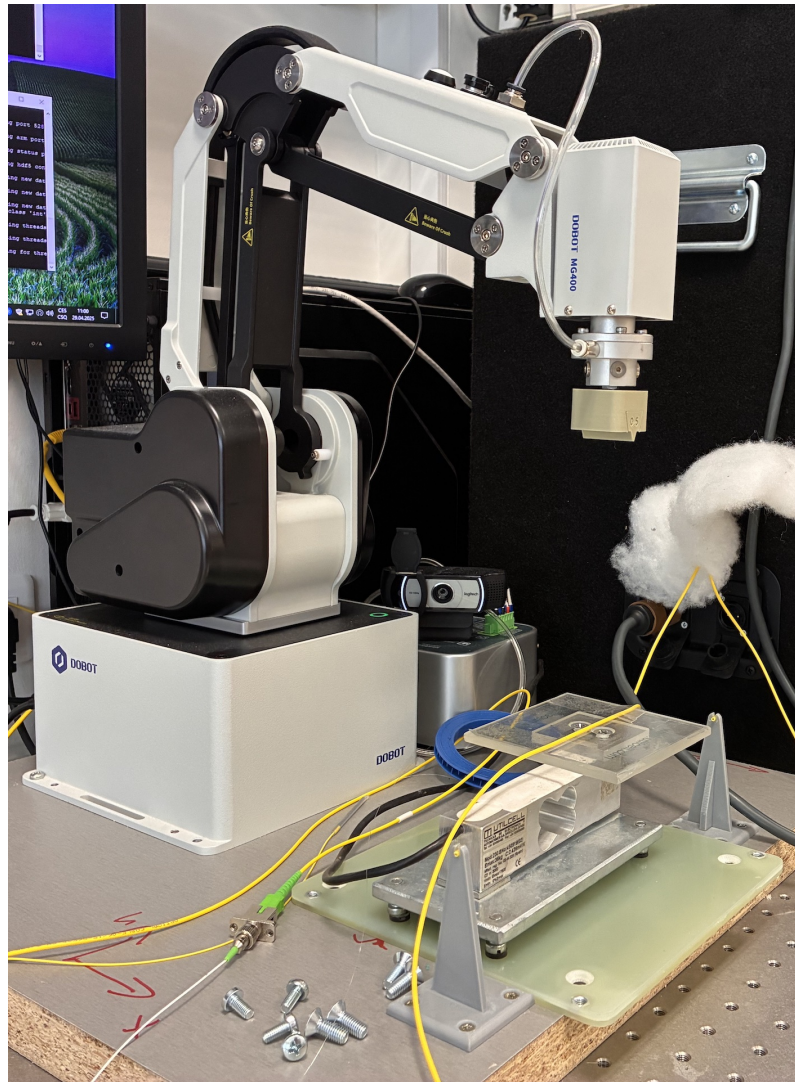
V této úloze se ale zaměříte na situaci, kdy je již v provozu koherentní optický systém. Můžete si jej představit jako vysokorychlostní optický spoj s koherentním přenosem. V úloze se budete zabývat tím, jestli na základě údajů z přijímače, který je již použitý pro samotný přenos informací po optickém vlákně, můžete ze získaných dat vyčíst informace o stavu samotného optického vlákna.

Zásadní výhodou takového využití je, že toto vlákno může být částečně použito jako senzor a již není potřeba kupovat žádná další zařízení. Budete pouze zpracovávat údaje z přijímače na optické trase. Na základě dat, která tento přijímač už měří, aby mohl koherentní systém vůbec fungovat a on mohl optický signál zpracovat, budete zjišťovat informace o stavu optického vlákna.

5.3.1 Získání dat pro úlohu

V úloze jsou vám nachystána naměřená data z koherentního systému ADVA FSP3000C.

Na obrázku 5.3 je nákres zapojení systému ADVA pro získání dat pro laboratorní úlohu. Optický signál je ze systému ADVA v místnosti SC 5.67 veden do místnosti SC 5.52. Odtud je patchcordem o délce 15 m zapojen do cívky s délkou 4,5 km vlákna. Následně je druhým 15 m patchcordem veden pod robotickou rukou a stejnou trasou



Obr. 5.4: Robotická ruka se senzorem tlaku

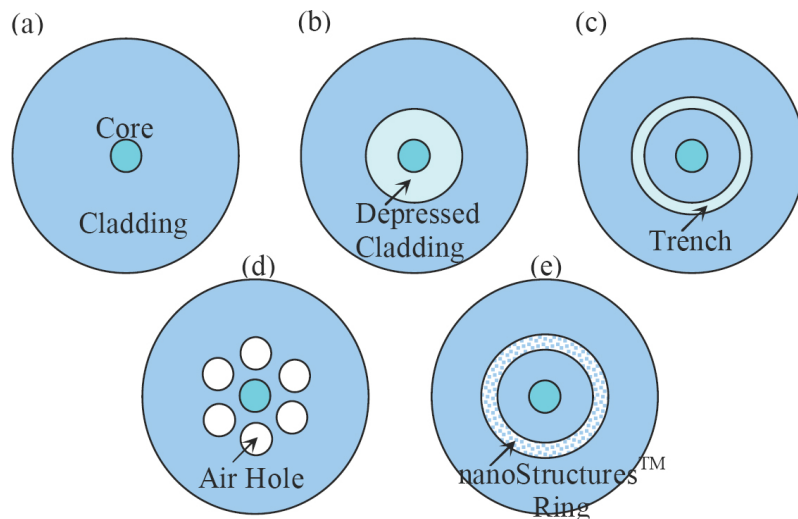
zpět do místnosti SD 5.67 se systémem ADVA.

Vlákno je pomocí systému ADVA využito k přenosu dat rychlostí 200 Gbit/s s modulací 16-QAM.

Optické vlákno je vedeno v laboratoři přes senzor tlaku, kde na optické vlákno působí silou robotická ruka. Robotická ruka je nastavena tak, že po začátku měření začne vždy postupně tlačít na vlákno na senzoru tlaku. Tento tlak postupně zvyšuje po malých krocích, až dosáhne nastavené hodnoty. Než robotická ruka dosáhne této hodnoty, může to při větších tlacích trvat i několik minut. Jakmile je dosaženo dané hodnoty a síla je stabilní, setrvá ruka ještě 10 sekund v přednastavené poloze. Poté se vrátí do výchozí polohy a znovu opakuje celý proces.

Na obrázku 5.4 je vidět robotická ruka DOBOT MG400 ve výchozí poloze. [54]

Pod ní se nachází senzor tlaku UTILCELL 230, který slouží k odečítání informace



Obr. 5.7: Optická vlákna méně citlivá na ohyb [59]

- (a) Konstrukce s redukováným průměrem modového pole (MFD)
- (b) Vlákno s pláštěm s nižším indexem lomu
- (c) Konstrukce s příkopovým profilem
- (d) Vlákno s otvory podporujícími vedení
- (e) Vlákno s nanostrukturálním profilem

5.4 Pracovní postup

1. Seznámení s výstupními soubory z koherentního systému ADVA

K úloze jsou přiloženy zachycené soubory z měření optického vlákna. Ty jsou uloženy ve formátu *.perf. Jedná se v podstatě o textový soubor, kde je na každém řádku zachycen jeden údaj naměřený ze systému ADVA. Samotný soubor lze tedy zobrazit v obyčejném textovém editoru (Notepad.exe), na straně 68 je vypsáných prvních 17 řádků z jednoho ze souborů.

```

1 adva_performance_monitoring,interface=1/1/n/ot200,logical_interface=otsia,pm_interval=acor-pmt:interval-indefinite,pm_profile=ImpCFPb16QCdc adom-oduckpat:chromatic-dispersion-compensation=-150 1745934099178797056
2 adva_performance_monitoring,interface=1/1/n/ot200,logical_interface=otsia,pm_interval=acor-pmt:interval-indefinite,pm_profile=QualityCFPb200g16Q adom-oduckpat:signal-to-noise-ratio=16.9 1745934099178797056
3 adva_performance_monitoring,interface=1/1/n/ot200,logical_interface=otsia,pm_interval=acor-pmt:interval-indefinite,pm_profile=QualityCFPb adom-oduckpat:optical-signal-to-noise-ratio=25.0 1745934099178797056
4 adva_performance_monitoring,interface=1/1/n/ot200,logical_interface=otsia,pm_interval=acor-pmt:interval-indefinite,pm_profile=CarrierCFPb adom-oduckpat:differential-group-delay=8 1745934099178797056
5 adva_performance_monitoring,interface=1/1/n/ot200,logical_interface=otsia,pm_interval=acor-pmt:interval-15min,pm_profile=Carrier adom-oduckpat:carrier-frequency-offset=0.003 1745934099178797056
6 adva_performance_monitoring,interface=1/1/n/ot200,logical_interface=otsia,pm_interval=acor-pmt:interval-15min,pm_profile=Quality adom-oduckpat:q-factor=9.9 1745934099178797056
7 adva_performance_monitoring,interface=1/1/n/ot200,logical_interface=otsia,pm_interval=acor-pmt:interval-15min,pm_profile=QualityMod adom-oduckpat:polarization-dependent-loss=0.0 1745934099178797056
8 adva_performance_monitoring,interface=1/1/n/ot200,logical_interface=otsia,pm_interval=acor-pmt:interval-15min,pm_profile=ImpCdc acor-factt:opt-rcv-pwr=-16.6 1745934099178797056
9 adva_performance_monitoring,interface=1/1/n/ot200,logical_interface=otsia,pm_interval=acor-pmt:interval-24hour,pm_profile=Carrier acor-factt:opt-rcv-pwr-lo=-18.9 1745934099178797056
10 adva_performance_monitoring,interface=1/1/n/ot200,logical_interface=otsia,pm_interval=acor-pmt:interval-24hour,pm_profile=Quality acor-factt:opt-rcv-pwr-mean=-17.3 1745934099178797056
11 adva_performance_monitoring,interface=1/1/n/ot200,logical_interface=otsia,pm_interval=acor-pmt:interval-24hour,pm_profile=QualityMod acor-factt:opt-rcv-pwr-hi=-16.5 1745934099178797056
12 adva_performance_monitoring,interface=1/1/n/ot200,logical_interface=otsia,pm_interval=acor-pmt:interval-24hour,pm_profile=ImpCdc adom-oduckpat:carrier-frequency-offset-lo=-0.006 1745934099178797056
13 adva_performance_monitoring,interface=1/1/n/ot200,logical_interface=otu-c2pa,pm_interval=acor-pmt:interval-indefinite,pm_profile=FEC acor-factt:fec-ber=0.000814933253200212 1745934099447931904
14 adva_performance_monitoring,interface=1/1/n/ot200,logical_interface=otu-c2pa,pm_interval=acor-pmt:interval-15min,pm_profile=FEC acor-factt:fec-ber-mean=0.000944883146509358 1745934099447931904
15 adva_performance_monitoring,interface=1/1/n/ot200,logical_interface=otu-c2pa,pm_interval=acor-pmt:interval-15min,pm_profile=NearEnd acor-factt:fec-corrected-errors=126565536844 1745934099447931904
16 adva_performance_monitoring,interface=1/1/n/ot200,logical_interface=otu-c2pa,pm_interval=acor-pmt:interval-24hour,pm_profile=FEC acor-factt:fec-uncorrected-blocks=0 1745934099447931904
17 adva_performance_monitoring,interface=1/1/n/ot200,logical_interface=otu-c2pa,pm_interval=acor-pmt:interval-24hour,pm_profile=NearEnd acor-factt:background-block-errors=0 1745934099447931904

```

Od 18. řádku se opakují již ty stejné parametry. Nyní se tedy zaměřte na těchto prvních 17 řádků. Ze začátku každého řádku se dozvíte informace o měření, na jakém rozhraní se měření provádí. Dále u hodnot, které obsahují informace o průměru, minimu, či maximu, se dozvíte i údaj, za jaký časový úsek je vyhodnocení prováděno. Zajímat vás tak budou především informace na konci řádku.

Začněte od konce, tedy z pravé strany jednotlivých řádků. Poslední údaj je časová informace o provedeném měření. Jedná se o unixový formát času. Tedy doba, která uplynula od 1. 1. 1970. [60]

Určete, v jakých jednotkách je časový údaj udáván a kdy dané měření proběhlo.¹

¹Bylo by zřejmě zbytečné počítat údaj ručně, zkuste využít nějaký online převodník časového formátu UNIX.

Poté se přesuňte na část zprava oddělenou mezerami hned před časovým údajem. Jedná se o tato data:

```
adom-oduckpat:chromatic-dispersion-compensation=-150
adom-oduckpat:signal-to-noise-ratio=16.9
adom-oduckpat:differential-group-delay=8
adom-oduckpat:carrier-frequency-offset=0.003
adom-oduckpat:q-factor=9.9
adom-oduckpat:polarization-dependent-loss=0.0
acor-factt:opt-rcv-pwr=-16.6
acor-factt:opt-rcv-pwr-lo=-18.9
acor-factt:opt-rcv-pwr-mean=-17.3
acor-factt:opt-rcv-pwr-hi=-16.5
adom-oduckpat:carrier-frequency-offset-lo=-0.006
acor-factt:fec-ber=0.000814933253200212
acor-factt:fec-ber-mean=0.000944883146509358
acor-factt:fec-corrected-errors=126565536844
acor-factt:fec-uncorrected-blocks=0
acor-factt:background-block-errors=0
```

Není nutné zabývat se všemi 17 údaji. Jelikož je cílem měřit okamžité hodnoty v závislosti na tlaku vytvářeném na optické vlákno, nejsou potřeba hodnoty průměrované za určitou dobu, ani hodnoty minim a maxim. Zaměřte se na tyto parametry:

- **Signal to noise ratio** – poměr signálu k šumu [dB]
- **Differential group delay** – rozdíl doby zpoždění mezi dvěma hlavními polarizačními módy světla v pikosekundách [ps]
- **Carrier frequency offset** – odchylka mezi skutečnou přenosovou frekvencí optického kanálu a jeho nominální (očekávanou) frekvencí
- **Q factor** (Quality factor) – metrika, která popisuje kvalitu přenášeného signálu v optické komunikaci, úzce spjata s BER. Její výpočet bývá dán určením středních hodnot logických jedniček a nul a jejich směrodatných odchylek
- **Optical receive power** (pt-rcv-pwr) – úroveň optického signálu přijatého na rozhraní [dBm]
- **Fec BER** (Forward Error Correction – Bit Error Rate) – poměr chybně přijatých bitů ke všem přijatým bitům
- **Fec corrected errors** – počet bitových chyb, které byly úspěšně opraveny algoritmem Forward Error Correction (FEC)
- **Fec uncorrected blocks** – počet bloků, které nebyly úspěšně opraveny algoritmem Forward Error Correction (FEC) [61], [62]

2. Extrahujte data ze souborů *.perf do datových souborů pomocí modulu pickle

Nyní si vyberte 5 souborů ze zadaných souborů ve složce **Zadání 1**.

Jedná se o několik měření s rozdílnými tlaky, kterými je působeno na optické vlákno.

Potřebujete dva skripty ze složky **Zadání 1**.

Skripty jsou připraveny v programovacím jazyce Python. Pro jejich správnou funkci musí být nainstalován Python v daném počítači. Soubory byly vytvářeny ve verzi Python 3.13.

Jaké součásti v Python potřebujete? Do systému Windows je možné nainstalovat Python z aplikace Microsoft Store.

Pro zpracování a zobrazování dat v grafech budete využívat moduly *numpy* a *matplotlib*. Tyto moduly nejsou součástí běžné instalace Pythonu. Pokud nejsou již nainstalovány, je třeba je nainstalovat. Jednou z možností je přes instalátor balíčků *pip*. Ten je od verze 3.4 součástí instalace Pythonu. Stačí tedy spustit příkazový řádek a zadat:

```
pip install numpy
pip install matplotlib
```

Ve složce **Skripty 1** otevřete (např. v textovém editoru nebo v Microsoft Visual Studiu) skript **text2data.py**.

Popis funkce skriptu Skript je určen na extrakci dat ze souborů *.perf. Data poté uloží pomocí modulu *pickle* do souborů, které je možné načíst v jiném Python skriptu. Program prochází zadaný soubor řádek po řádku pomocí funkce *for* a na každém řádku vyhledává daný text, který označuje uložená data. Funkce *find* vrátí, na kolikátém znaku na řádku se daný text našel. Pokud nebyl nalezen, vrátí „-1“.

Pokud se daný text na řádku najde, vyhledají se znaky „=“ a mezerník „ “. Mezi těmito znaky je poté vyhledána hodnota funkce, která je převedena do formátu float a prvek je poté uložen na konec daného seznamu.

Obdobně je vyčtena i hodnota času, kdy je z daného řádku s informací o SNR uložen i čas, ve kterém byl údaj načten. Jedná se o posledních 20 znaků na řádku. Ten je poté převeden na sekundy a uložen do proměnné *act_time*. Na konec seznamu se nepřidává hodnota času ve formátu UNIX, ale pouze čas v sekundách od začátku měření – tj. od prvního načteného údaje SNR.

Pokud se údaj SNR nenachází na právě kontrolovaném řádku, skript postupně prochází další hledané hodnoty. Takto se projde celý soubor. Jednotlivé hodnoty jsou ukládány do vlastních seznamů:

- *time*
- *snr*
- *differential_group_delay*
- *carrier_frequency_offset*
- *q_factor*
- *rcv_pwr*
- *fec_ber*
- *corrected_errors*
- *uncorrected_blocks*

V případě hodnot *corrected_errors* a *uncorrected_blocks* je v systému ADVA ukládána kumulativní hodnota počtu opravených chyb za posledních 15 minut, respektive 24 hodin. Protože v měření nás zajímají data, jak se hodnoty mění v čase, tak namísto této hodnoty je do seznamu ukládán rozdíl poslední a současné hodnoty naměřené ze systému ADVA.

Všechny seznamy jsou poté uloženy do pole *dataset*. To je poté pomocí modulu *pickle* zapsáno do souboru *outputFile* ve formátu **.data*.

Balíček *pickle* v Pythonu slouží k uložení a načtení Python objektů do a z binárního formátu. Umožňuje tak snadno ukládat složité datové struktury, kterými jsou například vícerozměrné seznamy do souborů nebo je přenášet mezi procesy. [63]

Co je nutné ve skriptu upravit? Ve skriptu musí být upraveny dvě základní informace. Jednou z nich je **pracovní složka**, ve které skript bude vyhledávat soubory **.perf* a do které bude také ukládat zpracované soubory **.data*. Informace o pracovní složce jsou uloženy v proměnné **folder**. Např.:

```
folder = "C:\\\\Lab 02"
```

Dále také **název vstupního a výstupního souboru**. Pro jednoduchost a přehlednost jsou vstupní a výstupní soubory pojmenovány stejně. Pouze se odlišují příponou. Samotný název obou souborů je poté uložen v proměnné **nazev**. Např.:

```
nazev = "X"
```

Pokud byste chtěli soubory pojmenovat rozdílně, můžete tak učinit úpravou proměnných *inputFile* a *outputFile*.

Pracovní složka je ve skriptu definována z důvodu rozdílného chování Pythonu na systému Windows 10. V případě spuštění z příkazové řádky je skript spuštěn v aktuální složce. V případě spuštění skriptu dvojklikem z průzkumníka souborů je ale otevřen ve složce `C:\Windows\System32`. Proto je ve skriptu zadaná složka, odkud budou soubory načítány a kam budou ukládány. [64]

Spuštění skriptu Pokud je skript upraven na správnou složku a název souboru, lze ho jen spustit. Ve Windows s nainstalovaným Pythonem tak udělejte pouhým dvojklikem na soubor `text2data.py`.

Pro převod celkem čtyř souborů je nutné skript upravit postupně pro každý soubor a poté spustit.

3. Zobrazte naměřené údaje

Nyní využijte druhý předpřipravený skript ve složce **Skripty 1** soubor `grafy_casova_zavislost.py`. Ten můžete opět otevřít v např. textovém editoru.

Popis skriptu Ve skriptu dochází k načtení souborů dle názvů uložených v seznamu `soubory_k_nacteni` ve složce `folder` pomocí balíčku `pickle`. Do těchto souborů byla v předchozím bodě uložena data, která teď budete načítat. Pro každý soubor v seznamu `soubory_k_nacteni` dojde k uložení dat do seznamu `Data`.

Jedná se o třírozměrný seznam: Můžete si jej představit jako několikastránkovou tabulku.

První rozměr odkazuje na rozdílné časy v měření. Tedy pokudikáté byla daná hodnota změřena (mohlo by jít o konkrétní řádek tabulky).

Druhý rozměr je pak sloupec tabulky, tedy jaký údaj bude odečítán. Na indexu `0` jsou uloženy časy, na indexu `1` jsou uloženy *SNR* a tak dále.

Třetí rozměr odkazuje na jednotlivá měření. Pokud jsou do skriptu načtené údaje celkem ze čtyř souborů (čtyř měření), budou celkem 4 indexy ve třetím rozměru, tedy možné indexy budou: `0`, `1`, `2` a `3`.

Pro hledání konkrétních uložených parametrů si lze představit pozicování takto:
`Data[tabelka][sloupec][řádek]`

Pokud jste tedy načteli tři soubory a bude vás zajímat seznam s informacemi o čase z prvního souboru, odkážte se na sloupec s indexem `Data[0][0]`. Seznam s časovými údaji z třetího souboru je `Data[2][0]`. Seznam s měřením *SNR* z třetího souboru je `Data[2][1]`.

Jednotlivé indexy pro měřená data jsou uvedeny níže. Za hvězdičku je třeba doplnit index, ze kterého souboru chceme data získat:

- Data[*][0] – Čas
- Data[*][1] – SNR
- Data[*][2] – Differential group delay
- Data[*][3] – Carrier frequency offset
- Data[*][4] – Q factor
- Data[*][5] – Rcv pwr
- Data[*][6] – Fec BER
- Data[*][7] – Corrected errors
- Data[*][8] – Uncorrected blocks

Parametry, které mají být zobrazeny v grafu, jsou poté volány funkcí *plot(osa x, osa y)*. Pro každou řadu zobrazenou v grafu je třeba funkci *plot* volat znovu. Pro rychlejší úpravy je vytvořena proměnná *sloupec*, která umožňuje jednoduše měnit, která data budou v grafu zobrazena.

Následně je na základě této proměnné *sloupec* také vytvořen vhodný popis grafu.

Pro práci s grafy je ve skriptu volán modul *matplotlib.pyplot* jako modul *graf*. Pro vykreslení grafu může být použito větší množství funkcí. Ve skriptu jsou použity tyto:

- graf.plot()* – pro vykreslení řady v grafu
- graf.xlabel()* – pro popis osy *x*
- graf.ylabel()* – pro popis osy *y*
- graf.title()* – pro název grafu
- graf.xticks()* – pro nastavení značek na ose *x*
- graf.grid()* – pro nastavení mřížky
- graf.legend()* – pro nastavení legendy grafu
- graf.subplots_adjust()* – je využit pro zmenšení grafu v okně
- graf.show()* – pro zobrazení grafu

Co musí být ve skriptu upraveno Musí být upraveny **soubory**, ze kterých budou načítána data a ze kterých tedy bude tvořen graf. To lze zajistit úpravou dat v proměnné `soubory_k_nacteni`. Protože budete zobrazovat graf ze čtyř různých měření, soubory by měly být čtyři. Zadávají se stejně jako v předchozím případě názvy bez přípony. Např.:

```
soubory_k_nacteni = ["V", "W", "X", "Y"]
```

Dále upravte i **adresu pracovní složky**, ze které budou soubory načítány v proměnné `folder`. Např.:

```
folder = "C:\\Lab 02"
```

Další úprava musí být provedena v části Vytvoření grafů. Zde pro každý soubor vytvořte jeden řádek tak, aby se z každého vykreslila jedna křivka. Např.:

```
sloupec = 3;
```

```
graf.plot(Data[0][0], Data[0][sloupec])
```

```
graf.plot(Data[1][0], Data[1][sloupec])
```

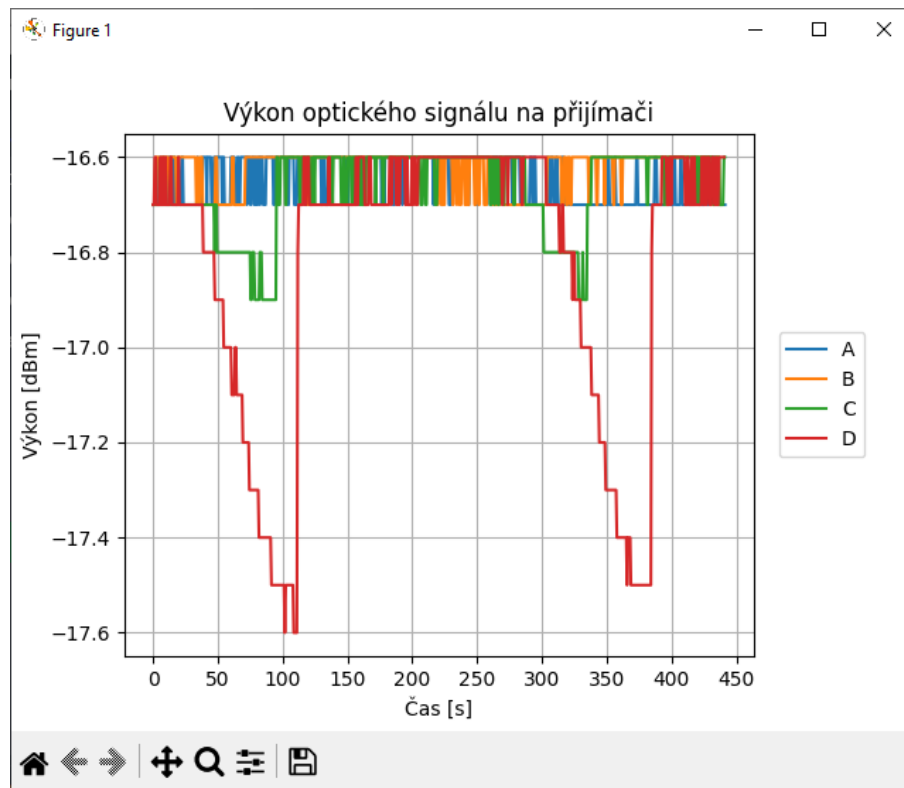
```
graf.plot(Data[2][0], Data[2][sloupec])
```

```
graf.plot(Data[3][0], Data[3][sloupec])
```

Jaký sloupec bude zvolen, ovlivní, jaký výstup v grafu bude zobrazen.

Ve skriptu není proti chybám ošetřena varianta, v případě že použijete funkci `plot()` a načtete do ní údaje mimo rozsah seznamu `Data`. V tom případě skript spadne. Je tedy vhodné, v případě problému, dobře si zkontrolovat, jestli nechcete načítat data z proměnné `Data`, kde se ale žádná data nenachází.

Jak by mohl vypadat výstup? Výstup může vypadat nějak podobně jako na obrázku 5.8. Nezapomeňte, že celkem můžete zobrazit sedm různých průběhů, protože jste sbírali více dat.



Obr. 5.8: Graf časové závislosti výkonu optického signálu na přijímači

4. Seřadte dané naměřené údaje v závislosti na působící síle na optické vlákno

Pokuste se porovnat jednotlivé průběhy. V zobrazení dat v závislosti na čase by mělo být patrné, jak narůstal tlak robotické ruky na vlákno až do maximální síly.

- Na kterých parametrech vyčítaných z koherentního systému se nejvíce projevil tlak vyvíjený robotickou rukou na vlákno?
- Jsou některé parametry, na kterých se tlak robotické ruky neprojevil vůbec?
- Dle dat zobrazených v grafu určete, jakým způsobem se při měření měnila síla. Je možné seřadit jednotlivé údaje z měření od nejmenší po největší sílu?
- Uložte si grafy, na kterých jsou informace patrné. Můžete k tomu použít symbol diskety ve spodní liště zobrazeného grafu, jako na obrázku 5.8.

5. Pro větší soubor dat určete závislost změřených parametrů na síle

Nejprve převedte hodnoty v souborech **.perf*

V další části pracujte s naměřenými daty ve složce **Zadání 2**. Protože se jedná o větší množství souborů ve formátu **.perf*, použijte skript

text2data - více souborů.py ve složce **Skripty 2**.

Tento skript je pouze upravenou verzí skriptu **text2data.py**, která pomocí cyklu *for* umožňuje převést najednou větší množství souborů z formátu **.perf*.

Co je třeba ve skriptu upravit?

Stačí zadat **názvy souborů** bez přípony, které chcete převádět do proměnné `nazvy_souboru` například takto:

```
nazvy_souboru = ["0 N", "3 N", "6 N"]
```

Dále upravte i **adresu pracovní složky**, ze které budou soubory načítány v proměnné `folder`. Např.:

```
folder = "C:\\\\Lab 02"
```

Takto převedte všechny náměry ze složky **Zadání 2**.

Pro zjednodušení můžete použít zadání názvů souborů v této podobě:

```
nazvy_souboru = [f"{x} N" for x in [0, 3, 6, 9, 12, 16, 20, 25,
    30, 35, 40, 45]]
```

Nyní zobrazte získaná data

K zobrazení dat je připraven skript **grafy_zavislost_na_sile.py** ve složce **Skripty 2**.

Pro správné fungování skriptu je třeba opět zadat názvy souborů, které budete načítat do seznamu `soubory_k_nacteni` a upravit složku, ve které se soubory nachází v proměnné `folder`. To může být uděláno stejně, jako v předchozím skriptu pro extrakci dat, tedy např.:

```
soubory_k_nacteni = [f"{x} N" for x in [0, 3, 6, 9, 12, 16, 20, 25,
    30, 35, 40, 45]]
```

Dále je třeba pro správné zobrazení sil zadat hodnoty nezávislé proměnné. Učíte tak v seznamu `síly`. Zadejte jednotlivé síly ve stejném pořadí, v jakém jsou načítány soubory, tedy např.:

```
síly = [0, 3, 6, 9, 12, 16, 20, 25, 30, 35, 40, 45]
```

Ve skriptu musí být také upraveno, jaké údaje budou vykreslovány do grafu. Protože tentokrát nebude vytvářen graf závislosti na čase, zadejte jako první údaj do funkce `plot` seznam naplněný stejnými hodnotami velikosti síly, který bude stejně dlouhý, jako je velikost seznamu se změřenými údaji. Velikost seznamu zjistíme pomocí funkce `len(Data[*][0])`. Jeden řádek funkce tak může vypadat takto:

```
graf.plot([síly[0]]*len(Data[0][sloupec]), Data[0][sloupec], 'x')
```

První parametr funkce `plot()` je seznam o délce stejné, jako má seznam `Data[0][sloupec]` a je naplněn stejnými hodnotami zadanými v `síly[0]`. Druhým parametrem je seznam s již změřenými údaji ze seznamu `Data[0][sloupec]`.

Třetí parametr zadaný k funkci `plot()` je `'x'`. Tento parametr udává, že v grafu nebudou zobrazeny spojnice hodnot jako v předchozích příkladech, ale každý bod bude zobrazen jako křížek.

Ovšem takto budou v grafu zobrazeny všechny změřené hodnoty při daném měření. Pokud tedy byla cílem měření síla, kterou tlačí rameno na optické vlákno, například 15 N, tak v rámci měření, kdy rameno postupně zvyšuje svůj přítlak na vlákno, bude obsahovat měření 15 N i parametry při nižším tlaku vyvíjeném na optické vlákno. Z toho důvodu jsou při odečítání hodnot důležité především extrémní hodnoty. V případě zvoleného sloupce 1, tedy údaje SNR, bude maximální síly dosaženo – jak bylo patrné z časových průběhů – při minimálním rozdílu signálu a šumu.

Proto si do grafu vynesete ještě křivku, která bude spojovat minima jednotlivých údajů.

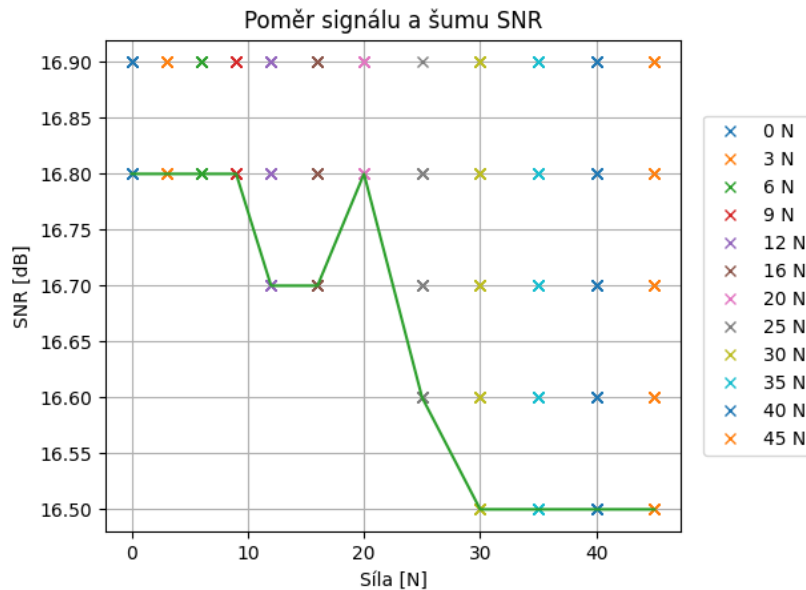
K tomu využijte část skriptu:

```
# minimální hodnota ve sloupci pro každé Data[i]
min_hodnoty = []

for i in range(len(Data)):
    min_hodnota = max(Data[i][sloupec])
    min_hodnoty.append(min_hodnota)

# přidání křivky zobrazující minimální hodnotu
graf.plot(síly, min_hodnoty)
```

Jak může vypadat výsledný graf? Výsledný graf pak může vypadat např. nějak takto:



Obr. 5.9: Poměr signálu a šumu (SNR) v závislosti na síle působící na vlákno

Úkoly

- Zobrazte grafy i pro ostatní naměřená data.
- Bude ve všech grafech sledovaná hodnota minimum funkce, nebo u některých změřené hodnoty porostou?
- Od jaké úrovně tlaku jste mohli pozorovat změnu v naměřených parametrech?
- Jednotlivé grafy si opět uložte.

6. Zpracujte měření s proměnlivou hodnotou tlaku na vlákno.

Ve složce **Zadání 3** je poslední zadaný soubor ve formátu **.perf*. Tentokrát se nejedná o tlak způsobený robotickou rukou, ale tlak je nepravidelný, způsoben rukou lidskou. Pokuste se s využitím skriptů a informací z předchozích bodů laboratorního měření tento soubor zpracovat. Zobrazte je graficky a na základě závislostí z předchozího bodu určete, jakou silou a po jakou dobu mohlo být na vlákno působeno.

Protože je měření jinak dlouhé (kratší, cca 80 s) než ostatní data, můžete upravit část zobrazení grafu. Pro lepší zobrazení postačuje zakomentovat (vložit na začátek řádku symbol #) část kódu upravující značky na ose *x*.

Dále může být skryta legenda a zrušeno zmenšení grafu, nejsou potřeba tedy ani funkce *subplots()* a *legend()*.

5.5 Kontrolní otázky

- V jakých jednotkách je zadán čas v souborech **.perf* a kdy probíhalo měření dat?
- Jak se můžou upravovat optická vlákna, aby byla méně náchylná na ohyb?
- Jaký je rozdíl mezi koherentním a nekoherentním systémem?
- Jaká modulace byla použita v systému ADVA? Kolik stavů a bitů je tak přenášeno současně?
- Co bylo způsobeno tlakem robotické ruky na vlákno?
- Jaké parametry z přenosu dat v koherentním optickém systému použitém v úloze bylo možné vyčíst na přijímači optického signálu?
- Na jakých parametrech se tlak nejvíce projevil?
- Jaké parametry naopak neovlivnil skoro vůbec?
- Co určují parametry *Diferenciální skupinové zpoždění* a *Odchylna nosné frekvence*?
- Jak jste seřadili náměry dle velikosti síly ve 3. úkolu?
- Od jaké úrovně tlaku jste pozorovali změnu v naměřených parametrech?
- Mohlo by mít odlišné použité optické vlákno vliv na změnu chování optického vlákna?
- Údaje o BER jsou odečítána před nebo až po FEC (forward error correction)? (Podívejte se na grafy opravených chyb a neopravených bloků.)
- Došlo během měření při vyšších úrovních tlaku (až 45 N) k přerušení přenosu dat?
- Došlo během měření při vyšších úrovních tlaku (až 45 N) ke zvýšení chybovosti přenášených dat (za FEC)? Jaká byla chybovost?
- Čím jsou způsobeny „schody“ v měření výkonu optického signálu na přijímači?
- Jak vypadá konstelační diagram u modulace QPSK a 4-QAM? Je stejný?
- Jak vypadá konstelační diagram u 16-QAM, 32-QAM a 64-QAM modulace?
- Jaká modulace optického signálu bude mít větší dosah: OOK nebo 16-QAM?

6 Popis laboratorní úlohy Měřicí přístroj VeEX VePAL TX300S

Cílem je navrhnout laboratorní úlohu s využitím přístroje VeEX VePAL TX300s pro předmět MPC-SKS. Měřicí přístroj je univerzální tester umožňující celou řadu testování datových a telekomunikačních sítí. Přístroj je též využíván v laboratorní úloze v předmětu BPC-PTS. Zde je využíván k měření propustnosti aktivních prvků a srovnání metodik pro komplexní testování výkonnosti ethernetových služeb.

Cílem návrhu této úlohy bylo najít jiné možnosti, které přístroj umožňuje, a koncipovat laboratorní úlohu s jeho využitím.

Úloha je koncipovaná tak, že by měla ukázat především možnosti a základní prvky obsluhy měřicího přístroje. Zároveň veškerý testovaný provoz je přímo generovaný v samotném přístroji.

6.1 Motivace a cíle laboratorní úlohy

Úloha je koncipována více jako otevřená úloha, která umožňuje studentům seznámit se s přístrojem a možnostmi, jaké nabízí. V úloze se pracuje s přenosem po optickém médiu a představuje několik přenosových technologií, které se pro přenos dat využívají. Studenti se seznámí s druhy a popisem optických transeiverů a několika technologiemi pro přenos dat, včetně jejich vrstev a fungování. V úloze pak nakonfigurují v přístroji generování provozu jednotlivých technologií a mají možnost je srovnat s ohledem na jejich latenci, možnosti a přenosovou kapacitu.

7 Zadání laboratorní úlohy Měřicí přístroj VeEX VePAL TX300S

V laboratorní úloze se pracuje s měřicím přístrojem VeEX VePAL TX300s. Jedná se o univerzální tester umožňující celou řadu testování datových a telekomunikačních sítí.

Úloha pracuje s využitím testeru pro práci s optickým přenosem dat a možnostmi generování provozu v optických sítích. V úloze se pracuje s několika technologiemi využívanými pro přenos dat přes optické médium a jejich srovnáním.

7.1 Potřebné vybavení

- Měřicí přístroj VeEX Vepal TX300s s nainstalovanou kartou TX340s.
- Dva shodné SFP/SFP+ moduly pro zapojení do měřicího přístroje.
- Vhodný optický patchcord LC/LC (odpovídající SFP/SFP+ modulům) pro propojení SFP modulů.
- *Volitelně USB flashdisk pro uložení zachycených *.pcap souborů.
(Může být nahrazeno i přenosem souborů přes vzdálený přístup k měřicímu přístroji.)*
- *Volitelně počítač se softwarem Wireshark pro analýzu souborů.*

7.2 Popis laboratorní úlohy

V laboratorní úloze se seznámíte s možnostmi přístroje VeEX VePAL TX300s, jaké druhy testů se na něm mohou provozovat a k čemu může být využit. Otestujete si SFP moduly, zjistíte, jaká data z nich může přístroj vyčíst. Dále si postupně projdete nastavení několika testů a rozdílných způsobů, jak může být test provozován a jaké druhy provozu v síti dokáže přístroj generovat.

V druhé části laboratorní úlohy se pokusíte srovnat přenosovou rychlost v ethernetových rámcích pro různé vrstvy síťového modelu. Pro několik přenosových technologií porovnáte zpoždění a odchyly ve zpoždění přijatých rámců. Dále nastavíte a zprovozníte zapouzdření více ethernetových linek do jednoho OTN spoje.

7.3 Zadání

1. Seznamte se přístrojem VeEX VePAL TX300s a s instalovanou kartou TX340s.
2. Otestujte dodané SFP transceivery a zjistěte, jaké údaje je možné z transceiverů vyčíst.
3. Zprovozněte pomocí technologie Ethernet spojení mezi dvěma SFP moduly s využitím funkce Loopback na druhém portu. Porovnejte kapacitu spoje v závislosti na velikosti ethernetového rámce.
4. Srovnajte zpoždění a kolísání zpoždění pro technologie Ethernet, Ethernet zapouzdřený pomocí Optical Transport Network a Fibre Channel přenášené přes optické vlákno.
5. Nastavte přenos pro více ethernetových linek v jednom spoji pomocí OTN.

7.4 Teoretický úvod

7.4.1 Standardizované transceivery

Jedná se o standardizované moduly, které umožňují využití především v telekomunikačních sítích, použití pro připojení širokého spektra komunikačních protokolů do zařízení. Obecně se označují jako SFP („es-ef-péčka“), i když SFP je zároveň označení konkrétního typu SFP. Zkratka SFP znamená Small Form-factor Pluggable, tedy počestně zásuvný modul malého formátu. [65]



Obr. 7.1: Příklad SFP modulu – MikroTik S-31DLC20D [66]

Nejpoužívanější řadou, se kterou se můžeme setkat v celé řadě zařízení, jsou SFP, resp. SFP+ moduly. Slotem pro SFP/SFP+ moduly je vybaven i měřicí přístroj VeEX VePAL TX300s.

SFP řada je zpětně kompatibilní, tedy v portech o vyšší rychlosti je možné používat SFP moduly s nižší rychlostí.

Typickými zástupci řady SFP jsou:

- SFP (podporující rychlosti až do 4,25 Gbit/s)
- SFP+ (podporující rychlosti až do 10 Gbit/s)
- SFP28 (podporující až 25 Gbit/s)
- SFP56 (podporující až 50 Gbit/s)

V současnosti existují moduly podporující až rychlosti 100 Gbit/s. [67]

Pro vyšší rychlosti byla vytvořena řada QSFP, která spojuje čtyři SFP kanály v jednom modulu. Odtud označení „quad“ SFP. U QSFP řady je tedy značení vycházející z řady SFP:

- QSFP (podporující až 4 x 1 Gbit/s)
- QSFP+ (podporující až 4 x 10 Gbit/s)
- QSFP28 (podporující až 4 x 25 Gbit/s) [68]
- a tak dále...

SFP moduly se vyrábějí v různých variantách a s rozdílnými konektory. Pro duplexní provoz bývají nejčastěji vybaveny optickým LC konektorem. Ten by nemělo být třeba představovat. Můžeme se u něj setkat s provedením jak pro SM (single-mode neboli jednovidové provedení) tak i MM (multi-mode neboli vícevidové provedení). Pokud si nejste vzhledem konektoru jistí, je zobrazen na obrázku 7.6 na straně 90.

7.4.2 Ethernet

Ethernet je v současnosti nejrozšířenější technologie využívaná pro lokální síť. Data jsou přenášena v rámcích, které obsahují hlavičku, přenášená data a kontrolní součet. Ethernet pracuje na 2. (linkové) vrstvě ISO/OSI modelu a využívá k adresování hardwarovou adresu síťové karty (MAC adresa). [68]

Ethernetový rámec je základní jednotka využívaná k zapouzdření a přenosu síťových paketů na linkové vrstvě. Celková délka rámce se pohybuje standardně mezi 64 a 1518 B, může být ale i delší (9000 B, někdy až 9600 B) v případě použití jumbo frame, ten ale není definován ve standardu IEEE 802.3. [69]

Skládá se z: [70]

- preamble o délce 7 B (určené pro synchronizaci přenosu – pravidelné střídání 10101010),
- SFD (Start Frame Delimiter) pro označení začátku rámce o délce 1 B (10101011),
- cílové a zdrojové MAC adresy, každá o délce 6 B,
- pole určujícího typ vyššího protokolu s délkou 2 B, v poli je určeno, jaký protokol vyšší vrstvy (např. IPv4, IPv6, ARP, ...) je přenášen,
- datového pole o délce 46 až 1500 B,

- a kontrolního součtu FCS o délce 4 B, který slouží pro detekci chyb.

7.4.3 Synchronous Digital Hierarchy

Je synchronní digitální technologie pro přenos dat používaná v páteřních sítích pro přenos velkého objemu dat po optických vláknech. Využívá synchronní přenos s časově řízeným TDM (časový multiplex).

Je standardizován normou definovanou ITU-T G.707. [71]

V SDH jsou rychlosti podporované měřicím přístrojem VePAL:

- STM-1 (155 Mbit/s)
- STM-4 (622 Mbit/s)
- STM-16 (2,5 Gbit/s)
- STM-64 (9,95 Gbit/s)

Dnes bývá částečně nahrazováno modernějšími technologiemi. Stále ale bývají využívány v infrastrukturách, kde je důležitá přesná synchronizace a spolehlivost. [72]

7.4.4 Fibre Channel

Je vysokorychlostní síťová technologie určená primárně pro spojení serverů a úložných zařízení. Je optimalizována pro nízkou latenci, vysoký datový tok a spolehlivý přenos dat. Jedná se o synchronní sériovou komunikaci. Umožňuje jednoduché propojení mezi dvěma zařízeními point-to-point. Dnes je také často používáno zapojení s Fibre Channel přepínači. Síť bývá tvořena redundantně pro zachování vysoké spolehlivosti. [73]

Fiber channel definuje vlastní síťový model. Je primárně zaměřen na přenos dat mezi datovými úložišti, není primárně navržen pro přenášení IP dat. Přenáší přímo bloková data, například SCSI nebo NVMe. SCSI (Small Computer System Interface) je protokol používaný pro komunikaci mezi počítači a úložnými zařízeními. Byl navržen pro blokový přenos dat, historicky používaný zejména s pevnými disky a páskovými mechanikami. [74] NVMe (Non-Volatile Memory Express) je moderní vysokorychlostní protokol určený pro provoz s SSD disky připojenými přes PCIe, který umožňuje paralelní zpracování tisíců příkazů s nízkou latencí. [75]

Model se skládá z pěti vrstev označovaných FC-0 až FC-4.

- FC-0 (Fyzická vrstva) určuje fyzické přenosové médium, konektory a elektrické či optické parametry,
- FC-1 (Linková vrstva) řeší především kódování, dekódování a detekci chyb,
- FC-2 (Přenosová vrstva) definuje rámce, řízení toku, adresaci portů a směrování v síti,

- FC-3 (Společné služby) je nepovinná vrstva s funkcemi pro multicast nebo striping přes více spojení, tedy rozdělení a současný přenos dat více nezávislými cestami,
- FC-4 (Aplikační vrstva), která se stará o zapouzdření vyšších protokolů, jako je SCSI, NVMe nebo i IP. [76]

Měřicí přístroj VePAL podporuje přenosové rychlosti FC až do 10 Gbit/s.

7.4.5 Optical Transport Network

Je definován standardem ITU-T G.709. Je využíván v páteřních optických sítích. Bývá využíván k zapouzdření různých typů dat do optického rámce pro efektivní a robustní přenos.

Jedná se o synchronní přenos umožňující multiplexování a transparentnost transportu. Umožňuje monitorování kvality přenosu, správu sítě a má silné mechanismy pro řízení chyb. [77]

U OTN se můžeme setkat s hierarchickou strukturou se třemi vrstvami.

- Nejnižší je OPU (Optical Payload Unit), která slouží jako transportní kontejner pro uživatelská data. Těmi může být Ethernet nebo například SDH či Fibre Channel. Neobsahuje žádnou korekci chyb, pouze přenáší data.
- Druhou vrstvou je ODU (Optical Data Unit), která zajišťuje přenosovou logiku. Stará se o identifikaci signálu a monitoring kvality služby. Umožňuje navíc hierarchické multiplexování, tedy že ODU vyšší úrovně může obsahovat několik ODU nižší úrovně.
- Třetí vrstvou je OTU (Optical Transport Unit). Do té jsou kromě ODU přidány informace pro transportní účely a také FEC (Forward Error Correction). Tento rámec je již fyzicky přenášen po optickém spoji. Zajišťuje tak ochranu a detekci chyb na fyzické vrstvě a poskytuje synchronizaci. [78]

Rychlosti, jaké OTN podporuje, jsou definovány v ITU-T G.709 a bývají označovány zkratkou OTU k , kde k zastupuje číslo rychlosti OTN. Běžnými rychlostmi jsou například: [79]

- OTU0 (ca 1,25 Gbit/s) – může být využit k přenosu Gigabitového Ethernetu
- OTU1 (ca 2,5 Gbit/s) – např. 2 ethernetové gigabitové linky, 2G Fiber Channel nebo SDH s rychlostí STM-16
- OTU2 (ca 10 Gbit/s) – např. 10G Fiber Channel nebo STM-64
- OTU2e (ca 11 Gbit/s) – např. 10G Ethernet
- OTU3 (ca 40 Gbit/s) – např. 40G Ethernet, STM-256

Umožňuje zapouzdření různých typů přenášených dat (Ethernet, SDH, FC, ...). Zajišťuje vysokou spolehlivost přenosu pomocí Forward Error Correction. Podporuje správu včetně performance monitoringu, alarmů a synchronizace. [80]

FEC (Forward Error Correction) neboli dopředná korekce chyb je technika využíváná v přenosech v datových a optických telekomunikačních sítích pro detekci a opravu chyb bez nutnosti opakování přenosu. To je podstatné pro využití především v nízkolatenčním přenosu a na dlouhých optických trasách. [81]

K přenášeným datům jsou přidávána redundantní data neboli kontrolní bity.

V případě příkladu kódování OTN se v OTU rámcích po rozdělení dat do bloků o 239 B pomocí algoritmu Reed-Solomon vypočte 16 opravných bajtů. Celkem tak vznikne blok o délce 255 B. Tyto bajty jsou uloženy do části OTU rámce označovaného *FEC field*. [82]

Při dekódování opět přijímač pomocí algoritmu Reed-Solomon vypočítá tzv. syndrom, který určuje počet chyb a jejich pozici. Pokud je počet chyb menší, než je maximální možný opravitelný počet chyb (v tomto konkrétním případě dat o délce 239 B (resp. 255 B) by se jednalo o 8 B), dekodér provede opravu poškozených dat. [82]

7.5 Pracovní postup

1. Seznamte se s přístrojem VePAL TX300s

Zapněte zařízení VeEX VePAL TX300s. Přístroj se spouští červeným tlačítkem se symbolem zapnutí. Je třeba jej podržet, dokud přístroj nepípne a barva LED diody vpravo nahoře se nezmění na zelenou.

Systém nastartuje do výchozí obrazovky.



Obr. 7.2: Výchozí obrazovku měřicího přístroje VePAL TX300s

Popis obrazovky přístroje V horní liště se vlevo nachází tlačítko pro vstup do menu *Utilities*. To především slouží k nastavení přístroje a správě souborů. Vpravo se poté nachází ikona zobrazující stav baterie nebo napájení (nabíjení) a ikona stavu připojeného úložiště (např. USB flash disku).

Nejvíce místa na obrazovce zabírá zobrazení dvou skupin portů, ve kterých budete konfigurovat jednotlivé testy. Z obrazovky je viditelné, že v přístroji se nachází modulární karta TX340SM. Tu si můžete prohlédnout ze zadní strany přístroje. Dále je zde zobrazena i verze firmwaru pro danou kartu.

Ve spodní stavové liště dále můžete nalézt některé údaje, jako IP adresu na komunikačním portu, stav vzdáleného připojení či aktuální systémový čas a stav Wi-Fi připojení.

Karta TX340SM V laboratoři je v přístroji VePAL TX300s nainstalována karta TX340SM. Karta je vybavena třemi páry portů pro měření.

- Jeden pár SFP+ portů podporujících: [83]
 - Ethernet s rychlostmi 10GE, 1000Base-X a 100Base-X,
 - SDH,
 - Fibre Channel,
 - OTN,
 - CPRI/OBSAI,
- dále jeden pár portů RJ45 podporující rychlosti 10/100/1000Base-T,
- a také pár BNC portů s podporou
 - PDH/DSh,
 - G.703 64k.

Úloha je věnována přenosu přes optické médium, tedy využity budou porty SFP/SFP+.

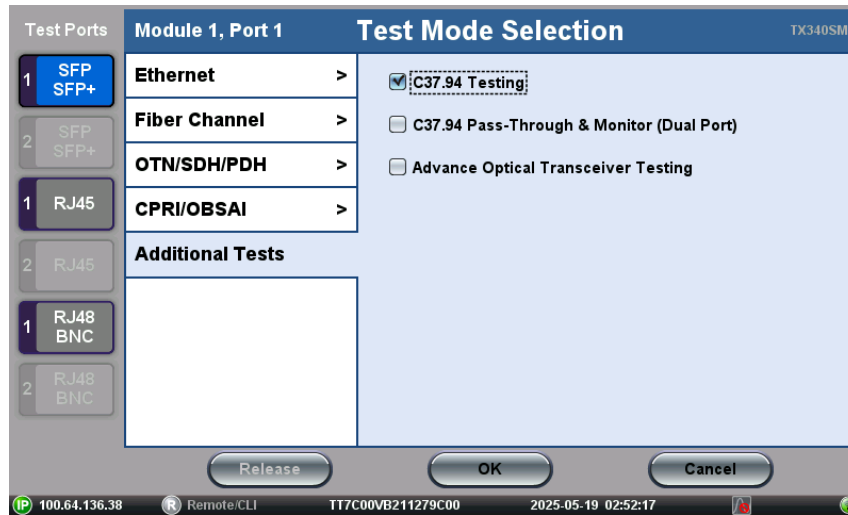


Obr. 7.3: Pohled na kartu TX340s

2. Test optického modulu

Na výchozí obrazovce na *Port Group 1* zvolte dole tlačítko *NEW*.

Otevře se nabídka, kde zvolíte, jaký typ testu chcete spustit.



Obr. 7.4: Obrazovka s výběrem testů

V levé nabídce jsou vidět testovací porty, které je možné využít. Měřicí přístroj (resp. karta TX340s) je vybaven třemi dvojicemi portů:

- SFP/SFP+
- RJ45
- RJ48/BNC

Protože v úloze se pracuje s optickými sítěmi, zvolte možnost SFP/SFP+.

V další nabídce je vidět možnosti, jaké typy přenosové technologie se dají zvolit:

- Ethernet
- Fiber Channel
- OTN/SDH/PDH
- CPRI/OBSAI
- Additional Tests

Čtvrtou možností je volba CPRI neboli Common Public Radio Interface a OBSAI neboli Open Base Station Architecture Initiative. To jsou standardy, které jsou používány v mobilních sítích pro přenos signálu mezi základnovou stanicí a rádiovou jednotkou. [84], [85] Těmi se vůbec zabývat nebudete.

Začněte od poslední možnosti. Nyní se můžete podívat do poslední nabídky *Additional Tests*. V té se nachází tři testy:

- C37.94 Testing
- C37.94 Pass-Through & Monitor (Dual Port)
- Advanced Optical Transceiver Testing

C37.94 je telekomunikační standard využívaný pro přenos dat především v energetice s rychlostí 64 kbit/s na kanál. Celkem jím může být přenášeno až 12 kanálů. Využívá duplexně vícevidová vlákna (multimode). [86]

Zaměřte se nyní na položku *Advanced Optical Transceiver Testing*.

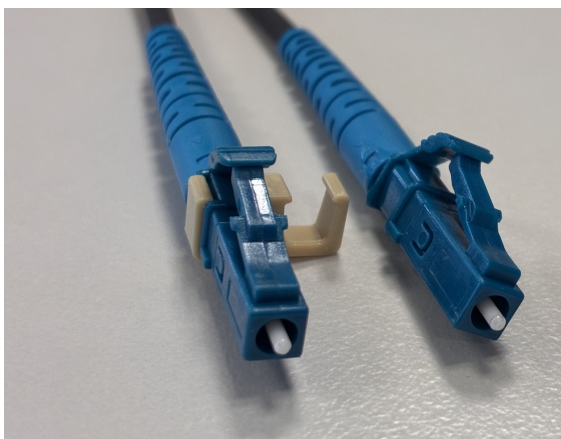
Tento test je zaměřen na kontrolu stavu a zjištění informací o jednotlivých transceiverech. Pro spuštění testu tedy vyberte položku *Advanced Optical Transceiver Testing* a klikněte na *OK*.

Po načtení testu se zobrazí základní okno testu.



Obr. 7.5: Testování optických transceiverů

Pro zjištění stavu testu je třeba zapojit smyčku mezi vstupním a výstupním LC portem na SFP transceiveru. K tomu může být použit samostatný LC optický patchcord. V případě, že je k dispozici jen duplexní patchcord, tak může být využito toho, že jsou konektory pouze spojeny plastovým háčkem, aby držely vedle sebe. Opatrně je tedy možné konektory oddělit a využít jen jeden z páru pro zapojení jako na obrázku 7.6.



Obr. 7.6: Ukázka spojky na jednom z LC konektorů

Na co si je důležité dát u rozpojení duplexního LC konektoru pozor.

U duplexního optického propoje je samozřejmě zásadní, aby byly konektory správně zapojeny. U SC/SC a SC/LC patch kabelů bývá zapojení 1:1, tedy nedochází k překřížení vláken. Využívají se primárně u propojení přístroje s optickým vláknem vyvedeným v patch panelu.

Propojení LC/LC se ale nejčastěji využívá v situaci propojení dvou zařízení na přímo. Zde je tedy nutné, aby byl patchcord „křížený“. Tedy v jednom směru je výstup z vysílače zapojen do vstupu přijímače a v opačném směru je stejně výstup z vysílače opět zapojen do přijímače.

Pokud dojde k přehození vysílacího a přijímacího signálu, tak propoj nebude fungovat.

Je tedy třeba do SFP+ portu (stejného jako byl vybrán při spuštění testu) zapojit SFP modul a propojit pomocí optického vlákna výstupní se vstupním LC konektorem. Pokud je již v SFP/SFP+ konektoru vložen SFP modul a máte zapojen optický signál do smyčky, můžete pokračovat.

V levém podokně je vidět nastavení testu. V pravém poté jeho výsledky.

Zvolte možnost *Auto Test*. Vlevo dole je možné v případě chyby při kontrole modulu upravit rozsah *RX level* hodnot, které měřicí přístroj zobrazí jako hodnoty bez chyby např. na hodnoty *Min. = - 10 dBm* a *Max. = 4 dBm*. V tomto případě záleží na specifikacích výrobce daného SFP modulu a na konkrétním použitém modulu.

Při změně hodnot a otevření numerické klávesnice je třeba zadat zvolenou hodnotu. Poté jde měnit znaménko tlačítkem *+/-*. Pro potvrzení údaje je třeba dvakrát stisknout tlačítko *Apply*.

Kliknutím na tlačítko s nápisem *Module*, v pravé horní části okna s výsledky, mohou být zobrazeny informace o SFP modulu, jako je teplota, vlnová délka, označení či výrobce.

Nyní se můžete pokusit spustit test tlačítkem *Start*.

Někdy se zobrazí chybová zpráva s informací, že nebylo navázáno spojení.

V tomto případě, pokud je vše správně zapojené, postačuje před spuštěním testu zapnout zdroj světla v SFP modulu tlačítkem *LASER On*. V případě, že i přesto se nepodaří spojení navázat, je možné stav signálu na vysílači a přijímači sledovat buď přímo kliknutím na položky *TX Power* a *RX Power* v současném testu optických transceiverů nebo lze informace o aktuálním stavu signálu a přijatých framů vidět i na domovské obrazovce jako na obrázku 7.7 (na tomto obrázku ovšem spojení není navázáno – nevidíme *Rx level* a kontrolky *Signal* a *Frames* jsou červené).



Rozsvícená žlutá ikona se symbolem laseru bez červeného křížku v horní liště symbolizuje zapnutý laser. Ten zůstane po testu zapnutý. Vypnout jej můžete stisknutím červeného tlačítka a *LASER Off*.

Buďte prosím obezřetní při manipulaci se zapojením a vypínejte vždy laser před manipulací s optickými patchcordy a SFP moduly.

Po ukončení testu se můžete mezi výsledky přepínat pomocí pěti rámečků s údaji *Throughput*, *Freq. Offset*, *Temperature*, *TX Power* a *RX Power*.



Při otevření podnabídky přes celé okno je možné její zavření pomocí symbolu červeného křížku, zobrazeného v horní liště.

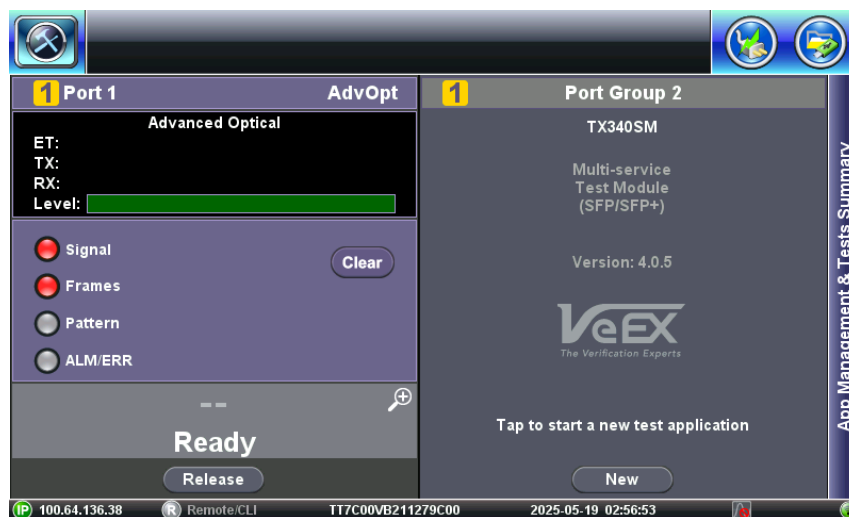


U některých testů se vedle červeného křížku zobrazuje i symbol domečku, který umožňuje návrat do domovské nabídky.



Toto tlačítko poté slouží k návratu na úvodní obrazovku, na které se zobrazují jednotlivé skupiny portů s nastavenými testy.

Pro návrat do daného testu z úvodní obrazovky klikněte do oblasti se symbolem lupy a nápisem *Ready*. To může být vidět na fotografii 7.7.



Obr. 7.7: Úvodní obrazovka se spuštěným testem

Úkoly

- Zjistěte základní informace o poskytnutých SFP modulech k úloze.
- Zjistěte vysílací výkon, výkon na přijímači, vlnovou délku a další informace.
- Proveďte v manuálním módu testu otestování pomocí *Frequency Offset Sweap*.

Pro uzavření testu na daném portu zvolte tlačítko úplně ve spodní straně úvodní obrazovky s testem s nápisem *Release* (viz obrázek 7.7). Potvrďte opětovným stisknutím *Release* a poté *Continue*. Systém poté chvíli pracuje a poté test úplně zmizí.

3. Testování velikostí ethernetového rámce

Nyní budou využity oba dva sloty pro nastavení testovacích skupin *Port Group 1* a *Port Group 2*.

Do obou SFP/SFP+ portů zapojte SFP moduly a propojte je duplexně optickým patchcordem. Výsledkem by mělo být zajištěné obousměrné spojení mezi dvěma SFP porty.


- Vyberte v pravém podokně *Port Group 1* nový test tlačítkem *New*.
- Věnovat se budete opět portům *SFP/SFP+* a přenosové technologii *Ethernet*.


Zde se v nabídce nachází možnosti spuštění širší nabídky testů. Jen se v krátkosti podívejte, jaké testy jsou umožněny. [87]

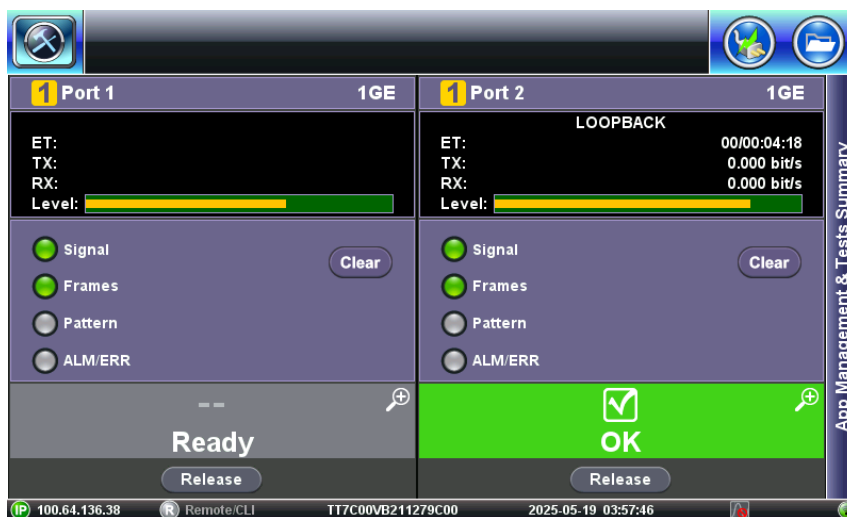
- **1G a 10G Ethernet**

- Ty jsou určeny pro kontrolu kvality signálu, BER, přenosových parametrů apod.

- **1G a 10G Ethernet Pass Through Monitor**
 - Umožňuje monitorovat provoz průchozím způsobem, tedy bez přerušování či změny dat může být zapojen do datové cesty pro její monitoring.
- **1G a 10G Ethernet Layer4 Testing**
 - Slouží pro analýzu protokolů, latence, ztráty paketů a kvality spojení na transportní vrstvě.
- **1G V-Suite Testing**
 - Je určen k testování virtuálních cest jako jsou VLAN, MPLS, QoS
- **1G a 10G 1588v2/PTP Through Mode & PDV Analysis**
 - Umožňuje testování přesnosti synchronizace pomocí PTPv2 (Precision Time Protocol)
- **Copper SFP+**
 - Testování SFP modulů, které nevyužívají pro přenos optické, ale měděné kabely např. Cat5e.
- **1G a 10G LACP Testing**
 - Testuje agregaci portů pro vyšší propustnost a redundanci.

- Zvolte nyní *1G Ethernet Testing*.
- Po spuštění testu na pravé straně spusťte Laser tlačítkem *LASER on*.
- Vraťte se na úvodní stránku stiskem tlačítka: 
- Zvolte stejný *1G Ethernet Testing* i na *Port Group 2*.
- Po spuštění testu nastavte daný port na *Loopback*.
- V zobrazené nabídce vyberte v položce *Test Layer* loopback na první, tedy fyzické vrstvě: *Layer 1*.

Spuštění testu Spusťte stiskem tlačítka *Start* vpravo nahoře. Pokud byl test spuštěn, můžete se vrátit na úvodní obrazovku stisknutím tlačítka . Úvodní obrazovka by měla vypadat jako na obrázku 7.8.

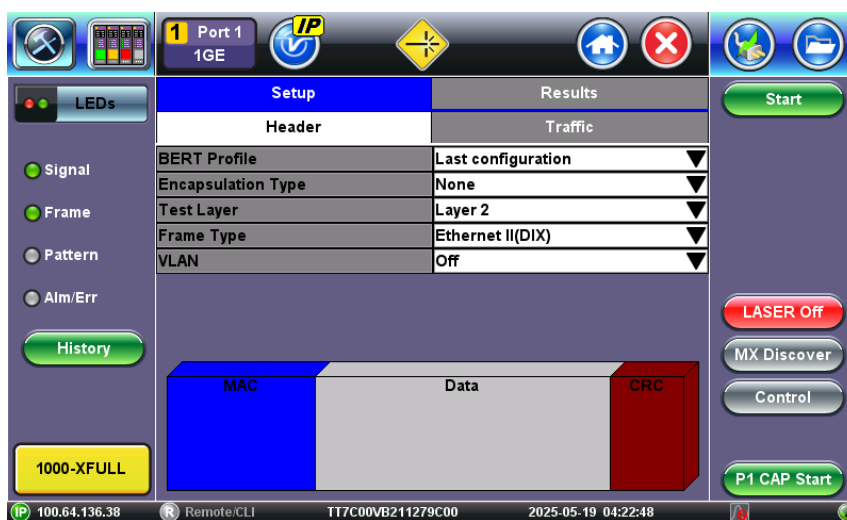


Obr. 7.8: Úvodní obrazovka s druhým testem nastaveným na Loopback

Otevřete nastavení testu v části *Port 1* kliknutím do oblasti se symbolem lupy a nápisem *Ready*.

- Vyberte položku *Throughput*

Zobrazí se okno se záložkami *Setup* a *Result*.



Obr. 7.9: Nastavení hlavičky u testu Throughput

Proveďte nastavení hlavičky (*Header*):

- *BERT Profile*: **Last configuration**
Určuje, že nastavení zůstává stejné jako při předchozím testu.
- *Encapsulation Type*: **None**
- *Test layer*

- *Frame Type*: **Ethernet II(DIX)**
- *VLAN*: **off**

A dále nastavení provozu (*Traffic*):

- *Traffi Flow*: **Constant**
- *Frame Size Type*: **Fixed**
- *Frame Size* (bytes)
- *Constant Bandwidth*: 100 %

Změřte hodnotu *Data Rate* pro rozdílné velikosti ethernetového rámce *Frame Size* a přenos na rozdílné síťové vrstvě *Test layer* s nastavenými vrstvami *layer 2*, *layer 3*, *layer 4* pro *PROTOCOL* UDP i TCP.

Srovnajte i dané parametry v případě nastavení IP paketů verze 4 i verze 6. Ve spodní části obrazovky vidíte znázorněno přidávání jednotlivých hlaviček k datům. Změnu nastavení IP provedete při zvoleném přenosu na síťové vrstvě *layer 3* a *layer 4* kliknutím na žluté pole v zobrazení částí ethernetového rámce v nastavení hlavičky.


Volte velikosti rámců tak, aby bylo změřeno alespoň 5 hodnot v celém rozsahu velikostí ethernetového rámce.

Sledujte údaje v záložce *Result* při zvolení podzáložky *Summary*. Sledujte hodnotu *Data Rate*.

Úkoly

- Změřte hodnotu *Data Rate* pro rozdílné velikosti ethernetového rámce při přenosu na rozdílné síťové vrstvě pro verzi IPv4 i IPv6.
- Naměřené údaje zapište do tabulky.
- Graficky zobrazte srovnání reálné přenosové kapacity při přenosu dat pomocí UDP a TCP při rozdílné velikosti ethernetových rámců.

4. Srovnání zpoždění a jejich kolísání pro různé technologie přenosu přes optické vlákno

Vraťte se zpět na úvodní obrazovku tlačítkem  .

V následujícím testu se pokusíte srovnat tři možnosti, jak posílat data přes optická vlákna. Ta byla popsána v teoretickém úvodu. Jedná se o Ethernet, OTN a Fiber Channel.

Přístroj neumožňuje pro nastavení OTN pracovat v režimu *LOOPBACK*, tedy tak, aby se poslaná data na přijímač vracela zpět pomocí vysílače, což bylo využito u předchozího bodu.

Nabízi se dvě možnosti, jak může být pracováno s informací o zpoždění rámců v síti.


První možností je propojit oba SFP moduly duplexně a na obou stranách spustit stejný test. Rámce jsou pak zasílány z jednoho měřicího slotu do druhého a analyzovány jsou v slotu druhém.

Výhodou takového měření je, že tento měřicí přístroj nabízí možnost vzdáleného přístupu. S použitím dvou přístrojů může být prováděno měření i v případě, kdy jsou jednotlivá místa výrazně vzdálena. K tomu může být využit volitelný GPS přijímač pro přesnou synchronizaci více zařízení a volitelné integrované atomové hodiny. [88]

Nevýhodou této varianty je nutnost konfigurovat všechna měření dvakrát. To je v případě poměrně pomalého a ne vždy zcela přehledného uživatelského rozhraní zdlouhavé a náročné.

Druhou možností je zapojit si měření jako smyčku. Využít tedy pouze jeden SFP modul a zapojit optickým patchcordem smyčku mezi vysílačem a přijímačem, stejně jako u testování SFP modulu. To umožní spustit dva rozdílné testy současně. Díky tomu je možné testovat na jednom testovacím slotu např. Ethernet a na druhém portu např. OTN.

Ukončení běžících testů V dalším postupu je popsána druhá možnost, tedy se zapojením testu jen pomocí jednoho SFP modulu a smyčkou mezi vysílačem a přijímačem.

- Ukončete test na Portu 2: Rozklikněte detail běžícího testu a stiskněte červené *Stop* u pravého kraje.
- Vraťte se na úvodní obrazovku tlačítkem  .
- Uvolněte druhý slot tlačítkem *Release* a potvrďte.
- Vypněte laser u Portu 1: Rozklikněte detail běžícího testu a stiskněte červené *Stop* u pravého kraje.
- Přepojte pracoviště na smyčku pomocí jednoho SFP modulu, stejně jako u testování optických SFP modulů.

Zpoždění u přenosu Ethernetu Na testovacím slotu *Port 1* by měl stále běžet test Ethernetu z minulého úkolu. Pokud tak není, spusťte test na portech SFP/SFP+ *1G Ethernet Testing*. Ten můžete otevřít a vrátit se na úvodní stránku testu.



Obr. 7.10: Spuštěný BERT test s výsledky

Tentokrát budete používat test BERT (Bit Error Rate Test).

- Přejděte do nabídky *Advanced Tools*.
- Vyberete *BERT* test.

V tomto testu je nastavení velmi podobné jako u testování Throughputu. Protože se budete zabývat zpožděním při transportu jednotlivých rámců, nebude mít na dané výsledky tentokrát vliv nastavení síťové vrstvy, na které test spustíte.

Ovšem protože si vyzkoušíte i vnášení chyb do přenosu, budete potřebovat i nastavení hlavičky na záložce (*Header*) – ta už byla popsána v předchozím úkolu.

Podívejte se dále na možnosti nastavení v záložce *Traffic*:

- *Traffic Flow*: **Constant**
 - Nastavení konstantního provozu v síti.
- *Frame Size Type*: **Fixed**
 - Velikost rámců se nebude v čase měnit.
- *Frame Size (bytes)*
 - Zde bude vaším úkolem nastavovat rozdílné velikosti rámce.
- *Constant Bandwidth*
 - A také nastavovat rozdílné zatížení linky.

Ve výsledcích testů na záložce *Results* se zaměřte především na záložku s informacemi o zpoždění rámců *Delay*.

Po spuštění testu můžete průběh testu ovládat tlačítky na pravé straně displeje. Kromě zastavení, restartování a pozastavení vysílání umožňují testy též vkládat chyby do zasílaných dat. Nastavení vkládání chyb se provádí stisknutím tlačítka *Setup Injection*. Je možné vkládat několik druhů chyb. Jedná se o bitové chyby, chyby **CRC** (Cyclic redundancy check), kdy je pozměněn kontrolní součet přenášeného rámce, **IP checksum** chyby, kdy je pozměněn kontrolní součet IP paketu, **Pause**,

neboli pozastavení vysílání a **TCP/UDP Checksum**, kdy je pozměněna hlavička UDP/TCP segmentu. Možnosti vkládání různých chyb budou rozdílné na základě toho, jaký *Frame Tape* jste zvolili v záložce *Header* při nastavování testu.

Chybu poté během spuštěného testu můžete do přenosu vložit tlačítkem *Err inj*.

Úplně vpravo dole se také nachází tlačítko *P1 CAP Start*, to spustí zaznamenání daného měření do souboru **.pcap*, které je možné analyzovat ve Wiresharku.

Úkoly

- Než se pustíte do nastavování a měření rozdílných hodnot zpoždění a jeho kolísání, nastavte si v druhém testovacím slotu protokol OTN a srovnajte přímo výsledky mezi jednotlivými technologiemi.
- Určete, jak se mění zpoždění s ohledem na velikost zatížení linky. Kromě informace o samotném zpoždění rámců jsou podstatné informace o odchylce tohoto zpoždění.
- Pokuste se najít jaký trend ve změně zpoždění se nachází. Způsobuje změna velikosti rámce nebo zatížení linky rozdíly ve zpoždění a jeho kolísání?
- U porovnání dat si nejprve porovnejte, jaké možnosti nastavení provozu a analýzy nabízí přístroj VePAL u jednotlivých technologií přenosu. (U nastavení OTN a Fiber Channel nenabízí přístroj tak širokou možnost nastavení jako u Ethernet.)
- Vyzkoušejte si také vkládání chyb do přenosu. Jak se vložená chyba projeví? Jaké druhy chyb lze vkládat?

Ethernet zapouzdřený do OTN Aby bylo možné jednoduše srovnávat údaje z měření mezi jednotlivými přenosovými technologiemi, můžete pro měření OTN využít druhý slot testu *Port Group 2*.



Obr. 7.11: Připravená dvě měření současně

Podobně jako v předchozím případě, spusťte ve druhém slotu *Port Group 2* nový test kliknutím na tlačítko *New*.

- Vyberte skupinu *OTN/SDH/PDH*
- Zvolte testovací mód *ODU0 and ODUflex – Single Port*
- Potvrďte tlačítkem *OK*
- Po načtení testu otevřete nabídku *Setup*.

Zde se nachází možnosti nastavení přenosu přes OTN.



Obr. 7.12: Nastavení přenosu OTN

U daného měření je pracováno s generováním provozu ethernetových rámců, které jsou zapouzdřeny do OTN rámce.

Musíte tedy nastavit samotný OTN protokol a dále ethernetové rámce, které budou zapouzdřeny.

V záložce *Signal* je nastavení samotného přenosu OTN:

- *Network Type*: **OTN**
- *Test Rate*: **OTU-1**
 - Určuje, jaká rychlost OTN bude použita. V případě použití SFP transceiverů jste omezeni jejich maximální rychlostí. Můžete použít jen OTU-1.
- *OTN Mapping*: **ODU1-ODU0-1GE**
 - Tato možnost určuje, jaká data budou do ODU vložena. V tomto případě se jedná o 1 Gbit Ethernet.
- *Tx ODU0 Channel*: **1**
- *Rx ODU Channel*: **1**
- *Scrambler*: **ON**
- *FEC*: **ON**

V záložce *GE Port-config* je nastavení gigabitového Ethernetu, který je do OTN rámce zapouzdřen.

- *Auto Negotiation*: **Both On**
- *Flow Control*: **Both On**

Po nakonfigurování OTN se můžete vrátit do výchozí nabídky testu stisknutím ikony domečku na horní liště.

V hlavní nabídce spusťte test *BERT*.

Zde je třeba nastavit přenášené rámce v záložce *Header* podobně jako v případě Gigabitového Ethernetu, velikost rámců a velikost provozu v záložce *Traffic*.

V případě práce s vkládáním chyb do přenášených dat, je systém nastavení jiný, než v případě Ethernetu. Zde se nastavení chyb provádí již v záložce *Error Inj.* v nastavení testu, ne tlačítkem v pravé liště.

Pokud se při spuštění testu zobrazí chybová zpráva s informací, že nebylo navázáno spojení, postačuje před spuštěním testu zapnout zdroj světla v SFP modulu tlačítkem *LASER On*.

Úkoly

- Prohlédněte si rozdílné možnosti nastavení u testu Ethernetu a OTN. Zohledněte tyto možnosti při výběru testovaných hodnot.

- Určete, jak se mění zpoždění s ohledem na velikost zatížení linky. Kromě informace o samotném zpoždění rámců jsou podstatné informace o odchylce tohoto zpoždění.
- Najděte, jaký trend ve změně zpoždění se nachází. Způsobuje změna velikosti rámce nebo zatížení linky rozdíly ve zpoždění a jeho kolísání?
- Umožňuje přístroj vkládání jiného typu chyb do přenosu, než u přímého Ethernetu?
- Porovnejte vhodný typ chyby vložený do přenosu při zapnuté a vypnuté FEC v nastavení OTN.

Fiber Channel

Podobně, jako v předchozích případech, proveďte testování přenosu pomocí Fiber Channel.

Využijte k tomu test *1/2/4/8G Fiber Channel Testing*. Nastavení je podobné, jako u nastavení testu s OTN.

Úkoly

- Porovnejte z hlediska latence přenos Fiber Channel, Ethernet a Ethernet přenášený přes OTN.
- Jaké možnosti obsahu vloženého do rámce tester umožňuje?

5. Přenos více ethernetových linek přes OTN

OTN umožňuje v rámci jednoho OTN spojení přenášet více linek. V posledním úkolu si zkuste přenášet více ethernetových linek pomocí zapouzdření do OTN s flexibilním přizpůsobením přenosové kapacity OTUflex.

K tomuto testu budete s měřicím přístrojem VePAL potřebovat SFP transceivery s podporou vyšší přenosové rychlosti, tedy například SFP+ s rychlostí 10 Gbit/s.

Spusťte test na jedné z možných skupin portů. Vyberte v záložce *OTN/SPD/PDH test ODU0 and ODUflex - Single Port*.

V nastavení testu v záložce *Signal* upravte nastavení OTN přenosu. Tentokrát zvolte:

- *Network Type: OTN*
- *Test Rate: OTU-2*
- *OTN Mapping: ODUflex-Nx1.25GE*



Obr. 7.13: Nastavení testu ODUflex s možností flexibilního přenosové rychlosti

Úkoly

- Kolik gigabitových ethernetových linek je možné přenášet v případě testu s flexibilním přizpůsobením přenosové kapacity?
- Je možné i bez použití flexibilního přizpůsobení přenosové kapacity přenášet v OTN několik rámců nižší úrovně zapouzdřené do úrovně vyšší?
- Umožňuje toto nastavení přístroj VePAL?

7.6 Kontrolní otázky

- Jaký je rozdíl mezi SFP a SFP+ modulem?
- Jak mohou být SFP moduly rozděleny – podle přenosového média, vlnové frekvence, typu optického vlákna?
- K čemu může sloužit Frequency Offset Sweep? U jakých technologií je zásadní přesnost vlnové délky optického transceiveru?
- V případě duplexního zapojení, jako v laboratorní úloze, využívá se stejná vlnová délka pro vzestupný i sestupný směr? S jakou/jakými vlnovými délkami jste pracovali?
- Jak velkou režii provozu jste změřili u přenosu Ethernetu?
- Jak se měnilo zpoždění u měření přenosu ethernetových rámců přes optické vlákno v porovnání se zapouzdřením do OTN a v porovnání s přenosem po FC?
- Lišilo se nějak kolísání zpoždění u jednotlivých technologií?
- Jak se liší synchronní a nesynchronní technologie?

Závěr

Cílem práce bylo navrhnout celkem tři laboratorní úlohy pro předmět Služby telekomunikačních sítí.

První úloha je zaměřena na pasivní optické sítě. Pro úlohu byl navržen modelový příklad optické distribuční sítě, která představuje čtyři bytové domy, které jsou propojeny optickou kabeláží. Cílem úlohy je s ohledem na počet uživatelů, délku optické trasy a rychlosti, kterými se budou uživatelé připojovat, navrhnout možné zapojení fyzické vrstvy pasivní optické sítě i to, jaká technologie a s jakou rychlostí bude využita.

Úloha samotná by měla vést k porozumění spojitosti mezi maximálním překlenutelným útlumem, dosahem sítě a dělicím poměrem. Často se u popisu fungování pasivních optických sítí v teorii uvádí srovnání jednotlivých parametrů, jako jsou maximální dosah a maximální dělicí poměr. Většinou již není uváděno, že tyto parametry se navzájem ovlivňují a není tak možné dosáhnout maximální délky optické distribuční sítě při maximálním počtu odboček. Z těchto údajů je tak většinou zcela nemožné udělat si konkrétní představu o reálném rozsahu pasivní optické sítě. V úloze je tak student seznámen s příkladem konkrétní sítě, jejím dosahem a kapacitou.

K práci na laboratorní úloze byla vytvořena šablona pro řešení laboratorní úlohy v softwaru Microsoft Excel. Tento software byl zvolen na základě jednoduchosti a přehlednosti nejen zadávaných dat, ale i výsledných výpočtů, kdy je možné se vracet k dříve vypočteným hodnotám a všechny je přehledně zobrazit najednou v tabulce. To umožňuje přehlednější zobrazení vypočtených hodnot a porovnání výsledků, například v případě srovnání útlumu optické distribuční sítě, překlenutelného útlumu a topologie optické distribuční sítě, při hledání možností snížení útlumu v pasivní optické síti.

Otázky v závěru úlohy jsou stavěny tak, aby byli studenti nuceni se nad danými otázkami zamyslet. Při hledání odpovědí by studenti měli pracovat s informacemi získanými z teoretického úvodu, i při práci na úloze samotné.

V druhé úloze je pracováno s reálnými naměřenými daty z optického koherentního přenosového systému ADVA FSP3000C. Základním cílem úlohy je seznámit s koherentním optickým přenosem dat a s možností zjišťování informací o stavu vlákna z dat, která mohou být získána z koherentního přijímače.

Teoretický úvod k úloze je koncipován tak, aby studenty pokud možno zaujal. Jsou v něm popsány rozdíly mezi koherentními a nekoherentními přenosovými systémy a využití těchto systémů v praxi. Dále je uvedena současná tendence využívat optická vlákna nejen jako přenosové médium, ale i jako senzor. Jsou uvedeny konkrétní příklady využití distribuovaných optických senzorů pro získávání dat

o seismické aktivitě a systémů pro detekci vlaků v kolejišti. Tyto informace slouží mimo jiné také k namotivování studentů k dané problematice a k získání jejich zájmu o možnosti širšího užití optických vláken a technologií.

Samotná úloha je pak rozdělena do tří pomyslných částí. V první se studenti pokusí seřadit dané náměry na základě působící síly na vlákno. V další části již určují závislost síly působící na vlákno a změřených parametrů. Ve třetí části pracují s náměrem proměnlivé síly a na základě údajů a závislostí získaných v předchozím bodě je jejich cílem určit, jak bylo s vláknem manipulováno a jaká síla na něj působila.

Nedílnou součástí úlohy je zpracování dat ze souborů a jejich zobrazení pomocí skriptů v jazyce Python. Přidanou hodnotou pro studenty by měla být právě možnost využití jazyka Python a práce s ním v případě zpracování většího množství dat a jejich zobrazování v grafech. V úloze studenti pracují s připravenými skripty, ve kterých provádí malé úpravy. Na úloze tak může být prezentována jednoduchost a využitelnost jazyka pro grafické zobrazení dat.

Závěrečné otázky by opět měly vést studenty k zamyšlení a tomu, aby byli studenti nuceni se nad tematikou zamyslet a některé informace si i vyhledat.

Třetí úloha je postavena odlišně než předchozí dvě úlohy. Cílem návrhu této úlohy je pokusit se najít, jak by mohl být využit měřicí přístroj VeEX VePAL TX300S v laboratorním cvičení v předmětu Služby komunikačních systémů. Protože přístroj je již využit v jiném předmětu, v návrhu byla snaha nabídnout jiné možnosti a funkce tohoto přístroje.

Celkově je úloha koncipována spíše jako méně uzavřená s možností, aby si studenti mohli vyzkoušet různé funkce přístroje a práci s ním. Celá úloha je navržena tak, že veškerý provoz je generován přímo v přístroji a v přístroji je i prováděna jeho analýza.

V úloze by studenti měli porovnat některé technologie pro přenos přes optické vlákno, s kterými může přístroj VePAL pracovat. Jedná se o Ethernet, Fibre Channel a OTN. Ty jsou popsány i v teoretickém úvodu k laboratorní úloze. Úloha by pak měla studenty vést k seznámení se strukturou a vrstvami těchto technologií a srovnání možností přenosu, zpoždění a kolísání zpoždění. V úloze se pracuje s možností zapouzdřování rámců při optickém přenosu a fungování dopředné korekce chyb.

Celkově ve všech laboratorních úlohách jsou otázky na závěr úlohy často záměrně pokládány tak, že přímá odpověď na ně nemusí být v textu dohledatelná. Často je třeba pro nalezení odpovědi spojit několik informací z řešení úlohy. V některých případech se ale odpověď na otázku v úloze nenachází. Pro studenty může být vhodnější danou informaci vyhledat například v dostupných materiálech nebo na internetu, než si pouze přečíst dané údaje v teoretickém úvodu. Proto by se při laboratorním cvičení studenti měli pokusit dané informace získat sami, třeba i s využitím prvků umělé inteligence a podobných asistentů. Pokud studenti dokáží dané výsledky do-

hledat, vyhodnotit a určit, zda jsou důvěryhodné, bude to pro jejich další, ať už pracovní či školní zkušenosti, přínosnější. Obohacující je i to, že pokud do získání informace musí vložit větší množství energie a času, může to vést k jejímu lepšímu pochopení a zapamatování.

Literatura

- [1] BUBNÍK, Lukáš; KLAJBL, Jiří a MAZUCH, Petr. In: *Optoelektrotechnika*. Code Creator, 2015, Kapitola 11. ISBN 978-80-88058-20-5.
- [2] MÜNSTER, Petr. *NÁVRH OPTICKÉ PŘÍSTUPOVÉ SÍTĚ FTTX*. Diplomová práce. Brno: VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ, 2010.
- [3] *AON vs PON Networks: What's the Difference and How to Make Choice?* Online. FS. 2024, 2024-06-24. Dostupné z: <https://community.fs.com/article/pon-vs-aon-in-ftth-systems.html>. [cit. 2024-10-27].
- [4] KUČERA, Zdeněk. *Měření parametrů optických spojů*. Diplomová práce. Brno: VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ, 2014.
- [5] SCHLITTER, P. *Optické přístupové sítě: Základní přehled a uvedení do problematiky optických přístupových sítí*. Online. In: ČVUT. 2024, s. 1-3. Dostupné z: <https://access.fel.cvut.cz/view4b29.html?cislocclanku=2004072807>. [cit. 2024-11-11].
- [6] HORÁK, Martin. *Srovnání technologií GPON a GEPON*. Online. In: OFA. 2011. Dostupné z: https://www.ofacom.cz/downloadFiles/17_2011_10_MH_Srovnani_technologii_GPON_a_GEPON.pdf. [cit. 2024-11-20].
- [7] *Recommendation G.984.1: Gigabit-capable passive optical networks (GPON): General characteristics*. Online. In: ITU. 2008. Dostupné z: <https://www.itu.int/rec/t-rec-g.984.1>. [cit. 2024-12-07].
- [8] *Recommendation G.987.2: 10-Gigabit-capable passive optical networks (XG-PON): Physical media dependent (PMD) layer specification*. Online. In: ITU. 2023. Dostupné z: <https://www.itu.int/rec/T-REC-G.987.2/en>. [cit. 2024-12-07].
- [9] *Recommendation G.987.1: 10-Gigabit-capable passive optical networks (XG-PON): General requirements*. Online. In: ITU. 2016. Dostupné z: <https://www.itu.int/rec/T-REC-G.987.1/en>. [cit. 2024-12-07].
- [10] *Recommendation G.9807.1: 10-Gigabit-capable symmetric passive optical network (XGS-PON)*. Online. In: ITU. 2023. Dostupné z: <https://www.itu.int/rec/T-REC-G.9807.1/en>. [cit. 2024-12-07].
- [11] *GPON vs. XG PON vs. XGS PON: Which PON Technology Is Right for Your Network?* Online. FS. 2024. Dostupné z: <https://community.fs.com/artic>

- le/gpon-vs-xg-pon-vs-xgs-pon-which-pon-technology-is-right-for-our-network.html. [cit. 2024-11-28].
- [12] ASAKA, Kota a KANI, Jun-ichi. *Standardization Trends for Next-Generation Passive Optical Network Stage 2 (NG-PON2)*. Online. In: NTT. 2015. Dostupné z: <https://www.ntt-review.jp/archive/ntttechnical.php?contents=ntr201503gls.html>. [cit. 2024-12-07].
- [13] *Higher Speed PON (G.9804 or HSP)*. Online. FS. 2024. Dostupné z: <https://community.fs.com/encyclopedia/higher-speed-pon-g9804-or-hsp.html>. [cit. 2024-11-04].
- [14] *Passive Optical Network Tutorial*. Online. FS. 2020. Dostupné z: <https://community.fs.com/article/passive-optical-network-tutorial.html>. [cit. 2024-11-22].
- [15] *What is the Difference Between EPON and GPON?* Online. Hitron. 2024. Dostupné z: <https://us.hitrontech.com/learn/what-is-the-difference-between-epon-and-gpon/>. [cit. 2024-11-22].
- [16] *EPON, GPON atd. Jaké jsou v tom rozdíly?* Online. ALTERNATIVO. 2024. Dostupné z: <https://www.alternativo.cz/default.asp?inc=inc/xpon.htm>. [cit. 2024-11-22].
- [17] *10G EPON vs XGS-PON*. Online. CableLabs. 2024. Dostupné z: <https://www.cablelabs.com/blog/10g-epon-vs-xgs-pon>. [cit. 2024-11-04].
- [18] *What are EPON, GPON, 10G EPON, and 10G GPON, and what are their differences?* Online. YCICT CO. 2019. Dostupné z: <https://www.ycict.net/what-are-epon-gpon-10g-epon-and-10g-gpon-and-what-are-their-differences/>. [cit. 2024-11-04].
- [19] APORNI, Alex. *100G pasivní optická síť*. Diplomová práce. Brno: VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ, 2022.
- [20] *GPON*. Online. In: Wikipedia: the free encyclopedia. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2024-08-11. Dostupné z: <https://en.wikipedia.org/wiki/GPON>. [cit. 2024-10-05].
- [21] *Technologie GPON*. Online. COMPLUS. 2024. Dostupné z: <https://complus.cz/telekomunikace/gpon>. [cit. 2024-10-27].
- [22] LAFATA, P. *Pasivní optické sítě GPON s prodlouženým dosahem*. Online. In: ČVUT. 2011, s. 1-3. Dostupné z: <https://access.fel.cvut.cz/view30c8>.

- html?navezclanku=pasivni-opticke-site-gpon-s-prodlouzenym-dosahem&cisloclanku=2011100001. [cit. 2024-11-13].
- [23] LARRY. *WDM Wave Lengths Multiplexing Technology: TFF (Thin-Film Filter) & AWG (Arrayed Waveguide Grating)*. Online. In: FS. 2023. Dostupné z: <https://www.fs.com/blog/wdm-wave-lengths-multiplexing-technology-tff-thinfilm-filter-awg-arrayed-waveguide-grating-6135.html>. [cit. 2025-02-11].
- [24] *GPON/XGS-PON/RFoG 1550nm 1610nm CEx WDM Filter Modules*. Online. In: LightOptics. Dostupné z: <https://www.lightoptics.co.uk/products/gpon-xgs-pon-1577nm-cex-wdm-filter-modules>. [cit. 2025-02-11].
- [25] *GPON, XGS, PON Combo Filter datasheet*. Online. In: Lindsay. 2022. Dostupné z: https://lindsaybb.com/wp-content/uploads/2022/06/LBB0430_LBWD_02_F_3149_XGS_LG_444_GPON_XGS_PON_Combio_Filter_dsheet.pdf. [cit. 2025-02-11].
- [26] *NG-PON2*. Online. In: Wikipedia: the free encyclopedia. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2024, 2024-10-18. Dostupné z: <https://en.wikipedia.org/wiki/NG-PON2>. [cit. 2024-10-21].
- [27] STOCKTON, Dave. *Why GPON needs to change - introducing NGPON2*. Online. In: PPC. 2024, s. 1-3. Dostupné z: <https://www.ppc-online.com/blog/why-gpon-needs-to-change-introducing-ngpon2>. [cit. 2024-11-13].
- [28] ZHANG, Deshi; LIU, Dekun; WU, Xuming a NESSET, Derek. *Progress of ITU-T higher speed passive optical network (50G-PON) standardization*. Online. In: OPTICA publishing group. 2020. Dostupné z: <https://opg.optica.org/jocn/fulltext.cfm?uri=jocn-12-10-D99&id=432860>. [cit. 2024-11-25].
- [29] *Testing Optical Splitters Loss with Optical Power Meter and Light Source*. Online. FS. 2024. Dostupné z: <https://community.fs.com/article/test-optical-splitters-loss-with-optical-power-meter-light-source.html>. [cit. 2024-10-13].
- [30] LAFATA, Pavel a VODRÁŽKA, Jiří. *PROGRAMY PRO KALKULACI ÚTLUMOVÉ BILANCE PASIVNÍCH OPTICKÝCH PŘÍSTUPOVÝCH SÍTÍ A JEJÍ OPTIMALIZACI*. Online. In: VŠB. 2010. Dostupné z: <https://advances.vsb.cz/data/articles/2010/Vol%208,%20No%202/Physics%20and%20Optics/The%20Applications%20for%20the%20Calculation%20and%20Optimization%20of%20Passive%20Optical%20Networks%20Attenuation%20Characteristics.pdf>. [cit. 2024-10-13].

- [31] *Calculate the Maximum Attenuation for Optical Fiber Links*. Online. Cisco. 2024, 2024-02-27. Dostupné z: <https://www.cisco.com/c/en/us/support/docs/optical-networking/ons-15454-sonet-multiservice-provisioning-platform-mspp/27042-max-att-27042.html>. [cit. 2024-10-04].
- [32] *Calculate the Maximum Attenuation for Optical Fiber Links*. Online. IT Slovník. 2024. Dostupné z: <https://it-slovník.cz/pojem/agregace>. [cit. 2024-11-04].
- [33] NAŘÍZENÍ EVROPSKÉHO PARLAMENTU A RADY (EU) 2015/2120. 2015, Článek 4.
- [34] *Informace pro uživatele dle Nařízení Evropského parlamentu a Rady (EU) 2015/2120, kterým se stanoví opatření týkající se přístupu k otevřenému internetu*. Online. In: OR-CZ. 2020. Dostupné z: https://www.orcz.cz/sites/default/files/docs/2024/01/podminky_pripojeni_internet_2021.pdf. [cit. 2024-10-13].
- [35] *Rychlost internetu: Její měření a reklamace*. Online. In: ČTÚ. 2021. Dostupné z: https://ctu.gov.cz/sites/default/files/obsah/soubory-ke-stazeni/rychlost_internetu_jeji_mereni_a_reklamace.pdf. [cit. 2024-10-13].
- [36] *Coexistence Element for XGS-PON(XG-PON)/GPON*. Online. In: Ubiquiti. 2021. Dostupné z: <https://dl.ui.com/qig/uacc-uf-wdm-xgs>. [cit. 2024-10-13].
- [37] BUSCAINO, Brandon. Coherent Optics Grows Older and Goes Shorter. *Optics & Photonics News*. 2025, roč. 2025, č. 3, s. 36-41.
- [38] PASCHOTTA, Rüdiger. Bandwidth—distance Product. Online. *RP Photonics Encyclopedia*. Dostupné z: <https://doi.org/10.61835/jk1>.
- [39] *ITU-T Recommendation G.957: Optical interfaces for equipments and systems relating to the synchronous digital hierarchy*. Online. In: ITU. 2006. Dostupné také z: <https://www.itu.int/rec/T-REC-G.957-200603-I/en>.
- [40] SALAZAR, Ryan. *MADI*. Online. In: Tvtech. 2012. Dostupné také z: <https://www.tvtechnology.com/opinions/madi>.
- [41] SOMMERS, Steve. *HD-SDI: More Possibilities than Just Television*. Online. In: Extron. Dostupné z: https://www.extron.de/article/hdsdi_ts. [cit. 2025-05-02].

- [42] KEISER, Gerd. *Optical Fiber Communications*. McGraw-Hill Education, 2010. ISBN 978-0073380711.
- [43] MASOUDI, Ali a NEWSON, Trevor. Analysis of distributed optical fibre acoustic sensors through numerical modelling. *Optics Express*. Roč. 2017, č. 25.
- [44] SAVORY, Seb. Digital Coherent Optical Receivers: Algorithms and Subsystems. Online. In: IEEE. 2010, s. 1164 - 1179. Dostupné z: <https://doi.org/10.1109/JSTQE.2010.2044751>. [cit. 2025-05-18].
- [45] AKADEMIE VĚD ČESKÉ REPUBLIKY, ÚSTAV PRO JAZYK ČESKÝ. *Internetová jazyková příručka*. Online. Ústav pro jazyk český. 2025. Dostupné z: <https://prirucka.ujc.cas.cz/?slovo=koherentn%C3%AD>. [cit. 2025-05-11].
- [46] RADIL, Jan. *Koherentní přenosové systémy podrobněji: Pokročilé modulační formáty*. Online. In: . 2020. Dostupné z: <https://www.vovcr.cz/odz/tech/512/page09.html>. [cit. 2025-05-18].
- [47] ZHAO, Jianye et al. 116.66-Tb/s WDM transmission over 16-Km field deployed 7-core fiber based on sub-constellations overlap constellation shaping. Online. *Optics Express*. 2023, roč. 2023, č. 31. Dostupné z: <https://doi.org/10.1364/OE.497946>. [cit. 2025-05-18].
- [48] Advanced Optical Modulation Formats. Online. *Proceedings of the IEEE*. Roč. 2006, č. 94, s. 952-985. Dostupné z: <https://doi.org/10.1109/JPROC.2006.873438>. [cit. 2025-05-03].
- [49] ŠIFTA, Radim. Optovláknové senzorické systémy. *AUTOMA*. Roč. 2020, č. 5, s. 33-36.
- [50] Applications of fiber-optic sensors. Online. *IEEE*. 2002. Dostupné z: <https://doi.org/10.1109/ECC.1989.77791>. [cit. 2025-05-18].
- [51] FERNÁNDEZ-RUIZ, Maria R. et al. Distributed acoustic sensing for seismic activity monitoring. Online. In: *APL Photonics*. 2020. Dostupné z: <https://doi.org/10.1063/1.5139602>. [cit. 2025-05-18].
- [52] ITK ENGINEERING. *Distributed Acoustic Sensing for railway technology*. Online. Dostupné z: <https://www.itk-engineering.de/en/story/innovation-distributed-acoustic-sensing/>. [cit. 2025-05-12].
- [53] LARRY. *Fiber Monitoring System for WDM/OTN Network: Automatic Monitoring and Troubleshooting*. Online. In: FS.com. 2024. Dostupné z: <https://www.fs.com/Products/Fiber-Monitoring-System-for-WDM-OTN-Network.aspx>. [cit. 2025-05-18].

- [//www.fs.com/blog/fiber-monitoring-system-for-wdmotn-network-automatic-monitoring-and-troubleshooting-15004.html](https://www.fs.com/blog/fiber-monitoring-system-for-wdmotn-network-automatic-monitoring-and-troubleshooting-15004.html). [cit. 2025-05-18].
- [54] DOBOT ROBOTS. *MG400*. Online. Dostupné z: <https://www.dobot-robots.com/products/desktop-four-axis/mg400.html>. [cit. 2025-04-29].
- [55] UTIL CELL. *Model 230*. Online. Dostupné z: <https://www.utilcell.com/dokumenty/m230-2020-en-de.pdf>. [cit. 2025-04-29].
- [56] *Recommendation G.657: Characteristics of a bending-loss insensitive single-mode optical fibre and cable*. Online. In: ITU-T. 2024. Dostupné z: <https://www.itu.int/rec/T-REC-G.657>. [cit. 2025-05-18].
- [57] *What is Bend-Insensitive Fiber?* Online. In: HOLIGHT. FTTH Fibre Optics. 2024. Dostupné z: <https://ftthfiber optic.com/what-is-bend-insensitive-fiber/>. [cit. 2025-05-10].
- [58] MASOPOUSTOVÁ, Kateřina. *Měření vlastností optických vláken a kabelů pro případné použití v extrémních podmínkách*. Diplomová práce. Praha: ČVUT, 2022.
- [59] MING-JUN, Li. *Bend-insensitive optical fibers simplify fiber-to-the-home installations*. Online. In: CORNING INC. SPIE.org. 2008. Dostupné z: <https://spie.org/news/0966-bend-insensitive-optical-fibers-simplify-fiber-to-the-home-installations>. [cit. 2025-05-18].
- [60] *Unix time*. Online. In: Wikipedia: the free encyclopedia. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Unix_time. [cit. 2025-05-18].
- [61] *Recommendation G.977.1: Transverse compatible dense wavelength division multiplexing applications for repeatered optical fibre submarine cable systems*. Online. In: ITU. 2020. Dostupné z: <https://www.itu.int/rec/T-REC-G.977.1-202010-I>. [cit. 2025-05-18].
- [62] ADTRAN HOLDINGS, INC. *ADVA Hardware Guide: Fiber Service Platform 3000 C*. Elektronicky. 2023.
- [63] *Pickle - Python object serialization*. Online. In: Python.org. 2025. Dostupné z: <https://docs.python.org/3/library/pickle.html>. [cit. 2025-05-18].
- [64] *Os.path - Common pathname manipulations*. Online. In: Python.org. 2025. Dostupné z: <https://docs.python.org/3/library/pickle.html>. [cit. 2025-05-18].

- [65] GEORGE. *SFP, SFP+, SFP28, QSFP+, QSFP28, What Are the Differences?* Online. In: FS. 2022. Dostupné také z: <https://www.fs.com/blog/sfp-sfp-sfp28-qsfp-qsfp28-what-are-the-differences-386.html>.
- [66] *S-31DLC20D: SFP (1.25G) module, 20KM, Single Mode*. Online. In: Mikrotik. Dostupné z: <https://mikrotik.com/product/S-31DLC20D-181>. [cit. 2025-04-24].
- [67] REEVES, Jason. *SFP-DD: The Future of Optical Transceiver Technology Explained*. Online. In: Fiber Mall. 2024. Dostupné z: <https://www.fibermall.com/blog/sfp-dd.htm>. [cit. 2025-04-24].
- [68] *Ethernet*. Online. In: Wikipedia: the free encyclopedia. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2025. Dostupné z: <https://en.wikipedia.org/wiki/Ethernet>. [cit. 2025-05-12].
- [69] *Jumbo frame*. Online. In: Wikipedia: the free encyclopedia. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2024. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Jumbo_frame. [cit. 2025-05-12].
- [70] *Ethernetový rámeček*. Online. In: Wikipedia: the free encyclopedia. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2023. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Ethernetov%C3%BD_r%C3%A1meček. [cit. 2025-05-12].
- [71] *G.707: Network node interface for the synchronous digital hierarchy (SDH)*. Online. In: ITU. Dostupné z: <https://www.itu.int/rec/T-REC-G.707-200701-I/en>. [cit. 2025-05-06].
- [72] *Synchronous optical networking*. Online. In: Wikipedia: the free encyclopedia. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2025. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Synchronous_optical_networking. [cit. 2025-05-12].
- [73] *Fibre Channel*. Online. In: Wikipedia: the free encyclopedia. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2025. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Fibre_Channel. [cit. 2025-05-12].
- [74] *SCSI*. Online. In: Wikipedia: the free encyclopedia. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2025. Dostupné z: <https://en.wikipedia.org/wiki/SCSI>. [cit. 2025-05-12].
- [75] *A Collection of Open Standards*. Online. In: NVM Express. Dostupné z: <https://nvmexpress.org/about/>. [cit. 2025-05-24].

- [76] *Fibre Channel*. Online. In: Wikipedia: the free encyclopedia. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2025. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Fibre_Channel. [cit. 2025-05-24].
- [77] *Optical transport network*. Online. In: Wikipedia: the free encyclopedia. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2024. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Optical_transport_network. [cit. 2025-05-12].
- [78] *OTN Technology Demystified*. Online. In: FS. Dostupné z: <https://www.fs.com/blog/otn-technology-demystified-8958.html>. [cit. 2025-05-06].
- [79] *G.709: Interfaces for the optical transport network*. Online. In: ITU. Dostupné z: <https://www.itu.int/rec/T-REC-G.709/en>. [cit. 2025-05-06].
- [80] *Optical transport network*. Online. In: Wikipedia: the free encyclopedia. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2024. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Optical_transport_network. [cit. 2025-05-09].
- [81] *Error correction code*. Online. In: Wikipedia: the free encyclopedia. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2025. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Error_correction_code. [cit. 2025-05-02].
- [82] *Optical Transport Network (OTN) Tutorial*. Online. In: ITU. Dostupné z: <https://www.itu.int/ITU-T/studygroups/com15/otn/OTNtutorial.pdf>. [cit. 2025-05-02].
- [83] *TX340s Module: All-in-one Optical and Service Test Platform*. Online. In: VeEX. Dostupné z: <https://www.veexinc.com/products/tx340sadvancedmultiserviceoption>. [cit. 2025-04-22].
- [84] *Common Public Radio Interface*. Online. In: Wikipedia: the free encyclopedia. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2024. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Common_Public_Radio_Interface. [cit. 2025-05-02].
- [85] *Open Base Station Architecture Initiative: IEEE Standard for N times 64 kbps Optical Fiber Interfaces between Teleprotection and Multiplexer Equipment*. Online. In: Wikipedia: the free encyclopedia. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2021. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Open_Base_Station_Architecture_Initiative. [cit. 2025-05-09].
- [86] IEEE. C37.94-2017, *IEEE Standard for N times 64 kbps Optical Fiber Interfaces between Teleprotection and Multiplexer Equipment*. 2017.

- [87] *TX340s User Manual: All-in-one, Optical and Service Test Platform*. PDF. 2025. VeEX, 2025.
- [88] *TX300s Family: Hardware Options*. Online. In: VeEX. Dostupné z: <https://www.veexinc.com/products/tx300s>. [cit. 2025-04-26].

Seznam symbolů a zkratek

PON	Passive Optical Network – pasivní optická síť
FFTN	Fiber to the node
FFTC	Fiber to the cabinet
FFTP	Fiber to the premises
FFTB	Fiber to the building (basement)
FFTH	Fiber to the home
PTP	Point to Point – bod-bod
PTM	Point to Multipoint
ODN	Optical Distribution Network – optická distribuční síť
OLT	Optical Line Termination – optické linkové zakončení
ONU	Optical Network Unit – optická síťová jednotka
ONT	Optical Network Terminal – optický síťový zakončovač
GEM	Gigabit-capable Passive Optical Network Encapsulation Method
GPON	Gigabit-capable Passive Optical Network
GEPON	Gigabit Ethernet Passive Optical Network
WDM	Wavelength-Division Multiplexing – vlnový multiplex
TDM	Time Division Multiplex – multiplex s časovým dělením
Mbit/s	megabit za sekundu
Gbit/s	gigabit za sekundu
B	bajt
nm	nanometr
km	kilometr
dB	decibel
dBm	decibel miliwatt

SNR	Signal-to-Noise Ratio – poměr signálu k šumu
Q factor	Quality Factor – faktor kvality
BER	Bit Error Rate – míra chybovosti bitů
N	Newton
CFO	Carrier Frequency Offset – odchylka nosné frekvence
NRZ OOK	Non-Return-to-Zero On-Off Keying
PAM	Pulse Amplitude Modulation – pulzně amplitudová modulace
SDI	Serial Digital Interface
MADI	Multichannel Audio Digital Interface
NRZI	Non-Return-to-Zero Inverted
PSK	Phase Shift Keying – klíčování fázovým posuvem
QPSK	Quadrature Phase Shift Keying
QAM	Quadrature Amplitude Modulation – kvadrurní amplitudová modulace
OTDR	Optical Time-Domain Reflectometer – optický reflektometr v časové oblasti
FEC	Forward Error Correction – dopředná oprava chyb
SFP	Small Form-factor Pluggable – zásuvný modul malého formátu
LC	Lucent Connector – konektor LC
SC	Subscriber Connector – konektor SC
SDH	Synchronous Digital Hierarchy – Synchronous Digital Hierarchy
FC	Fibre Channel
OTN	Optical Transport Network
TCP	Transmission Control Protocol
UDP	User Datagram Protocol

Seznam příloh

A	Laboratorní úloha 1: Šablona pro řešení laboratorní úlohy	118
B	Laboratorní úloha 1: Vyřešená šablona pro řešení úlohy	119
C	Laboratorní úloha 1: Generátor počtu uživatelů v síti	120
D	Laboratorní úloha 2: Zadané soubory pro první část	121
E	Laboratorní úloha 2: Zadané soubory pro druhou část	122
F	Laboratorní úloha 2: Zadaný soubor pro třetí část	123
G	Laboratorní úloha 2: Skript Python pro extrakci dat v první části	124
H	Laboratorní úloha 2: Skript Python pro grafické zobrazení naměřených dat v závislosti na čase v první části	125
I	Laboratorní úloha 2: Skript Python pro extrakci dat v druhé části	126
J	Laboratorní úloha 2: Skript Python pro grafické zobrazení naměřených dat v závislosti na čase v druhé části	127

A Laboratorní úloha 1: Šablona pro řešení laboratorní úlohy

Je soubor určený k řešení laboratorní úlohy PON. Obsahuje celkem 5 listů, které studenti využívají při řešení úlohy.

Je určený pro požití v softwaru Microsoft Excel v českém jazyce (z důvodu kompatibility funkcí). Vytvořen byl ve verzi Microsoft Excel 16.85 pro operační systém Mac OS.

Souboru pod názvem Lab_PON Šablona.xls. je obsažen ve složce Lab 1 v zip archivu s přílohami.

B Laboratorní úloha 1: Vyřešená šablona pro řešení úlohy

Je soubor s vyplněnými možnými správnými výsledky pro řešení laboratorní úlohy PON. Obsahuje celkem 5 listů, stejně jako soubor pro studenty.

Je určený pro použití v softwaru Microsoft Excel v českém jazyce (z důvodu kompatibility funkcí). Vytvořen byl ve verzi Microsoft Excel 16.85 pro operační systém Mac OS.

Souboru pod názvem `Lab_PON Šablona - řešení.xls` je obsažen ve složce `Lab 1` v zip archivu s přílohami.

C Laboratorní úloha 1: Generátor počtu uživatelů v síti

Je soubor, který umožňuje generování rozdílných zadání pro **6. úkol laboratorní úlohy**. Při každém přepočtení listu (změny dat) dojde k vygenerování nového náhodného čísla v rozsahu $\langle -12; 16 \rangle$ a jsou zobrazeny nové počty uživatelů u jednotlivých tarifů. Zároveň výsledek vždy odpovídá celkovému počtu 128 uživatelů a maximálním rychlostem pro možnost splnění 6. úkolu dle zadání.

Je určený pro požití v softwaru Microsoft Excel v českém jazyce (z důvodu kompatibility funkcí). Vytvořen byl ve verzi Microsoft Excel 16.85 pro operační systém Mac OS.

Souboru pod názvem Lab_PON Generátor počtu uživatelů.xls je obsažen ve složce Lab 1 v zip archivu s přílohami.

D Laboratorní úloha 2: Zadané soubory pro první část

Jsou soubory s naměřenými údaji ze systému ADVA FSP3000C určené pro zpracování v první části laboratorní úlohy s koherentním systémem.

Jedná se o 8 souborů s názvy:

- A.perf
- B.perf
- C.perf
- D.perf
- E.perf
- F.perf
- G.perf
- H.perf

Souboru jsou uloženy ve složce Lab 2\Zadání 1 v zip archivu s přílohami.

E Laboratorní úloha 2: Zadané soubory pro druhou část

Jsou soubory s naměřenými údaji ze systému ADVA FSP3000C určené pro zpracování v druhé části laboratorní úlohy s koherentním systémem.

Jedná se o 12 souborů s názvy:

0 N.perf
3 N.perf
6 N.perf
9 N.perf
12 N.perf
16 N.perf
20 N.perf
25 N.perf
30 N.perf
35 N.perf
40 N.perf
45 N.perf

Souboru jsou uloženy ve složce Lab 2\Zadání 2 v zip archivu s přílohami.

F Laboratorní úloha 2: Zadaný soubor pro třetí část

Je soubor s naměřenými údaji ze systému ADVA FSP3000C určený pro zpracování ve druhé části laboratorní úlohy s koherentním systémem.

Soubor s názvem `promenliva_sila.perf` je uložen ve složce Lab 2\Zadání 3 v zip archivu s přílohami.

G Laboratorní úloha 2: Skript Python pro extrakci dat v první části

Je skript v jazyce Python určený pro použití v první části laboratorní úlohy pro extrakci dat ze souborů perf. Soubor je třeba upravit dle zadání laboratorní úlohy.

Soubor s názvem `text2data.py` je uložen ve složce Lab 2\Skripty 1 v zip archivu s přílohami.

H Laboratorní úloha 2: Skript Python pro grafické zobrazení naměřených dat v závislosti na čase v první části

Je skript v jazyce Python určený pro použití v první části laboratorní úlohy pro extrakci dat ze souborů perf. Soubor je třeba upravit dle zadání laboratorní úlohy.

Soubor s názvem `grafy_casova_zavilost.py` je uložen ve složce `Lab 2\Skripty 1` v zip archivu s přílohami.

I Laboratorní úloha 2: Skript Python pro extrakci dat v druhé části

Je skript v jazyce Python určený pro použití v druhé části laboratorní úlohy pro extrakci dat ze souborů perf. Soubor je třeba upravit dle zadání laboratorní úlohy.

Soubor s názvem `text2data - více souborů.py` je uložen ve složce `Lab 2\Skripty 2` v zip archivu s přílohami.

J Laboratorní úloha 2: Skript Python pro grafické zobrazení naměřených dat v závislosti na čase v druhé části

Je skript v jazyce Python určený pro použití v druhé části laboratorní úlohy pro extrakci dat ze souborů perf. Soubor je třeba upravit dle zadání laboratorní úlohy.

Soubor s názvem `grafy_zavislost` na `sile.py` je uložen ve složce `Lab 2\Skripty 2` v zip archivu s přílohami.