

Diplomová práce



České
vysoké
učení technické
v Praze

F3

Fakulta elektrotechnická
Katedra elektromagnetického pole

Analýza nejistot přenosových parametrů v optických infrastrukturách 5G a VHCN

Vojtěch Mičín

Vedoucí: Ing. Jan Bohata, Ph.D.
Specialista: prof. Ing. Stanislav Zvánovec, Ph.D.
Duben 2024

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Mičín** Jméno: **Vojtěch** Osobní číslo: **492038**
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**
Zadávající katedra/ústav: **Katedra elektromagnetického pole**
Studijní program: **Elektronika a komunikace**
Specializace: **Fotonika**

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

Nejistoty přenosových parametrů v optických sítích 5G a VHCN

Název diplomové práce anglicky:

Uncertainties of Transmission Parameters in 5G and VHCN Optical Networks

Pokyny pro vypracování:

Se zvyšujícími se nároky na přenos dat a vzrůstajícím využitím optických vláken dochází k nutnosti přesného měření parametrů instalovaných vláknově-optických tras a komponent. V rámci diplomové práce analyzujte nejistoty přenosových parametrů v optických infrastrukturách pro 5G a VHCN (Very High Capacity Networks). Realizujte testovací síť (v typické konfiguraci pro VHCN) a experimentálně určete nejistoty klíčových parametrů takového optického přenosového systému. Dané měření pak kriticky vyhodnoťte. Zaměřte se primárně na největší zdroje nejistot, jejich kvantifikaci a zejména pak vliv na celkovou nejistotu přenosových parametrů celé optické sítě s ohledem na různé datové formáty.
Specialista: prof. Ing. Stanislav Zvánovec, Ph.D.

Seznam doporučené literatury:

- [1] R. Hui , M. O'Sullivan, „Fiber Optic Measurement Techniques”, Academic Press, 2009.
- [2] ČSN EN 61280-4-2 (359270), ed. 2. Postupy zkoušek optického vláknového komunikačního subsystému - Část 4-2: Instalovaná kabelová trasa — Měření útlumu a útlumu odrazu jednovlákenných vláken.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

Ing. Jan Bohata, Ph.D. katedra elektromagnetického pole FEL

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) diplomové práce:

Datum zadání diplomové práce: **25.01.2024**

Termín odevzdání diplomové práce: **24.05.2024**

Platnost zadání diplomové práce: **21.09.2025**

Ing. Jan Bohata, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) práce

podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

prof. Mgr. Petr Páta, Ph.D.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Diplomant bere na vědomí, že je povinen vypracovat diplomovou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v diplomové práci.

Datum převzetí zadání

Podpis studenta

Poděkování

Rád bych poděkoval svému vedoucímu Ing. Janu Bohatovi Ph.D., jehož rady a dobrá nálada provázela celou tuto práci a prof. Ing. Stanislavu Zvánovcovi, Ph.D. za jeho připomínky.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracoval samostatně, a že jsem uvedl veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací.

Abstrakt

Práce byla zaměřena na stanovení nejistot měření různých přenosových parametrů v optických sítích 5G a VHCN. Jako síť pro vyhodnocení nejistot byla sestavena pasivní optická síť použitelná pro standard VHCN. Na této síti byla na vlnové délce 1550 nm provedena sada měření konkrétními metodami pro parametry: délka trasa, vložný útlum, chromatická disperze, polarizační vidová disperze, útlum odrazu a reflektance. U každého parametru byla vypočítána nejistota měření dané metody. Výsledné hodnoty doplněné o rozšířené nejistoty byly porovnány s limitními hodnotami některých standardů. Pro každý parametr byly v závěru diskutovány nejvýznamnější faktory, které měly vliv na výslednou hodnotu měření.

Klíčová slova: Nejistoty, 5G sítě, VHCN, PON

Vedoucí: Ing. Jan Bohata, Ph.D.

Abstract

The work was focused on the determination of measurement uncertainties of various transmission parameters in 5G and VHCN optical networks. A passive optical network applicable to the VHCN standard was constructed as a network for the evaluation of the uncertainties. On this network, a set of measurements were performed at a wavelength of 1550 nm using specific methods for the parameters: path length, insertion loss, chromatic dispersion, polarization mode dispersion, optical return loss and reflectance. For each parameter, the measurement uncertainty of the method was calculated. The resulting values, plus the expanded uncertainties, were compared with the limiting values of some standards. For each parameter, the most important factors that affected the resulting measurement value were discussed at the end.

Keywords: Uncertainties, 5G networks, VHCN, PON

Title translation: Analysis of transmission parameter uncertainties in 5G and VHCN optical infrastructures

Obsah

Seznam zkratk	vii	
1 Úvod	1	
1.1 Moderní optické sítě	1	
1.1.1 Gigabitové přenosové standardy	1	
1.1.2 Pasivní optické sítě	5	
1.1.3 Přenášený signál v PON	8	
1.1.4 Použití PON v 5G a VHCN	10	
1.2 Cíle a struktura práce	10	
2 Parametry optických sítí	12	
2.1 Délka trasy	12	
2.2 Vložný útlum	13	
2.2.1 Intrinsické ztráty	14	
2.2.2 Extrinsické ztráty	16	
2.2.3 Metody měření vložného útlumu	17	
2.3 Chromatická disperze	20	
2.3.1 Metody měření chromatické disperze	21	
2.4 Polarizační vidová disperze	24	
2.4.1 Metody měření PMD	25	
2.5 Útlum odrazu a reflektance	28	
2.5.1 Metody měření ORL a reflektance	29	
3 Nejistoty měření	31	
3.1 Příklad výpočtu nejistoty měření vložného útlumu one-cord metodou	35	
3.2 Stanovení limitu útlumu optických tras	39	
4 Měření	41	
4.1 Měření délky a vložného útlumu metodou OTDR	42	
4.2 Měření vložného útlumu přímou metodou	45	
4.3 Měření chromatické disperze	47	
4.4 Měření polarizační vidové disperze	48	
4.5 Měření reflektance a ORL metodou OTDR	50	
5 Stanovení limitů a nejistot měření	52	
5.1 Stanovení limitů parametrů modelové PON	52	
5.2 Výpočet nejistoty měření vložného útlumu přímou metodou	56	
5.3 Nejistoty měření délky metodou OTDR	58	
5.4 Nejistoty měření chromatické disperze	59	
5.5 Nejistoty měření PMD	59	
5.6 Nejistoty měření reflektance a ORL	60	
6 Zhodnocení výsledků	61	
7 Závěr	66	
Literatura	68	

Obrázky

1.1 Rozdíl infrastruktury 4G LTE a 5G.....	4
1.2 Typ splitteru (a) FBT (fúzní splitter) (b) PLC (planární splitter).....	6
1.3 Srovnání minimálních poloměrů zakřivení pro různé typy vláken. ...	6
1.4 Schéma typické PON sítě.....	7
1.5 Historický vývoj standardů PON.....	8
1.6 Princip systému systému s multiplexací TDM.	9
1.7 Používaná frekvenční pásma pro jednotlivé standardy.	9
1.8 Možnost propojení standardů VHCN a 5G.	10
2.1 Historický vývoj měrného útlumu SiO ₂ vláken.	15
2.2 Srovnání Rayleigha a Mieho rozptylu.....	16
2.3 Ukázka mikroohybu a makroohybu.	16
2.4 Blokové schéma zapojení měření IL metodou OTDR.	18
2.5 Vzorový reflektogram.	18
2.6 Schéma zapojení přímé metody pro (a) měření reference one-cord metodou (b) měření reference two-cord metodou (c) měření reference three-cord metodou (d) měření testovaného vlákna.....	19
2.7 Zobrazení chromatické disperze v závislosti na vlnové délce.	21
2.8 Blokové schéma zapojení měření CD metodou fázového posuvu. ...	22
2.9 Blokové schéma zapojení měření CD metodou odezvy v základním pásmu AM.	22
2.10 Blokové schéma zapojení měření CD interferenční metodou (a) zapojení s přeladitelným filtrem (a) zapojení s monochromátorem.	23
2.11 Princip diferenciálního skupinového zpoždění.	24
2.12 Pohyb po Poincarého sféře změnou stavů polarizace (a) bez vlivu dvojlomu (b) s vlivem dvojlomu.....	26
2.13 Blokové schéma zapojení měření PMD metodou Poincarého oblouku.	26
2.14 Blokové schéma měření PMD metodou fixního analyzátoru (a) zapojení s přeladitelným laserem a detektorem pro měření optického výkonu (b) zapojení s širokospektrálním zdrojem a spektrálním analyzátozem.	27
2.15 Blokové schéma zapojení měření PMD tradiční interferometrickou metodou (TINTY).	27
2.16 Srovnání rovného a sešikmeného konektoru.	29
2.17 Schéma zapojení měření reflektance metodou OCWR (a) referenční měření (b) měření DUT.	30
3.1 Normální (Gaussovo) rozdělení pro různé střední hodnoty a směrodatné odchylky.	32
3.2 Různé intervaly spolehlivosti pro normální (Gaussovo) rozdělení.	35
4.1 Fotografie modelové PON.	41
4.2 Schéma modelové PON.	42
4.3 Reflektogram celé trasy s nedostatečně silným signálem. ...	43
4.4 Fotografie měřené trasy metodou OTDR (a) 10km vlákna, splitteru 1:8 a 100m vlákna (b) splitteru 1:16 a 3km vlákna.	43
4.5 Reflektogram měřené trasy s nastavenými markery (a) 10km vlákna, splitteru 1:8 a 100m vlákna (b) splitteru 1:16 a 3km vlákna. ...	44
4.6 Fotografie měření vložného útlumu přímou metodou 10km vlákna. ...	46
4.7 Zobrazení výsledku jednoho měření chromatické disperze.....	47
4.8 Zobrazení naměřených hodnot jednoho z kanálu PMD zdroje. ...	50


Tabulky

2.1 Doporučené třídy XGS-PON pro různé limitní hodnoty vložného útlumu pro užívané vlnové délky.	14
2.2 Maximální hodnoty útlumu při spojení různých kombinací konektorů.	17
3.1 Ukázkové nejistoty optických přístrojů stanovené výrobcí.	37
3.2 Ukázkové naměřené nejistoty měřené trasy (DUT).	37
3.3 Příklad výpočtu standardních nejistot pro různé zdroje nejistot.	38
3.4 Ukázkový výpočet stanovení limitu vložného útlumu trasy dvěma přístupy.	40
4.1 Tabulka výsledků měření útlumu a délky metodou OTDR na vlnové délce 1550 nm.	45
4.2 Tabulka výsledků měření vložného útlumu metodou one-cord na vlnové délce 1550 nm.	46
4.3 Tabulka výsledků měření vložného útlumu metodou one-cord na vlnové délce 1550 nm.	46
4.4 Naměřené hodnoty chromatické disperze a vypočtené koeficienty chromatické disperze na vlnové délce 1550 nm.	48
4.5 Naměřené hodnoty polarizační vidové disperze a vypočtené koeficienty PMD na vlnové délce 1550 nm.	49
4.6 Významné hodnoty měřeného kanálu PMD zdroje.	50
4.7 Naměřené hodnoty diskrétní reflektance a celkvého ORL metodou OTDR.	51
5.1 Výpočet měrného útlumu vláken z měření OTDR.	53
5.2 Vypočítané hodnoty vložných útlumů jednotlivých konektorových spojení z tabulky 4.2.	54
5.3 Stanovení limitu vložného útlumu modelové PON dvěma přístupy pro vlnovou délku 1550 nm.	55
5.4 Výrobci stanovené nejistoty optických přístrojů použitých při měření útlumu přímou metodou.	56
5.5 Výpočet standardní nejistoty pro měření útlumu one-cord metodou.	58
5.6 Parametry měření OTDR použité k výpočtu nejistoty měření.	59
5.7 Parametry měření chromatické disperze použité k výpočtu nejistoty měření.	59
5.8 Parametry měření PMD použité k výpočtu nejistoty měření.	60
6.1 Výsledné hodnoty měření všech parametrů ($\lambda = 1550$ nm) včetně nejistot měření.	61



Seznam zkratek

ADC	Analog-to-digital Converter
APC	Angled Physical Contact
BBU	Baseband Unit
CD	Chromatic Dispersion
CP	Control Plane
CU	Central Unit
CWDM	Coarse Wavelength Division Multiplex
DCF	Dispersion Compensating Fiber
DGD	Diferential Group Delay
DU	Distributed Unit
DUT	Device Under Test
DWDM	Dense Wavelength Division Multiplex
eMMB	enhanced Mobile Broadband
EPC	Evolved Packed Core
FBT	Fused Biconical Taper
FTTA	Fiber to the Antenna
FTTB	Fiber to the Building
FTTH	Fiber to the Home
FTTx	Fiber to the x
IL	Insertion Loss
Lx	Layer x
mMTC	massive Machine Type Communications
NGC	Next Generation Core
NRT	Non-real-time
OCWR	Optical Continuous Wave Reflectometer
OLT	Optical Line Termination
ONT	Optical Network Terminal
ONU	Optical Network Unit
OOK NRZ	On Off Keying – Non-Return to Zero
ORL	Optical Return Loss
OTDR	Optical Time-domain Reflectometry
PC	Physical Contact
PD	Photodiode
PLC	Planar Lightwave Circuit



PMD	Polarization Mode Dispersion
PON	Passive Optical Network
PSP	Principal State of Polarization
R	Reflectance
RGD	Relative Group Delay
RRH	Remote Radio Head
RT	Real-time
RU	Radio Unit
SBS	Stimulated Brillouin Scattering
SC	Squared Connector
SDH	Synchronous Digital Hierarchy
SEM	Standard Error of the Mean
TDM	Time Division Multiplex
UP	User Plane
URLLC	Ultra Low Latency Communications
VHCN	Very High Capacity Network
WDM	Wavelength Division Multiplex

Kapitola 1

Úvod

Roku 1975 bylo ve Velké Británii implementováno první komerční spojení optickým vláknem [1]. Od té doby technologie optických vláken, jako přenosového média, výrazně ovlivnila globální komunikační infrastrukturu. Překonala geografické bariéry a rozšířila se po celém světě. O masivním rozsahu a důležitosti tohoto přenosového média svědčí i fakt, že byly do roku 2016 vytvořeny až dvě miliardy kilometrů optických vláken s nízkým útlumem [1].

Princip přenosu dat tímto médiem spočívá v totálním odrazu světla, což umožňuje udržet světlo, tedy přenášený signál, uvnitř jádra vlákna. Samotné jádro je obklopeno pláštěm a dalšími vrstvami, které jsou voleny dle konkrétních požadavků a slouží jako ochrana před vnějšími vlivy. Tato konstrukce zajišťuje stabilitu a spolehlivost přenosu dat i v náročných podmínkách.

V porovnání s tradičními metalickými vodiči nabízejí optická vlákna několik výrazných výhod. V telekomunikacích hraje klíčovou roli nižší měrný útlum (útlum vztahený na kilometr vlákna), což umožňuje bez dodatečného zesílení přenášet signály na výrazně větší vzdálenosti. Taktéž vykazují imunitu vůči elektromagnetickému a radiofrekvenčnímu rušení, což zajišťuje stabilní a kvalitní přenos dat. Lehkost a kompaktní rozměry optických vláken, spolu s efektivním využitím frekvenčního pásma, umožňují vyšší kapacitu přenosu dat, což významně přispívá k efektivitě telekomunikačních sítí.

Při instalaci nových optických sítí a pravidelných kontrolách těch stávajících je nezbytné provádět důkladná měření. Přesnost těchto měření má klíčový význam, neboť i malé odchylky od stanovených hodnot mohou mít vážné důsledky na chod celé sítě. Za přesná měření v tomto kontextu označujeme ta, která mají nízké nejistoty, tedy minimální odchylky od skutečných hodnot. Jak se požadavky na přenosové rychlosti, resp. objemy dat zvyšují, zvyšují se i požadavky na přesnost měření.

1.1 Moderní optické sítě

1.1.1 Gigabitové přenosové standardy

V počátku roku 2019 začali největší mobilní operátoři používat nový standard sítí 5. generace (5G) [2]. Za vývojem 5G sítí stojí organizace 3GPP (3rd

Generation Partnership Project), která sdružuje odborníky z telekomunikačního průmyslu, akademické obce a vládních institucí. Hlavními rysy 5G sítě jsou větší šířka pásma (enhanced Mobile BroadBand, eMBB), velmi nízká latence (Ultra Low Latency Communications, URLLC), tj. velmi krátký časový interval mezi požadavkem na přenos dat a skutečným zahájením přenosu, a komunikace přístrojů (massive Machine Type Communications, mMTC). V rámci zavádění samostatně fungující 5G sítě (označováno jako „stand alone“ režim) je třeba změnit architekturu předešlé sítě 4. generace (4G). Síť 4G se skládá ze 3 hlavních jednotek:

- Jádru sítě (Evolved Packet Core, EPC): EPC je centrální inteligence sítě 4G, zodpovědná za řízení přenosu dat a konektivity mezi uživatelskými zařízeními a externími sítěmi. Zvládá úkoly, jako je směrování paketů, správa mobility, správa nosičů, vynucování zásad a zabezpečení. Zajišťuje tedy efektivní a bezpečný přenos dat s vysokorychlostní konektivitou.
- Jednotka základního pásma (Baseband Unit, BBU): BBU je zodpovědná za zpracování a správu funkcí digitálního signálu, jako jsou modulace/demulace, kódování/dekódování a přidělování kanálů pro přenos dat mezi uživatelskými zařízeními a sítí. BBU jsou obvykle umístěny na centralizovaném místě a obsluhují několik vzdálených rádiových jednotek v distribuovaném anténním systému. Rozhraní EPC a BBU bývá označováno jako „backhaul“.
- Vzdálená rádiová jednotka (Remote Radio Head, RRH): RRH je zodpovědná za konverzi digitálních signálů přijímaných z BBU na vysokofrekvenční signály pro bezdrátový přenos do uživatelských zařízení. RRH jsou připojeny k BBU pomocí metalických či optických kabelů, přičemž toto spojení je označováno jako CPRI (Common Public Radio Interface) nebo obecněji „fronthaul“.

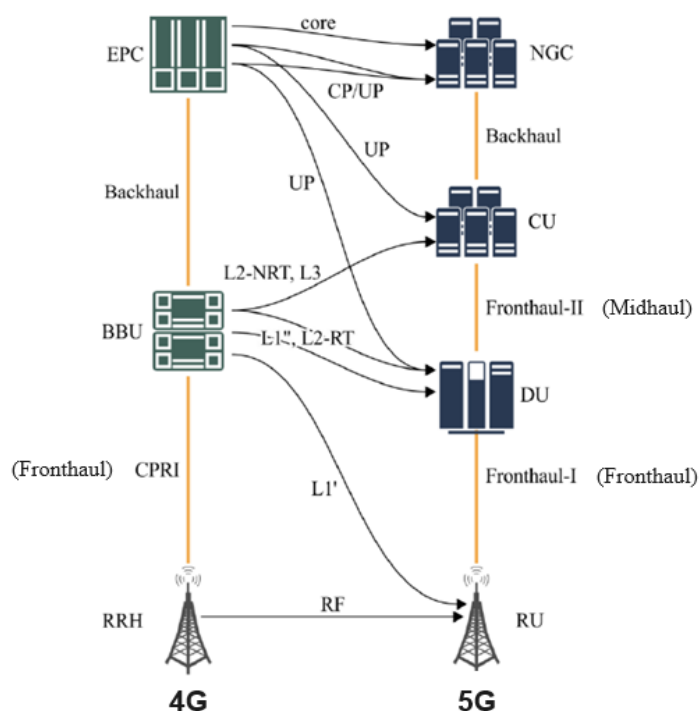
Na rozdíl od předešlé generace je 5G tvořena 4 hlavními jednotkami. Těmi jsou:

- Jádru nové generace (Next Generation Core, NGC): NGC, také známé jako 5G Core (5GC), je ústředním prvkem architektury sítě 5G. Je navržen tak, aby byl flexibilnější, škálovatelnější a efektivnější ve srovnání s EPC ve 4G. NGC poskytuje pokročilé funkce jako je podpora pro různé případy použití, včetně URLLC, mMTC a eMBB.
- Centrální jednotka (Central Unit, CU): Za NGC se nachází CU, která provádí funkce centralizovaného zpracování s vylepšenými možnostmi pro podporu funkcí 5G, jako dynamické přidělování zdrojů. CU odpovídá za úkoly, jako je plánování, koordinace a řízení zdrojů v rámci 5G. Rozhraní NGC a CU bývá označováno jako „backhaul“ 5G sítě. Rozhraní „fronthaul II“ (též „midhaul“) propojuje jednu CU k vícero distribuovaným jednotkám.

- Distribuovaná jednotka (Distributed Unit, DU): DU je zodpovědná za funkce zpracování dat v základním pásmu blíže k rádiovým jednotkám (RU). DU provádí úkoly, jako je modulace/demodulace, kódování/dekódování a tvarování paprsku, což přispívá k nižší latenci (neboť je umístěna blíže vysílacím stanicím, a tedy uživateli, než tomu bylo u generace 4G) a zvýšení kapacity sítí 5G. DU je skrze „fronthaul I“ (též „fronthaul“) propojena s více RU, které zakončují celou stand alone 5G síť.
- Rádiová jednotka (Radio Unit, RU): RU v 5G je podobná RRH ve 4G. Zodpovídá za konverzi digitálních signálů přijatých z DU na radiofrekvenční (RF) signály pro přenos skrze vzduch do uživatelských zařízení. Oproti RRH u 4G, jsou RU z důvodu použití jiných vlnových délek nasazeny blíže k uživatelům, což umožňuje lepší pokrytí, kapacitu a flexibilitu v sítích 5G.

Při porovnávání architektur sítí 4G a 5G se objevuje několik klíčových rozdílů. Ve 4G slouží EPC jako centrální inteligence, která řídí přenos dat, mobilitu a konektivitu. Tato architektura se vyznačuje centralizovaným přístupem, kde jsou úkoly, jako je směrování paketů, správa mobility a prosazování zásad, řešeny v rámci EPC. 4G navíc obsahuje BBU zodpovědné za centralizované zpracování digitálního signálu. Naopak 5G zavádí flexibilnější a rozčleněnou architekturu. NGC je navrženo tak, aby podporovalo různé služby pro různé případy použití. V 5G se vyznačuje oddělením funkcí pro CU a DU. CU provádějí centralizované úlohy zpracování, podobné BBU, zatímco DU zvládají zpracování v základním pásmu blíže k rádiovým jednotkám. Tento přístup umožňuje efektivnější využití a optimalizaci zdrojů, což přispívá k nižší latenci a zvýšené kapacitě. Principiální schéma změn mezi těmito dvěma standardy je uvedeno na obrázku [1.1](#).

Společně s rozvojem sítí 5G jsou v poslední době zmiňovány i sítě VHCN (Very High Capacity Network) [3](#). Jedná se o síť s velmi vysokou kapacitou, tj. přenosovou rychlostí. Na rozdíl od 5G se nejedná o mobilní síť, nýbrž o pevné připojení. Zatímco 5G síť umožňuje pohyb koncových uživatelů, VHCN nabízí vyšší spolehlivost připojení. Nejvýznamnějším parametrem VHCN je rychlost přenosu dat downstream s hodnotou minimálně 1 Gb/s. Vývoj takových sítí je spjat s kodexem elektronických komunikací [4](#), s programovým obdobím EU v letech 2021-2027 a cílem unifikace digitálního trhu v rámci EU. Kodex v jedné ze svých částí zmiňuje, že jsou VHCN sítěmi tvořené optickými vlákny zakončenými v tzv. distribučních bodech. Tento princip je označován jako FTTx (Fiber to the x), kde x určuje místo, do kterého je optické vlákno dovedeno, např. FTTH (Fiber to the Home) - vlákno do domu, FTTB (Fiber to the Building) - vlákno do budovy nebo FTTA (Fiber to the Antenna) - vlákno do „antény“, kdy je optické vlákno zavedeno až do rádiové jednotky. Kritéria pro kvalifikaci VHCN sítí v srpnu roku 2020 stanovila a roku 2023 aktualizovala skupina BEREC, která se zabývá regulacemi elektronické komunikace v Evropě [5](#). Pokud jakákoliv síť splňuje libovolně z následujících čtyř kritérií, je možno ji považovat za VHCN:



Obrázek 1.1: Rozdíl infrastruktury 4G LTE a 5G [6]; Control Plane, CP; User Plane, UP; Layer x, Lx; Real-time, RT; Non-real-time, NRT.

- I. Síť poskytující pevné připojení s optickým vláknem, které je zavedeno nejméně až do budovy s více bytovými jednotkami.
- II. Síť, která poskytuje bezdrátové připojení s optickým vláknem až k základnové stanici.
- III. Síť poskytující pevné připojení, která je schopna poskytovat za obvyklých podmínek ve špičce služby koncovým uživatelům s následujícími parametry s následující kvalitou služby (prahové hodnoty výkonnosti 1):
 - a. Rychlost přenosu dat downstream ≥ 1000 Mb/s
 - b. Rychlost přenosu dat upstream ≥ 200 Mb/s
 - c. Chybovost IP paketů (ITU-T Y.1540 [7]) $\leq 0,05$ %
 - d. Ztrátovost IP paketů (ITU-T Y.1540 [7]) $\leq 0,0025$ %
 - e. Zpoždění IP paketů (IETF RFC 2681 [8]) ≤ 10 ms
 - f. Kolísání zpoždění IP paketů (IETF RFC 3393 [9]) ≤ 2 ms
 - g. Dostupnost služby IP (ITU-T Y.1540 [7]) $\geq 99,9$ % za rok (nedostupnost 526 minut v roce)
- IV. Síť poskytující bezdrátové připojení, která je schopna poskytovat, za obvyklých podmínek ve špičce služby koncovým uživatelům s následujícími parametry kvalitou služby (prahové hodnoty výkonnosti 2):

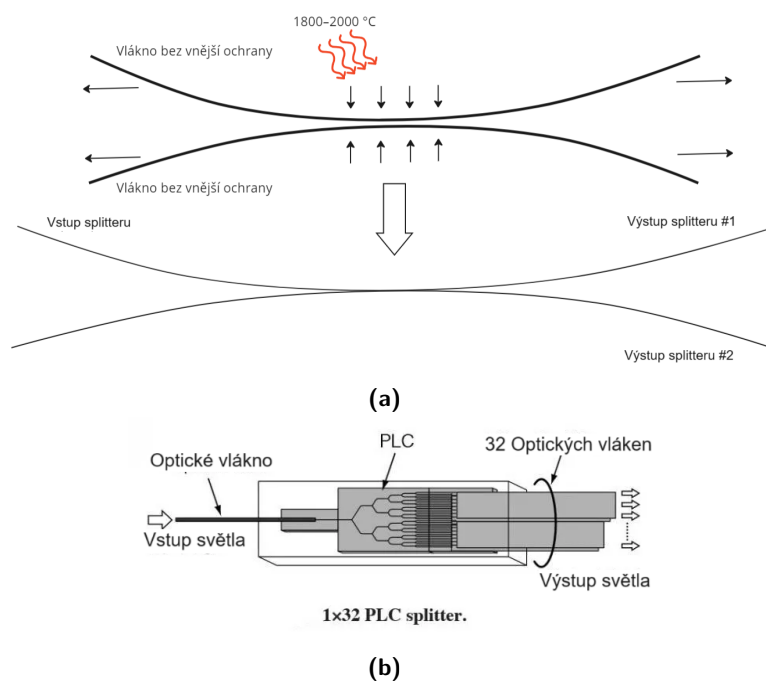
- a. Rychlost přenosu dat downstream ≥ 350 Mb/s
- b. Rychlost přenosu dat upstream ≥ 50 Mb/s
- c. Chybovost IP paketů (ITU-T Y.1540 [7]) $\leq 0,01$ %
- d. Ztrátovost IP paketů (ITU-T Y.1540 [7]) $\leq 0,01$ %
- e. Zpoždění IP paketů (IETF RFC 2681 [8]) ≤ 18 ms
- f. Kolísání zpoždění IP paketů (IETF RFC 3393 [9]) ≤ 5 ms
- g. Dostupnost služby IP (ITU-T Y.1540 [7]) $\geq 99,9$ % za rok (nedostupnost 526 minut v roce)

První zmíněné kritérium VHCN v podstatě popisuje technologii FTTH a FTTB, druhé je popis FTTA. Třetí a čtvrtý bod jsou poté mírnější kritéria VHCN pro metalické varianty připojení koncových uživatelů či bezdrátových vysílačů.

1.1.2 Pasivní optické sítě

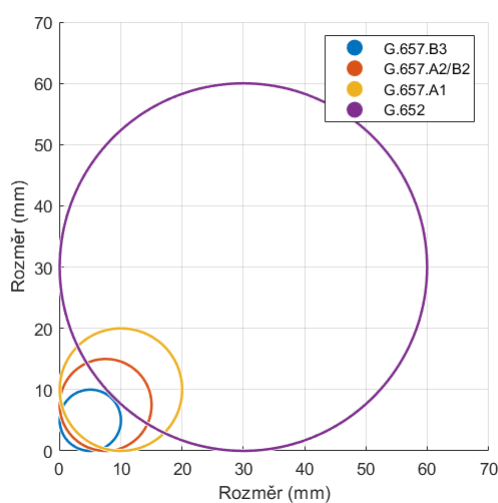
Napojením většího množství koncových uživatelů na optickou síť tak, aby nebylo nutné každého uživatele připojovat na separátní optický vysílač, se na konci 80. let 20. století začala zabývat britská telekomunikační skupina [10]. Ta přišla s návrhem první pasivní optické sítě (Passive Optical Network, PON) [11]. PON se řadí mezi přístupové sítě, tedy takové, které propojují jádro sítě a koncové uživatele. Klíčovou složkou PON sítí jsou tzv. optické splittery (česky také děliče či rozbočovače). Optický splitter je pasivní zařízení (tj. nepotřebuje napájení) využívané v optických komunikačních sítích k výkonovému rozdělení příchozího optického signálu do několika výstupů, což umožňuje distribuci signálu k několika účastníkům současně. Dva nejběžnější typy splitterů jsou fused biconical taper (FBT) a planar lightwave circuit (PLC). FBT je založen na principu fúzního taperu, kdy je ze dvou vláken odstraněna všechna vnější ochrana a při velmi vysokých teplotách (1800–2000 °C) jsou současně přitlačována k sobě a natahována, čímž dochází k jejich zúžování a vzájemnému přibližování, až slučování jader. PLC je v základu tvořena tenkou vrstvou křemíkového substrátu, na který jsou umístěny různé optické prvky. Pomocí této technologie je možné vytvořit splittery o různém počtu výstupních větví a dělicích poměrech. Poté, co je signál rozdělen, je navázán zpět do optických vláken pomocí tzv. vláknové pole, tj. vícero vláken umístěno blízko sebe. Oba principy jsou uvedeny na obrázcích [12].

Klasické PON sítě jsou konstruovány z jednovidových komponent. Jednovidový režim se vyznačuje šířením světla optickým vláknem pouze v jednom základním vidu, což umožňuje přímý a nezkreslený přenos signálu. Naopak vícevidový režim umožňuje šíření světla v několika různých videch z důvodu většího průměru jádra. Kvůli tomu také dochází k většímu rozptylu světelných paprsků. V dnešní době se téměř výhradně používají jednovidové komponenty, neboť obvykle poskytují vyšší přenosové rychlosti a menší ztráty signálu na delší vzdálenosti než jejich vícevidové protějšky. Jednovidová vlákna jsou standardy označována jako ITU-T G.652-G.657. Nejrozšířenějšími typy vláken v oblasti telekomunikace jsou pak ITU-T G.652 [12] a ITU-T G.657 [13].



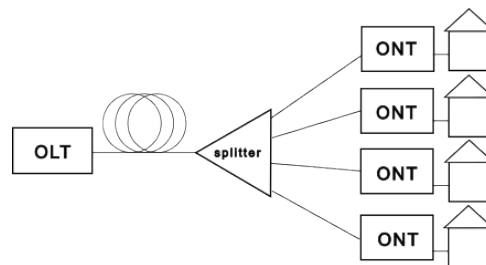
Obrázek 1.2: Typ splitteru (a) FBT (fúzní splitter) (b) PLC (planární splitter) [14].

V porovnání těchto dvou je novější standard ITU-T G.657 odolnější na ohyby. Tento fakt je zobrazen na obrázku [13], na kterém jsou uvedeny minimální poloměry zakřivení, které nemají vliv na útlum (tedy snížení síly přenášeného signálu) jednotlivých typů vláken. Pro poloměr zakřivení 2,5 mm vlákno ITU-T G.652 přestává z důvodu vysokého útlumu fungovat, zatímco vlákno ITU-T G.657.A2 vykazuje útlum pouze přibližně 1,7 dB [15].



Obrázek 1.3: Srovnání minimálních poloměrů zakřivení pro různé typy vláken.

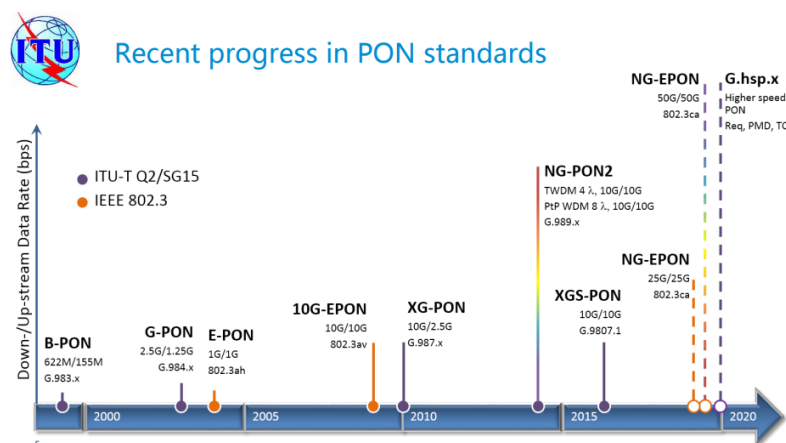
Struktura PON sítě je vždy pevně daná, liší se jen v počtu dělení, poměrem děleného výkonu do různých větví a délkou jednotlivých úseků. Na straně, kde se PON napojuje na jádro optické sítě, se nachází tzv. zakončení optické linky (Optical Line Termination, OLT). Z toho vede jediné vlákno do optického splitteru, z něhož dále vede více vláken buď přímo ke koncovým uživatelům nebo do dalšího splitteru. Na straně uživatele je pak síť zakončena optickým zařízením zvaným terminál optické sítě (Optical Network Terminal, ONT) nebo také optická síťová jednotka (Optical Network Unit, ONU). Počet výstupních větví jednotlivých splitterů se různí dle požadavků konkrétní sítě, nejčastěji jsou však vyráběny v provedení 1:2 až 1:32. Stejně tak se může lišit i poměr výkonu rozdělený do jednotlivých větví, takové splittery se nazývají asymetrické. Sítě, které potřebují větší dělicí poměr, například síť s gigabitovou kapacitou (GPON), řadí více splitterů s menšími dělicí poměry za sebe, díky čemuž je možné z jediného OLT připojit až 128 koncových uživatelů [16]. Principiální schéma zapojení PON je zobrazeno na obrázku 1.4.



Obrázek 1.4: Schéma typické PON sítě.

První PON definovanou v roce 1998 doporučením ITU G.983.1 [17] byla APON (ATM PON). Hlavní výhodou APON byla schopnost přenášet různé druhy datových služeb, jako jsou hlasové hovory, video a datové přenosy, prostřednictvím jednoho optického vlákna. To poskytovalo flexibilitu a efektivitu při poskytování komplexních telekomunikačních služeb. Maximální přenosové rychlosti tohoto standardu jsou 155 Mb/s pro downstream a 622 Mb/s pro upstream. BPON (Broadband PON), stanovená doporučením ITU G.683.3 [18], byla druhým významným typem PON. Oproti předchozímu standardu, kdy byla pro duplexní přenos používána jen jedna vlnová délka, používá BPON jiné vlnové délky pro směr downstream a upstream. Přenosové rychlosti BPON jsou 622/155 Mb/s pro downstream/upstream. Sítě GPON (Gigabit PON) [16] překonaly hranici přenosové rychlosti 1 Gb/s s maximálními přenosovými rychlostmi až 2,5/2,5 Gb/s pro downstream/upstream. Takové přenosové rychlosti však nebyly na všech budovaných trasách nezbytné, a tak existovaly i takové, jejichž přenosové rychlostmi dosahovaly maximálně 1244/155 Mb/s. K dosažení vyšších přenosových rychlostí využívaly tzv. GEM (GPON encapsulated method), která umožňovala seskupit rámce různých přenosových technologií (nejčastěji rámce Ethernet). Vývojem PON se od přelomu tisíciletí začala zabývat vyjma ITU (International Telecommunication Union), která vytvořila výše zmíněné standardy, i IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers). IEEE vyvíjela od roku 2001 technologii zvanou EPON

(Ethernet PON), jež v roce 2004 standardizovala [19]. Tato technologie je založena na ethernetovém protokolu. Cena ethernetových přepínačů a jiných ethernetových síťových komponent je totiž nižší než tomu bylo u ATM (na kterých stála APON a BPON). V roce 2009 definoval standard IEEE 802.3av [20] takovou EPON, která dosahovala přenosových rychlostí až 10 Gb/s ve směrech downstream i upstream (tzv. 10G-EPON). Síť další generace (Next-Generation PON, NG-PON) označovaly další vývojový stupeň PON sítí ITU. NG-PON se dále dělí na NG-PON1 a NG-PON2. V roce 2010 byl stanoven první standard označován jako XG-PON s přenosovými rychlostmi nejprve 10/2,5 Gb/s pro downstream/upstream (XG-PON1) a později 10 Gb/s symetricky (XGS-PON) [21]. Oproti NG-PON2 mohla fungovat souběžně se standardem GPON a EPON (příp. 10G-EPON), a tak nasazení tohoto standardu nevedlo k narušení připojení koncových zákazníků a budování nových sítí. NG-PON2 [22] totiž využívá celkem 4 obousměrné λ -kanály, přičemž každý tento kanál dosahuje přenosových rychlostí jako XG-PON1, tedy celkem 40/10 Gb/s pro downstream/upstream. Momentálně nejnovějšími standardy jsou 50G-PON (ITU) [23] a NG-EPON (IEEE) [24] s přenosovými rychlostmi 50 Gb/s symetricky. Obrázek 1.5 zobrazuje vývoj jednotlivých standardů PON do roku 2020 na časové ose společně s jejich přenosovými rychlostmi.

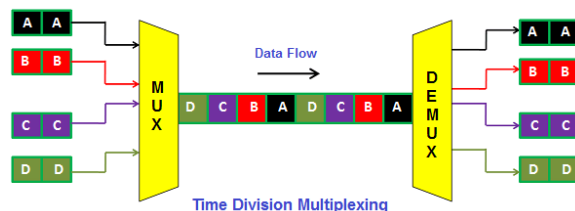


Obrázek 1.5: Historický vývoj standardů PON [25].

1.1.3 Přenášený signál v PON

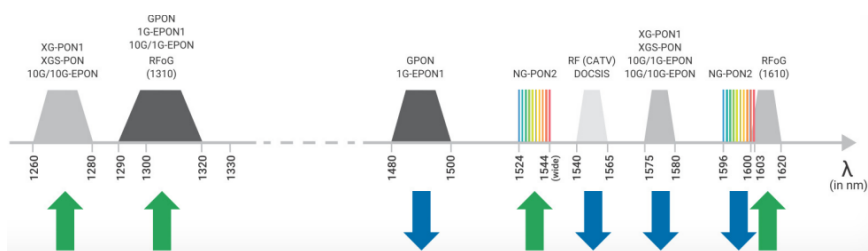
Aby bylo možné přenášet data v rámci jedné PON různým uživatelům naráz musí přenos dat splňovat určitá předem stanovená pravidla. V PON je tedy využívána tzv. multiplexace, tj. proces, který umožňuje přenášet více signálů nebo datových proudů přes jeden komunikační kanál nebo prostor současně. Časový multiplex (Time Division Multiplex, TDM) je používán k určení, kterému (nebo od kterého) z koncových uživatelů data patří. Při TDM je každému datovému objemu přidělen určitý časový slot v rámci předem definovaného časového rámce. Tyto časové sloty jsou následně prokládány

tak, aby byl vytvořen složený signál, který lze přenášet po optickém vlákně. Na přijímací straně se složený signál demultiplexuje, aby z něj byla vyčleněna data určená pouze danému uživateli. Princip TDM je zobrazen na obrázku [1.6](#)



Obrázek 1.6: Princip systému systému s multiplexací TDM [\[26\]](#).

Protože by v případě použití samotného TDM nebylo data možné přenášet zároveň duplexně, používají se pro různé směry přenosu jiné vlnové délky. Tímto způsobem je možné přenášet protichůdné signály uvnitř jednoho vlákna bez jejich vzájemného ovlivňování. Každý standard PON používá jiné vlnové délky pro jednotlivé směry přenosu (viz obr. [1.7](#), kde zelenými šipkami je označen přenos upstream a modrými downstream). Novější standardy, které dosahují přenosových rychlostí vyšších než 10 Gb/s navíc k TDM používají i vlnovou multiplexaci (Wavelength Division Multiplex, WDM). Během té nejsou využívány pouze dva λ -kanály pro zajištění obousměrného přenosu. WDM využívá více vlnových délek s určitými rozestupy k přenosu různých signálů v každém směru. Namísto použití většího počtu optických vláken je tak schopna přenášet větší objem dat v rámci jediného vlákna. Nejznámější typy vlnového multiplexu jsou CWDM (Coarse Wavelength Division Multiplex) a DWDM (Dense Wavelength Division Multiplex). Tyto technologie využívají různé vlnové délky s rozestupy 20 nm v telekomunikačních pásmech O, E, S, C a L (CWDM) [\[27\]](#), resp. 0,4-0,8 nm v telekomunikačních pásmech S, C, a L (DWDM) [\[28\]](#). Systémy, využívající WDM, jsou obvykle výrazně dražší, a tak jsou využívány jen tam, kde je vysoká přenosová rychlost nezbytná.



Obrázek 1.7: Používaná frekvenční pásma pro jednotlivé standardy [\[29\]](#).

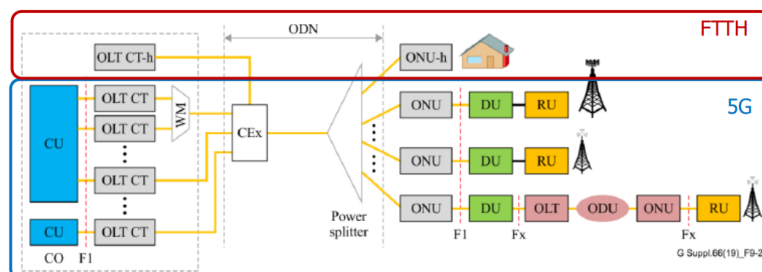
K přenosu konkrétních dat (v podobě bitů) je třeba signál určitým způsobem upravit. Tomuto procesu se říká modulace. V PON je nejběžněji využívána modulace OOK NRZ (On Off Keying – Non-Return to Zero). Jedná se o amplitudovou modulaci, kdy se v závislosti na hodnotě bitu mění výkon přenášeného signálu. Binární nula signalizuje úroveň výkonu P_0 a binární jednička výkon P_1 , kdy $P_1 > P_0$. Další používanou modulací je PAM4 (Pulse-Amplitude Modulation), která rozděluje 4 úrovně intenzity, kdy každá úroveň

symbolizuje 2 bity zároveň. U standardů s vyššími přenosovými rychlostmi je uvažováno i použití modulace fázové, kdy se pro změnu hodnoty bitů nemění amplituda, nýbrž fáze signálu [30].

1.1.4 Použití PON v 5G a VHCN

PON sítě hrají ve VHCN klíčovou roli. Představují totiž ideální řešení, jak připojit efektivně jednotlivé uživatele optickými vlákny za relativně nízké pořizovací náklady. Stávající či nově zbudované přístupové sítě představují pro 5G v současné době sice dostatečnou kapacitu (10 Gb/s), problém však nastává s mezní hodnotou latence. Zatímco v backhau a midhau by TDM-PON s latencí vystačila, ve fronthau nikoliv. Konvenční dynamická alokace pásma způsobuje zpoždění v řádu ms, přičemž mezní hodnota latence pro fronthaul je 0,25 ms. Z toho důvodu je třeba využít různé mechanismy, vedoucích ke snížení celkové latence. Například zmiňovaná technologie TWDM-PON (PON využívající TDM i WDM) nevyžaduje dynamickou alokaci pásma, a proto může být pro 5G fronthaul použita. I přes to, že je PON pro jednotlivé segmenty možné využít, v praxi se nevyžívají a jsou namísto nich komponenty napojovány P2P (z anglického pojmu Point-to-Point, který označuje způsob propojení dvou komponent právě jedním spojem bez jakéhokoliv větvení).

Protože je možné realizovat 5G a VHCN pomocí PON sítí, nabízí se možnost spojení těchto dvou technologií do jedné infrastruktury. Takové provedení nabízí i ITU-T [6]. Možnost propojení těchto dvou standardů je zobrazeno na obrázku 1.8. Taková realizace je možná, ale ve skutečnosti není příliš běžná, neboť je z provozních důvodů výhodnější oddělit síť pro rezidenční zákazníky a síť vedoucí do jednotlivých RU [31].



Obrázek 1.8: Možnost propojení standardů VHCN a 5G [31].

1.2 Cíle a struktura práce

Práce je zaměřena na stanovení nejistot měření různých přenosových parametrů v optických sítích 5G a VHCN. Nejdříve jsou nejvýznamnější parametry v optických přenosových systémech obecně popsány. Dále jsou vypsány jejich typické limitní hodnoty pro různé typy sítí. Pro každý parametr jsou též uvedeny nejběžnější metody měření, principy těchto metod i případné výhody či nevýhody.

Další kapitola je věnována nejistotám v metrologii. Jsou zde vysvětleny typy nejistot a s nimi spojené statistické pojmy. Dále je uveden příkladný výpočet nejistoty měření některého z dříve popsaných přenosových parametrů. V tomto výpočtu jsou komentovány všechny vlivy, jež mohou v daném měření způsobovat nejistotu. V kapitole jsou také uvedeny možnosti stanovení limitu útlumu nových optických tras, aby bylo možné z provedených měření vyhodnotit, zda síť je, či není, v pořádku.

Ve 4. kapitole je nejdříve vytvořena modelová optická síť, jež parametry odpovídá typické síti použité pro VHCN. Jsou uvedeny typy vláken a konektorů použitých komponent. Tato trasa je následně podrobena měřením různých přenosových parametrů. U každého takového měření je vždy okomentována zvolená metoda a průběh měření. Hodnoty naměrů pro jednotlivé parametry jsou vždy vypsány v tabulkách.

V páté a šesté kapitole jsou použita naměřená data k určení limitů trasy a především nejistot jednotlivých měření. Všechna naměřená a vypočtená data jsou následně analyzována. Data z měření doplněná o nejistoty měření jsou porovnány se stanovenými limity. Jsou zde také komentovány faktory ovlivňující měření a stanovení nejistoty.

Hlavním cílem této práce je korektní stanovení nejistot měření parametrů přenosových optických sítí 5G a VHCN. Tyto nejistoty jsou stanoveny pro testovací síť, která je vytvořena tak, aby odpovídala standardu VHCN. Dílčími cíli pak je charakteristika parametrů vláknově-optických sítí a popsání různých metod jejich měření. Při vyhodnocení měřených dat společně s jejich nejistotami jsou zdůrazněny faktory, které mají na hodnotu nejistoty největší vliv. Výsledné hodnoty jsou porovnány s vypočtenými limity nebo limity různých standardů přenosových sítí.

Kapitola 2

Parametry optických sítí

Kvalita optického přenosu v optických sítích závisí na různých parametrech, jejichž znalost je pro správný a spolehlivý přenos dat důležitá. Mezi nejvýznamnější parametry patří:

- délka trasy L (km)
- útlum trasy IL (dB)
- chromatická disperze CD (ps/nm)
- polarizační vidová disperze PMD (ps)
- útlum odrazu ORL (dB) a reflektance R (dB)

V podkapitolách 2.1 až 2.5 budou výše uvedené parametry vysvětleny a popsány různé metody, jimiž je možné tyto parametry měřit.

2.1 Délka trasy

Délka trasy představuje jeden z kritických parametrů v oblasti optických komunikací a hraje klíčovou roli při návrhu, provozu a údržbě optických komunikačních systémů. Tento parametr udává fyzickou vzdálenost, kterou světelný signál musí překonat od vysílacího bodu k bodu přijímacímu. Z hlediska plánování optické sítě je důležité zohlednit délku trasy, protože ovlivňuje volbu použitých komponent, útlum signálu a celkovou spolehlivost komunikačního spojení.

Délka trasy je obvykle měřena v kilometrech a zahrnuje všechny úseky optických vláken od začátku až do konce sítě. Délka trasy závisí nejen na vzdálenosti koncových bodů, ale i geografickém umístění, které mohou stanovit specifická pravidla na pokládku optických sítí, například města, horské oblasti či velké vodní plochy. V praxi se mohou optické trasy skládat z různých úseků, které vedou různými prostředím a mohou obsahovat různé prvky, jako jsou splittery, koncové body, případně i zesilovače signálu pro trasy dlouhé desítky až stovky kilometrů či s vyšším dělicím poměrem splitterů.

Měření délky optické trasy je nejčastěji realizováno pomocí optického zařízení založeného na metodě zpětného rozptylu (Optical Time-domain Reflectometry, OTDR), která poskytuje informace o délkách a útlumu optických vláken v dané trase na základě odraženého světla v každém bodě vlákna (detailnější popis v kapitole 2.2.3). Existují i další metody, jako například měření na základě času průchodu signálu, interferenční měření nebo metoda založená na měření ztrát výkonu. Tyto metody však nejsou vhodné na typické testování optických sítí a v praxi se nepoužívají.

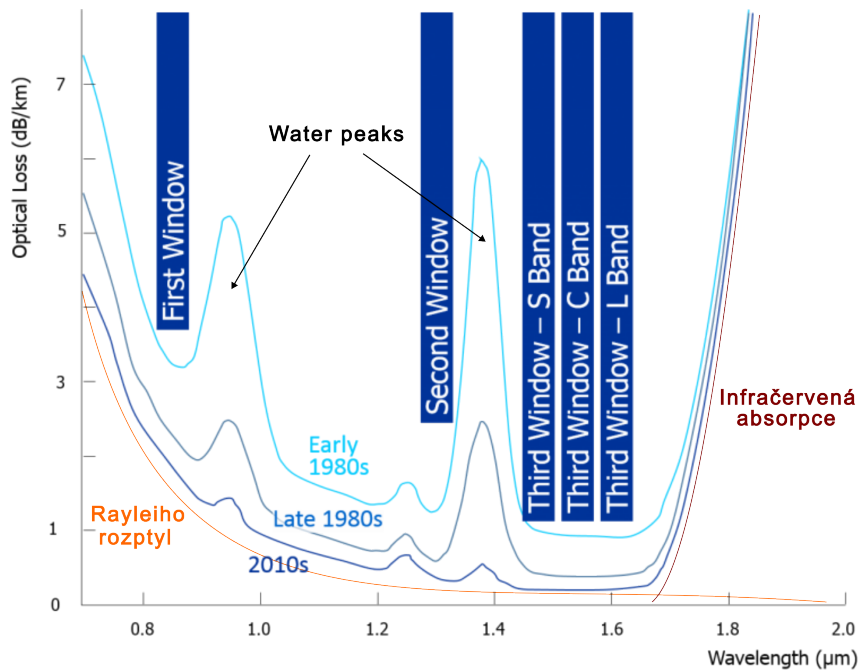
2.2 Vložný útlum

Vložný útlum (Insertion Loss, IL), též nazývaný vložné ztráty, označuje snížení síly signálu, ke kterému dochází po vložení komponenty do komunikační cesty nebo přenosového systému. Obvykle se měří v decibelech (dB) a představuje množství ztraceného výkonu signálu při průchodu zařízením. Popsat jej můžeme pomocí jednoduchého vzorce

$$IL(\text{dB}) = 10 \log_{10} \frac{P_{\text{TX}}(\text{W})}{P_{\text{RX}}(\text{W})}, \quad (2.1)$$

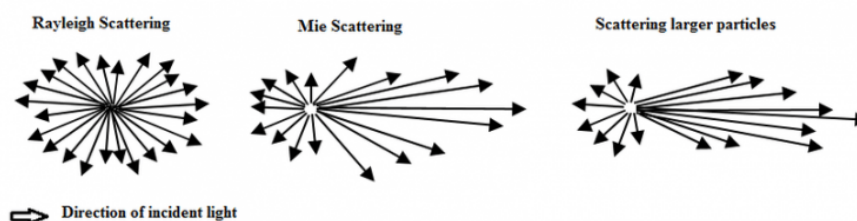
kde P_{RX} je výkon vstupního optického signálu ve wattech a P_{TX} výkon signálu výstupního ve wattech.

K vložným ztrátám může docházet v různých částech komunikačního systému, jako jsou konektorové spoje, vlákna či splitterly. Protože je zajištění dostatečně silného signálu na přijímací straně stěžejní podmínkou pro fungování telekomunikačních sítí, jsou vložné ztráty nejdůležitějším parametrem optických sítí. V rámci sítí XGS-PON, jež je možné pro standard VHCN, resp. 5G, použít, jsou standardem G.9807 [32] určeny mezní hodnoty vložného útlumu. Hodnota vložného útlumu každé XGS-PON se pak mezi těmito mezními hodnotami musí nacházet. Pro různé třídy útlumu (Optical Path Loss) pak standard sumarizuje limitní hodnoty použitelné pro XGS-PON v tabulce 2.1. Rozdělení do těchto tříd dále určuje krajní hodnoty výkonů a senzitivity v různých standardech PON (G-PON, XG-PON, XGS-PON nebo 50G TDM PON). Je důležité zmínit, že velká část uvedených hodnot je způsobena splitterly, které při každém dělení signálu 1:2 snižují výkon optického signálu o 3 dB, a tak při symetrickém dělicím poměru 1:128, který je pro XGS-PON možný, dochází z důvodu takového dělicího poměru k útlumu minimálně 21 dB (Obvykle má navíc každá větev splitterů různý dodatečný vložný útlum, který je způsoben nedokonalou geometrií splitteru. Tato dodatečná hodnota obvykle nabývá hodnot desetin dB).



Obrázek 2.1: Historický vývoj měrného útlumu SiO₂ vláken [34].

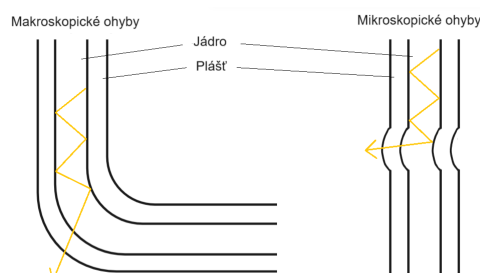
Tento jev je zapříčiněn mikroskopickými nedokonalostmi a nepravidelnostmi uvnitř vlákna. Tyto nedokonalosti mohou zahrnovat změny indexu lomu, kolísání hustoty a nepravidelnosti na rozhraní jádro-plášť. Když světlo narazí na tyto nepravidelnosti, rozptýlí se v různých směrech a odchýlí se od své zamýšlené dráhy. Největší vliv mají na tento typ ztrát dva typy rozptylů: Rayleioho a Mieho. Rayleioho rozptyl je všesměrový a elastický (rozptýlené světlo si zachovává původní vlnovou délku) rozptyl, ke kterému dochází při interakci záření s částicemi mnohem menšími, než je vlnová délka daného záření (např. při interakci s nehomogenitami v křemenné mřížce). Ve standardních křemenných vláknech zapříčiňuje v přenosových pásmech O, E, S a C až 90 % celkového útlumu. Mieho rozptyl je primárně typ dopředného a elastického rozptylu, který nastává při interakci záření s částicemi, jejichž velikost je srovnatelná s vlnovou délkou dopadajícího světla (např. nehomogenity v jádře nebo plášti vlákna). Srovnání těchto dvou druhů rozptylů je zobrazeno na obrázku 2.2. Jak je vidět na grafu 2.1, nastavuje Rayleioho rozptyl teoretickou minimální hranici útlumu standardních křemenných vláken. Překonání tohoto teoretického minima je možné použitím tzv. hollow-core vláken, neboli vláken s dutým jádrem. Ty využívají principy periodické nanostruktury, díky které nemusí mít jádro vlákna vyšší index lomu než plášť, jak tomu bývá a klasických vláken s pevným jádrem.



Obrázek 2.2: Srovnání Rayleigha a Mieho rozptylu [35].

2.2.2 Extrinsické ztráty

Extrinsické ztráty jsou způsobovány vnějšími faktory a vlivy prostředí. Jak již bylo v úvodu práce zmíněno, optická vlákna fungují na principu úplného vnitřního odrazu, který zajišťuje, že světlo zůstává uvnitř jádra. Pokud je vlákno ohnuto nad určitý kritický poloměr (viz obrázek [1.3]), může dojít k narušení úplného odrazu, čímž světlo uniká do pláště a dochází ke ztrátám. Ztráty v ohybech, stejně jako ostatní typy ztrát, jsou závislé na vlnové délce. Ztráty v ohybech neznamenají pouze makroskopické ohyby, kdy je vlákno vnějšími silami ovlivňováno. Jedná se i o ztráty v tzv. mikroskopických ohybech, které mohou vzniknout během výroby vlákna. Princip vyvázání energie z jádra v makroskopických a mikroskopických ohybech je zobrazen na obrázku [2.3]. Mikroskopické ohyby jsou řazeny mezi intrinsické ztráty, ale pro lepší kontext byly uvedeny v této kapitole.



Obrázek 2.3: Ukázka mikroohybu a makroohybu.

Dalším možným zdrojem extrinsických ztrát jsou svary optických vláken a spoje konektorů. Ztráty způsobené svary mohou být ovlivněny přípravou svařovaných vláken, jejich nedokonalým vycentrováním, či vzájemným natočením vláken. Vložný útlum konektorových spojů se může měnit v závislosti na poškození konektorů či jejich znečištění. Pokud se mezi konektory dostane nečistota, nejen že svou přítomností může zvýšit útlum, může také poškrábat konektory, čímž by jejich útlum (i další přenosové parametry) ovlivnila trvale. Z toho důvodu je při spojování konektorů vždy třeba dbát na dokonalou čistotu konektorů, než dojde k jejich spojení. Konektory optických vláken se vyrábí ve více třídách kvality. Maximální hodnoty vložného útlumu konektorových spojení pro různé třídy dle normy ČSN EN 61280-4-2 jsou uvedeny v tabulce [2.2].

Tabulka 2.2: Maximální hodnoty útlumu při spojení různých kombinací konektorů [36].

Zakončení 1	Zakončení 2	Požadavek útlumu
SM reference grade	SM reference grade	$\leq 0,2$ dB
SM reference grade	SM standard grade	$\leq 0,5$ dB
SM standard grade	SM standard grade	$\leq 0,75$ dB
<p>Poznámka 1 Tato tabulka ukazuje požadovaný výkon standardních a referenčních konektorů SC v souladu s IEC 60874-14-2. Tyto hodnoty se nacházejí v jiných, ale ne ve všech, standardech pro připojení hardwaru.</p> <p>Poznámka 2 Současné studie JWG8 od IEC SC86A a SC86B týkající se koncovek referenční třídy mohou poskytnout hodnoty pro jiné typy konektorů.</p>		

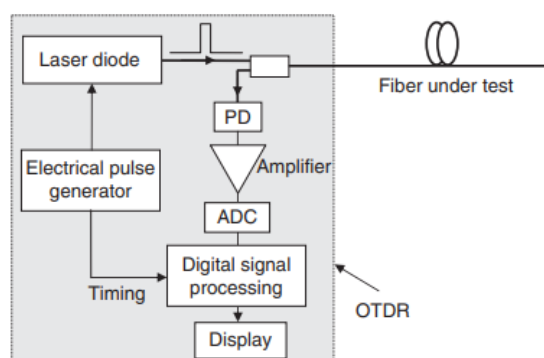
Ztráty konektorových spojů mohou na delších trasách (vyšší desítky kilometrů) tvořit pouze malou část vložného útlumu celé trasy, avšak u kratších tras se může jednat o dominantní složku. Tento fakt může být ilustrován na příkladu dvou různých tras. Trasa A je tvořena jedním vláknem o délce 1 km zakončený dvěma spoji referenčních konektorů. Za předpokladu měrného útlumu 0,3 dB/km (maximální hodnota útlumu měrného vlákna standardu ITU G.657 pro 1550 nm) a dvou spojů o útlumu 0,2 dB (maximální hodnota vložného útlumu dle tabulky 2.2) bychom dostali hodnotu maximálního útlumu 0,7 dB. Trasa B je tvořena dvěma různými vlákny, každé o délce 40 km. Všechny spoje na trase (na koncích i mezi dvěma měřenými vlákny) jsou tvořeny referenčními konektory. V případě stejného měrného útlumu vláken a spojení konektorů dostaneme maximální hodnotu útlumu 24,6 dB ($0,3 \text{ dB/km} \times 80 \text{ km} + 0,2 \text{ dB} \times 3$). Zatímco na trase A tvoří konektorové ztráty více než polovinu celkové hodnoty útlumu, na trase B pouze přibližně 5 %.

2.2.3 Metody měření vložného útlumu

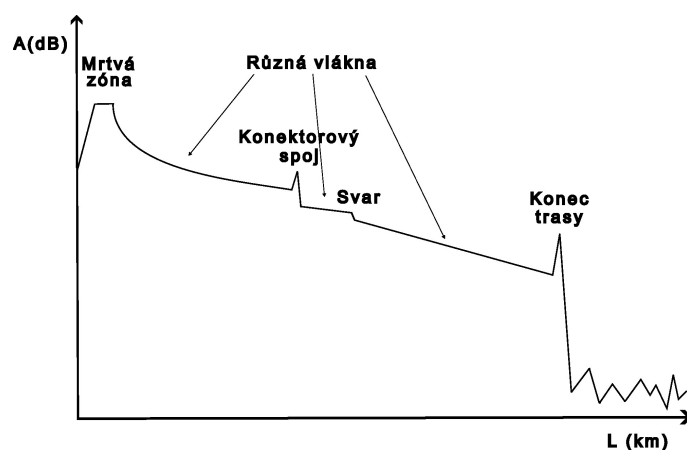
Metoda OTDR

Metoda OTDR je základní měřicí metodou v optických sítích, která je založena na Rayleigho rozptylu. Světlo uvnitř vlákna reaguje s molekulami SiO_2 (u standardních telekomunikačních vláken) a rozptyluje se do všech směrů. I přes to, že je běžně Rayleigho rozptyl nežádoucí a u standardních optických vláken nastavuje nepřekonatelnou hranici měrného útlumu (významné především pro vlnové délky do 1580 nm), využívá jej metoda OTDR ve svůj prospěch. Zdroj záření na počátku trasy vyšle pulz o předem nastavené časové délce. Detektor, nacházející se na stejné straně jako zdroj, následně přijímá veškerou rozptýlenou energii ve zpětném směru, která je přímo úměrná útlumu v jednotlivých místech trasy. Za předpokladu správné kalibrace přístroje získáme přesný nástroj na vyobrazení celé trasy, jejích komponent a útlumu. Je nutné zmínit, že rychlost šíření světla optickým vláknem závisí na indexu lomu jádra. Proto je třeba před měřením správně

nastavit hodnotu délky pulzu i indexu lomu. Zatímco nastavením větší délky pulzu je možné naměřit delší trasy s vyšším útlumem, tak nastavením menší délky pulzu se zpřesňuje měření jednotlivých událostí na trase. Nevýhodou metody je nízký výkon detekovaného signálu na detektoru. Jestliže se v měřené síti nachází např. velký počet dělení (splitterů), může nastat situace, kdy bude rozptýlený optický signál tak slabý, že se dostane pod hranici šumu. V takovém případě je třeba využít jinou metodu nebo proměřit danou síť po částech. Blokové schéma metody OTDR je zobrazena na obrázku 2.4. Na obrázku 2.5 je pak zobrazen ukázkový reflektogram (obrázek náměru metodou OTDR) s vyznačenými událostmi na trase. Velkou výhodou metody je fakt, že je možné měřit vložný/měrný útlum trasy z pouze jednoho konce.



Obrázek 2.4: Blokové schéma zapojení měření IL metodou OTDR [37]; Photodiode, PD; Analog-to-Digital Converter, ADC.

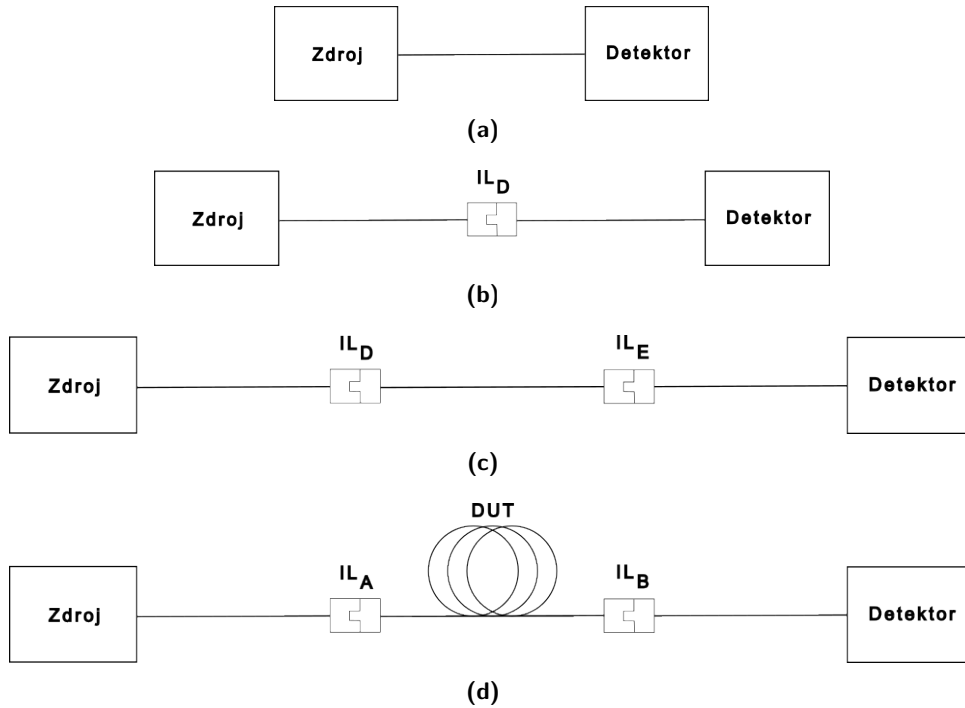


Obrázek 2.5: Vzorový reflektogram.

■ Přímá metoda

Přímá metoda funguje vždy na principu rozdílu měřené trasy a reference. Měření je složeno ze zdroje optického záření, testované trasy, detektoru a referenčních patch cordů. Patch cord je krátké propojovací optické vlákno (obvykle

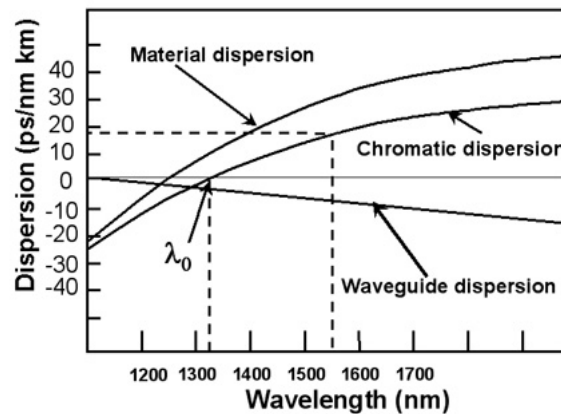
1 nebo 2 metry dlouhé), jehož vložný útlum je zanedbatelný. Standardně se používají 3 možnosti zapojení přímé metody [36], které se od sebe liší v množství patch cordů a konektorových spojení zahrnutých do měření reference (viz obrázek 2.6). Pro získání hodnoty útlumu trasy stačí odečíst hodnotu naměřeného výkonu z měření reference od hodnoty výkonu obdrženého z měření trasy.



Obrázek 2.6: Schéma zapojení přímé metody pro (a) měření reference one-cord metodou (b) měření reference two-cord metodou (c) měření reference three-cord metodou (d) měření testovaného vlákna.

Metoda one-cord měří referenci pouze s jedním patch cordem. Do výsledného útlumu je však tímto přístupem zahrnut i útlum obou konektorových spojení. Při použití označení z obrázku 2.6 je výsledná hodnota útlumu tvořena jako $IL_{celk} = IL_A + IL_{DUT} + IL_B$, kde IL_A je útlum způsobený konektorovým spojením před testovanou trasou, IL_{DUT} útlum testované trasy (Device Under Test, DUT) a IL_B útlum způsobený konektorovým spojením za ní.

Metoda two-cord zahrnuje při měření reference již 2 patch cordy a 1 konektorové spojení, a jejich vliv se tedy při měření testovaného vlákna vynuluje. Při měření testovaného vlákna je tedy v měřené hodnotě útlumu zahrnut vliv jednoho dalšího spojení. Hodnotu měřeného útlumu lze zapsat jako $IL_{celk} = IL_A + IL_{DUT} + IL_B - IL_D$, kde IL_D je útlum způsobený konektorovým spojením při referenčním měření.



Obrázek 2.7: Zobrazení chromatické disperze v závislosti na vlnové délce [39].

vlnových délek, a tak vykompenzovat jejich rozdíl. Pokud je však na dané trase používán WDM, je nutné využití více Braggových mřížek.

Maximální hodnota chromatické disperze pro XGS-PON [32] není standardy definována. U P2P sítě 10GBASE-ER [40] s přenosovými rychlostmi 10,3/10,3 Gb/s je maximální hodnota chromatické disperze pro vlnovou délku 1550 nm 546 ps. Limitní hodnoty se ale liší i s různými modulačními formáty a přenosovými rychlostmi. Pro OOK NRZ jsou tyto hodnoty 1176 ps/nm pro 10 Gb/s a 73,5 ps/nm pro 40 Gb/s [41] (údaje pro vlákna G.652).

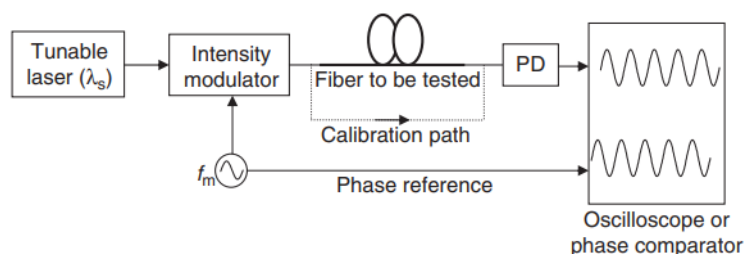
2.3.1 Metody měření chromatické disperze

Znalost chromatické disperze je pro fungování optických sítí klíčová. Získání její přesné hodnoty však není tak jednoduché, jak by se na první pohled mohlo zdát. Pro přímé měření na kilometru vlákna by šířka pulzu zdroje optického záření musela být na úrovni pikosekund a přijímač by musel disponovat velkou šířkou pásma. Namísto tohoto přímého přístupu se běžněji používají 3 metody [37].

Metoda fázového posuvu

Metoda fázového posuvu je založena na vzájemném posuvu dvou sinusových signálů. Schéma zapojení je znázorněno na obrázku 2.8. Laser s nastavitelnou vlnovou délkou (jehož rozsah musí odpovídat zkoumaným vlnovým délkám) vysílá optický signál do intenzitního modulátoru. Tento optický signál je modulován sinusovým průběhem o určité frekvenci f_m . Poté, co optický signál projde z modulátoru skrze testované vlákno, je detekován fotodetektorem a zobrazen na osciloskopu. Na stejném osciloskopu je zároveň zobrazen i sinusový signál s frekvencí f_m . Protože v důsledku chromatické disperze došlo k fázovému posuvu signálu procházejícího optickým vláknem, lze porovnat rozdíly fází obou sinusových průběhů a vyhodnotit relativní zpoždění (Relative Group Delay, RGD). Protože se je sinusový průběh periodický, je nutné zaznamenávat násobky 2π , o které se posunutý signál oproti

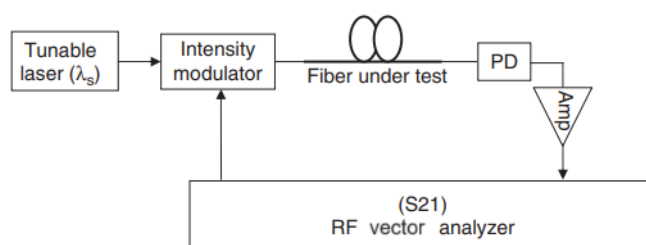
referenčnímu přemístil. Touto metodou je možné měřit hodnoty chromatické disperze v rozsahu limitovaným detektorem či laserem. Laser je také možné nahradit širokopásmovým zdrojem (např. SLED) a přeladitelným filtrem propouštějícím vždy pouze vybrané vlnové délky.



Obrázek 2.8: Blokové schéma zapojení měření CD metodou fázového posuvu [37].

Metoda odezvy v základním pásmu AM

Druhou běžně užívanou metodou je metoda odezvy v základním pásmu AM. Tato metoda se opírá o princip frekvenční modulace (frequency-sweep). Namísto generátoru sinusových signálů a osciloskopu v metodě fázového posuvu je zde řídicí jednotkou VF vektorového analyzátor. Ten poskytuje signál s větší šířkou použitých frekvencí, aby jím moduloval optický signál z přeladitelného laseru. Po průchodu tohoto optického signálu vláknem a jeho detekci je signál zesílen a pomocí síťového analyzátoru vyhodnocen. Schéma zapojení je znázorněno na obrázku 2.9. Oproti metodě fázového posuvu má tato metoda výhodu, že ihned získá hodnotu chromatické disperze pro libovolnou vlnovou délku nastavenou na optickém zdroji a nemusí proměřovat okolní vlnové délky. Jak metoda fázového posuvu, tak i metoda odezvy v základním pásmu AM jsou vhodné, pokud je třeba změřit chromatickou disperzi delšího úseku vlákna (nebo kratšího vlákna s vysokou hodnotou chromatické disperze). Pokud je však nutné změřit hodnotu tohoto parametru pro kratší vlákna (jednotky nebo menší desítky metrů), není ani jedna z nich vhodnou volbou.

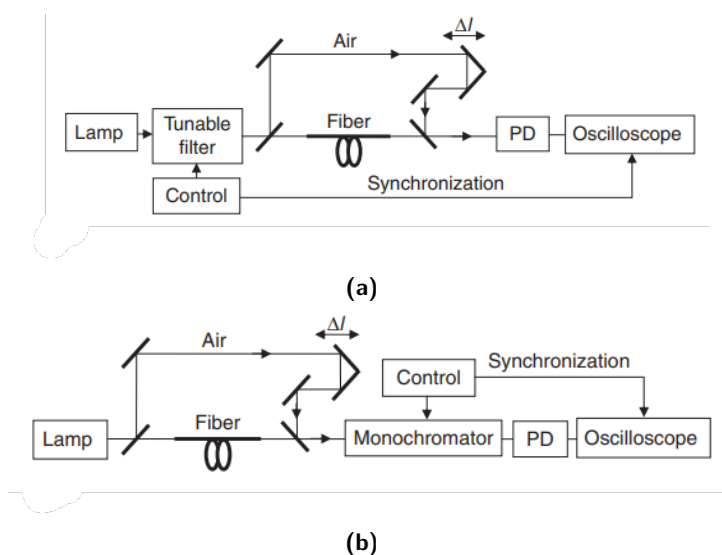


Obrázek 2.9: Blokové schéma zapojení měření CD metodou odezvy v základním pásmu AM [37].

Interferometrická metoda

Interferometrie představuje přesnou optickou techniku používanou k měření různých vlastností světla, jako je fáze, intenzita, polarizace a vlnová délka. Její základní princip spočívá v interferenci světla, kde se kombinují a interagují nejčastěji dvě elektromagnetické vlny. Obvykle je využíván zdroj optického světla k vytvoření koherentních vln s identickou fází a frekvencí. Interferometr rozdělí světlo na dva paprsky, přičemž jeden je určen jako referenční paprsek a nasměrován definovanou trasou k detektoru, zatímco druhý, měřený paprsek, prochází před dosažením detektoru objektem zájmu. Při opětovném setkání na detektoru dochází k interferenci mezi měřeným a referenčním paprskem, což vytváří konstruktivní (pokud jsou ve fázi) nebo destruktivní (pokud jsou mimo fázi) interferenční vzory. Detektor nakonec kvantifikuje intenzitu této interference.

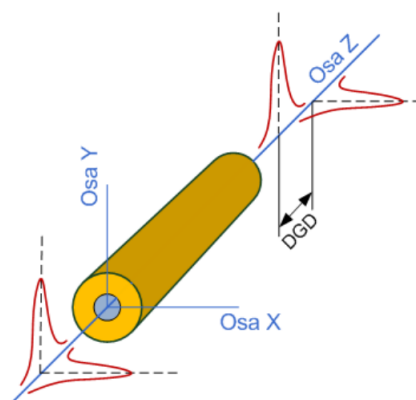
Velmi krátká vlákna (do nižších desítek metrů) mají hodnotu chromatické disperze velmi nízkou. Problém s jejím měřením řeší interferometrická metoda. Jako zdroj je obvykle využíván širokospektrální zdroj optického záření pro pokrytí velkého množství vlnových délek. Výběr konkrétní vlnové délky je prováděn buď přeladitelným filtrem hned za optickým zdrojem (viz 2.10a) nebo monochromátorem před optickým detektorem (viz 2.10b). V této metodě se využívá Mach-Zehnderova interferometru. Optický signál je za pomoci polopropustného zrcadla či krystalu rozdělen do dvou větví z nichž jedna je tvořena měřeným vláknem a druhá volně vzduchem s proměnlivou délkou. Tyto větve jsou následně sloučeny do jedné a detekovány na fotodetektoru. Větev tvořena vzduchem je považována za větev bez závislosti rychlosti propagace na vlnové délce. Za pomoci posouvání okna filtru, resp. monochromátoru, a změny délky větve s proměnlivou délkou je následně možné odvodit hodnotu zpoždění jednotlivých vlnových délek, a tedy chromatické disperze.



Obrázek 2.10: Blokové schéma zapojení měření CD interferenční metodou [37] (a) zapojení s přeladitelným filtrem (a) zapojení s monochromátorem.

2.4 Polarizační vidová disperze

V jednovidových vláknech je světelný signál tvořen pouze jedním videm, který je tvořen dvěma základními stavy polarizace (Principal State of Polarization, PSP) šířenými ve dvou navzájem kolmých polarizačních rovinách. Vidy jsou označovány jako HE_{11}^x (šíří se v rovině horizontální) a HE_{11}^y (šíří se v rovině vertikální). V případě ideálního vlákna (ve smyslu dokonale symetrickém) by oba tyto vidy procházely vláknem stejnou rychlostí. V realitě však vlákno dokonale symetrické není a dochází tak k jevu zvaném dvojlom, kdy každý stav polarizace prochází jinou rychlostí (jsou tak nezáměrně vytvořeny dvě osy polarizace - pomalá a rychlá). Parametr diferenciální skupinové zpoždění (Diferential Group Delay, DGD), též označován jako $\Delta\tau$ (ps), udává časový rozdíl mezi těmito polarizačními stavy světla v optickém vlákně [42]. Princip tohoto efektu je zobrazen na obrázku 2.11. Nedokonalosti, způsobující dvojlom (tedy různou rychlost šíření jednotlivých stavů polarizace), se dělí na vnitřní a vnější. Vnitřní nedokonalosti pochází z výrobního procesu a jsou způsobeny nedokonalě kulatým a rotačně symetrickým jádrem vlákna či vnitřními tlaky ve vlákně. Vnější jsou způsobeny změnami teploty, vibracemi nebo vnějšími silami.



Obrázek 2.11: Princip diferenciálního skupinového zpoždění [43].

V infrastrukturách s dlouhými vlákny nebo vyššími přenosovými rychlostmi (vyšší desítky Gb/s) mohou vyšší hodnoty DGD způsobovat problém s přenosem dat. V takových případech musí být použity koherentní detektory, které při detekci zachovávají i fázi signálu a lze tedy signál rekonstruovat. Dalším řešením může být kompenzace pomocí optických zařízení, jako jsou polarizační regulátory nebo použití polarizaci udržující vlákna, která hlavní stavy polarizace udržují ve dvou osách. Ta pomocí vnitřních stresových prvků ve vlákně záměrně vytvoří oválný tvar jádra, a vytvoří tedy tzv. rychlou a pomalou osu, která jednotlivé polarizační stavy udrží. Obě dvě tyto varianty jsou však velice nákladné a v praxi se tedy využívají jen zřídka.

Protože je DGD závislé na mnoha parametrech a jeho hodnota je silně proměnlivá s vlnovou délkou a časem, jeví se při pozorování jako stochastický

(náhodný) parametr. Z toho důvodu byl zdefinován parametr polarizační vidová disperze (Polarization Mode Dispersion, PMD) (ps), který je získán jako průměrná hodnota DGD v čase přes různé vlnové délky a polarizační stavy. Na rozdíl od DGD je PMD méně proměnlivá, a tak se používá pro popis optické trasy častěji než DGD. Protože je však při přenosu dat pro přenos klíčová variabilita DGD, udává se při popisu optických tras zároveň maximální přípustná hodnota DGD, která je obvykle stanovena jako 3násobek nebo 3,73násobek [40] hodnoty PMD. Hodnota 3násobku je stanovena pro síť standardu ITU synchronní digitální hierarchie (Synchronous Digital Hierarchy, SDH) [44] se spolehlivostí 99,9954 %, kdy hodnota DGD nevyhovuje přibližně 25 minut v roce, zatímco 3,73násobek je stanoven pro ethernetové síť standardu IEEE se spolehlivostí 99,99987 %, kdy hodnota DGD nevyhovuje přibližně 30 sekund v roce.

Při popisu optických sítí, resp. vlastností optických vláken, je taktéž často uváděn tzv. koeficient PMD. Jedná se o parametr, který udává hodnotu PMD vztahenou na délku vlákna. S délkou vlákna pro koeficient PMD se váže tzv. beat length [45]. Beat length je vzdálenost mezi místy, ve kterých se polarizace otočí přesně o 2π , tzn. vrátí se do počátečního stavu. Pokud je délka vlákna mnohem menší než tato beat length světla uvnitř vlákna, udává se hodnota koeficientu PMD jako ps/km. Pokud je délka vlákna mnohem větší, je hodnota udávána jako ps/ $\sqrt{\text{km}}$. Protože nabývá beat length ve standardních optických vláknech hodnoty v řádu jednotek nebo desítek metrů, je koeficient PMD při měření telekomunikačních sítí obvykle udáván právě jako ps/ $\sqrt{\text{km}}$. Tento fenomén je odůvodněn tím, že je dvojlom na kratších vláknech považován za stále stejný po celé délce vlákna, zatímco u delších vláken je dvojlom proměnlivý.

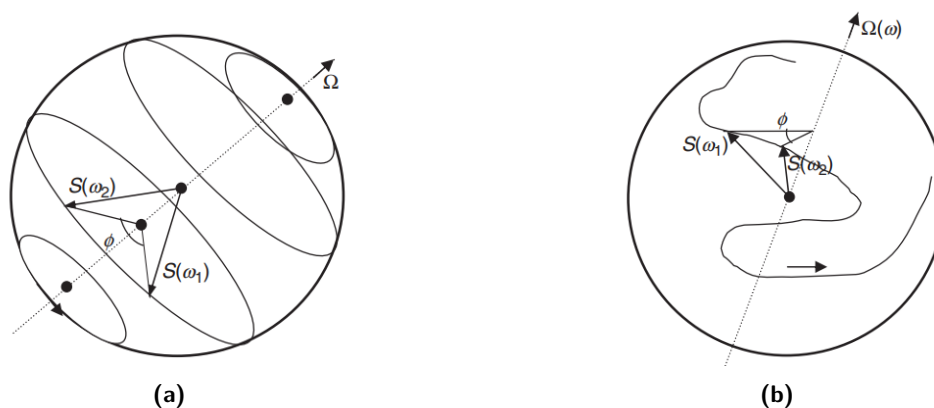
Obdobně jako tomu bylo u chromatické disperze nejsou pro síť XGS-PON [32] standardem udávány mezní hodnoty DGD, ani PMD. Normou jsou však stanoveny maximální hodnoty těchto parametrů pro P2P 10GBASE-ER [40] s obdobnými přenosovými rychlostmi, a to $DGD_{max} = 19$ ps a $PMD_{max} = 5,1$ ps.

2.4.1 Metody měření PMD

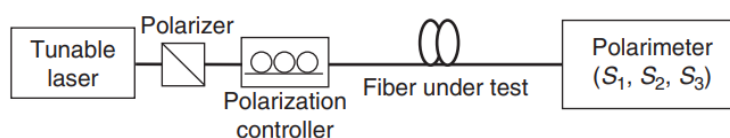
Metoda Poincarého oblouku

První možnou metodou pro měření hodnoty PMD je tzv. metoda Poincarého oblouku (Poincaré Arc Method). Ta vychází z faktu, že je možné stav polarizace, tj. vliv dvojlomu, popsat pomocí Stokesových parametrů. Jedná se o vektor \vec{S} , který obsahuje složky S_0, \dots, S_3 . Postupným měněním vlnové délky laseru dochází ke změnám hodnot jednotlivých složek. Vektor složený z parametrů S_1, S_2, S_3 o velikosti $P = \sqrt{S_1^2 + S_2^2 + S_3^2}$ je možné promítnout do tzv. Poincarého sféry. Ta graficky vyjadřuje konkrétní stav polarizace záření. Za předpokladu krátkého vlákna by se vliv dvojlomu neprojevil a na Poincarého sféře by tak docházelo k vytváření kružnic (viz obr. 2.12a). Pro dlouhá vlákna je již vliv dvojlomu markantní, a dochází tak k pohybu po celé sféře

(viz obr. 2.12b). Nevýhodou této metody je nutnost zařízení polarimetru a zdroje optického záření (laseru) s kontinuálním laděním vlnových délek k dosažení přesného měření rotace polarizace. Blokové schéma metody je zobrazeno na obrázku 2.13



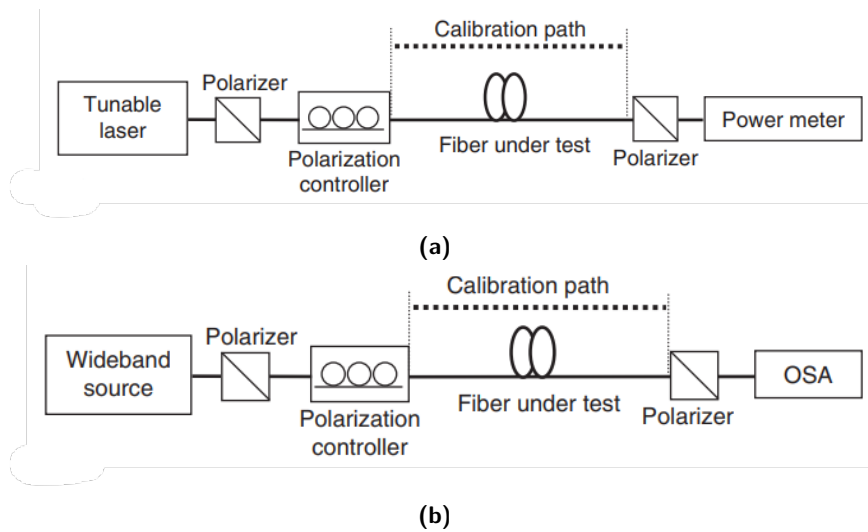
Obrázek 2.12: Pohyb po Poincarého sféře změnou stavů polarizace [37] (a) bez vlivu dvojlomu (b) s vlivem dvojlomu.



Obrázek 2.13: Blokové schéma zapojení měření PMD metodou Poincarého oblouku [37].

Metoda fixního analyzátoru

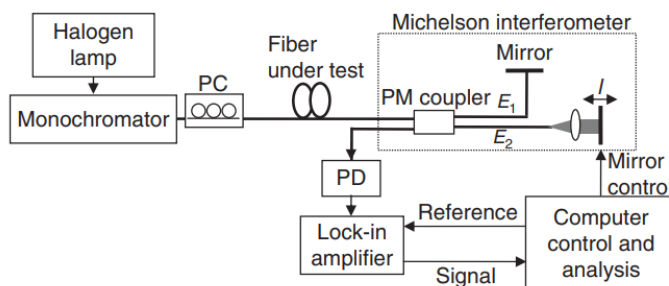
Oproti metodě Poincarého oblouku je pro metodu fixního analyzátoru namísto polarimetru na konec trasy umístěn polarizátor, který je fixně nastaven. Použijeme-li přeladitelný laser jako zdroj optického záření, bude za polarizátorem umístěn detektor pro měření optického výkonu (viz obr. 2.14a). Při přelazování laseru (jeho vlnové délky) dojde ke změně detekovaného výkonu, neboť je vliv PMD na každou vlnovou délku jiný. Z těchto změn je možné určit hodnotu PMD. Druhou možností je použití širokospektrálního zdroje jako zdroje optického záření a optického spektrálního analyzátoru pro detekci (viz obr. 2.14b). Kvůli dvojlomu bude mít každá vlnová délka jinak stočenou rovinu polarizace a po průchodu polarizátorem se tyto změny projeví na hodnotě spektrální hustoty optického výkonu.



Obrázek 2.14: Blokové schéma měření PMD metodou fixního analyzátoru [37] (a) zapojení s přeladitelným laserem a detektorem pro měření optického výkonu (b) zapojení s širokospektrálním zdrojem a spektrálním analyzátozem.

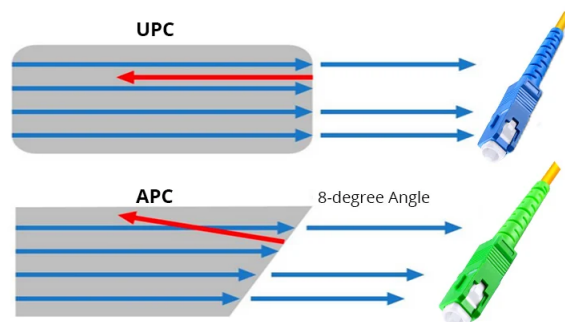
■ Tradiční interferometrická metoda

Další, novější, metodou na měření PMD je tradiční interferometrická metoda (Traditional Interferometry Technique, TINTY). Monochromátor nejdříve vyfiltruje požadovanou vlnovou délku (šířku pásma) zdroje optického záření a polarizační kontroler vybere průchozí polarizaci. Za kontrolerem je zařazeno testované vlákno a nakonec Michelsonův interferometr s detektorem a vyhodnocovacím hardwarem. Za předpokladu dostatečně velké šířky pásma, má záření velice krátkou koherentní délku, a musí mít tedy obě ramena interferometru téměř stejnou délku. Změnou délky jednoho ramene dochází kvůli PMD ke změně interferometrického obrazce ze které je následně možné vypočítat hodnotu parametru PMD. Blokové schéma TINTY je zobrazeno na obrázku 2.15.



Obrázek 2.15: Blokové schéma zapojení měření PMD tradiční interferometrickou metodou (TINTY) [37].

(Physical Contact) konektorům odlišné jejich záměrným sešikmením čela vlákna (viz obrázek 2.16). Díky tomuto zakončení se odražený signál z větší části vyváže skrze plášť mimo vlákno a výrazně se tak zvýší útlum odrazu (resp. sníží reflektance) na daném spoji. Typickou hodnotou ORL je pro PC konektory 30-40 dB a pro APC konektory 60+ dB [47].



Obrázek 2.16: Srovnání rovného a sešikmeného konektoru [47].

2.5.1 Metody měření ORL a reflektance

Metoda OTDR

Reflektance (potažmo ORL) se obvykle měří jednou ze dvou metod. Z dřívějšího popisu ODTR je jasné, že jednou metodou bude právě optický reflektometr. Ten dokáže v rámci jednoho měření z jedné strany měřené trasy získat hodnoty diskrétní reflektance každého bodu na optické trase, díky kterému je ideální volbou pro rychlá měření. Pokud reflektometr automaticky nepočítá hodnotu reflektance, je možné ji manuálně vypočítat [36] jako

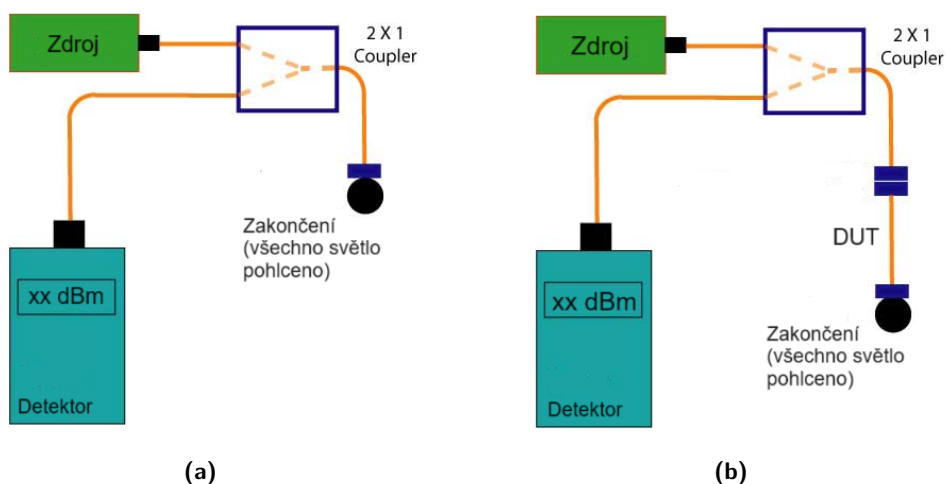
$$R = 10 \cdot \log_{10}(10^{H/5} - 1) + 10 \cdot \log_{10}(t) + B, \quad (4.1)$$

kde H je výška špičky v náměru, u níž reflektanci počítáme, t je délka pulzu v nanosekundách a B je koeficient Rayleigha zpětného rozptylu (typicky -82,5 dB). Některé reflektometry umí určit společně s hodnotou diskrétní reflektance i hodnotu ORL mezi dvěma libovolnými body. Pokud reflektometr tuto funkci nenabízí, je výpočet velice komplexní. Bylo by třeba kombinovat hodnoty reflektance všech bodů na trase a zároveň uvažovat útlum trasy před každým tímto bodem. Při měření reflektance, potažmo ORL, je třeba dbát na to, aby nebyly vrcholy těchto špiček zasaturovány, neboť by pak nebylo možné hodnotu reflektance určit. Tento nežádoucí jev je možné potlačit zkrácením časové délky pulzu, a tedy zeslabením přijímaného signálu.

Metoda OCWR

Druhou, přesnější, metodou je testování pomocí OCWR (Optical Continuous Wave Reflectometer) [36]. Jedná se o metodu běžně používanou pro měření

reflektance konektorů patch cordů. Oproti metodě OTDR s ní možné měřit hodnoty reflektancí uvnitř trasy a není tak obvykle používána pro vyhodnocení poruch v měřené síti. K měření touto metodou je třeba zdroj optického záření, detektor, coupler a gel nebo ferule s mírně vyšším indexem lomu jako má jádro testovaného vlákna. Principiální schéma metody je znázorněno na obrázku 2.17. Nejprve je provedeno měření reference, kdy je konec měřicího patch cordu zakončen v gelu nebo feruli se stejným indexem lomu pro potlačení odrazů od konce trasy. Namísto použití gelu nebo ferule je možné odrazy od konce trasy potlačit ohyby patch cordu tak, aby byl veškerý odražený výkon vyváznán v ohybech z vlákna. V takovém případě však hrozí úplné zlomení vlákna patch cordu. Na detektoru je pak detekován výkon, který stanovuje minimální měřenou hodnotu metody. Následně je za měřicí patch cord zapojena měřená trasa jejíž konec je opět umístěn do gelu nebo ferule. Tímto způsobem je získána hodnota výkonu odraženého signálu. Na závěr je nutné detektor umístit namísto DUT, aby byl změřen výkon signálu na vstupu DUT pro vypočítání ORL. Metoda se využívá v případech, kdy je třeba změřit pouze hodnotu celkového odrazu a není třeba znát hodnotu diskretních reflektancí uvnitř měřené trasy. Zároveň dokáže oproti OTDR detekovat vyšší hodnoty ORL s vyšší přesností, časově je však výrazně náročnější.



Obrázek 2.17: Schéma zapojení měření reflektance metodou OCWR (a) referenční měření (b) měření DUT [48].

Kapitola 3

Nejistoty měření

Žádné měření není dokonale přesné. Je totiž ovlivněno řadou faktorů, které se projevují na hodnotě měřené veličiny a mohou tak její hodnotu zkreslit. Nejistota měření poskytuje kvantitativní údaj o potenciálním rozsahu, v němž se skutečná hodnota měřené veličiny nachází. Faktory ovlivňující měření mohou být například přesnost měřících přístrojů, teplota, lidský faktor či systematické a náhodné chyby. V oblasti měření se používá zápis, ve kterém velká písmena značí neznámé veličiny a malá písmena veličiny známé. Matematicky je možné princip nepřesností měření popsat rovnicí

$$X = x \pm U, \quad (3.1)$$

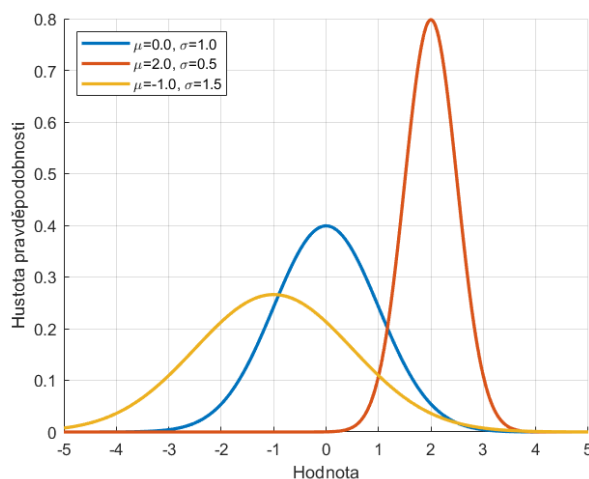
kde X je skutečná hodnota měřené veličiny, x je naměřená hodnota měřené veličiny a U je rozšířená nejistota měření. Nejistota měření má ve vědeckém a průmyslovém kontextu zásadní význam. Odráží totiž přirozená omezení a potenciální chyby spojené s jakýmkoli měřícím procesem. Při vyhodnocování experimentálních či analytických dat jsou správně vyhodnocená měření základem pro vyvození spolehlivých závěrů a přijímání informovaných rozhodnutí. Pochopení a zohlednění nejistoty měření je nezbytné pro zajištění platnosti a reprodukovatelnosti vědeckých výsledků či kontroly kvality. Principy korektního výpočtu nejistot a jejich interpretace jsou popsány v [49]. Publikace obsahuje obecný popis stanovení nejistot bez ohledu na odvětví, přičemž každá tato nejistota je vždy složena z nejistot typu A a B.

Každá nejistota nabývá hodnot, jejichž pravděpodobnost výskytu je dána tzv. rozdělením pravděpodobnosti. Rozdělení pravděpodobnosti je statistická funkce, která popisuje pravděpodobnost získání všech možných hodnot, kterých může náhodná veličina nabývat. Nejistota typu A nabývá normálního (též Gaussova) rozdělení. Jedná se o nejběžnější typ rozdělení dat vůbec. Hustota pravděpodobnosti tohoto rozdělení je dána vzorcem

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}}, \quad (3.2)$$

kde σ je směrodatná odchylka, σ^2 rozptyl a μ střední hodnota. V grafu 3.1 jsou vidět hustoty pravděpodobnosti pro různé střední hodnoty a různé hodnoty rozptylu. Toto rozdělení obvykle popisuje výskyt hodnot, jež jsou ovlivněny

určitými stochastickými procesy. Zároveň popisuje rozdělení výsledné nejistoty U , která je složena ze standardních nejistot jednotlivých komponent.



Obrázek 3.1: Normální (Gaussovo) rozdělení pro různé střední hodnoty a směrodatné odchylky.

Výpočet standardní nejistoty typu A z naměřených dat musí být pro zaručení dostatečné statistické významnosti proveden minimálně z 10 hodnot. Tento počet je stanoven normou ČSN EN 61280-4-2 pro metrologii [36]. Hodnotu standardní nejistoty typu A pro daný zdroj nejistoty je možné vypočítat jako výběrovou směrodatnou odchylku průměru $s_{\bar{x}}$ (též nazývanou standardní chyba aritmetického průměru, Standard Error of the Mean, SEM). Pro kontext této hodnoty je však důležité nejdříve popsat parametry: směrodatná odchylka σ (Standard Deviation) a výběrová směrodatná odchylka s (Sample Standard Deviation). Směrodatná odchylka určuje statistickou variabilitu dat, u kterých jsou známy všechny nabývané hodnoty daného rozdělení. S touto se dále pojí parametr rozptyl σ^2 , který je roven kvadrátu směrodatné odchylky. Častěji se tak pro popis variability dat používá výběrová směrodatná odchylka, která je počítána pouze z výběru dat z daného rozložení. Výpočet obou těchto statistických parametrů je vidět v rovnicích (3.3) a (3.4), kde N je počet hodnot rozložení, resp. vzorku, x_i i-tá hodnota a \bar{x} jejich aritmetický průměr.

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2} \quad (3.3)$$

$$s = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2} \quad (3.4)$$

Z hodnoty výběrové směrodatné odchylky je pak snadno možné získat hodnotu výběrové směrodatné odchylky průměru jako

$$u_A = s_{\bar{x}} = \frac{s}{\sqrt{N}}. \quad (3.5)$$

Tato hodnota určuje variabilitu vypočteného průměru vzorku od skutečného průměru daného rozdělení. Důležité je zmínit, že pokud by hodnota, jejíž nejistotu kvantifikujeme, nebyla průměrnou hodnotou výběru, ale pouze jednou náhodnou naměřenou hodnotou, počítala by se nejistota typu A jako směrodatná odchylka a nikoliv jako výběrová směrodatná odchylka průměru.

Druhým, v metrologii běžným, rozdělením je rozdělení rovnoměrné. To přiřazuje všem hodnotám veličiny stejnou pravděpodobnost. Matematicky je vztah možné zapsat jako

$$f(x) = \begin{cases} \frac{1}{b-a} & \text{pro } x \in (a, b) \\ 0 & \text{pro } x \notin (a, b) \end{cases}, \quad (3.6)$$

kde a je nejnižší nabývaná hodnota veličiny a b ta nejvyšší. Nejistoty dat s rovnoměrným rozdělením jsou obvykle označovány jako nejistoty typu B. Mezi příklady faktorů způsobujících nejistotu typu B patří nedostatečná přesnost měřicích zařízení, nedostatečná kalibrace, nekompletní znalost měřené veličiny, vliv okolních podmínek a chyby při nastavování zařízení. Tyto systematické nejistoty jsou obvykle kvantifikovány na základě informací, zkušeností nebo technických specifikací. Kdyby měl například měřič výkonu rozlišení 0,1 mW, znamenalo by to, že zobrazená hodnota 5,3 mW může znamenat hodnoty od 5,25 až 5,349. Tento druh nejistot je obvykle udáván výrobcem měřicích přístrojů.

Pokud jsou měřené hodnoty uváděny v nelineárních jednotkách, např. v decibelech, je třeba je před jakýmkoliv matematickými operacemi hodnoty nejprve převést do jednotek lineárních, např. procent. Těmito operacemi může být sčítání, násobení, výpočet průměru nebo například směrodatné odchylky. Převod mezi decibely a procenty může být proveden jednoduchým vzorcem

$$X(\%) = \left(10^{X(\text{dB})/10} - 1\right) \cdot 100. \quad (3.7)$$

S hodnotami v lineární oblasti je dále možné provádět jednotlivé matematické operace. Vypočtené hodnoty jsou pak typicky převedeny zpět z lineárních do logaritmických pomocí vztahu

$$X(\text{dB}) = 10 \log_{10} \left(\frac{V(\%)}{100} + 1 \right). \quad (3.8)$$

Tento převod však neplatí, jsou-li převáděny hodnoty vztažené k průměru. Jedná se například o převod směrodatné odchylky nebo výběrové směrodatné odchylky průměru. Pro kvantifikaci takových veličin v logaritmické oblasti je třeba hodnotu počítat relativně vůči průměrné hodnotě. Výpočet takové statistické veličiny je pak proveden jako

$$V(\text{dB}) = 10 \log_{10} \left(\frac{\bar{x}(\%)}{100} + \frac{V(\%)}{100} + 1 \right) - \bar{x}(\text{dB}), \quad (3.9)$$

kde V je daná statistická veličina a \bar{x} aritmetický průměr dat, ke kterým je veličina vztažena. Pokud by byl pro tyto veličiny převod z lineární do logaritmické oblasti proveden pomocí vzorce (3.8), mohly by vycházet nesmyslné

hodnoty těchto statistických veličin. Vzorec je používán pro výpočet jednotlivých zdrojů nejistot, samotný převod rozšířené nejistoty měření je však vždy počítán dle vzorce (3.8).

Tvar hustoty pravděpodobnosti jednotlivých rozdělení má stěžejní vliv na korektní zahrnutí daného zdroje nejistoty do celkového výpočtu. Pro správný výpočet kombinované standardní nejistoty je zapotřebí vydělit udávanou nejistotu dělitelem D , jehož hodnota se odvíjí od této hustoty pravděpodobnosti. Takto obdržená hodnota je označována jako standardní nejistota u . Parametry přístrojů jsou obvykle uváděny s intervalem spolehlivosti (Confidence Interval) 95 % (pravděpodobnost, s jakou se reálná hodnota nachází v rozmezí daným nejistotou). Pro zahrnutí všech zdrojů nejistot stejným způsobem je třeba tyto hodnoty normovat různými hodnotami dělitele. Pro normální rozdělení je hodnota dělitele pro přibližně 95 % $D = 2$. Pro rovnoměrné rozdělení je pak hodnota pro přibližně 95 % $D = \sqrt{3}$. Pokud by byly výrobcem dané komponenty nejistoty udávány pro jinou hodnotu intervalu spolehlivosti, je třeba hodnotu dělitele náležitě upravit.

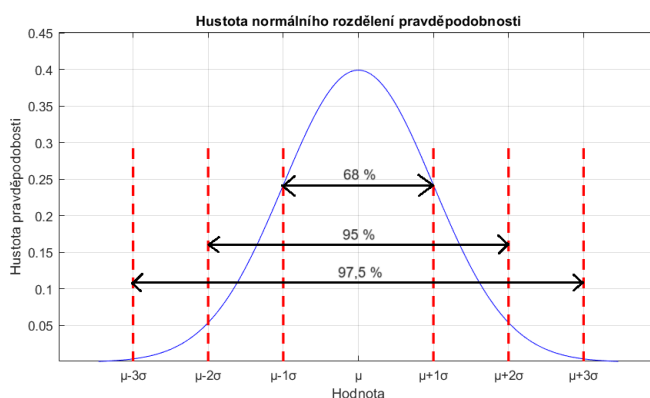
Po vypočítání hodnot jednotlivých standardních nejistot všech zdrojů je třeba vypočítat tzv. kombinovanou nejistotu u_C dle vzorce pro akumulaci nejistot

$$u_C = \sqrt{\sum_{i=1}^M u_i^2}, \quad (3.10)$$

kde M je celkový počet všech zdrojů nejistot podílejících se na celkové nejistotě a u_i je i -tá standardní nejistota daného zdroje nejistoty. Tato kombinovaná nejistota nabývá hodnoty jedné směrodatné odchylky a protože je popsána normálním rozdělením, stanovuje vypočtená hodnota interval spolehlivosti přibližně 68 % (viz obrázek 3.2). Pro zvýšení intervalu spolehlivosti, a tedy i šance, že se reálná hodnota nachází v daném intervalu, bývá tedy hodnota nejistoty rozšířena o tzv. koeficient rozšíření k . Finální hodnota rozšířené nejistoty lze vypočítat jako

$$u = ku_C. \quad (3.11)$$

Nejčastěji se výsledná rozšířená nejistota měření stanovuje pro $k = 2$, a jde tedy interval spolehlivosti přibližně 95 %.



Obrázek 3.2: Různé intervaly spolehlivosti pro normální (Gaussovo) rozdělení.

3.1 Příklad výpočtu nejistoty měření vložného útlumu one-cord metodou

V této kapitole bude nastíněn typický výpočet nejistoty pro měření vložného útlumu one-cord metodou. Vložný útlum byl pro tento příklad zvolen z důvodu jeho významnosti v telekomunikačních přenosových systémech. One-cord metoda pak z důvodu její preferovaného užívání v praxi. Kombinovaná nejistota u_C počítá dle standardního vzorce pro akumulaci nejistot (3.10), tedy odmocnina součtu druhých mocnin standardních nejistot všech komponent sítě. Obecně je v rámci přímé metody měření útlumu je možné tento vzorec konkretizovat a zapsat jako

$$u_C \approx \sqrt{u_{source}^2 + u_{DUT}^2 + u_{det}^2}, \quad (3.12)$$

kde u_{source} je standardní nejistota zdroje optického záření, u_{DUT} standardní nejistota měřené trasy a u_{det} standardní nejistota detektoru. Každá z těchto standardních nejistot je složena z vícero standardních nejistot dané komponenty. Důležité nejistoty, jež nebyly výrobcí komponent uvedeny je třeba změřit (alespoň 10 krát) a kvantifikovat. Optická trasa použitá pro tento příklad je smyšlená. Smyšlené jsou i hodnoty použité pro výpočet jednotlivých parametrů. V rámci tohoto příkladu bude uvažována konstantní teplota celého měření (měřicí přístroje + samotná trasa) při všech prováděných měřeních. Pokud by podmínka konstantní teploty nebyla zaručena, bylo by třeba její vliv do výpočtů zahrnout.

Trasa je tvořena pouze jedním vláknem o délce 10 km, ke kterému byl připojen zdroj optického záření z jedné strany a detektor ze strany druhé dle schéma zapojení one-cord metody (viz 2.6a). Nejistota způsobena zdrojem u_{source} může být ovlivněna následujícími parametry:

- Stabilita u_{stab} - Výkon vysílaného optického signálu se může měnit v čase.
- Jiná nestabilita u_{jine} - Např. nestability způsobené nekonstantním proudem či teplotou laseru.

Matematicky lze tedy standardní nejistotu zdroje zapsat jako

$$u_{source} = \sqrt{u_{stab}^2 + u_{jine}^2}. \quad (3.13)$$

Nejistota způsobena testovaným vláknem u_{DUT} je způsobena parametry:

- Polarizačně závislý útlum u_{polIL} - Útlum vlákna a konektorových spojení je proměnlivý se stavem polarizace procházejícího záření.
- Konektorová spojení u_{spoj} - Útlum jednotlivých konektorových spojení na síti se může s každým rozpojením a zapojením měnit. I když uvnitř trasy žádné konektorové spoje nejsou, je třeba započítat vliv spojení koncových vláken s patch cordy.
- Reference u_{REF} - Vláknem použité na měření reference může vykazovat proměnlivý útlum především pak opětovným zapojováním spojů.

Standardní nejistota testovaného vlákna lze zapsat jako

$$u_{DUT} = \sqrt{u_{polIL}^2 + u_{spoj}^2 + u_{REF}^2}. \quad (3.14)$$

Standardní nejistota detektoru u_{det} zahrnuje parametry:

- Polarizačně závislá odezva u_{polR} = Změna výkonu se změnou stavu polarizace vstupujícího záření.
- Rozlišení displeje u_{roz} = Rozlišovací schopnost zobrazovacího displeje.
- Linearita u_{lin} = Závislost detekovaného výkonu na vlnové délce nebo úrovni dopadajícího výkonu.
- Nehomogenita u_{nehom} = Různá senzitivita na dopadající záření v různých bodech detektoru.

Obdobně jako předešlé standardní nejistoty lze i standardní nejistotu detektoru vypočítat jako

$$u_{det} = \sqrt{u_{polR}^2 + u_{roz}^2 + u_{lin}^2 + u_{nehom}^2}. \quad (3.15)$$

Pro tento příklad byly stanoveny následující hodnoty nejistot (v běžném případě by byly tyto nejistoty stanoveny datasheety příslušných komponent):

Tabulka 3.1: Ukázkové nejistoty optických přístrojů stanovené výrobcí.

Nejistoty zdroje optického záření	
Stabilita	0,01 dB
Konektorová stabilita	0,005 dB
Nejistoty detektoru	
Vnitřní nejistota	3 %
Rozlišení displeje	0,0005 dB
Linearita	0,4 %
Polarizační závislost	0,005 dB
Konektorová stabilita	0,005 dB

V porovnání s dříve zmíněnými druhy nejistot v těchto parametrech není obsažena nejistota jiných nestabilit pro zdroj optického záření a nehomogenita detektoru. V ideálním případě by bylo nutné tyto nejistoty dodatečně doměřit. Reálné měření těchto parametrů je však velice obtížné a jejich hodnota by v porovnání s ostatními nejistotami měla být dle očekávání zanedbatelná. U detektoru byla stanovena i hodnota vnitřní nejistoty detektoru (také označována jako nejistota typu a detektoru). Ta by se projevila v případě, ve kterém by byla měřena absolutní hodnota výkonu optického záření a nikoliv útlum trasy jako rozdíl mezi referenčním měřením a měřením DUT. Taktéž je uvedena i konektorová stabilita zdroje. Tu není třeba ve výpočtu nejistoty měření zahrnout, neboť během měření nedojde k odpojení patch cordu od zdroje optického záření.

Předpokládejme, že nejistoty reference a konektorových spojení DUT byly měřeny vždy sadou 10 nezávislých měření. Tato měření zahrnovala rozpojování, čištění a následné zapojování koncových konektorů, nikoliv konektorů uvnitř měřené trasy. Tímto způsobem byla získána data, která byla pomocí vzorce (3.7) převedena do lineární oblasti. Z těchto lineárních dat byly posléze pomocí vzorce (3.5) vypočteny výběrové směrodatné odchyly průměru (standardní nejistoty typu A), které byly následně zpětně převedeny do logaritmické oblasti pro názornost dat (viz tabulka 3.2). Nejistota útlumu způsobená polarizační závislostí byla obdobně stanovena z 10 hodnot, kdy byl před měřenou trasu zařazen polarizační kontrolér a postupně měněna rovina polarizace.

Tabulka 3.2: Ukázkové naměřené nejistoty měřené trasy (DUT).

Nejistoty měřené trasy (DUT)	
Polarizačně závislý útlum	0,03 dB
Konektorová spojení	0,15 dB
Reference	0,02 dB

Pro stanovení hodnoty dělitele D , a tedy správný výpočet standardních nejistot je třeba určit typ rozdělení pravděpodobnosti jednotlivých nejistot. Ten je dán povahou daného zdroje nejistot. Pro rovnoměrné rozdělení je $D = \sqrt{3}$. Pro normální rozdělení záleží na tom, zda byla hodnota nejistoty obdržena od výrobce přístroje ($D = 2$), nebo zda byla naměřena dodatečně ($D = 1$). Pro další výpočty je třeba všechny hodnoty uváděné v decibelech převést do lineární oblasti (vzorec (3.7)). V tabulce 3.3 jsou uvedeny všechny výše uvedené zdroje nejistot, jejich hodnoty, typy rozložení.

Tabulka 3.3: Příklad výpočtu standardních nejistot pro různé zdroje nejistot.

Zdroj nejistoty	Rozložení	Hodnota	Dělitel D	Standardní nejistota u
Zdroj optického záření				
Stabilita	Norm.	2,31E-03	2	1,15E-03
Detektor				
Rozlišení displeje	Rovn.	1,15E-04	$\sqrt{3}$	6,65E-05
Linearita	Norm.	4E-03	2	2,00E-03
Polarizační závislost	Norm.	1,15E-03	2	5,76E-04
Konektorová stabilita	Norm.	1,15E-03	2	5,76E-04
Měřená trasa				
Polarizačně závislý útlum	Norm.	6,93E-03	1	6,93E-03
Konektorová spojení	Norm.	3,51E-02	1	3,51E-02
Reference	Norm.	4,62E-03	1	4,62E-03

Z takto vypsaných hodnot standardních odchylek je nyní možné vypočítat kombinovanou standardní nejistotu u_C jako

$$u_C = \sqrt{\sum_{i=1}^N u_i^2} = 3,9 \%, \quad (3.16)$$

kde u_i je i -tá standardní nejistota z celkového počtu N standardních nejistot. Tuto hodnotu je nakonec nutné rozšířit o koeficient rozšíření $k = 2$, čímž je získána hodnota rozšířené nejistoty s intervalem spolehlivosti cca 95 %

$$U = K u_C = 2 \cdot 0,039 = 7,8 \%. \quad (3.17)$$

Tuto hodnotu je nakonec vhodné převést zpět do logaritmického měřítka pomocí vzorce (3.8) jako

$$U(\text{dB}) = 10 \log_{10} \left(\frac{U(\%)}{100} + 1 \right) = 0,33 \text{ dB}. \quad (3.18)$$

Vypočtenou nejistotu $U = 0,33 \text{ dB}$ je možné zahrnout při udávání hodnoty měřeného vložného útlumu jako $IL = (\bar{x} \pm 0,33) \text{ dB}$, kde \bar{x} je aritmetický průměr měřených hodnot vložného útlumu.

3.2 Stanovení limitu útlumu optických tras

Získáním korektně vypočítané nejistoty získáme interval hodnot, ve kterém se reálná hodnota útlumu dané trasy s určitou pravděpodobností nachází. Za předpokladu předem stanovených limitů je třeba vyhodnotit, zda měřená veličina těmto limitům vyhovuje či nikoliv. Pokud však měřená trasa nemá předem stanovené limity, je nutné hodnotu takového limitu stanovit.

Již 30 let se při stanovení limitu měrného útlumu sítě běžně využívá metoda maximálních hodnot [50]. Ta funguje na principu součtu maximálních hodnot, kdy se pro všechny komponenty (resp. události jako jsou svary či konektory) sítě sečtou jejich maximální hodnoty pro danou vlnovou délku a tím vznikne pro tuto vlnovou délku její limit vložného útlumu. V takovém případě u delších tras nebo tras s velkým počtem komponent nemusí limit odpovídat realitě. Jiní poskytovatelé aplikují ve svých sítích metodu, skládající se z maximálních hodnot konektorů a měrného útlumu vlákna a střední hodnoty svarů. Taková metoda je sice přísnější, ale nezpůsobuje v celkové hodnotě útlumu obvykle velký rozdíl. Druhá, doporučená, metoda je založena na statistickém přístupu. Výpočet touto metodou stojí na dostatečném počtu nezávislých měření, ze kterých by bylo možné vypočítat střední hodnotu a směrodatnou odchylku pro jednotlivé komponenty. Hodnota limitu vložného útlumu každé komponenty by pak byla dána jako $IL = N \cdot IL_{AVG} + \sqrt{N} \cdot 2\sigma$, kde N je množství dané komponenty na trase, IL_{AVG} střední hodnota vložného útlumu komponenty a σ její směrodatná odchylka. Ve výpočtu slouží \sqrt{N} jako váhování směrodatných odchylek. Tímto způsobem by došlo k mírnému zpřísnění limitu, ale zároveň snížení požadovaného útlumu trasy. Zahrnutím 2σ do výpočtu limitu by dle obrázku 3.2 vznikl interval přibližně 95 %, přičemž překročení krajní hodnoty tohoto intervalu zleva však v tomto případě nevádí, a tak by tento interval spolehlivosti obsahoval více než 97 % vyhovujících naměrů. Hodnoty 2σ byly vypočítány jako dvojnásobek σ v procentech a následně převedena do decibelů. Hodnotu 1σ v decibelech nelze pouze vynásobit dvěma.

V tabulce 3.4 je znázorněn jak příklad výpočtu limitů dle standardního přístupu, tak i doporučeného statistického přístupu (hodnoty konkrétních parametrů byly převzaty z ukázkového příkladu [50]). Pokud by byl limit tvořen pro trasu složené z celkem 20 km optických vláken, 5 svarů a 4 konektorových spojů, byl by rozdíl mezi jednotlivými přístupy pro obě vlnové délky 0,9 dB. Rozdíl v hodnotách se pro různé vlnové délky mohou lišit. Kdyby byla modelová trasa kratší s menším množstvím svarů a konektorových spojů, byl tento rozdíl menší. Pro trasy s vyšším počtem svarů či konektorových spojení, případně delší trasy, by byla hodnota rozdílu přístupů naopak větší. Při stanovení limitní hodnoty vložného útlumu sítě je tedy nutné vždy zvážit, zda zvolený přístup dává smysl.

Tabulka 3.4: Ukázkový výpočet stanovení limitu vložného útlumu trasy dvěma přístupy.

Naměřené hodnoty:				
Hodnoty měrného útlumu vlákna				
Vlnová délka	max (dB/km)	mean (dB/km)	1σ (dB/km)	2σ (dB/km)
1550 nm	0,25	0,21	0,02	0,04
1310 nm	0,36	0,32	0,02	0,04
Hodnoty vložného útlumu svaru				
Vlnová délka	max (dB)	mean (dB)	1σ (dB)	2σ (dB)
1550 nm	0,1	0,08	0,01	0,02
1310 nm	0,1	0,08	0,01	0,02
Hodnoty vložného útlumu konektorového spojení				
Vlnová délka	max (dB)	mean (dB)	1σ (dB)	2σ (dB)
1550 nm	0,35	0,23	0,061	0,121
1310 nm	0,35	0,23	0,061	0,121
Výpočet:				
Trasa dlouhá 20 km s 5 svary a 4 konektorovými spojeními:				
Přístup s maximálními hodnotami:				
1550 nm	$IL_{max} = 20 \cdot 0,25 + 5 \cdot 0,1 + 4 \cdot 0,35 = 6,9 \text{ dB}$			
1310 nm	$IL_{max} = 20 \cdot 0,36 + 5 \cdot 0,1 + 4 \cdot 0,35 = 9,1 \text{ dB}$			
Statistický přístup:				
1550 nm	$IL_{stat} = 20 \cdot 0,21 + \sqrt{20} \cdot 0,04 + 5 \cdot 0,08 + \sqrt{5} \cdot 0,02 + 4 \cdot 0,23 + \sqrt{4} \cdot 0,121 = 6 \text{ dB}$			
1310 nm	$IL_{stat} = 20 \cdot 0,32 + \sqrt{20} \cdot 0,04 + 5 \cdot 0,08 + \sqrt{5} \cdot 0,02 + 4 \cdot 0,23 + \sqrt{4} \cdot 0,121 = 8,2 \text{ dB}$			

Kapitola 4

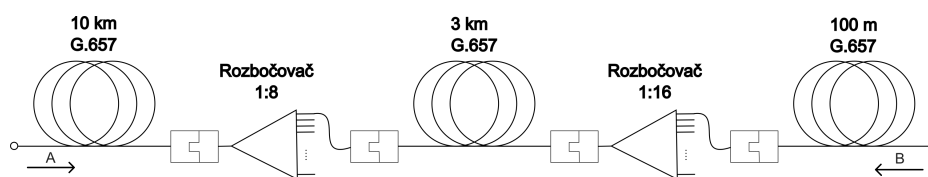
Měření

Z předešlých kapitol plyne, že PON sítě jsou pro standard VHCN stěžejní. Pro 5G je také možné PON využívat, ale běžnější realizace je pomocí spojů P2P. Z těchto důvodů je pro měření parametrů a následné stanovení nejistot těchto měření vybudována PON, jež představuje reálnou část sítě VHCN. Nároky na metrologii jsou však pro VHCN a 5G stejné, a tak lze postup popsany v následujících kapitolách aplikovat i na optické trasy sítí 5G.

Modelová PON je složena ze 3 separátních optických vláken a 2 PLC symetrických splitterů. V každém splitteru je vlákno zapojeno jen do jedné z možných větví, ostatní větve nejsou připojeny. Předpokládá se, že měřené hodnoty by byly v rámci jednotlivých větví podobné. Délky vláken 10 km, 3 km a 100 m byly vybrány tak, aby síť simulovala reálnou situaci, kdy je signál nejprve od OLT dopraven do požadované oblasti (např. do zástavby, do obce) nejdelším vláknem, kratším vláknem roz distribuované do menších oblastí (např. do konkrétních ulic) a nakonec nejkratšími vlákny ke koncovým uživatelům (např. do konkrétních budov). Splitter s dělicím poměrem 1:8 spojuje dvě delší vlákna, splitter 1:16 dvě kratší vlákna. Modelová síť tedy umožňuje připojení až 128 koncových uživatelům. Fotografie sestavené PON a její schéma jsou zobrazeny na obrázcích 4.1 a 4.2. Ve schématu jsou také uvedeny směry A a B na které je odkazováno v při měření různých parametrů.



Obrázek 4.1: Fotografie modelové PON.



Obrázek 4.2: Schéma modelové PON.

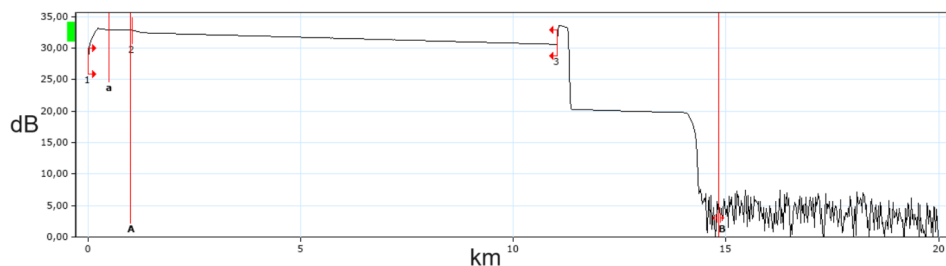
Všechna použitá vlákna a splittery mají konektory SC/APC, které jsou vhodné pro rychlé přepojování spojů. Tato výhoda se projeví především v opakovaných měřeních, kdy jsou vlákna často přepojována a čištěna. Všechna použitá vlákna jsou typu ITU-T G.657.A2, tedy vlákna s velmi nízkými ztrátami způsobenými ohyby. Jednotlivé komponenty sítě jsou zakončeny standardními konektory. Aby nedocházelo k náhodnému otáčení komponent (vláken), jsou jednotlivé konektory náležitě označeny. I přes to, že normy zabývající se metrologií v optických sítích vliv kvality konektorových spojek ignorují, jsou ze stejného důvodu označeny i jejich strany. Pro zaručení vyšší stability měřených dat jsou všechna měření prováděna v klimatizovaném prostředí s konstantní teplotou 24 °C. Z důvodu omezených možností měřících přístrojů jsou všechna měření prováděna pouze na vlnové délce 1550 nm.

4.1 Měření délky a vložného útlumu metodou OTDR

Jako první byla na modelové síti měřena délka trasy a vložný útlum metodou OTDR. Metoda OTDR byla pro měření délky trasy zvolena z důvodu jejího nejčastějšího použití. Hodnoty útlumu trasy byly také zaznamenány, ale nejsou stěžejní, neboť byla jako vhodnější varianta zvolena přímá metoda, pomocí které bude měření provedeno dále. Nejistota měření pro hodnoty vložného útlumu tedy nebude stanovena, neboť bude stanovena právě pro přímou metodu. Protože se na prvních přibližně 35 metrech reflektogramu nachází z důvodu Fresnelova odrazu tzv. mrtvá zóna (viz obrázek 2.5), není možné zde metodou OTDR měřit. Proto je při měření metodou OTDR vždy třeba zařadit do měření takzvané předřadné vlákno. Toto vlákno se umístí před měřené komponenty, aby se celá mrtvá zóna nacházela v něm a nezasahovala tak do měřených komponent. V tomto případě je na začátku trasy zařazeno přibližně 1 km dlouhé jednovlákové vlákno třídy ITU-T G.657.A2. Nutnost použití dalšího vlákna je v tomto případě odůvodněna i tím, že použitý reflektometr EXFO FTB-720C disponuje konektorem FC/APC. Předřadné vlákno tak zde muselo být umístěno i jako převod z konektoru FC na SC.

Protože nebylo z důvodu nedostatečně silného signálu možné změřit celou modelovou PON síť najednou (viz obrázek 4.3), bylo třeba ji rozdělit na více částí. Síť tedy byla rozdělena na 2 trasy s přibližně stejnou odhadovanou hodnotou vložného útlumu tak, aby vstupní parametry měření obou tras byly co nejpodobnější. Jedna trasa byla složena z 10 km vlákna, splitteru s dělicím poměrem 1:8 a 100 m vlákna přesně v tomto pořadí (viz fotografie 4.4a). Druhá

trasa ze splitteru s dělicím poměrem 1:16 a 3km vláknem v tomto pořadí (viz fotografie 4.4b). Při sestavování tras bylo dbáno na to, aby se optický splitter nacházel na úplném konci trasy. Pokud by tak nebylo učiněno, nebylo by možné odečíst délku trasy (splitter se totiž na reflektogramu jeví širší než ve skutečnosti a zasahuje tak do dalšího úseku) a navíc by útlum splitteru mohl splynout s útlumem na konci trasy. Z důvodu časové náročnosti nebyly jednotlivé trasy měřeny oboustranně, nýbrž pouze v jednom směru.



Obrázek 4.3: Reflektogram celé trasy s nedostatečně silným signálem.



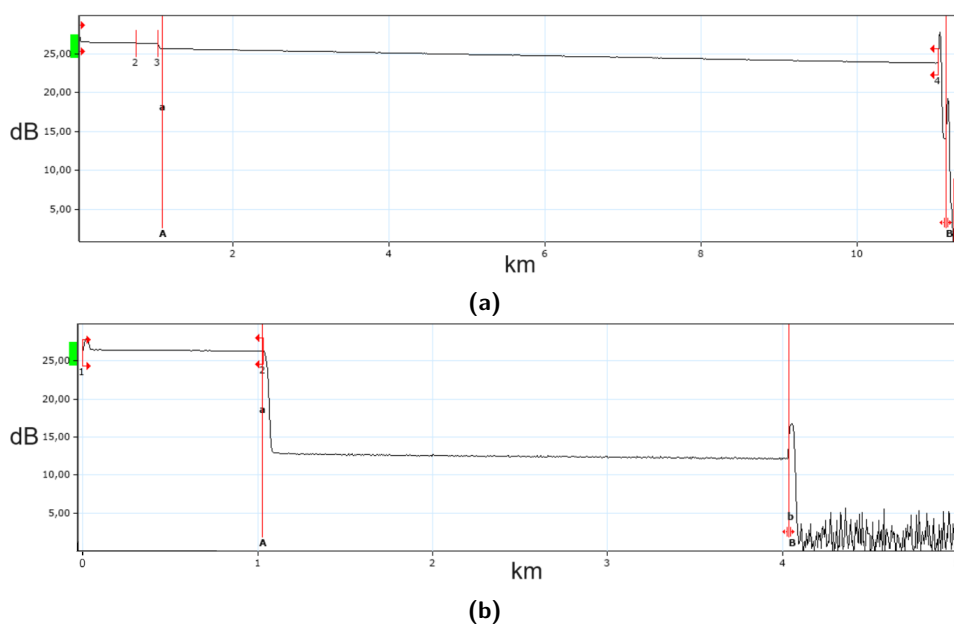
(a)



(b)

Obrázek 4.4: Fotografie měřené trasy metodou OTDR (a) 10km vlákna, splitteru 1:8 a 100m vlákna (b) splitteru 1:16 a 3km vlákna.

Celkem bylo metodou OTDR provedeno 20 měření. Každá trasa byla měřena 10 krát pro dostatečnou statistickou významnost dat. Útlum trasy byl měřen bez koncových konektorových spojení (channel loss). Výsledky měření OTDR jsou totiž později srovnávány s výsledky měření vložného útlumu přímou metodou, kde je útlum měřen včetně koncových konektorových spojení (link loss). Jednotlivá měření vždy začínala nastavením vstupních parametrů, konkrétně rozsahu měřené trasy (5, resp. 20 km), časové délky pulzu (275 ns) a doby průměrování (30 s). Z každého tohoto měření byla pomocí kurzorů odečtena hodnota útlumu trasy společně s její délkou (viz obrázek 4.5). Naměřené hodnoty útlumu a délky jednotlivých tras jsou uvedeny v tabulce 4.1. Z důvodu zmenšení velikosti tabulky je v popisu trasy vynechána informace o předřadném, přibližně 1 km dlouhém, vlákně. Protože neumožňují ostatní měřicí přístroje měření na vlnové délce 1310 nm, nebyla tato data zaznamenávána ani v případě reflektometru, který měření na této vlnové délce umožňuje. Z reflektogramů byla odhalena skutečnost, že vlákno, které bylo považováno za 100metrové, ve skutečnosti měří přibližně 56 metrů. Z toho důvodu bude u tohoto vlákna dále uváděna právě tato délka. Vlákna s předpokládanými délkami 3 a 10 km svými skutečnými délkami přibližně odpovídají.



Obrázek 4.5: Reflektogram měřené trasy s nastavenými markery (a) 10km vlákna, splitteru 1:8 a 100m vlákna (b) splitteru 1:16 a 3km vlákna.

Tabulka 4.1: Tabulka výsledků měření útlumu a délky metodou OTDR na vlnové délce 1550 nm.

Měření	10 km + splitter 1:8 + 100 m		splitter 1:16 + 3 km	
	Útlum (dB)	Délka trasy (m)	Útlum (dB)	Délka trasy (m)
1	11,61	10074	14,03	3005,3
2	11,66	10061,3	13,89	3005,7
3	11,48	10066,1	13,86	3007,4
4	11,62	10073,7	13,73	3005,5
5	11,47	10053,9	13,91	3002,9
6	11,62	10061,6	13,94	3006,4
7	11,64	10053,6	13,92	3005,5
8	11,67	10069,6	13,88	3006,1
9	11,49	10073,4	13,82	3005,5
10	11,67	10069,6	13,80	3004,7

4.2 Měření vložného útlumu přímou metodou

Jako další byl na modelové síti měřen vložný útlum přímou metodou. Za optimální variantu přímé metody byla zvolena metoda one-cord, neboť se v praxi používá nejčastěji. V měřené hodnotě je totiž zahrnut i vliv krajních konektorových spojů, což je v tomto případě žádoucí (link loss).

Jako zdroj optického záření byl pro toto měření použit laser CoBrite DX4 a jako detektor THORLABS PM100D s Ge fotodiodou THORLABS S122C. Použité patch cordy mají stejné konektory jako komponenty modelové PON. Pro potlačení vlivu postupně se navyšujícího optického výkonu zdroje optického záření po jeho spuštění byla všechna měření prováděna nejdříve 30 minut od spuštění laseru. Mezi měřeními nebyl laser ze stejného důvodu vypínán. Výkon zdroje byl nastaven na 6 dBm tak, aby byl detekovaný signál na výstupu stále dostatečně silný, ale zároveň byla dodržena bezpečnostní opatření v rámci laboratoře. Aby nedocházelo ke zkreslení výsledků z důvodu úzké spektrální čáry laseru, byl signál upraven pomocí efektu stimulovaného Brillouinova rozptylu (Stimulated Brillouin Scattering, SBS), jež zdroj nabízí. Vložný útlum byl měřen jak pro celou síť najednou, tak i jednotlivě pro všechny její komponenty. Všechny tyto trasy byly měřeny oboustranně pro větší množství dat a lepší interpretaci výsledků. Pro korektní určení hodnoty měřené veličiny vč. její nejistoty byla každá trasa podrobena 10 nezávislým měřením (rozpojení konektorů, čištění a opětovné zapojení).

V tabulkách 4.2 a 4.3 jsou vidět hodnoty vložného útlumu jednotlivých měření. Označení (A) a (B) se vztahuje k určení, zda byla trasa měřena v jednom, či druhém směru. Reference one-cord metody byla, stejně jako jednotlivé trasy, měřena 10 krát. Z těchto dat byla následně vypočítána

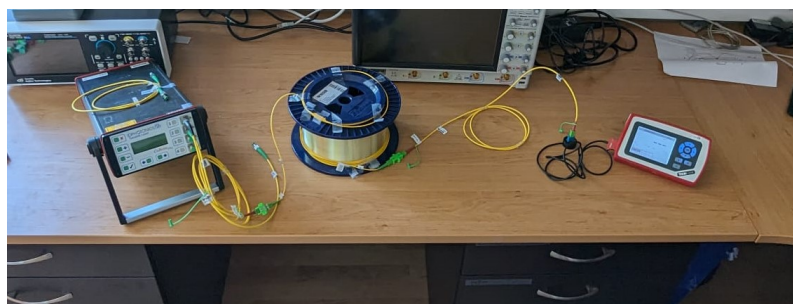
střední hodnota, jež byla odečtena od jednotlivých hodnot každého měření pro získání útlumu, nikoliv detekovaného výkonu. Na fotografii 4.6 je vidět zapojení komponent při měření vložného útlumu 10km vlákna.

Tabulka 4.2: Tabulka výsledků měření vložného útlumu metodou one-cord na vlnové délce 1550 nm.

Měření	Vložný útlum (dB)					
	56 m (A)	56 m (B)	3 km (A)	3 km (B)	10 km (A)	10 km (B)
1	1,03	0,66	1,25	1,18	2,35	2,69
2	0,72	0,59	1,21	1,13	2,47	2,59
3	0,64	0,81	1,24	1,29	2,31	2,54
4	0,59	0,53	1,19	1,1	2,45	2,77
5	0,56	0,76	1,16	1,13	2,36	2,55
6	0,51	0,92	1,11	1,07	2,39	2,52
7	0,62	0,65	1,25	1,05	2,42	2,59
8	0,47	0,66	1,27	1,04	2,47	2,55
9	0,43	0,87	1,18	1,08	2,56	2,52
10	0,46	0,64	1,2	1,07	2,46	2,64

Tabulka 4.3: Tabulka výsledků měření vložného útlumu metodou one-cord na vlnové délce 1550 nm.

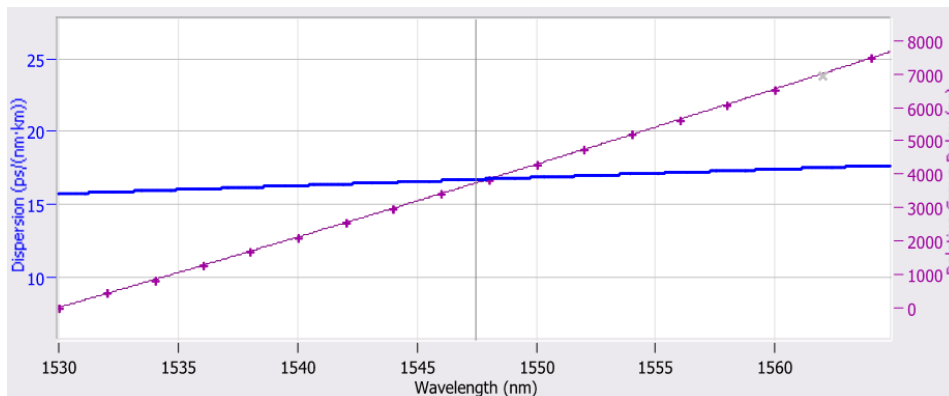
Měření	Vložný útlum (dB)					
	splitter 1:8 (A)	splitter 1:8 (B)	splitter 1:16 (A)	splitter 1:16 (B)	Full path (A)	Full path (B)
1	9,97	9,82	13,09	13,55	26,55	26,64
2	9,97	9,93	13,03	13,47	26,65	26,67
3	9,92	9,92	13,03	13,57	26,84	26,65
4	9,99	10,1	13,06	13,35	26,65	26,91
5	10,12	10,01	13,05	13,36	26,66	26,65
6	10,05	9,97	13,1	13,4	26,57	26,65
7	10,03	9,98	13,1	13,55	26,51	26,75
8	10,07	9,98	13,11	13,48	26,54	26,96
9	10,04	9,99	13,08	13,41	26,69	26,67
10	9,99	10,04	13,16	13,41	26,54	26,63



Obrázek 4.6: Fotografie měření vložného útlumu přímou metodou 10km vlákna.

4.3 Měření chromatické disperze

Měření chromatické disperze bylo provedeno pomocí SLED zdroje, určeného na měření CD/PMD, EXFO FLS-5834A a platformy EXFO FTB-500 s analyzátozem chromatické disperze FTB-5800. Použitý analyzátor využívá metodu fázového posuvu (viz kapitola 2.3.1). Chromatická disperze byla měřena pouze pro celou PON síť najednou a pouze v jednom směru. Protože je hodnota chromatické disperze přímo úměrná délce vlákna, byla by hodnota velmi podobná i když by se na trase nenacházely splittery. Stejně tak lze očekávat velmi podobné výsledky i v případě měření v opačném směru. K měřené PON síti byly přidány 2 patch cordy, které se nacházely mezi zdrojem a trasou, resp. trasou a analyzátozem. Ty byly použity z důvodu, aby nedocházelo k opotřebením konektorů uvnitř použitých přístrojů. Díky jejich malé délce je však možné jejich vliv zanedbat. Dohromady bylo provedeno 10 měření, mezi kterými byly rozpojovány a zapojovány koncové konektorové spoje. Z každého měření bylo obdrženo 18 hodnot relativního skupinového zpoždění s krokem vlnové délky 2 nm pokrývající celé C pásmo (1530-1565 nm). Průměrování hodnot každého kroku bylo nastaveno na dobu 2 sekund. Data byla automaticky přepočítána na hodnoty chromatické disperze. Všechny tyto hodnoty byly následně zobrazeny v jednom grafu (viz 4.7). Po vydělení hodnot chromatické disperze délkou trasy (tj. součet průměrů obou měřených tras v kapitole 4.1) byl obdržen koeficient chromatické disperze každého měření. Naměřené a vypočtené hodnoty pro vlnovou délku 1550 nm, společně s průměrnou délkou trasy naměřenou metodou OTDR, jsou uvedeny v tabulce 4.4



Obrázek 4.7: Zobrazení výsledku jednoho měření chromatické disperze.

Tabulka 4.4: Naměřené hodnoty chromatické disperze a vypočtené koeficienty chromatické disperze na vlnové délce 1550 nm.

Délka trasy: 13071,2 m		
Měření	CD (ps/nm)	koef. CD (ps·nm ⁻¹ ·km ⁻¹)
1	220,96	16,90
2	220,95	16,90
3	221,14	16,92
4	221,20	16,92
5	221,39	16,94
6	221,13	16,92
7	220,78	16,89
8	221,32	16,93
9	221,41	16,94
10	220,61	16,88

4.4 Měření polarizační vidové disperze

Stejně jako v případě chromatické disperze bylo i měření polarizační vidové disperze provedeno pomocí SLED zdroje EXFO FLS-5834A a platformy EXFO FTB-500, tentokrát s analyzátozem PMD FTB-5500. Měřicí přístroje využívají k měření PMD zobecněnou interferometrickou metodu (GINTY). Měřena byla opět pouze celá PON síť včetně propojovacích patch cordů (jednostranně). Patch cordy sice mají i v tomto případě zanedbatelný vliv na měřené hodnoty z důvodu jejich krátké délky ale nikoliv z důvodu jejich ohýbání. Měřené hodnoty se mohou významně lišit v závislosti na změnách polarizace způsobenými právě natáčením a ohýbáním těchto vláken. Z toho důvodu je vždy výhodné zvolit co nejkratší připojovací patch cordy k potlačení tohoto vlivu. Kvůli této závislosti byly vyjma typického rozpojování a zapojování konektorových spojení mezi deseti měřeními i různě natáčený propojovací patch cordy pro simulaci různých poloh připojení měřicích zařízení. Data z těchto měření jsou uvedena v tabulce 4.5. Tato data jsou navíc doplněna o délku měřené trasy a vypočítaný koeficient PMD (ps/ $\sqrt{\text{km}}$).

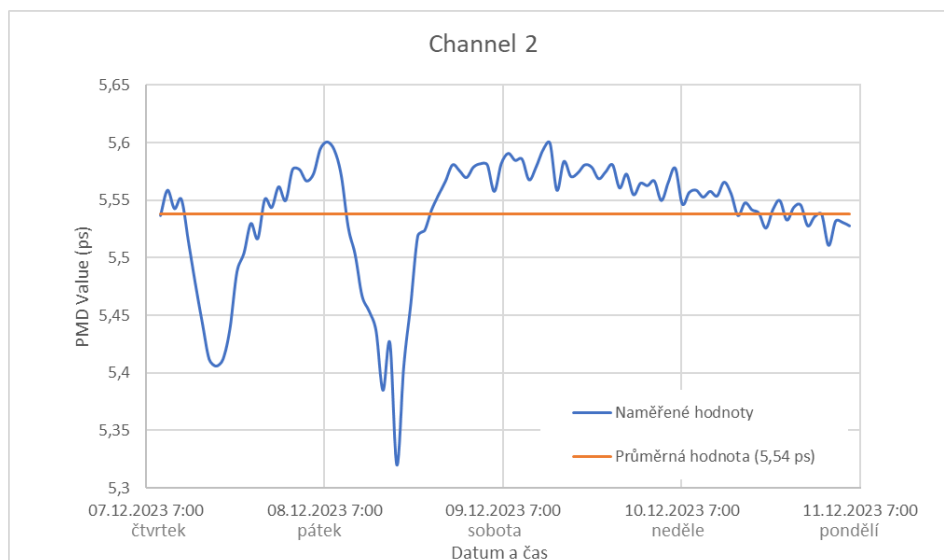
Tabulka 4.5: Naměřené hodnoty polarizační vidové disperze a vypočtené koeficienty PMD na vlnové délce 1550 nm.

Délka trasy: 13071,2 m		
Měření	PMD (ps)	koef. PMD (ps/ $\sqrt{\text{km}}$)
1	0,145	0,040
2	0,148	0,041
3	0,144	0,040
4	0,143	0,040
5	0,161	0,045
6	0,208	0,058
7	0,182	0,050
8	0,175	0,048
9	0,140	0,039
10	0,191	0,053

Mimo hlavní cíle práce byl také vytvořen i tzv. zdroj PMD. Jedná se o pasivní optické zařízení, které umožní simulovat pevně stanovené vyšší hodnoty PMD za účelem testování různých optických komponent a vlivu PMD na přenos v optických komunikačních systémech. Díky jeho použití není třeba využívat velmi dlouhá vlákna, u kterých by navíc problém tvořila i vysoká chromatická disperze a útlum. Zdroj PMD byl vytvořen z různých dlouhých úseků polarizaci udržujícího vlákna. Tyto úseky vlákna byly následně svařovány pod náhodně velkým vzájemným úhlem natočení. Díky tomu, že na sebe kvůli různému natočení vláken, stresové elementy nenavazují, dochází ke změně PSP. Čím více svarů je provedeno, tím více se výsledky měření podobají standardnímu SiO² vláknu. Ideální simulací by pak bylo vlákno z nekonečně mnoha různě dlouhých vláken s náhodnými úhly natočení vláken při svaru.

Přestože je hodnota PMD samotné komponenty téměř neproměnlivá, mají na její hodnotu vliv vnější faktory. Na obrázku 4.8 jsou zobrazeny naměřené hodnoty PMD ze čtyřdenního měření jednoho kanálu zdroje PMD. Zahrnuté byly jak pracovní dny, kdy se v oblasti měření pohybovaly osoby, tak dny víkendu, kdy v oblasti nikdo nebyl. Celkem bylo zaznamenáno 100 hodnot s časovými kroky 56 minut. Naměřené hodnoty i vypočítané statistické veličiny z tohoto měření jsou uvedeny v tabulce 4.6. Jak je vidět, ve čtvrtek a v pátek došlo v měřených hodnotách k výraznému poklesu. Tento pokles byl způsoben právě přítomností osob v bezprostřední blízkosti probíhajícího měření. Hodnoty byly v takovém případě nejpravděpodobněji nejvíce ovlivněny změnami teploty, která byla bez přítomnosti osob konstantních 24 °C, a vibracemi, přenášenými skrze podlahu a stůl do měřené trasy i měřicích přístrojů. Lze předpokládat, že v běžných podmínkách budou výkyvy z důvodu větších

teplotních změn i silnějších vibrací ještě výraznější. PMD zdroj byl do práce zahrnut pro zdůraznění proměnlivosti hodnoty PMD z důvodu vnějších vlivů a významnosti dlouhodobého měření v reálných sítích.



Obrázek 4.8: Zobrazení naměřených hodnot jednoho z kanálů PMD zdroje.

Tabulka 4.6: Významné hodnoty měřeného kanálu PMD zdroje.

Parametr	Hodnota
Průměrná hodnota	5,53 ps
Směrodatná odchylka	0,053 ps
Maximální hodnota	5,320 ps
Minimální hodnota	5,601 ps

4.5 Měření reflektance a ORL metodou OTDR

Z důvodu použití sešikmených konektorů u všech komponent navržené PON sítě by dle očekávání neměla reflektance, resp. ORL, způsobovat problémy s přenosem. Tuto hypotézu je možné vyhodnotit z již existujících náměrů metody OTDR. Jak již bylo popsáno v kapitole [2.5.1](#), hodnotu diskrétní reflektance (tedy hodnota reflektance při určité události na trase) lze vypočítat jako

$$R = 10 \cdot \log_{10}(10^{H/5} - 1) + 10 \cdot \log_{10}(t) + B. \quad (4.1)$$

Použitý reflektometr EXFO FTB-720C ale poskytuje tuto hodnotu již při zobrazení reflektogramu, a není tak nutné ji manuálně počítat. Mimo

hodnotu diskretní reflektance umožňuje použitý reflektometr zobrazit i hodnotu ORL mezi libovolnými dvěma body na trase¹. Pro nalezení události s nejvýznamějším odrazem (nejvyšší hodnotou R) na trase byly srovnány hodnoty reflektancí všech událostí. Nejvýraznější odraz byl nalezen na konektorovém spojení mezi 10km vláknem a splitterem s dělicím poměrem 1:8 (viz obrázek 4.5a). Stanovení celkové hodnoty ORL je z důvodu rozdělení celé PON sítě na 2 různé trasy komplikovanější. Hodnota ORL v obou koncových bodech PON sítě se bude snižovat až do chvíle, kdy dojde k poklesu výkonu signálu z důvodu útlumu splitteru. Odraz způsobený komponentami za tímto splitterem již budou natolik utlumené, že se na intenzitě odraženého signálu neprojeví. Protože konektorové spojení splitteru s dělicím poměrem 1:16 a předřadného vlákna neprojevovalo významný odraz signálu, je možné konstatovat, že největší vliv na ORL bude mít úsek PON sítě složený z 10km vlákna a splitteru s dělicím poměrem 1:8. Tato hodnota ORL společně s hodnotou nejvýznamějšjí reflektance byla odečtena pro 10 provedených měření. Takto získané hodnoty jsou uvedeny v tabulce 4.7.

Tabulka 4.7: Naměřené hodnoty diskretní reflektance a celkvého ORL metodou OTDR.

Měření	Reflektance	ORL
1	-50,2	33,68
2	-50,9	33,7
3	-50,8	33,7
4	-50,4	33,69
5	-50,1	33,67
6	-50,4	33,69
7	-50,8	33,69
8	-51	33,68
9	-50,7	33,7
10	-50,6	33,7

¹V tomto kontextu tedy není ORL pouze opačnou hodnotou reflektance, nýbrž útlum odrazu celé trasy mezi dvěma vybranými body. V případě, kdy by byla celá síť zahrnuta v jednom náměru OTDR by pak těmito body byly začátek a konec trasy.

Kapitola 5

Stanovení limitů a nejistot měření

Po provedení všech měření je třeba stanovit jejich nejistoty. Takto vypočítané hodnoty společně s těmi měřenými by však samy o sobě neměly příliš vysokou vypovídající hodnotu, neboť by nebylo možné určit, zda jsou přípustné, či nikoliv. Proto jsou u modelové PON sítě nejprve stanoveny limity jednotlivých parametrů, se kterými jsou následně jednotlivé výsledky srovnávány. Limity jsou stanoveny pouze na vlnové délce 1550 nm, neboť na této vlnové délce probíhala všechna měření.

Nejistoty měření jsou vždy stanoveny pro celou modelovou PON a nikoliv pro jednotlivé části. Samotný výpočet by se však kromě měřených hodnot nikterak nelišil. Z důvodu největší významnosti měření vložného útlumu přímou metodou, jsou u nejistoty měření toho parametru uváděny i dílčí výsledky. Pro další výpočty jsou vždy uvedeny potřebné parametry, výrobcem poskytnuté informace a vypočtená hodnota rozšířené nejistoty daného měření.

5.1 Stanovení limitů parametrů modelové PON

Jako první je stanoven limit vložného útlumu jakožto nejvýznamnějšího parametru trasy. Pro demonstraci jsou pro trasu stanoveny limity oběma dříve zmíněnými přístupy (viz kapitola 3.2). Na celkový limit sítě mají vliv:

- Měrný útlum vláken
- Vložný útlum konektorových spojů
- Vložný útlum splitterů

Statistický přístup je založen na znalosti střední hodnoty a směrodatné odchylky. V ideálním případě bychom tyto hodnoty předem znali, a mohli je tak pouze dosadit do vzorce. V tomto případě však výrobce stanovuje pouze maximální hodnoty daných komponent, a tak je třeba tyto hodnoty pro modelovou PON stanovit. Směrodatná odchylka σ bude v tomto případě z důvodu omezeného počtu měřených hodnot nahrazena výběrovou směrodatnou odchylkou s . Standard pro vlákna ITU-T G.657.A2 [13] udává pro vlnovou délku 1550 nm maximální měrný útlum vlákna $A_{max_vlakno} = 0,3$ dB/km. Zbylé parametry je třeba určit z měření vložného útlumu metodou OTDR, kde

může být odečten útlum vláken bez vlivu koncových konektorových spojení. Ke stanovení průměrné hodnoty vložného útlumu a jeho výběrové směrodatné odchylky poslouží náměry trasy obsahující přibližně 10 km dlouhé vlákno. Pokud by byl měrný útlum počítán z kratších úseků vláken, byl by více zatížen nejistotou dané metody měření. K dispozici je tedy 10 měření, ze kterých byly odečteny hodnoty měrného útlumu A , tedy útlum měřeného vlákna vydělený jeho délkou. Tyto hodnoty jsou uvedeny v tabulce 5.1. Z těchto hodnot byla vypočtena střední hodnota μ_{vlakna} a výběrová směrodatná odchylka σ_{vlakna} . Je důležité zmínit, že pro vypočtení středních hodnot i výběrových směrodatných odchylek v decibelech je třeba hodnoty nejdříve převést z decibelů na procenta (vzorec 3.7) a následně zpět do decibelů (vzorec 3.8) pro průměr nebo 3.9) pro výběrovou směrodatnou odchylku).

Tabulka 5.1: Výpočet měrného útlumu vláken z měření OTDR.

Měření	Útlum (dB)	Délka trasy (m)	Měrný útlum A (dB/km)
1	1,896	10005,8	0,18949
2	1,895	10007,4	0,18936
3	1,895	10005,8	0,18939
4	1,895	10004,5	0,18941
5	1,895	10005,8	0,18939
6	1,895	10006,4	0,18938
7	1,893	10006,4	0,18918
8	1,895	10016	0,18920
9	1,893	10006,7	0,18917
10	1,893	10006,4	0,18918

$$\mu_{vlakna} = 0,1893 \text{ dB/km}$$

$$\sigma_{vlakna} = 1,2 \cdot 10^{-4} \text{ dB/km}$$

Pro konektorová spojení je výrobcem opět stanovena pouze maximální hodnota $IL_{max_conn} = 0,6$ dB. Průměrná hodnota vložného útlumu jednoho konektorového spojení a jeho výběrová směrodatná odchylka musí být opět vypočteny. Hodnoty v tabulce 4.2 v sobě obsahují z důvodu použití one-cord metody vliv obou koncových konektorových spojení. Díky tomu, že patch cordy použité při měření one-cord metodou mají stejné konektory jako jednotlivé komponenty sítě, je možné snadno vypočítat obě potřebné hodnoty. Z reflektogramů zahrnující 10 km dlouhé vlákno byla odečtena hodnota útlumu samotného 10km vlákna. Rozdíl hodnot útlumu naměřených přímo metodou one-cord pro 10km vlákno (směr A) a průměrné hodnoty útlumu vlákna 10km vlákna z reflektogramů (tabulka 5.1) potom udává útlum samotných konektorových spojení (dvou, nikoliv jednoho). Vydělením tohoto rozdílu dvěma získáme útlum jednoho konektorového spojení (hodnoty každého spojení jsou odlišné, a tak tímto dělením dochází ke snížení hodnoty výběrové směrodatné odchylky). Vypočítané hodnoty jsou uvedeny v tabulce

5.2. Z těchto 10 hodnot je, obdobně jako v případě parametrů měrného útlumu vláken, možné vypočítat střední hodnotu μ_{conn} a výběrovou směrodatnou odchylku.

Tabulka 5.2: Vypočítané hodnoty vložných útlumů jednotlivých konektorových spojení z tabulky 4.2.

Průměrný útlum 10km vlákna (OTDR): 1,895 dB		
Měření	Útlum 10km vlákna one-cord (dB)	Útlum konektorového spojení (dB)
1	2,35	0,23
2	2,47	0,29
3	2,31	0,21
4	2,45	0,28
5	2,36	0,23
6	2,39	0,25
7	2,42	0,26
8	2,47	0,29
9	2,56	0,33
10	2,46	0,28

$$\mu_{conn} = 0,26 \text{ dB}$$

$$s_{conn} = 0,037 \text{ dB}$$

Pro oba splittery jsou výrobcem stanoveny všechny potřebné parametry:

$$IL_{max_spl8} = 9,39 \text{ dB}$$

$$\mu_{spl8} = 9,31 \text{ dB}$$

$$\sigma_{spl8} = 0,052 \text{ dB}$$

$$IL_{max_spl16} = 12,73 \text{ dB}$$

$$\mu_{spl16} = 12,51 \text{ dB}$$

$$\sigma_{spl16} = 0,094 \text{ dB}$$

Se znalostí všech těchto hodnot je možné vypočítat limity vložného útlumu oběma zmiňovanými přístupy. Tento výpočet je proveden v tabulce 5.3. Uvedená hodnota v tabulce 2σ byla vypočtena v procentech a následně převedena do decibelů. Nelze ji počítat jako pouhý dvojnásobek hodnoty σ v decibelech.

Tabulka 5.3: Stanovení limitu vložného útlumu modelové PON dvěma přístupy pro vlnovou délku 1550 nm.

Hodnoty měrného útlumu vlákna			
max (dB/km)	mean (dB/km)	1σ (dB/km)	2σ (dB/km)
0,3	0,1893	$1,2 \cdot 10^{-4}$	$2,4 \cdot 10^{-4}$
Hodnoty vložného útlumu konektorového spojení			
max (dB)	mean (dB)	1σ (dB)	2σ (dB)
0,6	0,26	0,037	0,074
Hodnoty vložného útlumu splitteru 1:8			
max (dB)	mean (dB)	1σ (dB)	2σ (dB)
9,39	9,31	0,052	0,103
Hodnoty vložného útlumu splitteru 1:16			
max (dB)	mean (dB)	1σ (dB)	2σ (dB)
12,73	12,51	0,094	0,186
Přístup s maximálními hodnotami:			
$IL_{max} = 13,07 \cdot 0,3 + 6 \cdot 0,6 + 1 \cdot 9,39 + 1 \cdot 12,73 = \mathbf{29,6 \text{ dB}}$			
Statistický přístup:			
$IL_{stat} = 13,07 \cdot 0,1893 + \sqrt{13,07} \cdot 2,4 \cdot 10^{-4} + 6 \cdot 0,26 + \sqrt{6} \cdot 0,074 + 1 \cdot 9,31 + \sqrt{1} \cdot 0,103 + 1 \cdot 12,51 + \sqrt{1} \cdot 0,186 = \mathbf{26,3 \text{ dB}}$			

Rozdíl mezi limity jednotlivých přístupů pro vlnovou délku 1550 nm je 3,3 dB. Největší vliv na tomto rozdílu měl útlum konektorových spojení a měrný útlum vláken, jejichž střední hodnota se výrazně lišila od hodnoty maximální. Při započítání útlumu splitteru 1:8 došlo k jevu, kdy byla maximální hodnota útlumu komponenty nižší, než střední hodnota navýšená o 2σ . To je způsobeno malým rozdílem mezi maximální a průměrnou hodnotou a relativně velkou směrodatnou odchylkou. Výsledky obou přístupů jsou korektní, a lze je tedy použít k ověření, zda útlum způsobený touto trasou není příliš vysoký.

Limitní hodnoty parametrů chromatická disperze, PMD, celkového ORL a diskretní reflektance není možné takto obecně vypočítat. Obvykle jsou dány konkrétními standardy nebo samotnými poskytovateli připojení dle vlastních požadavků. Maximální hodnota chromatické disperze, PMD a diskretní reflektance byla stanovena dle standardu IEEE 802.3ae (standardizace 10GBASE-ER). Pro chromatickou disperzi společně a maximální DGD byly navíc stanoveny limity pro různé přenosové rychlosti OOK modulace. Standard ITU G.9807 popisující XGS-PON udává limit ORL a IL . Výpočet IL byl proveden za účelem názorně popsat proces stanovení jeho limitů.

Parametr pro daný standard	Hodnota	Jednotka
$CD_{max_10GBASE-ER}$ [40]	546	ps/nm
$CD_{max_OOK_10G}$ [41]	1176	ps/nm
$CD_{max_OOK_40G}$ [41]	73,5	ps/nm
$PMD_{max_10GBASE-ER}$ [40]	5,1	ps
$DGD_{max_OOK_100G}$ [51]	4	ps
ORL_{max} [32]	> 32	dB
R_{max} [40]	< -26	dB

Limitní hodnoty IL pro XGS-PON jsou uvedeny v tabulce 5.3. Naměřené hodnoty budou s těmi limitními srovnány v rámci kapitoly zhodnocení výsledků 6.

5.2 Výpočet nejistoty měření vložného útlumu přímou metodou

Pro výpočet nejistoty měření je třeba nejdříve kvantifikovat všechny faktory, které mají na měření veličiny vliv. Veškeré informace o nejistotách použitých měřicích přístrojů (laser CoBrite DX4 [52] a detektor THORLABS PM100D s Ge fotodiodou THORLABS S122C [53]), které výrobci pro vlnovou délku 1550 nm poskytli, jsou uvedeny v tabulce 5.4.

Tabulka 5.4: Výrobci stanovené nejistoty optických přístrojů použitých při měření útlumu přímou metodou.

Nejistoty zdroje optického záření	
Rozlišení	0,01 dB
Stabilita (1 hodina)	0,01 dB
Stabilita (24 hodin)	0,03 dB
Nejistoty detektoru	
Vnitřní nejistota	5 %
Rozlišení	2 nW
Linearita	0,5 %

Protože rozlišení zdroje optického záření znamená odchylku výkonu vyzařovaného světla od hodnoty na displeji přístroje, nezpůsobí v tomto měření chybu. Důvodem je fakt, že měření bylo provedeno najednou a tato odchylka byla tedy stejná jak při měření reference, tak i zbylých tras. Kdyby byl laser mezi jednotlivými měřeními vypínán, projevil by se tento parametr

ve výsledné nejistotě. Stabilita zdroje optického záření byla proměřena. Protože jsou optické přístroje nejvíce nelineární v prvních minutách spuštění, jsou měření prováděna až s určitým časovým odstupem pro potlačení této významné nelinearity. Ze stejného důvodu byla stabilita zdroje měřena, přičemž toto měření bylo spuštěno 30 minut po zapnutí laseru. Díky tomuto časovému odstupu došlo ke snížení tohoto zdroje nejistoty. Měření stability zdroje optického záření bylo měřeno stejným detektorem, který byl použit při měření vložného útlumu přímou metodou. Hodnota výkonu byla měřena každou vteřinu po dobu jedné hodiny. Z těchto dat byl vypočten průměr a následně výběrová směrodatná odchylka průměru neboli nejistota typu A $u_{source_A} = s_{\bar{x}} = 0,026$ dB. Jako nejistoty detektoru u_{det} byly použity hodnoty stanovené výrobcem. Oproti ukázkovému příkladu v kapitole 3.1 nebyla u zdroje optického záření zmíněna nejistota spojená s konektorovou stabilitou. Tuto nejistotu výrobce neudává, ale z důvodu permanentního zapojení jediného vlákna do zdroje lze tuto nejistotu zanedbat. Nejistotu rozlišení detektoru 2 nW je třeba přepočítat tak, aby byl parametr udáván v procentech či decibelech. K tomuto přepočtu je třeba znát hodnotu měřené veličiny. V případě měření celé trasy byla průměrná hodnota detekovaného výkonu -20,8 dBm. S její znalostí je nutné hodnotu nejdříve převést za pomoci vzorce (5.1) na watty a posléze touto hodnotou vydělit hodnotu udávané nejistoty (viz vzorec (5.2)).

$$P(W) = 10^{\frac{P(\text{dBm})-30}{10}} = 10^{\frac{-20,8-30}{10}} = 8,3 \cdot 10^{-6} \text{ W} \quad (5.1)$$

$$u_{det_roz} = \frac{2 \cdot 10^{-9}}{8,3 \cdot 10^{-6}} \cdot 100 = 0,024 \% \quad (5.2)$$

Polarizační závislost detektoru taktéž nebyla oproti příkladu udávána, její vliv by však na měřenou hodnotu neměl být dle předpokladů významný.

Nejistoty spojené s konektorovými spojeními měřené trasy u_{DUT_con} byly stanoveny jako výběrové směrodatné odchylky průměru měřených dat. Hodnoty $u_{DUT_conA} = 0,032$ dB a $u_{DUT_conB} = 0,038$ dB byly vypočteny pro oba dva směry modelové PON sítě. Ve výpočtu nejistoty měření je však vždy zahrnuta pouze jedna z nich. Obdobným způsobem byla získána i nejistota reference $u_{DUT_ref} = 0,0013$ dB, která byla vypočtena z 10 náměrů hodnoty reference (rozpojování a zapojování referenčního vlákna do detektoru) a nejistota konektorové stability detektoru $u_{det_con} = 0,0011$ dB (rozpojování a zapojování koncového patch cordu do detektoru). Nejistoty způsobené změnami polarizace budou v tomto případě zanedbány. Vliv konektorových spojení, který je v příkladném výpočtu nejistoty měření zmíněn, je zahrnut v hodnotě vypočtené u_{DUT_A} .

Všechny hodnoty nejistot uváděné v decibelech byly nejdříve přepočítány na procenta pomocí vzorce (3.7). S těmito hodnotami je nyní možné vypočítat kombinovanou standardní nejistotu měření u_C . Celý výpočet je proveden v tabulce 5.5, přičemž jednotlivé kroky provedené v této tabulce jsou detailněji vysvětleny v kapitole 3.1

Tabulka 5.5: Výpočet standardní nejistoty pro měření útlumu one-cord metodou.

Zdroj nejistoty	Rozložení	Hodnota	Dělitel D	Standardní nejistota u
Laser CoBrite DX4				
Stabilita	Norm.	6,0E-3	1	6,0E-3
Detektor THORLABS PM100D s hlavicí THORLABS S122C				
Rozlišení	Rovn.	2,4E-4	1,7321	1,4E-4
Linearita	Norm.	5,0E-3	2	2,5E-3
Konektorová stabilita	Norm.	2,5E-4	2	1,3E-4
Měřená PON síť				
Konektorová spojení	Norm.	7,4E-3	1	7,4E-3
Reference	Norm.	2,99E-4	1	2,99E-4
Kombinovaná nejistota				
Standardní kombinovaná nejistota měření u_C				0,00986
Rozšířená nejistota měření U ($k = 2$)				0,0197

Vypočítanou rozšířenou nejistotu měření $U_A = 1,97\%$ je možné převést do logaritmického měřítka dle vzorce 3.8. Díky tomu získáme hodnotu $U_A = 0,085$ dB. Výpočet byl proveden pro trasu měřenou ve směru (A). Pokud by byla nejistota počítána pro opačný směr (B), vyšla by rozšířená nejistota měření vložného útlumu one-cord metodou $U_B = 2,19\%$ nebo $U_B = 0,094$ dB.

5.3 Nejistoty měření délky metodou OTDR

Z datasheetu měřicího přístroje EXFO FTB-720C [54] vyplývá, že je výsledná nejistota dána jako suma různých faktorů, nikoliv jako suma kvadrátů ve vzorci akumulace nejistot (vzorec 3.10). Těmito faktory může být nelinearita detektoru, změny teploty, rozlišení vzorkování nebo typu vlákna. K těmto faktorům musí být započtena i výběrová směrodatná odchylka průměru (SEM) daného měření. Protože byla modelová PON síť měřena jako 2 části, je třeba vypočítat nejistotu měření každé této části a následně je vhodným způsobem sloučit. Sloučení je provedeno podle vzorce pro akumulaci nejistot. V tabulce 5.6 jsou uvedeny parametry použité k výpočtu nejistoty měření, jež byly stanoveny nebo odečteny z měřených dat (tabulka 4.1).

Hodnoty rozšířené nejistoty ($k=2$) byly stanoveny jako $U_1 = 4,93$ m pro delší trasu a $U_2 = 0,75$ m pro kratší trasu. Nejistota měření metodou OTDR pro celou PON síť pak lze vypočítat buď z kombinovaných nejistot u_C nebo přímo z rozšířených nejistot jako

$$U = 2 \cdot \sqrt{u_{C1}^2 + u_{C2}^2} = \sqrt{U_1^2 + U_2^2} = 4,98 \text{ m.} \quad (5.3)$$

Tabulka 5.6: Parametry měření OTDR použité k výpočtu nejistoty měření.

10 km + splitter 1:8 + 56 m	
Typ vlákna	G.657.A
Průměr délky trasy	10065,7 m
SEM délky trasy	2,46 m
Rozlišení vzorkování	0,32 m
splitter 1:16 + 3 km	
Typ vlákna	G.657.A
Průměr délky trasy	3005,5 m
SEM délky trasy	0,37 m
Rozlišení vzorkování	0,16 m

5.4 Nejistoty měření chromatické disperze

Nejistoty spojené s měřením chromatické disperze mohou být způsobeny nepřesnými měřeními vlnové délky, opakovností měření, teplotní závislostí, délce použitých vláken a jejich typu. Konkrétní hodnoty jsou uvedeny v data-sheetu analyzátoru chromatické disperze FTB-5800 [55]. Parametry použité pro výpočet nejistoty měření chromatické disperze, včetně vypočtené SEM, jsou uvedeny v tabulce 5.7. Pro vlnovou délku 1550 nm vyšla rozšířená nejistota měření ($k = 2$) chromatické disperze $U = 3,2$ ps/nm.

Tabulka 5.7: Parametry měření chromatické disperze použité k výpočtu nejistoty měření.

Typ vlákna	G.657.A
Délka trasy	13071,2 m
Průměr chromatické disperze	221,09 ps/nm
SEM chromatické disperze	0,084 ps/nm

5.5 Nejistoty měření PMD

U analyzátoru PMD FTB-5500 [55] jsou informace o výpočtu nejistoty měření PMD ještě omezenější. Výrobce uvádí pouze dvě hodnoty, jejichž součet tvoří nejistotu měření. Stanovuje hodnotu 0,02 ps, která nejspíš souvisí s velikostí autokorelačního peaku GINTY metody, a 2 % z měřené hodnoty. Tyto dvě hodnoty však zahrnují velké množství faktorů, jako je teplota, rozdělení, typ použitého vlákna, nejistotu konektoru, atd. Pokud by tyto nejistoty byly

výrobce detailněji popsány, bylo by možné určit měřenou hodnotu s menší nejistotou. Výpočet opět typicky zahrnuje variabilitu střední hodnoty ve formě SEM. Tabulka 5.8 obsahuje všechny použité parametry pro výpočet nejistoty měření PMD GINTY metodou. Rozšířená nejistota měření ($k = 2$) vyšla $U = 0,04$ ps.

Tabulka 5.8: Parametry měření PMD použité k výpočtu nejistoty měření.

Typ vlákna	G.657.A
Délka trasy	13071,2 m
Průměr PMD	0,164 ps
SEM PMD	0,008 ps

5.6 Nejistoty měření reflektance a ORL

Nejméně informací výrobce udává pro měření reflektance, resp. ORL. V datasheetu [54] je zmíněna pouze typická hodnota nejistoty měření reflektance ± 2 dB. K této hodnotě je opět nutné přidat výběrovou směrodatnou odchylku průměru získanou z reflektogramů. Výrobce neudává žádné údaje k nejistotě ORL, ale lze předpokládat, že její hodnota bude velice podobná hodnotě nejistoty měření reflektance. Z 10 náměrů byla vypočtena střední hodnota $ORL_{mean} = -33,69$ dB. Pro výpočet rozšířené nejistoty byly použity pouze hodnoty průměrné reflektance $R_{mean} = -50,58$ dB a vypočítaného SEM = 0,096 dB. Vypočítaná rozšířená nejistota měření ($k = 2$) je $U = 2,2$ dB.

Kapitola 6

Zhodnocení výsledků

V kapitolách 4 a 5 byly naměřeny a vypočteny všechny potřebné hodnoty pro jejich jejich vyhodnocení. Pro lepší přehlednost jsou v tabulce 6.1 uvedeny průměrné hodnoty všech měřených parametrů doplněné o hodnoty nejistot měření s koeficientem rozšíření $k = 2$.

Tabulka 6.1: Výsledné hodnoty měření všech parametrů ($\lambda = 1550$ nm) včetně nejistot měření.

Parametr	Aritmetický průměr $\pm U$
Vložný útlum - směr A	(26,62 \pm 0,085) dB
Vložný útlum - směr B	(26,72 \pm 0,094) dB
Délka trasy	(13071,2 \pm 4,98) m
Chromatická disperze	(221,09 \pm 3,2) ps/nm
PMD	(0,164 \pm 0,04) ps
Reflektance	(-50,58 \pm 2,2) dB
ORL	(33,69 \pm 2,2) dB

Na měření vložného útlumu přímou metodou one-cord byl z důvodu jeho největší významnosti kladen největší důraz. Měřeny byly oba směry modelové PON sítě a navíc i jednotlivé komponenty separátně pro názornost vlivu jednotlivých komponent na celkové hodnotě vložného útlumu. V rámci stanovení nejistoty měření této metody hrála největší roli konektorová spojení, jejichž rozpojování a následné zapojování variovalo měřenou hodnotu nejvíce. Roli v tomto případě mohl hrát i fakt, že mezi jednotlivými měřeními došlo k mírnému poškození koncových konektorů. Toto poškození bylo nejspíš způsobeno nedostatečným vyčištěním konektoru před jeho opětovným zapojením, kvůli čemuž mohla nečistota vlákno poškrábat. K tomuto nedopatření zřejmě došlo v důsledku nepozornosti, neboť některá konektorová spojení byla rozpojena a následně spojena více než 100 krát. Daný konektorový spoj nebyl v průběhu měření vyleštěn (tj. nedošlo k odstranění škrábanců), protože jeho stav neovlivňoval stanovené cíle práce. Druhým nejvýznamnějším faktorem při měření vložného útlumu byla linearita detektoru. Pokud by byla rozšířená nejistota měření počítána pouze z těchto dvou faktorů, došlo by k zanedbatelné změně

výsledné hodnoty (změna řádu 10^{-4} dB). Při výpočtu nejistoty měření této metody byly potlačeny dva důležité faktory, které by měly na výslednou hodnotu nejistoty zásadní vliv. Proměnlivá teplota v místech měřicích přístrojů nebo testované trasy může silně ovlivnit hodnotu útlumu. V případě laboratorního měření, kdy byla teplota v místnosti konstantních $24\text{ }^{\circ}\text{C}$, je možné její vliv zanedbat. V běžných podmínkách je však nutné její vliv na komponenty, nejlépe dlouhodobým měřením, zohlednit. Dalším významným faktorem, který byl při měření potlačen je vnitřní nejistota Ge detektoru $u_{in} = 5\%$ (tj. přibližně $0,21\text{ dB}$). Tuto nejistotu bylo z důvodu použití one-cord metody, tedy metody využívající nejdříve referenční měření, se kterým jsou další měření srovnávány, zanedbat. Kdyby však nebyla hodnota měřena relativně vůči referenci, nýbrž přímo jako absolutní hodnota detekovaného výkonu (již by se nejednalo o měření vložného útlumu, nýbrž optického výkonu), musela by být do výpočtu nejistoty měření zahrnuta. Pokud by tento zdroj nejistoty byl započítán do kombinované nejistoty modelové sítě, vyšla by rozšířená nejistota $U_A = 0,22\text{ dB}$, resp. $U_B = 0,23\text{ dB}$. Jedná se tedy o významný faktor, na jehož zanedbání nesmí být opomenuto.

V rámci předešlé kapitoly byly zároveň stanoveny i limitní hodnoty. Pokud sečteme výsledky měření vložného útlumu s nejistotami, získáme hodnoty $U_{ILA} = 26,71\text{ dB}$ a $U_{ILB} = 26,81\text{ dB}$. Porovnáním s hodnotou limitu stanovenou přístupem součtu maximálních hodnot lze říci, že hodnoty limitu pro oba směry vyhovují s pravděpodobností vyšší než $97,5\%$ ¹, protože je mezi hodnotami rezerva větší než $2,5\text{ dB}$. Pokud však tyto hodnoty porovnáme s limitem statistického přístupu, limit je přesažen. Tento výsledek nemusí nutně znamenat, že síť není v pořádku. Chyba může být způsobena například nedostatečným množstvím vzorků pro stanovení statistických hodnot jednotlivých komponent trasy v tabulce 5.3, nepřesnými měřeními těchto vzorků nebo odlišností jednotlivých komponent. Ověření by bylo možné provést pomocí three-cord přímé metody, která nezahrnuje vliv koncových konektorových spojení. V porovnání s limity stanovenými standardem ITU-T G.9807 [32] (viz. tabulka 2.1) jsou měřené hodnoty vyhovující a mohly by tak být z tohoto hlediska použity jako síť XGS-PON. Z hlediska vložného útlumu by testovací síť bylo možné použít i pro standard NG-PON2 [56] s přenosovými rychlostmi 40 Gb/s symetricky, neboť jsou limity tohoto standardu shodné s limity XGS-PON. Pokud je měření vložného útlumu provedeno precizně a hodnota měřeného vložného útlumu je vyšší než jednotky decibel, vliv nejistoty na celkovou hodnotu měření bude velmi malý.

Pro data z reflektometru je velice obtížné určit hlavní zdroje nejistot. Důvodem je nedostatek informací v datasheetu použitého přístroje. Mezi nejvýznamnější faktory ovlivňující měření délky metodou OTDR nejspíše patří délka pulzu, která zvětšuje délku událostí na trase (viz rozdíl mezi obrázky 4.3 - $2,5\text{ }\mu\text{s}$ a 4.5a - 275 ns), rozlišení vzorkování, nepřesné nastavení markerů, či, v běžných podmínkách, vlivy prostředí (teplota, vlhkost). Nejistota navíc může být nepřesně určena z důvodu kombinace nejistot měření dvou dílčích

¹Jedná se o přibližně $97,5\%$ namísto 95% , protože není limit normálního rozdělení stanoven z obou stran, nýbrž pouze z jedné.

tras namísto jedné. Pokud by však nedošlo k náměru dílčích částí PON sítě, nebylo by možné metodu pro stanovení délky trasy použít. Statistická významnost měření by byla zvýšena provedením měření i z opačné strany a následným zahrnutím těchto hodnot do výpočtu. I přes to, že by mohla měření z opačné strany vlákna hodnotu nejistoty změnit, tvoří momentální hodnota nejistoty pouze přibližně 0,04 % měřené hodnoty délky. Jedná se tedy o velice malou relativní nejistotu a její případná mírná změna by ve výsledku neměla velký vliv.

Nepřesnosti měření chromatické disperze dle výrobce měřicího zařízení nejvíce závisí na délce měřené trasy. Datasheet ale obsahuje informace o velikosti nejistoty měření pro pásma C+L pouze pro 2 délky vlákna 20 a 120 km. Hodnoty pro ostatní délky vlákna pak záleží na interpretaci. Stanovenou nejistotu chromatické disperze pak z velké části ovlivňuje i nepřesné interní měření vlnové délky a nejistota spojená s konektorovými spojeními. I přes to, že na rozdíl od ostatních parametrů není chromatická disperze příliš náchylná na teplotu [57], bylo by v běžném prostředí nutné vliv teplotních změn zahrnout. Srovnáním průměrné naměřené hodnoty doplněné o nejistotu měření ($221,09 \pm 3,2$) ps/nm s limitní hodnotou 546 ps/nm zjistíme, že síť limitům vyhovuje s pravděpodobností 97,5 % (lze konstatovat, že pravděpodobnost se z důvodu velkého rozdílu průměrné měřené a limitní hodnoty blíží 100 %). Tato limitní hodnota je však stanovena standardem IEEE 802.3ae [40] pro P2P spoj s přenosovými rychlostmi shodnými s XGS-PON o délce typicky 30 km. Z toho důvodu nelze ze srovnání hodnot vyvozovat závěry, neboť hodnota chromatické disperze je přímo úměrná délce vlákna. Pokud bychom uvažovali lineární závislost hodnoty chromatické disperze na délce trasy uvnitř testovací PON a nastavili tak délku trasy na 30 km, obdrželi bychom hodnotu chromatické disperze ($507,48 \pm U$) ps/nm (závislost U nelze považovat za lineární na délce trasy). S jistotou lze říci, že i když neznáme přesnou hodnotu U , splňovala by trasa limity tohoto standardu. Vypočítaná hodnota chromatické disperze sítě taktéž vyhovuje i běžnému modulačnímu standardu OOK [41] s tolerancí 1176 ps/nm pro přenosovou rychlost 10 Gb/s (stanoveno pro vlákna G.652). Hodnotě 73,5 ps/nm pro přenosovou rychlost 40 Gb/s však již nevyhovuje. Nejistota metody je ale vždy relativně malá vůči měřené hodnotě, a příliš tak neovlivní verdikt, zda síť limitům vyhovuje či nikoliv.

U měření PMD je při měření nízkých hodnot primární zdroj nejistoty měření zřejmý. I přes to, že GINTY metoda umožňuje měřit díky užší autokorelační špičce nižší hodnoty PMD než TINTY metoda, hraje šířka autokorelační špičky významnou roli v určování nejistoty. Velký vliv na hodnotě nejistoty mají i změny polarizace záření z důvodu ohýbání a natáčení připojovacích patch cordů. Z tohoto důvodu je vždy výhodné měřit hodnotu PMD s co nejkratšími patch cordy. Jak je vidět na výsledcích PMD zdroje (obrázek 4.8), na měřených hodnotách se taktéž projeví i vnější vlivy. Na hodnoty měly nejpravděpodobněji vliv vibrace přenášené do měřené trasy i měřicích přístrojů a proměnlivá teplota v oblasti měření z důvodu přítomnosti osob. Lze předpokládat, že v běžných podmínkách budou výkyvy z důvodu větších

teplotních změn i silnějších vibrací ještě výraznější. Tyto faktory je třeba v případě reálné sítě dlouhodobým měřením kvantifikovat a vyhodnotit. Stejně jako u chromatické disperze nejsou standardy PON sítě stanoveny limitní hodnoty. Pro případ 10 gigabitového P2P spoje je limitní hodnota 5,2 ps, což je přibližně 30násobek průměrné měřené hodnoty navržené sítě doplněné o nejistotu měření. Pro modulace OOK NRZ je stanovena tolerance maximálního DGD na 4 ps [51] pro přenosovou rychlost 100 Gb/s. PMD lze na hodnotu maximálního DGD snadno přepočítat jako $DGD_{MAX} = 3PMD$ pro sítě standardu ITU SDH [44] se spolehlivostí 99,9954 %, kdy hodnota DGD nevyhovuje přibližně 25 minut v roce), nebo $DGD_{MAX} = 3,73PMD$ pro ethernetové sítě standardu IEEE se spolehlivostí 99,999987 %, kdy hodnota DGD nevyhovuje přibližně 30 sekund v roce).

Nejistotu reflektance, potažmo ORL, je z kvůli nedostatečnému popisu výrobce velice obtížné popsát. Největší vliv na hodnotu nejistoty budou nejspíše mít rozlišení vzorkování, nepřesné nastavení markerů (nemusí být korektně umístěny markery stanovující lineární část před měřenou událostí) a vliv koncových konektorových spojení. Dalšími vlivy pak mohou být teplota a vlhkost prostředí, či polarizační závislost detektoru. Jako nejvýznamnější bod na trase z hlediska diskretní reflektance byl označen splitter s dělícím poměrem 1:8. Oblast na trase před tímto splitterem, tedy 10km vlákno společně s tímto splitterem určovala hodnotu celkového ORL trasy. Oblast za splitterem již hodnotu ORL nenavýšovala z důvodu velkého vložného útlumu samotného splitteru. Limity reflektance nejsou stejně jako u předchozích parametrů u PON sítě stanoveny. Pro P2P spoj je dle standardu ITU-T G.9807 [32] limitní hodnota $R = -26$ dB. Důvodem velkého rozdílu mezi limitní a měřenou hodnotou reflektance bude patrně použití PC, resp. APC, konektorů. Limitní hodnota ORL = 32 dB, stanovená přímo standardem pro XGS-PON je daleko striktnější. Odečtením nejistoty měření ORL, která byla stanovena jako nejistota reflektance, od průměrné měřené hodnoty získáme ORL = 31,49 dB. Protože tato hodnota není vyšší než hodnota limitní, nelze přibližně s 97,5 % pravděpodobností stanovit, že síť limitu vyhovuje. Pokud bychom však uvažovali nerozšířenou nejistotu ($k = 1$), získali bychom hodnotu ORL = 32,59 dB, která se již v mezích nachází a lze tak s 84 % pravděpodobností² stanovit, že taková hodnota limitu vyhovuje.

I přes to, že byly nejistoty stanoveny v souladu se všemi použitými data-sheety a normami zabývajícími se stanovením nejistot, nelze říci, že je jejich stanovení jednoznačné. I když by se mělo jednat o standardizovaný postup, záleží na přístupu daného člověka, jak k nejistotám jednotlivých přenosových parametrů přistoupí. V rámci této práce bylo z důvodu velké časové náročnosti snížen počet měření pro vyhodnocení nejistot. Za předpokladu dostatečného množství času by bylo vhodné zohlednit opačný směr přenosu pro všechny měřené parametry. Dále stojí za zmínku konstantní teplota v celé oblasti měření. Ta se týkala všech měření a bylo ji tak možné z výpočtů vynechat. Pokud by teplota byla proměnlivá, bylo by třeba vyhodnotit její

²Jedná se o přibližně 84 % namísto 68 %, protože není limit normálního rozdělení stanoven z obou stran, nýbrž pouze z jedné.

vliv na měřenou veličinu dlouhodobým měřením. Z těchto dat by následně byla vypočtena výběrová směrodatná odchylka průměru, která by byla standardně započtena do kombinované nejistoty. Za zmínku stojí fakt, že všechny nejistoty byly počítány jako výběrové směrodatné odchylky průměru, neboť všechna měřená data byla udávána jako průměr výběru. Pokud bychom chtěli stanovit nejistoty jednoho libovolného náměru, byla by nejistota počítána jako směrodatná odchylka.

Kapitola 7

Závěr

Práce byla zaměřena na stanovení nejistot měření různých přenosových parametrů v optických sítích 5G a VHCN. Nejprve byly popsány struktury sítí 5G a VHCN, jejich parametry a termíny s nimi spojené. Pro tyto sítě byla nalezena vhodná varianta síťového připojení ve formě pasivní optické sítě (PON), díky které nemusí být každý koncový uživatel spojen s jádrem sítě P2P spojen. Byly vyjmenovány různé standardy PON sítí, jejich principy a přenosové rychlosti. Dále byly detailně vysvětleny nejvýznamnější přenosové parametry v optických sítích. Těmi jsou délka trasy, útlum trasy, chromatická disperze, polarizační vidová disperze, útlum odrazu a reflektance. U každého parametru byla objasněna jeho podstata a určena jeho limitní hodnota dle určitého přenosového standardu. Navíc byly u každého parametru vyjmenovány různé metody měření a objasněny jejich principy. Následně byly vysvětleny pojmy potřebné k pochopení principu stanovení nejistoty měření jako jsou statistické rozdělení, výběrová směrodatná odchylka průměru nebo interval spolehlivosti. Byl proveden názorný výpočet nejistoty měření vložného útlumu přímou metodou, ve kterém byly zdůrazněny všechny důležité kroky. Také byl proveden i vzorový výpočet limitu vložného útlumu sítě použitím dvou odlišných přístupů, aby v případě absence limitních hodnot bylo možné z naměření vyhodnotit, zda je měřená síť v pořádku, či nikoliv.

V rámci hlavního cíle práce byla sestavena testovací síť, jež odpovídala požadavkům VHCN. Testovací síť byla PON, která se skládala ze 3 úseků optických vláken G.657.A2 a 2 splitterů s dělicími poměry 1:8 a 1:16. Síť byla sestavena tak, aby odpovídala běžně používaným PON telekomunikačním operátorů. Na testovací síti pak byly na vlnové délce 1550 nm měřeny všechny výše uvedené přenosové parametry vybranými metodami. Každé měření bylo provedeno vícekrát tak, aby bylo možné z naměření korektně určit statistické hodnoty potřebné pro výpočet nejistoty. Poté byly pro testovací síť stanoveny limitní hodnoty a vypočteny nejistoty měření jednotlivých parametrů.

V závěru byly všechny významné hodnoty shrnuty v přehledné tabulce 6.1. Napříč měřeními všech parametrů měla velký vliv variabilita způsobena rozpojováním a následným připojováním konektorových spojení. V případě měření vložného útlumu přímou metodou měla navíc velký vliv i nelinearita detektoru. Zdůrazněn byl fakt, že při vyhodnocení nejistoty měření útlumu je třeba zanedbat vnitřní nejistotu detektoru, která by v opačném případě

měla dominantní vliv na výsledky měření. Pro měření parametrů délky trasy, reflektance a ORL metodou OTDR byly informace poskytnuté výrobcem měřicího zařízení velice omezené. Lze však předpokládat, že největší vliv rozlišení vzorkování a nepřesné nastavení markerů v reflektogramech. Nejistota chromatické disperze je z velké míry, kromě variability konektorových spojení, ovlivněna nepřesným interním měřením vlnové délky. Polarizační vidová disperze, měřená metodou GINTY, je pak při měření nižších hodnot (< 1 ps) nejvíce ovlivněna vlastní autokorelační špičkou. V případě použití delších patch cordů (více než cca 1 m), propojující měřenou trasu s měřicími přístroji, může mít jejich ohýbání a kroucení dominantní vliv na velikost nejistoty měření PMD z důvodu změn polarizace v těchto patch cordech. Parametr PMD je navíc, jak bylo znázorněno na výsledcích měření zdroje PMD (obrázek 4.8), velice náchylný na vnější vlivy jako jsou vibrace či změny teploty. U reálné sítě je výrazně doporučeno tyto vlivy z dlouhodobého měření kvantifikovat. Stejným způsobem je třeba vyhodnotit i teplotní vliv na ostatní parametry, který byl v rámci této práce z důvodu konstantní teploty v laboratoři zanedbán. Data jednotlivých měření byla na závěr srovnána s různými limity přenosových standardů. Z dat plyne, že by testovací síť nespĺňovala limity standardu 10 Gb/s symetrické XGS-PON z důvodu příliš vysokého ORL. Ostatní parametry limitní hodnoty XGS-PON splňovaly.

V závěru práce je třeba zmínit, že data poskytnutá výrobcem i normami, zabývající se nejistotami měření, nejsou jednotně interpretovatelná. Informace v datasheetech optických měřicích přístrojů jsou omezené a záleží tak na každém člověku, který nejistoty vyhodnocuje, jak přesně nejistoty stanoví. V každém případě je však třeba obsáhnout při výpočtech nejistot měření jednotlivých parametrů faktory, jenž mají na nejistotu největší vliv (typicky vliv koncových konektorových spojení, teploty a nejvýznamnějších zdrojů nejistot měřicích přístrojů).



Literatura

- [1] J. Ballato and P. Dragic, "Glass: The Carrier of Light - A Brief History of Optical Fiber," *International Journal of Applied Glass Science*, vol. 7, no. 4, Oct., pp. 413–422, 2016.
- [2] Qualcomm, "Everything You Need to Know About 5G," *Qualcomm*, Jul. 25, 2017. [Online]. Available: <https://www.qualcomm.com/5g/what-is-5g>. [Accessed Dec. 13, 2023].
- [3] G. Santella and F. Vatalaro, "An approach to define Very High Capacity Networks with improved quality at an affordable cost," *2020 Global Information Infrastructure and Networking Symposium (GIIS)*, Tunis, Tunisia, Oct. 2020, pp. 1-6.
- [4] Evropský parlament a Rada (EU), SMĚRNICE EVROPSKÉHO PARLAMENTU A RADY (EU) 2018/1972, Dec. 2018.
- [5] BEREC, "BEREC Guidelines on Very High Capacity Networks (2023)," *BEREC, BoR (23) 164*, 2023. [Online]. Available: <https://www.berec.europa.eu/en/document-categories/berec/regulatory-best-practices/guidelines/berec-guidelines-on-very-high-capacity-networks-2023>. [Accessed: Dec. 13, 2023].
- [6] Telecommunication Standardization Sector of ITU, Recommendation G.Sup66, *5G wireless fronthaul requirements in a passive optical network context*, Sep. 2020.
- [7] Telecommunication Standardization Sector of ITU, Recommendation ITU-T Y.1540, *Internet protocol data communication service - IP packet transfer and availability performance parameters*, Dec. 2019.
- [8] G. Almes, S. Kalidindi and M. Zekauskas, RFC 2681, *Round-trip for Delay Metric for IPPM*, Network Working Group. Sep. 1999.
- [9] C. Demichelis and P. Chimento, RFC 3393, *IP Packet Delay Variation Metric for IP Performance Metrics (IPPM)*, Network Working Group, Nov. 2002.

- [10] J.R. Stern, J.W. Ballance, D.W. Faulkner, S. Hornung, D.B. Payne and K. Oakley, "Passive optical local networks for telephony applications and beyond," *Electronics Letters*, vol. 23, no. 24, Nov., pp. 1255 – 1256, 1987.
- [11] Cisco, "What Is Passive Optical Networking (PON)?," *Cisco*, [Online]. Available: <https://www.cisco.com/c/en/us/products/switches/what-is-passive-optical-networking.html>. [Accessed Dec. 13, 2023].
- [12] Telecommunication Standardization Sector of ITU, Recommendation ITU-T G.652, *Characteristics of a single-mode optical fibre and cable*, Oct. 2016.
- [13] Telecommunication Standardization Sector of ITU, Recommendation ITU-T G.657, *Characteristics of a bending-loss insensitive single-mode optical fibre and cable*, Oct. 2016.
- [14] C. n Chethi, "Information about PLC Splitter," *Medium*, Oct. 26, 2017. [Online]. Available: <https://medium.com/@chetankumar.nv/information-about-plc-splitter-978bacd14db7>. [Accessed May 8, 2023].
- [15] UnitekFiber Solution, "What is the Difference Between G657 and G652 Optical Fibers," *UnitekFiber Solution*, [Online]. Available: <https://www.unitekfiber.com/what-is-the-difference-between-g657-and-g652-optical-fibers.html>. [Accessed Dec. 14, 2023].
- [16] Telecommunication Standardization Sector of ITU, Recommendation ITU-T G.984.1, *Gigabit-capable passive optical networks (GPON): General characteristics*, May 2008.
- [17] Telecommunication Standardization Sector of ITU, Recommendation ITU-T G.983.1, *Broadband optical access systems based on Passive Optical Networks (PON)*, Jan. 2005.
- [18] Telecommunication Standardization Sector of ITU, Recommendation ITU-T G.983.1, *a broadband optical access system with increased service capability by wavelength allocation*, Mar. 2001.
- [19] IEEE Computer Society, IEEE 802.3ah-2004, *IEEE Standard for Information technology– Local and metropolitan area networks– Part 3: CSMA/CD Access Method and Physical Layer Specifications Amendment: Media Access Control Parameters, Physical Layers, and Management Parameters for Subscriber Access Networks*, Jun. 2004.
- [20] IEEE Computer Society, IEEE 802.3av-2009, *IEEE Standard for Information technology– Local and metropolitan area networks– Specific requirements– Part 3: CSMA/CD Access Method and Physical Layer Specifications Amendment 1: Physical Layer Specifications and Management Parameters for 10 Gb/s Passive Optical Networks*, Oct. 2009.

- [21] Telecommunication Standardization Sector of ITU, Recommendation ITU-T G.987.1, *10-Gigabit-capable passive optical networks (XG-PON): General requirements*, Mar. 2016.
- [22] Telecommunication Standardization Sector of ITU, Recommendation ITU-T G.989.1, *40-Gigabit-capable passive optical networks (NG-PON2): General requirements*, Mar. 2013.
- [23] Telecommunication Standardization Sector of ITU, Recommendation ITU-T G.9804.3, *50-Gigabit-capable passive optical networks (50G-PON): Physical media dependent (PMD) layer specification*, Sep. 2021.
- [24] IEEE Computer Society, IEEE 802.3ca-2020, *IEEE Standard for Ethernet Amendment 9: Physical Layer Specifications and Management Parameters for 25 Gb/s and 50 Gb/s Passive Optical Networks*, Jun. 2020.
- [25] Telecommunication Standardization Sector of ITU, ITU-T Q2/SG15, *ITU-T PON standards - progress and recent activities*, Sep. 2020.
- [26] "Time Division Multiplexing Working and Importance", *Spiceworks*, [Online]. Available: <https://www.spiceworks.com/tech/networking/articles/what-is-tdm/>. [Accessed May 5, 2023].
- [27] Telecommunication Standardization Sector of ITU, Recommendation ITU-T G.694.2, *Spectral grids for WDM applications: CWDM wavelength grid*, Dec. 2003.
- [28] Telecommunication Standardization Sector of ITU, Recommendation ITU-T G.694.1, *Spectral grids for WDM applications: DWDM frequency grid*, Oct. 2020.
- [29] J. Brouček (2019). Zvyšování kapacity PON sítě – otevřená cesta pro upgrade [PowerPoint slides]. Available: https://www.profiber.eu/files/prednasky/2019/KKTS_2019/Broucek_PON_KKTS_v2.pdf.
- [30] P. Torres-Ferrera, H. Wang, V. Ferrero, R. Mercinelli and R. Gaudino, "Towards 50 Gb/s in High-Speed PON: Optimization of Modulation Formats Using Pre-Chirping," *2018 20th International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON)*, Bucharest, Romania, 2018, pp. 1-4, doi: 10.1109/ICTON.2018.8473857.
- [31] J. Brouček (2024). Rychlé připojení FTTH!? [PowerPoint slides]. Available: https://www.profiber.eu/files/akcie/2024/Site_FTTH/Sbornik/A-02_Rychle_FTTH_v1.pdf.
- [32] Telecommunication Standardization Sector of ITU, Recommendation ITU-T G.9807.1, *10-Gigabit capable symmetric passive optical network (XGS-PON)*, Feb. 2023.

- [33] Telecommunication Standardization Sector of ITU, Recommendation ITU-T G.652, *Characteristics of a single-mode optical fibre and cable*, Oct. 2009.
- [34] Qualcomm, "Everything You Need to Know About 5G," *Qualcomm*, Jul. 25, 2017. [Online]. <https://www.qualcomm.com/5g/what-is-5g>. [Accessed Dec. 13, 2023].
- B. Clesca, "Fiber Loss," *OpticalCloudInfra*, Apr. 17, 2017. [Online] Available: <https://opticalcloudinfra.com/index.php/2017/04/17/low-can-fiber-loss-go/>. [Accessed May 8, 2024].
- [35] PhysicsOpenLab, "Light Scattering," *PhysicsOpenLab* Jul. 10, 2019. [Online] Available: <https://physicsopenlab.org/2019/07/10/light-scattering/>. [Accessed Dec. 14, 2023].
- [36] ÚŘAD pro TECHNICKOU NORMALIZACI, METROLOGII a STÁTNÍ ZKUŠEBNICTVÍ [ÚNMZ], ČSN EN 61280-4-2, *Postupy zkoušek optického vláknového komunikačního subsystému - Část 4-2: Instalované kabelová trasa - Měření útlumu a útlumu odrazu jednovidových vláken*, ed. 2, Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, Mar. 2015.
- [37] R. Hui and M. O'Sullivan, *Fiber-Optic Measurement Techniques*, Academic Press, 2009, ISBN 978-0-12-373865-3.
- [38] L. Čepa et al., "Porovnání metod kompenzace chromatické disperze u klasického optického jednovidového vlákna," <http://access.feld.cvut.cz/>. phpRS, 2010. [Online]. Available: <http://access.feld.cvut.cz/view.php?nazevclanku=porovnani-metod-kompenzace-chromaticke-disperze-u-klasickeho-optickeho-jednovidoveho-vlakna&cislocclanku=2010020001>. [Accessed Dec. 15, 2023].
- [39] M. R. Wilder, "Understanding and measuring chromatic dispersion," *Fiber Optics*, VertMarkets, Inc., 2000. [Online]. Available: <https://www.fiberopticonline.com/doc/understanding-and-measuring-chromatic-dispers-0002>. [Accessed Dec. 15, 2023].
- [40] IEEE Computer Society, IEEE 802.3ae-2002, *IEEE Standard for Information technology - Local and metropolitan area networks - Part 3: CSMA/CD Access Method and Physical Layer Specifications - Media Access Control (MAC) Parameters, Physical Layer, and Management Parameters for 10 Gb/s Operation*, Aug. 2002.
- [41] VIAVI Solutions, "Reference Guide to Fiber Optic Testing," *VIAVI Solutions*, 2. ed. 2018. [Online]. Available: https://www.c3comunicaciones.es/Documentacion/fiberguide2_bk_fop_tm_ae.pdf. [Accessed May 8, 2023].

- [42] R. Paschotta, "Polarization Mode Dispersion," In: *RP Photonics Encyclopedia*, RP Photonics AG, 2007. [Online]. Available: https://www.rp-photonics.com/polarization_mode_dispersion.html. [Accessed Dec. 15, 2023].
- [43] M. Āupa et al., "Polarizační vidová disperze – PMD," In: *Elektrorevue*, vol. 14. [Online]. Available: https://www.profiber.eu/files/prednasky/Elektrorevue__2012_24.pdf. ISSN 1213-1539. [Accessed May 8, 2023].
- [44] Telecommunication Standardization Sector of ITU, Recommendation ITU-T G.959.1, *Optical transport network physical layer interfaces*, Jan. 2024.
- [45] THORLABS, "Beat Length and Polarization Maintaining Fiber," *THORLABS*. [Online]. Available: https://www.thorlabs.com/newgrouppage9.cfm?objectgroup_id=14213. [Accessed May 6, 2023]
- [46] The Fiber Optic Association, "Measuring Reflectance or Return Loss," In: *FOA*, 2008. [Online]. Available: <https://www.thefoa.org/tech/ref/testing/test/reflectance.html>. [Accessed Dec. 15, 2023].
- [47] Derek, "APC, UPC, PC Fiber Connector Types Comparison and Selection," In: *QSFPTEQ*, 2021 [Online]. Available: <https://www.qsfptek.com/qt-news/apc-upc-pc-fiber-connector-types-differences-and-selection.html>. [Accessed Dec. 15, 2023].
- [48] The Fiber Optic Association, "Measuring Reflectance or Return Loss," *The Fiber Optic Association*, 2018. [Online]. Available: <https://www.thefoa.org/tech/ref/testing/test/reflectance.html>. [Accessed May 8, 2023].
- [49] Joint Committee for Guides in Metrology (JCGM), JCGM 100:2008, *Evaluation of measurement data – Guide to the expression of uncertainty in measurement*, International Organization for Standardization (ISO) and International Electrotechnical Commission (IEC), Sep. 2008.
- [50] J. Brouček and J. Sukop (2024). Závazné limity útlumu optických tras – přiměřené, objektivní, nekompromisní [PowerPoint slides]. Available: https://www.profiber.eu/files/akcie/2024/Site_FTTx/Sbornik/F-04_limity-utlumu-tras_v2.pdf.
- [51] E. Lach and W. Idler, "Modulation formats for 100G and beyond," In: *Optical Fiber Technology*, vol. 17,(5), 2011, pp. 377-386.
- [52] ID Photonics, "CoBriteDX4 - Laser," [Online]. 2020. https://www.id-photonics.com/images/stories/PDF/Data_sheet_CBDX4-x-x-xx.pdf.

- [53] THORLABS, "Compact Photodiode Power Head with Germanium Detector," 18359-S01 datasheet, Rev C. Apr. 2021.
- [54] EXFO, "FTB-720C LAN/WAN Access OTDR," FTBX720C.6EN datasheet. Oct. 2023.
- [55] EXFO, "FTB-5500B/FTB-5800," FTB5500B/5800.8EN datasheet. Aug. 2020.
- [56] Telecommunication Standardization Sector of ITU, Recommendation ITU-T G.989.2, *40-Gigabit-capable passive optical networks 2 (NG PON2): Physical media dependent (PMD) layer specification*, Feb. 2019.
- [57] P. S. Andre, A. N. Pinto and J. L. Pinto, "Effect of temperature on the single mode fibers chromatic dispersion," *Proceedings of the 2003 SBMO/IEEE MTT-S International Microwave and Optoelectronics Conference - IMOC 2003. (Cat. No.03TH8678)*, Foz do Iguacu, Brazil, 2003, pp. 231-234 vol.1, doi: 10.1109/IMOC.2003.1244863.