



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV TELEKOMUNIKACÍ

DEPARTMENT OF TELECOMMUNICATIONS

BEZPEČNOST OPTICKÝCH VLÁKNOVÝCH INFRASTRUKTUR

FIBER OPTIC INFRASTRUCTURE SECURITY

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Martin Děcký

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Petr Münster, Ph.D.

BRNO 2024

Bakalářská práce

bakalářský studijní program **Informační bezpečnost**

Ústav telekomunikací

Student: Martin Děcký

ID: 230800

Ročník: 3

Akademický rok: 2023/24

NÁZEV TÉMATU:

Bezpečnost optických vláknových infrastruktur

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Cílem bakalářské práce je teoretický rozbor problematiky bezpečnostních rizik optických vláknových infrastruktur. Analyzovány budou nejen běžné útoky na odposlech dat, ale především modifikace optických vláknových infrastruktur a možnosti detekce modifikací. V rámci praktické části práce bude provedena analýza rizik z pohledu detekce modifikace optických infrastruktur a experimentální ověření alespoň pěti vybraných metod.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] KEISER, Gerd. Optical fiber communications. 4th ed. New York, NY: McGraw-Hill Companies, c2011. ISBN 0073380717.

[2] JUNG KARKI, Sachin. Hacking Fiber optics easier than copper cable: Freelance IT Security professional [online]. 2016 [cit. 2019-09-14]. Dostupné z: <http://bit.ly/2IOHXS8>

Termín zadání: 5.2.2024

Termín odevzdání: 28.5.2024

Vedoucí práce: doc. Ing. Petr Münster, Ph.D.

doc. Ing. Jan Hajný, Ph.D.
předseda rady studijního programu

UPOZORNĚNÍ:

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

ABSTRAKT

Tato bakalářská práce se zabývá problémem bezpečnostních rizik optických vláknových infrastruktur z pohledu detekce modifikací. V první části jsou teoreticky popsány vlastnosti optického vlákna, přenos informací v optických sítích a jednotlivé prvky optických infrastruktur. Další část je věnována metodám měření optických tras a útokům v nich. V poslední části dojde k analýze rizik těchto útoků a k ověření vybraných metod pro detekci modifikací.

KLÍČOVÁ SLOVA

optické vlákno, bezpečnost přenosu v optických sítích, detekce modifikací, únik dat, odposlech, metody měření optických tras

ABSTRACT

This bachelor thesis addresses the problem of security risks of optical fiber infrastructures from the perspective of modification detection. In the first part, the properties of optical fiber, information transmission in optical networks and individual elements of optical infrastructures are theoretically described. The next part is devoted to methods of measuring optical paths and attacks in them. In the last part, the risks of these attacks are analyzed and selected methods for modification detection are validated.

KEYWORDS

optical fiber, transmission security in optical networks, modification detection, data leakage, eavesdropping, optical path measurement methods

DĚCKÝ, Martin . *Bezpečnost optických vláknových infrastruktur*. Bakalářská práce.
Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních tech-
nologii, Ústav telekomunikací, 2024. Vedoucí práce: doc. Ing. Petr Münster, PhD.

Prohlášení autora o původnosti díla

Jméno a příjmení autora: Martin Děcký
VUT ID autora: 230800
Typ práce: Bakalářská práce
Akademický rok: 2023/24
Téma závěrečné práce: Bezpečnost optických vláknových infrastruktur

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

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

Brno

.....

podpis autora*

*Autor podepisuje pouze v tištěné verzi.

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych poděkoval vedoucímu bakalářské práce panu doc. Ing. Petru Münsterovi, Ph.D. za odborné vedení, konzultace, trpělivost a podnětné návrhy k práci.

Obsah

Úvod	11
1 Optické vlákno	12
1.1 Struktura vlákna	12
1.1.1 Jednovidové vlákno	12
1.1.2 Vícevidová vlákna	14
1.1.3 Dělení dle použitého materiálu – jádro	15
1.1.4 Dělení dle použitého materiálu – povlak	15
2 Přenos v optických sítích	17
2.1 Přenosová pásma	17
2.1.1 Rozdělení přenosových pásem	17
2.2 Chromatická disperze	18
2.3 Polarizační disperze	19
2.4 Útlum	19
2.4.1 Rozptyl	20
2.4.2 Absorpce	21
2.5 Nelineární optické jevy	22
2.5.1 Jevy prvního řádu	22
2.5.2 Jevy druhého řádu	23
2.5.3 Jevy třetího řádu	24
3 Prvky optických infrastruktur	26
3.1 Optické konektory	26
3.2 Optický zesilovač	26
3.2.1 EDFA zesilovač	27
3.3 Optický rozbočovač	27
3.3.1 PLC rozbočovač	28
3.3.2 FBT rozbočovač	28
3.4 Multiplexer a Demultiplexer	28
3.4.1 Soustava dielektrických filtrů	29
3.4.2 Fibre bragg grating	29
3.4.3 Arrayed waveguide grating	30
4 Metody měření a monitorování optických tras	31
4.1 Optická reflektometrie v časové doméně (OTDR)	31
4.2 Měření útlumu pomocí zdroje světla a energetického měřiče (LSPM)	32
4.3 Optická spektrální analýza (OSA)	32

4.4	Optický zpětný útlum (ORL)	32
4.5	Bit Error Rate Test (BERT)	33
4.6	Interferometrická metoda	33
5	Útoky v optických sítích	34
5.1	Útoky bez přerušení vlákna	34
5.1.1	Mikroohyb	34
5.1.2	Makroohyb	34
5.1.3	Přeslechy WDM	35
5.1.4	Rayleighův rozptyl	36
5.1.5	Rozptyl Braggovými mřížkami	36
5.1.6	Řez s V-drážkou	36
5.1.7	Zpětný odraz	36
5.2	Útoky s přerušením vlákna	37
5.2.1	Vložení aktivních zařízení	37
5.2.2	Vložení optického děliče	37
5.2.3	Vložení demultiplexoru	38
6	Výsledky studentské práce	39
6.1	Analýza rizik	39
6.1.1	Analýza rizik makroohybu	39
6.1.2	Analýza rizik vložení děliče	39
6.1.3	Analýza rizik přeslechů multiplexů	40
6.1.4	Analýza rizik zpětného odrazu	40
6.2	Měření optické trasy	41
6.2.1	Měření makroohybu přímou metodou (LSPM)	41
6.2.2	Měření makroohybu metodou OTDR	41
6.2.3	Výsledky měření makroohybů	42
6.2.4	Měření vložení děliče metodou OTDR	42
6.2.5	Měření vložení děliče přímou metodou (LSPM)	43
6.2.6	Měření vložení děliče metodou BERT	43
6.2.7	Výsledky měření vložení děliče	44
6.2.8	Měření a výsledky přeslechů multiplexu - metoda OSA	45
6.2.9	Měření a výsledky zpětného odrazu	46
	Závěr	47
	Literatura	48
	Seznam symbolů a zkratk	52

Seznam obrázků

1.1	Znázornění poloměru ohybu optických vláken	13
2.1	Znázornění rozptylu	20
3.1	Schéma základního spoje WDM.	29
3.2	Schéma AWG demultiplexeru.	30
5.1	Znázornění mikroohybu.	35
5.2	Znázornění makroohybu.	35
6.1	Graf naměřených hodnot útlumu makroohybu přímou metodou . . .	41
6.2	Graf naměřených hodnot útlumu makroohybu metodou OTDR	42
6.3	Graf naměřených hodnot přeslechů kanálů	45

Seznam tabulek

2.1	Pásma vlnových délek jednovidových vláken.	18
6.1	Naměřené hodnoty útlumu jednotlivých děličů metodou OTDR. . . .	43
6.2	Naměřené hodnoty útlumu jednotlivých děličů přímou metodou (LSPM).	44
6.3	Naměřené hodnoty jednotlivých děličů metodou BERT.	44
6.4	Naměřené hodnoty útlumu zpětného odrazu pro různá zakončení. . . .	46

Úvod

Bezpečnost optických vláknových infrastruktur je klíčovým prvkem moderní komunikační technologie, která umožňuje přenos obrovského množství dat na dlouhé vzdálenosti s vysokou rychlostí a spolehlivostí. Vzhledem k rostoucí závislosti na těchto technologiích je nezbytné věnovat zvýšenou pozornost nejen běžným bezpečnostním hrozbám, jako je odposlech dat, ale také složitějším formám útoků, které zahrnují modifikace samotných optických vláknových infrastruktur.

Cílem této bakalářské práce je teoretický rozbor problematiky bezpečnostních rizik spojených s optickými vláknovými infrastrukturami. Práce se zaměří na analýzu nejen tradičních útoků, jako je odposlech dat, ale také na útoky zahrnující modifikace optických vláken, které mohou vést k narušení integrity a bezpečnosti přenášených informací. Důležitou součástí práce bude rovněž prozkoumání možností detekce těchto modifikací, což je zásadní pro prevenci a minimalizaci potenciálních škod.

V teoretické části práce bude čtenář v kapitole 1 seznámen se strukturou optického vlákna a jeho dělení podle použitého materiálu jak u jádra, tak i u povlaku. V kapitole 2 je popsán přenos informací v optické síti a jevy, ke kterým při přenosu dochází. V následující kapitole 3 jsou popsány jednotlivé prvky optických infrastruktur, aktivní i pasivní. V kapitole 4 je čtenář seznámen s metodami monitorování a měření optických sítí, které lze použít pro detekci útoků na tyto sítě, které jsou popsány v kapitole 5.

Praktická část práce, která se nachází v kapitole 6, se zaměří na analýzu rizik těchto útoků z pohledu detekce modifikace optických infrastruktur. Bude provedeno experimentální ověření pěti vybraných metod s cílem poskytnout konkrétní doporučení a osvědčené postupy pro zvýšení bezpečnosti optických vláknových sítí.

1 Optické vlákno

Optická vlákna hrají klíčovou roli při efektivním přenosu rozsáhlých informací na velké vzdálenosti s minimálními ztrátami a zároveň slouží jako účinné senzory. Během výrobního procesu je kladen důraz na dosažení optimálních přenosových vlastností, což představuje nejvyšší standard kvality výroby. Tato část se zaměřuje na fundamentální fyzikální charakteristiky přenosu informací optickým vláknem, s důrazem na strukturu jednovláknových konfigurací. Dále podrobně zkoumá různé typy zdrojů a detektorů optického záření a také se věnuje optickým vláknovým sensorům.

1.1 Struktura vlákna

Optické vlákno se skládá ze tří prvků – jádra, pláště a povlaku. Tyto prvky přenášejí data prostřednictvím infračerveného světla, čímž se signál šíří vláknem. Jádro se nachází ve středu optického vlákna a zajišťuje cestu pro světlo. Průměr jádra se liší u jednovidových a vícevidových vláken od 8 do 62,5 μm . Větší velikost jádra ve vícevidovém vlákně poskytuje světlu různé cesty, zatímco malá velikost jádra v jednovidovém vlákně poskytuje jedinou cestu. [1]

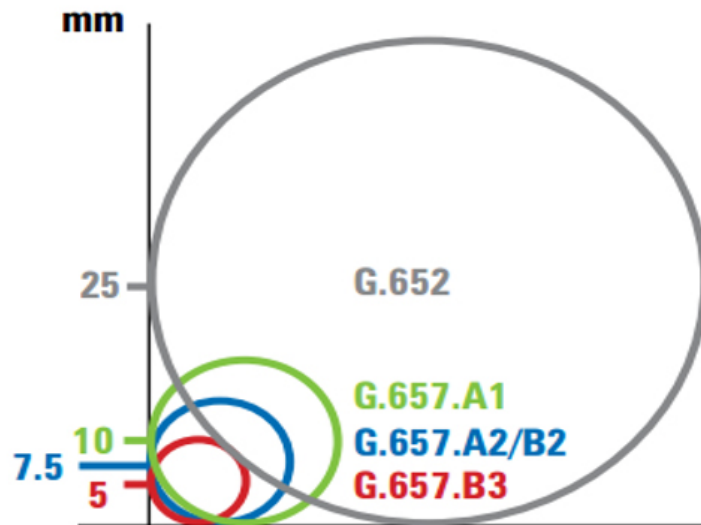
Dále následuje plášť, který má velikost 125 μm . Plášť udržuje světlo uvnitř jádra a řídí směr, kterým se světlo šíří vláknem. Když světlo vstoupí do vlákna pod vhodným úhlem přiblížení, známým také jako kritický úhel, odrazí se a zůstane uvnitř jádra, čímž se dosáhne procesu zvaného úplný vnitřní odraz. Pokud není v ideálním úhlu, světlo se bude lámat a signál se vyzáří. [1]

Poslední částí optického vlákna je povlak, který funguje jako primární nárazník. Má průměr 250 μm . Tlumí a chrání vlákna před vlhkostí a nepříznivým prostředím. Povlak tvoří dvě vrstvy uretan-akrylátu, známé také jako měkká a tvrdá vrstva. Měkká vrstva tlumí vlákna a tvrdá vrstva zajišťuje odolnost proti oděru. Povlak má také vyšší index lomu než jádro a plášť, což umožňuje lom nežádoucího světla od pláště. [1]

1.1.1 Jednovidové vlákno

Tento typ vlákna má velmi tenké jádro (okolo 8 až 10 mikrometrů) v poměru k tloušťce pláště a vede se v něm pouze jeden paprsek (vid). Takto tenké jádro paprsek napřimuje a tím snižuje možnost rozptylu, díky čemu je možné přenášet paprsek na dlouhou vzdálenost. Proto jsou tato vlákna využívána zejména v páteřních sítích. Nevýhodou jednovidových vláken je nutnost použití přesnějších (a tím i dražších) generátorů a detektorů záření a i samotné vlákno má typicky vyšší cenu než multividové. Vlastnosti jednotlivých jednovidových vláken, například poloměr

ohybu (viz obr. 1.1), se řídí přiděleným standardem podle doporučení ITU-T, skupiny G. [2, 3]



Obr. 1.1: Minimální poloměr ohybu jednojádrových optických vláken. [4]

G.652

Jedná se o standardní optické jednojádrové vlákno s průměrem $9/125 \mu\text{m}$ (jádro/-plášť). Tento typ se dále dělí na další 4 podtypy označované písmeny A až D. U variant C a D lze využít celého přenosového pásma včetně pásma E (1360–1460 nm), na rozdíl od variant A a B, které mají v tomto pásmu zvýšený vložený optický útlum vlivem iontů vody OH^- . [5]

G.653

Tento standart byl vyvinut za cílem potlačení chromatické disperze pro vlnovou délku 1550 nm. Používají se na velké vzdálenosti pro vyšší přenosové rychlosti s jedinou provozovanou vlnovou délkou, protože se systémy vlnového multiplexu s více vlnovými délkami dochází k překrývání jednotlivých vlnových délek a vytváření parazitních vedlejších kanálů a přeslechů. [5]

G.654

Tato vlákna byla vyvinuta jako speciální varianta G.652 a jsou optimalizována pro co nejnižší vložený útlum v pásmu 1550 nm. Jsou velmi nákladná a v praxi se používají výhradně k extrémním dálkovým přenosům pro podmořské kabely. [5]

G.655

Tato vlákna se používají především v dálkových optických sítích a na rozdíl od vláken typu G.653 nemají nulovou disperzi pro vlnovou délku 1550 nm. Malá nenulová disperze je nezbytná, aby se zabránilo vedlejším nelineárním jevům. Tento typ vlákna je určen pro technologie DWDM (Dense wavelength-division multiplexing) a pro vysoké přenosové rychlosti. [5]

G.657

Vlákna podle tohoto standartu jsou odolnější na makroohyb, proto se používají buď na místech, kde je vysoká pravděpodobnost odposlechu ohybem, nebo v domácnostech, kde je předpokládána větší manipulace s vláknem a tedy vyžadována i vyšší odolnost vlákna. [5]

1.1.2 Vícevidová vlákna

Vlákno má tlustší jádro (obvykle 50 nebo 62,5 mikrometrů) než jednovidové vlákno a díky tomu je přenášeno více vidů (paprsků) najednou, kdy se paprsky šíří odrazem o vnitřní stěny jádra. Výhodou těchto vláken oproti jednovidovým jsou také nižší náklady na výrobu a to i generátorů (většinou LED) a detektorů záření. Dále vynikají velkou kapacitou a spolehlivostí. [2]

Vícevidová vlákna můžeme ještě rozdělit na vlákna:

- se skokovou změnou indexu lomu,
- s postupnou (gradientní) změnou indexu lomu.

Vlákna se skokovou změnou indexu lomu

U tohoto vlákna je jádro vyrobeno z jednoho typu optického materiálu a plášť z jiného s odlišnými optickými vlastnostmi za cílem využití principu totálního odrazu. Tento typ vlákna má vyšší útlum a také je pro mnoho užití příliš pomalé a to z důvodu vidové disperze, takže v dnešní době není příliš používané. [3]

Vlákna s postupnou změnou indexu lomu

Vlákno využívá odstupňování indexu lomu v jádře pomocí použití různých materiálů a tím kompenzuje různé délky drah jednotlivých paprsků neboli modální disperzi¹. Odstupňování je takové, že ve středu jádra je sklo s největším indexem lomu a s narůstající vzdáleností od středu index lomu parabolicky klesá. Díky tomu se zde světlo

¹Efekt, který způsobuje rozdílné rychlosti ve světelném pulsu u jednotlivých frekvencí.

nešší pomocí totálního odrazu, ale za pomoci ohybu světla. Tento typ vlákna se využívá pro LAN, optická vlákna do bytu, kamerové systémy a další bezpečnostní systémy. [3]

1.1.3 Dělení dle použitého materiálu – jádro

Optická vlákna se dělí na základě materiálu použitého pro výrobu jejich jádra na skleněná a plastová. Skleněná vlákna, vyrobená převážně z oxidu křemičitého (SiO_2), jsou vhodná pro použití s kratšími vlnovými délkami, zatímco pro delší vlnové délky se často využívají vlákna z chalkogenních skel. [6]

Vlákna z oxidu křemičitého pracují efektivně ve vlnových délkách od přibližně $0,8 \mu\text{m}$ do $1,7 \mu\text{m}$. Mají nízké ztráty při přenosu světla, což je činí vhodnými pro dlouhé vzdálenosti a odolají vysokým teplotám. Tato vlákna se nejčastěji používají v telekomunikacích, medicíně a v senzorech, kde je důležitá nízká ztráta signálu a vysoká spolehlivost. Naproti tomu vlákna z chalkogenních skel umožňují přenos světla ve větším spektru vlnových délek (přibližně od $1 \mu\text{m}$ do $12 \mu\text{m}$), ale mají vyšší ztráty a nižší tepelnou stabilitu. Využívají se tam, kde je důležitý přenos infračerveného světla. [6]

1.1.4 Dělení dle použitého materiálu – povlak

Polyethylen (PE)

Polyethylenový povlak je vysoce odolný vůči nízkým teplotám, má dobrou chemickou stabilitu, odolnost vůči většině kyselé a alkalické korozi, odolnost proti oděru a vysokou elektrickou izolaci. Proto se PE běžně používá jako standardní materiál vnějšího pláště pro venkovní kabely. [7]

Polyvinylchlorid (PVC)

PVC povlak má dobré mechanické vlastnosti, vysokou elektrickou izolaci, pružnost, pevnost a dobrou odolnost proti ohni. Má však horší stabilitu vůči světlu a teple, takže je vhodnější jako materiál vnějšího pláště pro vnitřní kabely z optických vláken. [7]

Polyvinylidenfluorid (PVDF)

Polyvinylidenfluorid má několik vynikajících vlastností, jako je elasticita, nízká hmotnost, nízká tepelná vodivost, vysoká chemická odolnost a tepelná odolnost. Má také lepší ohnivzdornost než PE a neprodukuje téměř žádný kouř ani v případě požáru.

Materiál PVDF lze proto použít pro vnější plášť kritičtějších páteřních optických kabelů. [7]

Low Smoke Zero Halogen (LSZH)

LSZH se vyznačuje nízkou kouřivostí, nízkou toxicitou, nízkou korozivností a vysokou retardací hoření. LSZH je bezpečný a ekologický materiál, díky čemuž je ideální volbou pro vnitřní i venkovní instalace. Optické kabely s materiálem LSZH jsou ale obecně dražší. [7]

Plenum

Plenum je jedna z hlavních součástí pro výrobu optických kabelů s hodnocením OFNP. Má vysokou retardaci hoření a nevytváří toxické nebo korozivní plyny ani při extrémně vysokých teplotách. Kabely z optických vláken s materiálem Plenum jsou preferovanou volbou pro vedení ve ventilačních kanálech nebo vzduchotechnických systémech s přetlakem vzduchu. [7]

Riser

Jako jedna z hlavních součástí pro výrobu optických kabelů s hodnocením OFNR má Riser relativně slabší odolnost proti plameni ve srovnání s materiálem Plenum. Je také bez toxických plynů a korozivních plynů. Proto se optické kabely s materiálem Riser obvykle používají ve vertikálních stoupačkách a horizontálních kabelech v budovách. [7]

2 Přenos v optických sítích

Přenos dat v optických sítích se skládá ze tří částí: vysílací části, přenosového prostředí a přijímací části. První ze zmíněných, vysílací část, je tvořena zdrojem záření, kterým může být například luminiscenční dioda nebo laser. Přenosové prostředí se skládá z různých aktivních nebo pasivních prvků, popsaných v kapitole 3 a optických vláken. Poslední složkou je přijímací část, kde je pomocí fotodetektoru signál převáděn z fotonů zpět na elektrický. V následující kapitole proběhne přiblížení s přenosovými pásmy a s jevy, které při přenosu vznikají. [5]

2.1 Přenosová pásma

Šířka pásma označuje maximální kmitočet signálu, který lze spolehlivě přenést na vzdálenost 1 km pomocí vícevidového vlákna bez nadměrného zkreslení způsobeného disperzí, jako je například šíření více vidů ve vlákně. Tato hodnota je vyjádřena v MHz·km. [8]

Šířka pásma je ovlivněna konstrukčním uspořádáním, materiálem optického vlákna a vlnovou délkou optického signálu. Vlnová délka má významný dopad na šířku pásma. Například vlákno s vlnovou délkou 850 nm může mít šířku pásma 160 MHz·km, zatímco při vlnové délce 1 300 nm dosahuje šířka pásma 500 MHz·km. Změna vlnové délky optického záření rovněž ovlivňuje útlum vlákna. [8]

2.1.1 Rozdělení přenosových pásem

Díky neustálému rozvoji jednovidových optických vláken, ať už v oblasti výroby či technologického pokroku, se objevují různá přenosová okna, tj. I., II., III., IV. a V.

Okno I. (kolem 850 nm)

Představuje vícevláknové vlákno, kde se při šíření vyskytuje výrazné snížení útlumu. Toto okno se však nepoužívá pro dálkové přenosy, protože hodnoty útlumu jsou příliš vysoké. [5]

Okno II (1280–1335 nm)

Jedná se o nejnižší a historicky první jednovidové přenosové okno pro vlákna o průměru $9/125\ \mu\text{m}$. Má měrný útlum těsně pod 0,35 dB/km a nachází uplatnění při dálkových přenosech. [5]

Okno III (1530–1565 nm)

Představuje přenosové okno s minimem specifického útlumu pro standardní křemíkové vlákno. Měrný útlum se pohybuje v rozmezí 0,19–0,22 dB/km, a toto okno se využívá při přenosech na dlouhé vzdálenosti a v transportních a globálních sítích. [5]

Okno IV (1565–1625 nm)

Je přenosové okno umístěné za absolutní vlnovou délkou minimálního specifického útlumu, ačkoliv je charakterizováno jako velmi ploché. Přestože se útlum v tomto okně liší od okna III, vývoj technologie WDM (Wavelength-division Multiplexing) a optických zesilovačů umožňuje téměř zdvojnásobit přenosovou kapacitu kombinací spektra oken III a IV na velké vzdálenosti. [5]

Okno V (1335–1530 nm)

Poslední okno je dostupné pro přenosové využití od konce 90. let 20. století, díky pokroku v technikách výroby optických vláken, které eliminují příměsi OH a snižují lokální maximum útlumu při 1380 nm. S propojením oken II až V vzniká souvislý přenosový kanál s šířkou pásma až 50 THz. [5]

Pásmo	Název	Vlnová délka [nm]
O	Original	1260 - 1360
E	Extended	1360 - 1460
S	Short	1460 - 1530
C	Conventional	1530 - 1565
L	Long	1565 - 1625
U	Ultra-long	1625 - 1675

Tab. 2.1: Pásmo vlnových délek jednovláknových vláken. [5]

2.2 Chromatická disperze

Chromatická disperze vzniká proto, že vstupní paprsek není zcela chromatický, ale skládá se z více složek s různými vlnovými délkami, kdy každá tato složka má jinou rychlost, kterou se šíří vláknem. Tím je způsobeno, že na konec vlákna dorazí každá složka v rozdílném čase a dochází zde k časovému roztažení přenášených impulzů a z toho vyplývajícimu zkreslení přenášené informace. U jednovláknových vláken je

chromatická disperze nejmenší při vlnové délce 1310 nm a při vlnové délce 1550 nm taková, že může omezovat jejich použití, tzn. přenosovou vzdálenost či rychlost. [9]

Chromatická disperze je dále členěna na dvě části a těmi jsou vlnovodná disperze a materiálová disperze.

Vlnovodná disperze

Vlnovodná disperze je způsobena geometrickými vlastnostmi vlnovodu. Tím může být například mikronehomogenost materiálu, ze kterého je jádro. Tím je vytvořeno prostředí s lehce jiným indexem lomu čímž může být mírně změněna vlnová délka a tím je i pozměněn tvar podélného vidu. Vlnovou disperzí je vlna zpomalena nepřímo úměrně vlnové délce, čehož může být využito ke vzájemnému vykompenzování disperzí. [8]

Materiálová disperze

Materiálová disperze závisí vlnové délce a na indexu lomu materiálu, ze kterého je jádro optického vlákna vyrobeno, nejčastěji sklo, u kterého je index lomu okolo 1,48. Každá vlnová délka se pak tímto prostředím šíří jinou rychlostí, kdy nárůst rychlosti je přímo úměrný nárůstu vlnové délky. [8]

2.3 Polarizační disperze

Využívání jednovidového optického vlákna se rozvíjí v oblasti dvou ortogonálních polarizačních rovin. Tento proces je ovlivněn neuniformitou a nedostatky ve vlákne, které mohou vznikat během výrobního procesu, kdy vlákno nemusí mít v některých oblastech ideálně kruhový průřez, nebo se mohou objevit mikroohyby.

Další faktory, jako například mechanické poškození při manipulaci s vláknem, mohou vést ke zpoždění nebo posunutí signálů. Tento druh disperze je problematický, jelikož se nedá efektivně kompenzovat. Jakákoli změna v průběhu trasy vlákna, například při instalaci v jiném kabelovém vedení, může způsobit dodatečné deformace nebo stres na vlákno, což vede ke změnám v disperzi signálu. Na rozdíl od jiných typů disperze, polarizační disperze nemá významný vliv při nízkých rychlostech přenosu dat, ale stává se kritickým faktorem u rychlostí překračujících 2,5 Gb/s. [8]

2.4 Útlum

Následující část druhé kapitoly se zaměřuje na vysvětlení lineárních jevů, ovlivňujících útlum optických vláken. Většina ztrát, které se vyskytují, je zapříčiněna těmito

jevy. Tyto jevy poskytují odůvodnění pro výběr v současnosti používaných vlnových délek s cílem dosáhnout optimálních přenosových vlastností, a to i při nízkých intenzitách. Mezi tyto lineární jevy patří rozptyl a absorpce. [8]

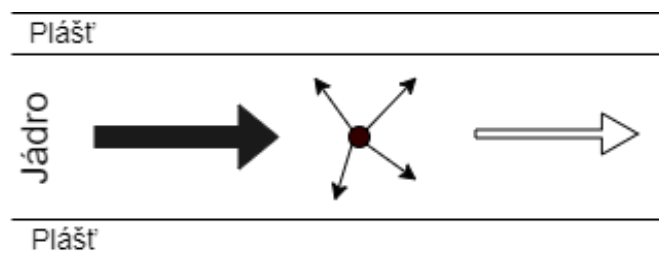
Celkový útlum je pak roven součtu všech jednotlivých podsložek útlumu. Útlum je udáván v decibelech (dB) a jedná se o poměr vstupního (P_1) a výstupního (P_2) výkonu, jak jde vidět v následujícím vzorci:

$$A = 10 \log_{10} \frac{P_2}{P_1} \quad [\text{dB}].$$

2.4.1 Rozptyl

Materiálový rozptyl vzniká kvůli nepravdělnostem, které se formují hlavně během procesu chlazení skleněných vláken. Tyto nepravdělnosti vedou k náhodnému rozložení molekul ve skle, což způsobuje proměnlivost v indexu lomu skla, známou jako prostorová fluktuace. Když světlo narazí na tyto nehomogenní oblasti, dochází k jeho rozptylu ve všech směrech, což způsobuje ztrátu části světelné energie. Míra, jakou rozptyl přispívá k celkovému útlumu světla ve vláknech, se liší v závislosti na typu skla, výrobní technologii a použitém materiálu. [10]

V oblasti vlnových délek, které se obvykle využívají pro telekomunikace, je rozptyl silně závislý na vlnové délce, přičemž s jejím nárůstem klesá, jelikož amplituda rozptýleného světla je úměrná λ^{-2} a intenzita rozptýleného světla je úměrná λ^{-4} . Proto je výhodné používat co nejdelší vlnové délky pro minimalizaci rozptylu. [10]



Obr. 2.1: Znárodnění rozptylu.

Rayleighův rozptyl

Tento jev, převažující zejména ve spodní části absorpčního spektra optických komunikačních systémů, je způsoben tepelnými vibracemi krystalové struktury materiálu. Malé, náhodné mikroskopické změny v optickém vláknech, které jsou menší než samotná vlnová délka světla, vedou k dodatečnému útlumu signálu. Rayleighův rozptyl, který zvyšuje útlum, je úměrný osmé mocnině indexu lomu materiálu a klesá s rostoucí čtvrtou mocninou vlnové délky světla. [10]

Tento fenomén je neodstranitelný; dokonce ani extrémní chlazení vláknů na teplotu blízkou absolutní nule nevede k jeho eliminaci. I při absolutní nule zůstanou pozice atomů v krystalové mřížce „zamrzlé“, což způsobuje, že se světlo kolem těchto bodů rozptyluje a to vede ke ztrátám. Posun pracovní frekvence do infračerveného spektra, tj. k vyšším vlnovým délkám, může tento rozptyl částečně snížit. [10]

Mieův rozptyl

Tento druh rozptylu se objevuje kvůli nehomogenitám v optickém vlákně, jejichž velikost je podobná vlnové délce světla, které vláknem prochází. Pokud tyto geometrické nedokonalosti dosáhnou nebo přesáhnou jednu desetinu vlnové délky světla, rozptyl a tím i ztráty signálu se výrazně zvětší. Zlepšení výrobního procesu, který zahrnuje minimalizaci těchto nepravidelností, pečlivé tažení vláknů a aplikaci dodatečných vrstev, může tyto ztráty alespoň částečně redukovat. [10]

Rozptyl vlivem nečistot a špatným výrobním postupem

Tento typ rozptylu může být vyvolán různými faktory, jako je přítomnost nečistot v materiálu jádra, praskliny vzniklé nedokonalým procesem tažení vláknů, nebo nesouměrnost v průměru jádra a pláště. Všechny tyto příčiny mají společný základ v nedostatečích výrobního procesu. Chyby, o kterých je řeč, mají makroskopickou velikost. [10]

2.4.2 Absorpce

Materiálová absorpce představuje způsob ztráty, který je spojen s výrobním procesem optického vláknů a projevuje se jako rozptyl přenášeného světla v podobě tepla v rámci vlnovodu. Tato absorpce může být buď vnitřní, kdy je způsobena interakcí mezi různými složkami sklářského materiálu, nebo externí, kdy souvisí s mírou nečistot ve skle. [11]

Vnitřní absorpce

Vnitřní absorpce nastává, když světelná energie interaguje s molekulami čistého oxidu křemičitého, což vede k absorpci světla elektronem a jeho přechodu do jiného energetického stavu. Tento jev rezonance je typický pro ultrafialovou oblast (spektrální vlnová délka menší než 400 nm) a u oxidu křemičitého se rozšiřuje až do viditelného spektra. Foton může rovněž interagovat s molekulou, čímž dojde ke změně jejího vibračního stavu, což představuje další způsob absorpce fotonů a tedy ztráty optické energie. Tento druh vibrační rezonance je charakteristický pro infračervenou oblast (spektrální vlnová délka větší než 760 nm). [12]

Vnější absorpce

Ztráty způsobené absorpcí světla nečistotami v materiálu skla, konkrétně v oxidu křemičitém, jsou známé jako vnější absorpční ztráty. Tyto ztráty jsou často spojeny s přítomností vodních par v křemíkových optických vláknech. Ionty hydroxyly (OH^-) z vodních par, které se integrují do struktury skla, vykazují specifickou vibrační rezonanci při 2,73 μm . Když se tato rezonance kombinuje s vibračními rezonancemi samotného oxidu křemičitého, dochází k významné absorpci na vlnových délkách 1,38; 1,24; 0,95 a 0,88 μm . Toto má zásadní význam, protože většina systémů optických vláken funguje v rozmezí vlnových délek 1,3 μm až 1,55 μm , kde 1,3 μm vlnová délka nabízí nejmenší disperzi pro běžná jednovláknová optická vlákna a 1,55 μm vlnová délka přináší nejnižší úroveň ztrát. [12]

2.5 Nelineární optické jevy

Tyto jevy se objevují v prostředí s nelineárními vlastnostmi. Rozdělujeme je buď podle stupně nelinearity, na kterém se vyskytují, nebo podle jmen vědců, kteří je poprvé identifikovali. V další části textu budou podrobněji popsány nelineární jevy prvního, druhého i třetího řádu.

2.5.1 Jevy prvního řádu

Ramanův rozptyl

Ramanův rozptyl je jev, který se obvykle řadí mezi jevy nelineární optiky prvního řádu, i když jeho popis a důsledky se mohou prolínat s jevy vyšších řádů v závislosti na kontextu a definici. Většina fotonů se odráží zpět bez změny frekvence, což je známé jako Rayleighův rozptyl, ale přibližně jeden z milionu fotonů se odráží s jinou frekvencí, buď nižší nebo vyšší, než měla vlna původně. Tento jev se nazývá neelastický rozptyl. [13]

Efektivita Ramanova rozptylu může být zvýšena pomocí stimulované emise. Při tomto procesu foton o nižší frekvenci interaguje s fotonem o vyšší frekvenci, což vede k neelastickému rozptylu. Stimulovaná emise je vyvolána pomocí specifického budiče, umožňujícího na dané vlnové délce interakci mezi fotony a vibračními stavy (fonony) materiálu. Tento princip nachází uplatnění v Ramanových zesilovačích, kde interakce mezi optickým zářením a vibračními stavy materiálu vyvolává emisi, která generuje nový signál šířící se vpřed a je posunutý o 100 nm od původního. Pro iniciaci tohoto jevu je potřeba vyšší prahová energie než u Brillouinova rozptylu, konkrétně okolo 1 W pro jednovákové vlákno s nelineárním indexem lomu $n_2 = 10^{-12} \text{ cm}^2/\text{W}$.

Po dosažení této hranice dochází k přenosu energie z nižších vlnových délek do vyšších, což může mít negativní dopady na distribuci energie v systému. [14]

Použitím zpětné vazby, kde braggovské mřížky reflektují světlo zpět do vlákna, se vytváří Ramanův laser. Tento proces generuje Stokesovy vlny, které mají odlišnou frekvenci než původní vlna a jsou dále zesilovány stimulovanou emisí. Tento princip se využívá k přeměně vlnových délek. Například umístěním pěti párů braggovských mřížek, které odrážejí světlo na vlnových délkách 1144, 1208, 1280, 1362 a 1455 nm, vznikne kaskádní rezonátor Ramanova laseru. Tento laser pak přemění vlnovou délku 1086 nm z yterbiového vláknového laseru na vlnovou délku 1455 nm. Ramanův laser s vlnovou délkou 1455 nm je schopen indukovat Ramanovo zesílení ve standardních jednomódových vláknech v komunikačním pásmu 1550 nm. Tento princip byl demonstrován na konci roku 2004 na trase mezi Prahou a Brnem, kde se pomocí 10 Gb ethernetu po jednovidovém vlákně uskutečnil přenos dat bez potřeby linkových zesilovačů. Bez Ramanova laseru by bylo nutné tyto zesilovače instalovat v intervalu 70 až 80 km po celé délce trasy. [15]

2.5.2 Jevy druhého řádu

Generování druhé harmonické

Generování druhé harmonické je základním příkladem nelineární optické interakce, kde je kombinována energie dvou fotonů na vstupní frekvenci. Tento průlomový objev následoval po zavedení rubínového laseru v roce 1961, kdy byl tento laser použit k osvětlení krystalu křemene. Jako výsledek byla vytvořena výstupní frekvence, která byla přesně dvojnásobkem původní frekvence. [14]

U optických vláken je možné pozorovat podobný efekt, když jsou obohacena o fosfor nebo germanium. U tradičních optických vláken však kvůli jejich symetrii kolem středu lze třetí harmonickou generovat jen s velmi nízkou efektivitou. Nicméně, výroba a design optických vláken pro tyto účely vyžaduje pečlivou kontrolu materiálových vlastností a geometrie vláken, aby se maximalizovala efektivita těchto procesů. [14]

Třívlenný proces

Třívlenný proces je jev, který nastává v prostředí s kvadratickou nelinearitou. Tento princip se uplatňuje při interakci dvou optických vln s odlišnými frekvencemi v nelineárním optickém materiálu. V důsledku této interakce dochází k vytvoření třetí vlny, jejíž frekvence je buď součtem, nebo rozdílem frekvencí původních dvou vln. Třívlenný proces není omezen pouze na generování součtových a rozdílových frekvencí, ale může být také využit k vytváření nových vln, které mají výrazně odlišné

vlastnosti od původních vstupních vln. Tento proces je klíčový pro řadu aplikací v optické technologii, včetně optických zesilovačů a oscilátorů, kde se využívá k efektivnímu generování nebo zesílení optických signálů. [13, 16]

Klíčem k efektivnímu využití třívlonného procesu je výběr vhodného nelineárního materiálu, který má dostatečně vysokou nelineární odezvu pro požadovanou aplikaci. Materiály, jako jsou některé typy krystalů a vláken, byly speciálně upraveny nebo vybrány pro dosažení optimálních vlastností, které podporují třívlonný proces a umožňují výrobu vysoce efektivních a přesně kontrolovaných optických zařízení. [13, 16]

2.5.3 Jevy třetího řádu

Nelineární materiálový rozptyl

Nelineární materiálový rozptyl, známý také jako nelineární indexový rozptyl nebo nelineární refrakční rozptyl, patří k jevům třetího řádu nelineární optiky. Tyto jevy jsou závislé na intenzitě světla a zahrnují interakce, které se stávají významnými při vysokých intenzitách světla, jako jsou ty, které jsou typické pro laserové paprsky.

Když se ve vlákně objevuje materiálový rozptyl, většinou rozptýlené fotony zachovávají stejnou frekvenci jako fotony nepozměněné. Nicméně, v některých případech může foton být rozptýlen na odlišné frekvenci. Tento jev vede k nesouladu mezi vstupním a výstupním výkonem [2].

Brillouinův rozptyl

Tento jev je spojen s akustickými vlnami, které se šíří optickým vláknem. Pokud má akustická vlna dostatečně vysoký výkon, dojde k lokální změně indexu lomu v materiálu. V důsledku toho se jeden foton odpojí od šířícího se signálu a začne se pohybovat v opačném směru než akustická vlna. Tento odpojený foton má odlišnou frekvenci než původní šířící se vlna, a je frekvenčně posunutý směrem dolů. [14]

Vytvořená zpětná vlna pak může negativně ovlivnit stabilitu a šumový poměr vysílacího zdroje. Protože k vyvolání tohoto jevu stačí jen malý vysílací výkon (několik miliwattů), je obvykle žádoucí tento efekt omezit. Jedním ze způsobů, jak toho dosáhnout, je zvýšení spektrální šířky vysílacího zdroje. Brillouinův rozptyl se liší v závislosti na šířce přenášeného pásma a typu optického vlákna. Využití najde ve stimulovaném Brillouinově rozptylu, kdy do prostředí s tímto typem rozptylu zasáhne silný energetický impulz (např. laser), což vede k výraznému zesílení efektu. [14]

Čtyřvlonné směšování

Čtyřvlonné směšování je jev, kdy v nelineárním optickém prostředí dojde k interakci tří světelných paprsků s odlišnými vlnovými délkami, podobně jako v případě třívloného procesu. V důsledku této interakce dochází k vytvoření nové, čtvrté vlny, která má jinou vlnovou délku než vstupní paprsky. Tento jev představuje významný problém v systémech pro přenos dat metodou hustého vlnového multiplexu (DWDM), jelikož může způsobit nechtěné signály a rušení mezi kanály, což komplikuje efektivní přenos dat v těchto systémech. Rozpoznání a řešení tohoto problému je klíčové pro zajištění spolehlivosti a vysoké kvality přenosů v DWDM sítích. [14]

3 Prvky optických infrastruktur

V následující kapitole jsou podrobně popsány optické konektory, aktivní prvky optických sítí, jako jsou zesilovače a přepínače, a následně pasivní prvky, jako jsou rozbočovače, multiplexery a demultiplexery.

3.1 Optické konektory

Optické konektory jsou klíčové komponenty v optických sítích, které umožňují propojení optických prvků a vláken. Existuje mnoho typů optických konektorů, z nichž každý má specifické vlastnosti a je určen pro různé aplikace.

SC (Subscriber Connector) konektory se používají pro single-mode i multi-mode a vyrábí se v simplexní i duplexní variantě. Používají zásuvný mechanismus (push-pull). Mají větší životnost, než ostatní konektory. [17]

ST (Straight Tip) konektory jsou konektory s bajonetovým zámkem a mají dvě možnosti připojení (twist a push in). Tyto konektory byly dříve hojně využívány pro multi-mode, ale dnes jsou již velmi málo používány. [17]

FC (Ferrule Connector) konektory využívají šroubovací mechanismus, ale jinak je stavbou podobný ST konektorům. Jsou vhodné pro aplikace, kde je potřeba pevná fixace. Dnes se již moc nepoužívají. [17]

LC (Lucent Connector) konektory jsou konektory s dvoudílným zástrčným mechanismem. Jsou podobné SC konektorům a také se vyrábí v simplexní i duplexní variantě. Oproti ostatním mají ale poloviční keramickou feruli¹. Jsou často používány v SFP (Small Form-factor Pluggable) modulech. [17]

Dalším dělením konektorů je dělení dle zbroušení ferule. Existují 4 druhy: PC (Physical Contact), SPC (Super Physical Contact), UPC (Ultra Physical Contact) a APC (Angled Physical Contact). PC má mírně zakřivený konec, což zajišťuje, že se ferule dotýkají pouze ve svém nejvyšším bodě, což snižuje ztráty signálu a odrazy. SPC a UPC jsou lépe vybroušené a leštěné než PC, takže poskytují nižší ztráty a menší odrazy díky ještě hladšímu povrchu. APC ferule mají úhel 8 stupňů, což minimalizuje odrazy zpět do laseru a to je ideální pro aplikace, které jsou citlivé na odrazy. [18]

3.2 Optický zesilovač

Pro přenos dat na extrémně dlouhé vzdálenosti je nezbytné zapojení optických zesilovačů, aby se překonaly ztráty signálu, které jsou neodmyslitelnou součástí šíření

¹Část konektoru, která se stýká s druhým konektorem, typicky o průměru 2,5 mm.

světla optickými vlákny. I při použití optických vláken nejvyšší kvality, které obvykle mají útlum na úrovni 0,2 dB/km, se útlum stane kritickým faktorem omezujícím do-
sah a efektivitu spojů dlouhých 10 kilometrů nebo více. [19]

Na rozdíl od elektronických opakovačů, které pracují tak, že přijatý optický sig-
nál nejprve převedou na elektrický signál, umožní jeho zesílení v elektronické formě
a následně ho opět transformují zpět do optické podoby pro další přenos, optické
zesilovače umožňují zesílení signálu přímo v jeho optické formě. To znamená, že sig-
nál může být zesílen bez nutnosti jakékoliv přeměny média, což vede k nižší latenci
a vyšší efektivitě přenosu. Optické zesilovače tak hrají klíčovou roli ve vysokorych-
lostních a dlouhých optických komunikačních linkách, jako jsou mezikontinentální
podmořské kabely nebo rozsáhlé terestrické sítě, kde je potřeba zajistit minimální
ztrátu signálu při udržení vysoké kvality a rychlosti přenosu. [19]

3.2.1 EDFA zesilovač

Optický zesilovač funguje na principu takzvané laserové pumpy, která přidává do
optického vlákna erbiové ionty. Tento způsob zesílení je nejefektivnější v C pásmu,
avšak zesilování se aplikuje i na jiných vlnových délkách, což činí tento typ zesilovače
vhodným pro použití ve WDM (Wavelength Division Multiplexing) systémech. Když
se tento zesilovač využívá pro jediný komunikační kanál, může poskytnout zesílení
až o 50 dB v C pásmu. Rozvoj těchto zesilovačů vedl k výraznému nárůstu přenosové
kapacity telekomunikačních systémů. Nicméně, jednou z nevýhod je vznik chroma-
tické disperze, která nastává kvůli přítomnosti více spektrálních složek v přenášeném
signálu. [19]

3.3 Optický rozbočovač

Optický dělič, známý také jako splitter nebo dělič, funguje jako dvousměrný pasivní
komponent v rámci optických sítí, jehož hlavní úlohou je umožnit sdílení optického
signálu mezi více uživateli. Tento prvek efektivně rozděluje signál z centrální jed-
notky OLT (Optical Line Terminal) do několika větví, aby mohl být distribuován
do jednotek ONU (Optical Network Unit) umístěných u koncových uživatelů, což se
děje v procesu zvaném downstream. V opačném směru, tedy při upstream přenosu,
splitter naopak sbírá data od více ONU jednotek a spojuje je do jediného signálu,
který je následně odeslán zpět k OLT. [5]

Optické děliče se vyrábějí pomocí dvou hlavních technologických postupů, kte-
rými jsou Fused Biconical Taper (FBT) a Planar Lightwave Circuit (PLC), přičemž
každá z těchto technologií nabízí různé vlastnosti a je vhodná pro specifické aplikace
v rámci optických sítí. [18]

3.3.1 PLC rozbočovač

PLC rozbočovač představuje druh optického splitteru, který je postaven na bázi polovodičové technologie. Jeho klíčovou součástí je PLC čip, kolem kterého jsou organizována optická pole vytvořená na podložce z křemíku. Díky své konstrukci nabízejí tyto rozbočovače menší útlum signálu ve srovnání s rozbočovači typu FBT, což je činí efektivnějšími pro rozdělování signálu, dokonce až do poměru 1:128. Tato vlastnost z nich činí ideální volbu pro implementaci v pasivních optických sítích, jako je FTTH (Fiber To The Home), kde je potřeba rozvádět optický signál k velkému počtu uživatelů. [18]

3.3.2 FBT rozbočovač

FBT dělič, jeden z nejrozšířenějších typů optických splitterů, využívá k realizaci své funkce techniku spojování optických vláken. Tento proces se odehrává pod vysokým tlakem a teplotou, což umožňuje roztavení vnějšího obalu vláken a jejich následné přiblížení jader vláken velmi blízko k sobě. Takto jsou vytvořeny svazky obvykle dvou až čtyř vláken, která se poté vrství na sebe ve víceúrovňové kaskádě. Díky této metodě jsou FBT děliče typicky využívány v aplikacích, kde je potřeba méně výstupních portů. Existují dva typy děličích poměrů, symetrický a asymetrický. Symetrické děliče rozdělují záření rovnoměrně mezi všechna výstupní vlákna, příkladem je například dělič s poměrem 50:50. Asymetrické děliče dělí světlo mezi výstupní vlákna v různých poměrech, například dělič s poměrem 80:20 rozděljuje záření na dva výstupy, jeden s 80 % a druhý se 30 % vstupního výkonu. [18]

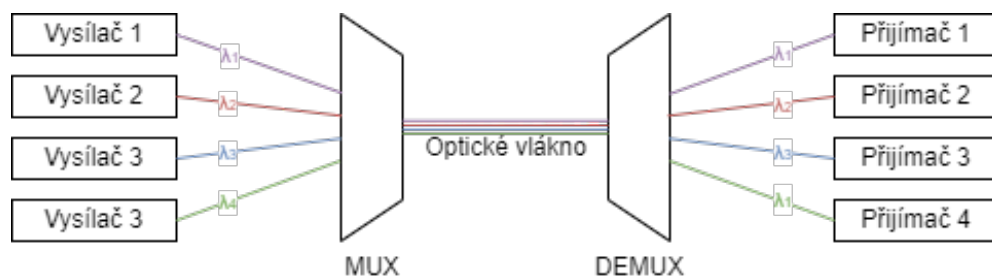
3.4 Multiplexer a Demultiplexer

Multiplexery a demultiplexery jsou zařízení pro slučování (v případě multiplexerů) a rozdělování (v případě demultiplexerů) různých vlnových délek do jediného optického vlákna nebo z něj. Tyto přístroje nacházejí své uplatnění především v systémech založených na technologii WDM (Wavelength Division Multiplexing). Nejjednodušší forma WDM používá dvě vlnové délky, přičemž každá pochází z různého spektrálního „okna“, jako je například kombinace 850 nm a 1300 nm pro vícevidová vlákna nebo 1310 nm a 1550 nm pro jednovidová vlákna. Tím se kapacita spoje zdvojnásobí a umožní plně duplexní komunikace. Technologie WDM se dále vyvíjí do pokročilejších forem jako jsou WWDM (Wide Wavelength Division Multiplexing), CWDM (Coarse Wavelength Division Multiplexing) a DWDM (Dense Wavelength Division Multiplexing), které se liší v hustotě rozložení kanálů. [8, 20]

Zatímco návrh a realizace multiplexeru bývá obvykle jednodušší než u demultiplexeru, může se provádět různými způsoby, jako je využití multivlnového zdroje

se schopností přizpůsobení vlnové délky nebo kombinací signálů z více vstupů do jednoho výstupu. [20]

Naopak demultiplexer, který slouží k rozdělení signálu z jednoho vlákna na více výstupů s odlišnými vlnovými délkami, vyžaduje použití specifických optických komponent, jako jsou difrakční mřížky, hranoly nebo optické filtry, v závislosti na počtu a typu vlnových délek, které mají být zpracovány. Optické filtry se obvykle používají, pokud je potřeba manipulovat s menším počtem vlnových délek, zatímco pro větší počet vlnových délek a pro dosažení vyšší přesnosti a efektivity se upřednostňují difrakční techniky. Mezi nejčastěji používané demultiplexery patří systémy založené na dielektrických filtrech, FBG (Fiber Bragg Grating) a AWG (Arrayed Waveguide Grating). [20]



Obr. 3.1: Schéma základního spoje WDM.

3.4.1 Soustava dielektrických filtrů

Soustava dielektrických filtrů je navržena k selektivnímu odstraňování specifických optických signálů. Každý filtr v tomto systému je zodpovědný za odstranění konkrétní frekvence, která je zachycena snímačem, zatímco ostatní frekvence jsou ponechány neporušené a pokračují dál v cestě. Tento postup se neustále opakuje, až jsou všechny komponenty signálu postupně vyfiltrovány. [20]

3.4.2 Fibre bragg grating

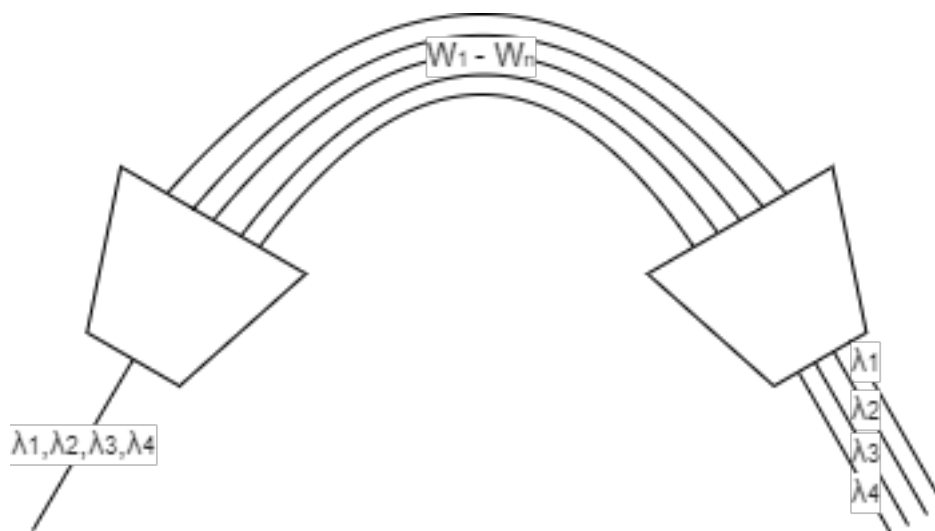
Funkce FBG (Fiber Bragg Grating) demultiplexeru je založena na principu podobném systému dielektrických filtrů. Klíčovým procesem je odraz vlny od Braggovy mřížky, který nastává, pokud se Braggova rezonanční vlnová délka blíží vlnové délce vstupního signálu. Jestliže tato podmínka splněna není, vlna pokračuje dále bez odrazu. [20]

Braggova mřížka je specifická struktura umístěná v jádru optického vlákna, charakterizovaná oblastmi s rozdílnými indexy lomu. Tyto oblasti se vytvářejí pomocí

expozice UV laserem. Možnost regulace, která frekvence bude z filtru odražena, je dána změnou periodicity, s jakou se mění index lomu v mřížce. Tato perioda odpovídá polovině vlnové délky cílené frekvence. [20]

3.4.3 Arrayed waveguide grating

V případě AWG demultiplexeru je vstupní signál nejdříve rozdělen do několika částí, které jsou poté vedeny paralelně přes vlnovody různých délek. Díky rozdílům v délkách těchto vlnovodů dochází k fázovému posunu mezi jednotlivými vlnami. Když se tyto vlny později znovu setkají, jejich fázové rozdíly mezi sebou interferují, což vede k tomu, že se výstupní body, odpovídající různým vlnovým délkám, nacházejí na různých místech. Tyto výstupní body jsou pak zachyceny připojenými optickými vlákny. AWG demultiplexery jsou často využívány v systémech DWDM (Dense Wavelength Division Multiplexing) pro jejich schopnost efektivně oddělovat vlnové délky v hustě multiplexovaných optických signálech. [20]



Obr. 3.2: Schéma AWG demultiplexeru.

4 Metody měření a monitorování optických tras

4.1 Optická reflektometrie v časové doméně (OTDR)

OTDR (Optical Time-Domain Reflectometry) je metoda používaná k měření a analýze vlastností optických vláken. OTDR funguje na principu vysílání série krátkých světelných pulzů do optického vlákna a měření světla, které se od různých bodů ve vlákne odrazí zpět k přístroji. Připojením jednoho konce vlákna může OTDR vypočítat útlum vlákna, uniformitu, ztráty spojů a konektorů. [21]

Optická reflektometrie v časové doméně generuje a vysílá do vlákna sérii světelných pulzů. Tyto pulzy cestují vlákem a na různých místech narazí na nehomogeneity, jako jsou spoje, sváry, zlomy nebo koncovky vláken, kde dochází k odrazu části světla zpět k zdroji. Odražené světlo je zachyceno a analyzováno OTDR, který měří intenzitu odraženého signálu a čas, který světelnému pulzu trvalo, než se vrátil zpět. Díky tomu je možné určit vzdálenost místa odrazu od zařízení. [21]

Při měření pomocí OTDR je nezbytné znát několik základních parametrů, které je třeba nastavit. Jedná se o parametry, jako je délka měřené dráhy, doba průměrování a šířka vysílaných impulsů. Většina přístrojů má automatické nastavení těchto parametrů podle měřené trasy, měření v automatickém režimu je však vhodné pouze pro orientační náhled trasy, v praxi se tyto parametry nastavují ručně. Doba průměrování se pohybuje v rozmezí 15 sekund až 1 minuty. Klíčové je nastavení šířky vysílaných impulsů, tato šířka se volí podle délky trasy, tedy k celkovému útlumu. Pokud je šířka impulsu příliš velká, je měření negativně zkresleno, naopak při příliš krátkém impulsu je signál ponořen do šumu a měření je nepřesné. Šířka pulzu přímo určuje prostorové rozlišení (rozlišovací schopnost) OTDR. [21]

Spolu se šířkou impulsu existuje také parametr, který nazýváme „mrtvá zóna“. Obecně se jedná o určitou vzdálenost za výstupním konektorem OTDR, ve které nelze provádět měření. Světlo, které se odrazí zpět, způsobuje saturaci detektoru, protože nelze odstranit první Fresnelův odraz od prvního konektoru. Fotodioda potřebuje čas na zotavení, mrtvá zóna je určena touto dobou a šířkou impulsu. Velikost této zóny se pohybuje od jednotek metrů do desítek metrů v závislosti na šířce použitého impulsu, viz tabulka. Mrtvou zónu lze eliminovat připojením předřadného vlákna a za toto vlákno pak připojením měřeného vlákna. [21]

4.2 Měření útlumu pomocí zdroje světla a energetického měřiče (LSPM)

Metoda měření útlumu pomocí zdroje světla a energetického měřiče spočívá v měření a porovnání intenzity světelného signálu na začátku a na konci měřeného úseku vlákna. Na jednom konci optické trasy je umístěn zdroj světla, který vysílá světelný signál o známé intenzitě a vlnové délce do optického vlákna. Tento zdroj může být například LED dioda nebo laser. Na druhém konci optické trasy je umístěn energetický měřič, který měří intenzitu světla, jež prošlo vlákem. Tento přístroj měří výkon světla v jednotkách dBm (decibely nad 1 miliwatt). Útlum v decibelech (dB) se vypočítá na základě rozdílu mezi výkonem signálu na vstupu do vlákna a výkonem signálu na výstupu. Tento rozdíl ukazuje, kolik světelné energie bylo ztraceno při průchodu vlákem. [22]

Tato metoda poskytuje přesná měření útlumu pro celé spektrum aplikací, od jednoduchých kabelů po složité optické trasy a může být použita pro různé typy vláken a vlnové délky. Na rozdíl od OTDR ale nemůže LSPM lokalizovat místa s vysokým útlumem nebo jinými problémy na trase a je potřeba mít přístup k oběma koncům měřeného úseku. [22]

4.3 Optická spektrální analýza (OSA)

Optical Spectrum Analyzer (OSA) poskytuje podrobné informace o složení signálu v závislosti na vlnové délce nebo frekvenci, umožňuje identifikovat různé vlnové délky a měřit jejich intenzitu, šířku pásma nebo ztráty a tím identifikovat specifické typy narušení nebo modifikací. [23]

OSA rozdělí přicházející optický signál do jeho spektrálních složek, což umožňuje detailní analýzu každé vlnové délky zvlášť. To se obvykle dosahuje pomocí difrakční mřížky nebo interferometru. Spektrální složky jsou následně detekovány a měřeny. OSA může používat různé typy detektorů (např. fotodiody) pro převod optické energie na měřitelný elektrický signál. Měřené spektrum je analyzováno a zobrazeno ve formě grafu, kde osa x reprezentuje vlnovou délku (nebo frekvenci) a osa y intenzitu nebo výkon jednotlivých spektrálních složek. [23]

4.4 Optický zpětný útlum (ORL)

Měření optického zpětného útlumu (Optical Return Loss) je technika používaná k určení míry, jakou se optický signál odráží zpět ke zdroji v optickém komunikačním systému nebo komponentu. [24]

Zdroj světla odesílá signál do optického systému. Část tohoto signálu se může na různých místech (např. spoje, konektory, nečistoty) odrazet zpět k zdroji. Míra odrazu závisí na rozdílu indexů lomu mezi spojenými materiály a na kvalitě a čistotě spojovacích bodů. Speciální měřicí zařízení, jako je ORL meter, detekuje a měří intenzitu signálu, který se vrací zpět. ORL se vypočítá jako rozdíl mezi výkonem odeslaného signálu a výkonem signálu vráceného. Vyšší hodnota ORL značí menší množství odraženého světla a značí lepší vlastnosti spoje a menší rušení. [24]

4.5 Bit Error Rate Test (BERT)

Bit Error Rate Test (BERT) je metodou používanou k měření kvality signálu v digitálních komunikačních systémech. Testování míry chyby bitů (Bit Error Rate, BER) pomáhá zjistit, jak často dochází k chybnému přenosu bitů v kanálu. BER je definován jako poměr počtu chybně přijatých bitů k celkovému počtu přenesených bitů během určitého časového období. [25]

BERT zahajuje proces generováním a odesíláním známé posloupnosti datových bitů, známé jako testovací vzorek nebo vzor, přes komunikační kanál. Tato data jsou posílána přes přenosová média. Na přijímacím konci jsou data přijata a porovnávána s původním vzorem, který byl odeslán. Jakýkoliv rozdíl mezi odeslaným a přijatým vzorem je zaznamenán jako chyba. Počet chyb (chybně přijatých bitů) je vydělen celkovým počtem odeslaných bitů, což dává BER. Nízká hodnota BER indikuje dobrý výkon komunikačního kanálu, zatímco vysoká hodnota BER ukazuje problémy. [25]

4.6 Interferometrická metoda

Základem této metody je interference. Nejčastěji se k měření používá Michelsonův nebo Mach-Zehnderův interferometr. Měřený vzorek se skládá z jednoho ramene Mach-Zehnderova interferometru a druhé rameno slouží jako referenční dráha se známou chromatickou disperzí. Na straně detekce dochází k interferenci mezi signály z obou ramen. Pokud měníme délku referenční dráhy, můžeme použít interferenci ke sledování fázového rozdílu mezi signály z obou ramen. Pro referenční cestu lze použít krátké optické vlákno nebo optický paprsek, který je veden pouze vzduchem pomocí optické soustavy. Tento se používá pouze pro měření krátkých úseků optických vláken (do 10 m). Z toho vyplývá, že tato metoda není vhodná pro měření optických drah, ale používá se spíše pro přesné měření krátkých vláken nebo pro měření součástek. [26]

5 Útoky v optických sítích

Existuje mnoho způsobů, jak může dojít k úniku informací v optických sítích. Není snadné tyto způsoby přesně klasifikovat, ale lze je rozdělit do základních kategorií. První kategorií jsou útoky, které způsobují přerušení spojení na trase, a tyto výpadky mohou být detekovány pomocí síťových kontrolních mechanismů. Druhou kategorií jsou útoky, které nevyžadují fyzickou změnu optické infrastruktury. Tyto útoky často využívají fyzikálních vlastností optických vláken k odposlechu dat.

5.1 Útoky bez přerušení vlákna

Odposlech z optického vlákna, známý jako fiber tapping, je technika, která umožňuje sledování dat přenášených vláknem bez toho, aby došlo k jeho fyzickému poškození. Klíčovým benefitem této metody je, že pokud je provedena správně, stává se odhalení takového odposlechu velmi složitým. To je výrazný rozdíl oproti jiným metodám odposlechu, které zahrnují přerušení signálu nebo jiné viditelné zásahy do trasy, což je možné snadno zaznamenat. [27]

Schopnost detekce odposlechu závisí na míře útlumu signálu způsobeného odposlouchávacím zařízením. Existují různé přístupy k fiber tappingu, přičemž některé z nich způsobují vyšší útlum signálu než jiné, což ovlivňuje jejich snadnou či obtížnou detekovatelnost. [27]

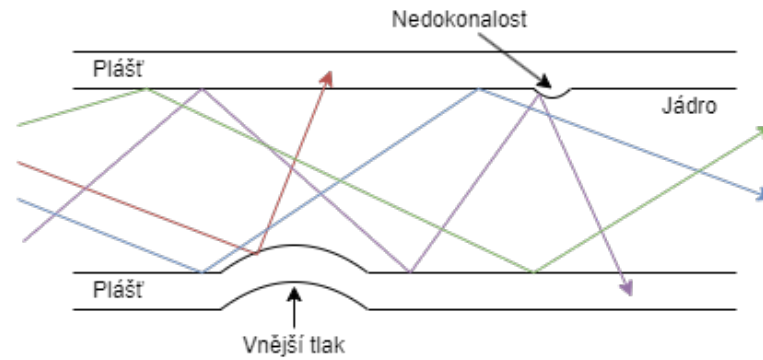
5.1.1 Mikroohyb

Mikroohyby v optickém vlákně mohou vzniknout kvůli malým nedokonalostem, které jsou důsledkem výrobního procesu, například kvůli nerovnostem mezi jádrem a pláštěm nebo odchýlkám v průměru vlákna. Mohou být také vyvolány aplikací vnějšího tlaku na vlákno. Tyto jevy vedou k tomu, že část světelných paprsků uniká z vlákna, což má za následek mírný útlum signálu. [27]

Mikroohyby se vyskytují poměrně často a jejich detekce je složitá, což umožňuje, že mohou být využity pro skryté odposlechy. V porovnání s jinými odposlechovými metodami však množství úniku záření a tudíž i unikajících informací bývá u mikroohybů relativně nízké. [27]

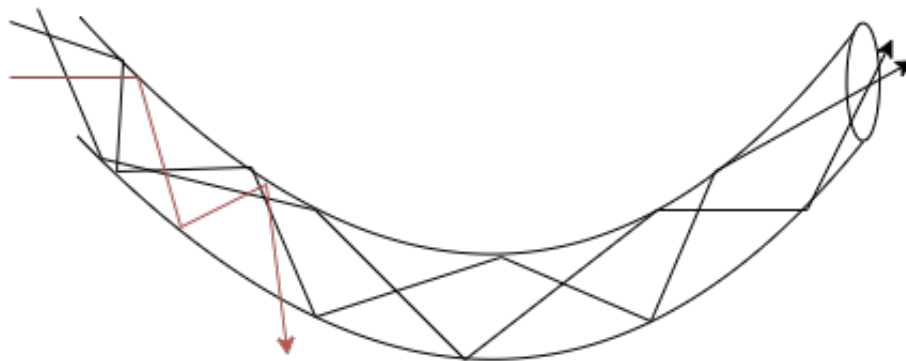
5.1.2 Makroohyb

Odposlech makroohybem využívá podobný princip jako mikroohybem, s cílem vytlačit světelný paprsek z vlákna. Na rozdíl od mikroohybu se však zde dosahuje tohoto efektu ohnutím vlákna do kritického poloměru ohybu, který je menší než



Obr. 5.1: Znázornění mikroohybu.

je doporučený minimální limit. Při takovém ohnutí dochází k situaci, kdy světelný paprsek již nereflakuje zpět do vlákna, ale uniká ven. Minimální bezpečný poloměr ohybu je specifikován výrobcem a závisí na typu a průměru vlákna, podle standardů ITU-T (viz obr. 1.1) . Využití makroohybu je považováno za jeden z nejsnadnějších způsobů, jak zaútočit na fyzickou vrstvu optických sítí. Prostřednictvím makroohybu je možné do systému vložit rušivý signál, což může vést k poškození optických zesilovačů a switchů. [6, 28]



Obr. 5.2: Znázornění makroohybu.

5.1.3 Přeslechy WDM

Jedná se o nechtěný jev, který se může objevit v aktivních i pasivních komponentech optických přenosových systémů. Specifickým příkladem je možnost odposlechu signálu v systémech s vlnovým dělením (WDM) používajících multiplexery. Přeslechy v systémech WDM jsou významným problémem, který ovlivňuje výkon optických sítí. Dochází k němu, když optický výkon z jednoho kanálu uniká do druhého, což se

projevuje jako šum a snižuje integritu signálu nebo může způsobit nežádoucí přístup a následný odposlech. Přeslechy mohou být vnitrokanálové, kdy dochází k rušení v rámci stejné vlnové délky, nebo mezikanálové, které ovlivňují různé vlnové délky. Míra tohoto přeslechu závisí na designu multiplexeru, přesněji na rozestupech mezi jednotlivými přijímači ve vláknovém vedení. [29]

5.1.4 Rayleighův rozptyl

Tento jev se přirozeně vyskytuje, když foton narazí na molekuly v prostředí, kterým se šíří. I když je takto rozptýlené záření slabé, lze ho zachytit pomocí fotodetektorů umístěných kolem vlákna nebo může být přeměrováno do jiného vlákna, což umožňuje odposlech. Tento typ útoku je velice jednoduchý, protože nevyžaduje žádnou fyzickou manipulaci s vláknem. [30]

5.1.5 Rozptyl Braggovými mřížkami

Tento proces je poměrně komplexní a zahrnuje vytváření Braggovy mřížky v jádru optického vlákna. Toho se dosahuje pomocí interferování UV paprsků z UV excitačního laseru, které vyleptávají mřížku přímo do materiálu vlákna, které se následně vloží do aktivní optické trasy. Na této mřížce pak dochází k odrazu části světelného záření mimo vlákno, což lze zachytit fotodetektory umístěnými kolem vlákna, podobně jako u Rayleighova rozptylu. Nicméně, realizace této metody v terénu je značně náročná kvůli komplikovanosti procesu vyleptávání mřížek do vlákna. [27]

5.1.6 Řez s V-drážkou

Tato metoda zahrnuje vyříznutí drážky ve vnějším obalu vlákna, která sahá až těsně k jádru. Úhel, pod kterým V-tvarovaná drážka přiléhá k světlu šířícímu se vláknem, přesahuje kritický úhel. To vede k úplnému vnitřnímu odrazu a část světla, která se pohybovala ve vnějším obalu a přecházela přes drážku, uniká z vlákna ven. [27]

5.1.7 Zpětný odraz

Zpětný odraz se objevuje na spojovací ploše mezi upravenými konci dvou spojených konektorů a v malém vzduchovém prostoru mezi nimi. Je známý jako Fresnelův odraz a vzniká kvůli rozdílu v indexu lomu materiálu konektoru a vzduchu. Podobně jako u Rayleighova rozptylu, i tento odraz může být detekován fotodetektorem, což umožňuje potenciální odposlech přenášené komunikace. [31]

5.2 Útoky s přerušením vlákna

Tyto druhy útoků je snazší odhalit ve srovnání s útoky, které nevedou k přerušení optického vlákna, jelikož dočasně naruší kontinuitu sítě. Toto přerušení může zaznamenat jak provozovatel sítě s nasazenými monitorovacími nástroji, tak i samotný uživatel, který si všimne výpadku ve svém připojení k poskytovateli internetových služeb. Z tohoto důvodu je nutné plánovat tyto útoky s přihlédnutím k časování, například během předem oznámené údržby nebo nečekaných výpadků sítě způsobených jinými faktory, aby nedošlo k jejich snadnému odhalení.

5.2.1 Vložení aktivních zařízení

Tento typ útoku, známý jako útok MitM (Man in the Middle), zahrnuje umístění aktivního zařízení mezi dvě komunikující strany. Existují dva typy takových aktivních zařízení: optoelektronická a optotronická. [32]

Optoelektronické zařízení přeměňuje přijatý optický signál na elektrický, umožňuje jeho analýzu nebo úpravu, a poté jej znovu převádí na optický signál, který pokračuje ve svém přenosu. Hlavní nevýhodou tohoto přístupu je dodatečné zpoždění signálu ve srovnání s neporušeným průběhem přenosu. [32]

Na druhou stranu, optotronické zařízení pracuje přímo s optickým zářením, což přináší výhodu menší odhalitelnosti díky absenci zpoždění signálu. Je však klíčové, aby intenzita signálu výstupu odpovídala intenzitě na vstupu, což snižuje pravděpodobnost odhalení prostřednictvím měření útlumu. [32]

Oba typy zařízení, jak optoelektronické, tak i optotronické, jsou však potenciálně odhalitelné pomocí měření útlumu s využitím metody OTDR (Optical Time-Domain Reflectometer). [32]

5.2.2 Vložení optického děliče

Optický dělič je pasivní zařízení sloužící k rozdělení světelného záření na více částí. Pro jeho instalaci do optické sítě je nutné tuto síť fyzicky přerušit. Vztah mezi odvedeným a procházejícím signálem je obvykle velmi nízký (až 1:99), což vede k minimálnímu zvýšení útlumu v síti. V důsledku toho může být zařízení při použití standardních metod měření odporu v síti těžko detekovatelné. Strategie umístění děliče na trase může výrazně ovlivnit jeho odhalení. Pokud je umístěn za prvky způsobující další útlum nebo za optickými zesilovači, možnost jeho detekce se značně snižuje, protože při vnesení jen velmi malého útlumu do trasy může jednoduše splynout například s konektorem. [33]

5.2.3 Vložení demultiplexoru

Tento druh útoku vychází z podobného konceptu jako vložení optického děliče, ale liší se v tom, že místo odklonění části světla v širokém spektru dochází k selektivnímu odklonění pouze světla s konkrétní vlnovou délkou. Nejsnadnější k použití je demultiplexor, který využívá Braggových mřížek, přestože je možné využít jakýkoliv typ vlnového demultiplexoru. Podobně jako při použití optického děliče lze šanci na odhalení této metody snížit tím, že se zařízení umístí za jiné prvky v síti, které mohou účinně maskovat jeho přítomnost. [32]

6 Výsledky studentské práce

Praktická část této práce bude zaměřena na realizaci vybraných útoků (makroohyby, vložení děliče, přeslechy vlnových multiplexů a zachycení zpětného odrazu) na optickou vláknovou infrastrukturu a ověření vybraných metod (přímá metoda, OTDR, BERT, OSA a měření zpětného odrazu) na detekci těchto útoků. Také bude provedena analýza rizik útoků s návrhem minimalizace těchto rizik.

6.1 Analýza rizik

6.1.1 Analýza rizik makroohybu

Závažnost a riziko útoku makroohybem je úzce spjata s typem sítě a s typem použitého optického vlákna. Tento útok není závislý na místě, tudíž může být proveden kdekoliv v průběhu celé trasy. Útlum způsobený makroohybem může vést ke snížení kvality, zvýšené chybovosti a nebo k úplnému výpadku služeb. Dalším rizikem makroohybů je možnost odcizení dat a tím způsobena kompromitace zabezpečené komunikace. Posledním rizikem je degradace fyzických vlastností vlákna způsobena opakovanými ohyby, která vede ke snížení životnosti optických kabelů a nutnosti častějších oprav a údržby. Celkově bych rizika spojená s tímto útokem hodnotil jako vysoká, protože některé měřicí metody nedokáží rozeznat změny pod 0,2 dB, tudíž větší poloměry makroohybů nemusí být detekovány a mohou splynout s celkovým útlumem trasy.

Tato rizika lze minimalizovat například položením optického vlákna co nejpříměji, aby nedocházelo k překročení minimálních bezpečných poloměrů ohybu a použití ochranných krytů a výztuh v místech s vysokým rizikem tohoto útoku. S tím souvisí i materiály vláken, například vlákna typu G657, která jsou odolnější proti ohybovým ztrátám. Další možností minimalizace je šifrování přenášených dat před potencionálním odposlechem a použití monitorovacích systémů, které dokáží změny detekovat a rychle na ně reagovat.

6.1.2 Analýza rizik vložení děliče

Při útoku vložení děliče může být dělič vložen buď v sestupném směru do aktivní optické sítě nebo může být dělič vložen ve vzestupném směru do pasivní optické sítě za jiný dělič, což je hůře detekovatelné, pokud nedojde k překonání hranice maximálního útlumu.

Pro minimalizaci těchto rizik je nejvýhodnější použít dělič s co nejnižším vloženým útlumem, aby případně bylo možné detekovat jiný dělič vložený hned za již

existující. Takovým děličem by byl například dělič s dělicím poměrem 99:1, z důvodu malého vloženého útlumu, takže by detekce dalšího vloženého děliče byla jednodušší. Také by měly být pomocí monitorovacích systémů hlášeny změny útlumu a hlavně déle trvající výpadky trasy. Je také doporučováno celkové zabezpečení přístupu k optické síti, aby k vložení optického děliče vůbec nemohlo dojít. Pro minimalizaci by také všechna komunikace měla být šifrována.

6.1.3 Analýza rizik přeslechů multiplexů

U přeslechů vlnových multiplexů je prvním rizikem interference některého z kanálů s jiným kanálem a následné zhoršení kvality signálu a snížení rychlosti přenosu dat. Přeslechy mohou také omezit efektivní využití dostupného spektra a snížit tak kapacitu. Dalším rizikem je neautorizovaný přístup k přenášeným informacím a tím porušena integrita a důvěrnost dat. I když je třeba takto získaný signál zesílit, tak je riziko vysoké, protože je tento typ útoku jen velmi těžko odhalitelný.

Hlavní možností jak předejít vzniku přeslechů je zvolení kvalitních a spolehlivých zařízení s dostatečnou izolací jednotlivých kanálů v kritických úsecích sítě, protože dostatečná izolace zajišťuje čistý přenos signálu bez rušení a přeslechů. Pro většinu aplikací je považována za dostatečnou izolaci hodnota kolem 30 dB. Pro pokročilé DWDM aplikace, kde je kladen důraz na maximální čistotu signálu a minimální přeslechy, může být požadována izolace až 40 dB nebo vyšší. Dále je doporučováno pečlivé plánování spektrálního rozdělení kanálů, aby se snížila možnost interference.

6.1.4 Analýza rizik zpětného odrazu

Zpětný odraz může způsobit křížení s přenášeným signálem, což může vést k výpadkům, zhoršení kvality služeb nebo k poškození laserového vysílače a jiných optických zařízení. Dalším rizikem může být odcizení a zneužití odražených dat. Tato data však je třeba oddělit od vysílaného sestupného signálu a následně pravděpodobně zesílit a tak není riziko velké a je lehce minimalizovatelné.

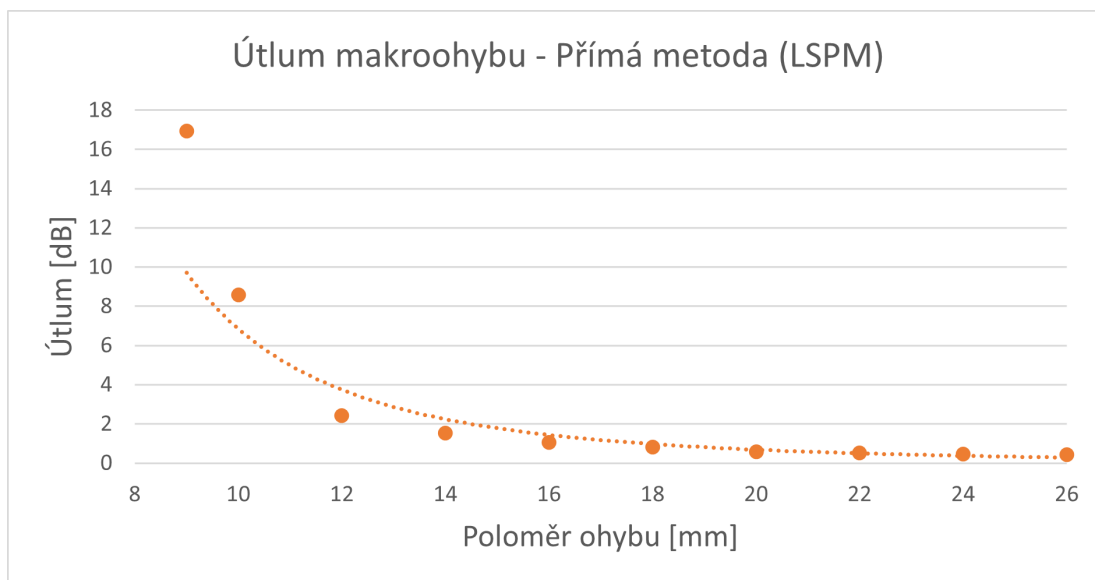
Základní možností minimalizace je zamezení přístupu útočníka k volným zakončením nebo k jiným prvkům optické infrastruktury. U zakončení lze minimalizovat riziko odrazu použitím konektorů a spojek s nízkým zpětným odrazem. Místo UPC konektorů například konektory APC. Rizika také lze minimalizovat použitím šifrování dat, takže případná odcizená data nebudou lehce čitelná.

6.2 Měření optické trasy

V následující podkapitole bude rozebráno měření jednotlivých metod, použité přístroje, typy konektorů a spojek a postupy měření. Dále zde budou naměřená data zpracovaná do přehledných tabulek a grafů.

6.2.1 Měření makroohybu přímou metodou (LSPM)

Pro měření přímou metodou byl použit zdroj vysílání EXFO FLS-600 Light Source vysílající na vlnové délce 1550 nm, optické vlákno typu G652 a měřič výkonu EXFO FPM-600 Power Meter, který byl nejprve kalibrován referenční hodnotou útlumu a následně použit pro měření makroohybů o poloměrech 9 až 26 mm (měřeno pomocí vytištěných forem), vždy ob jeden milimetr. Z těchto naměřených hodnot, viz obr. 6.1, lze vyčíst, že touto metodou je znatelnější útlum (větší než 1 dB) možné detekovat až při poloměru ohybu 14 mm.

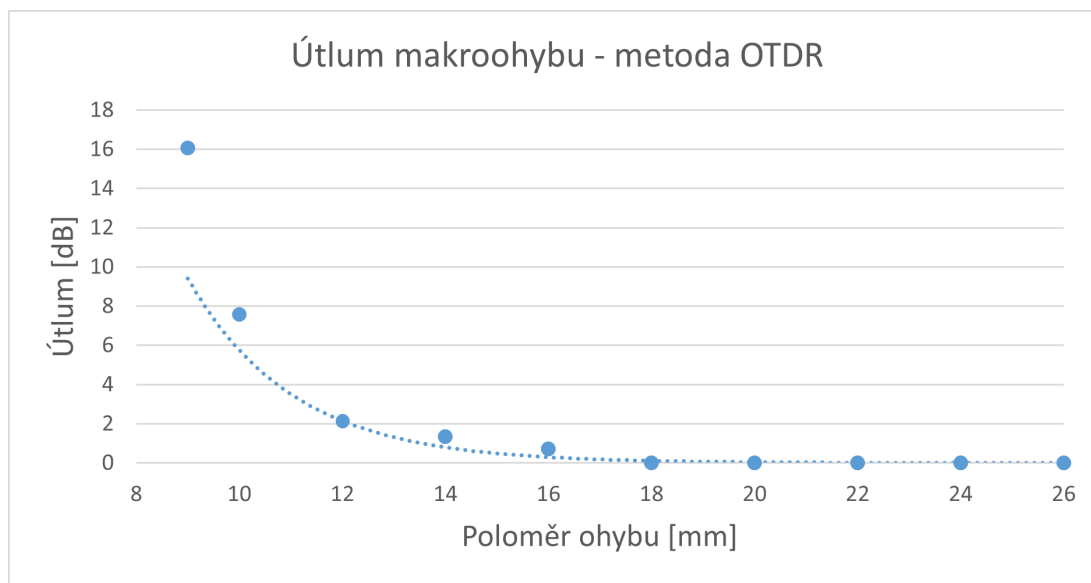


Obr. 6.1: Graf naměřených hodnot útlumu makroohybu přímou metodou.

6.2.2 Měření makroohybu metodou OTDR

Pro měření makroohybu reflektometrickou metodou byl použit OTDR reflektometr EXFO FTB-2 s aplikací OTDR, předřadné vlákno typu G652 délky jednoho kilometru a zařadné vlákno opět typu G652 délky 500 metrů. Měření byly opět ohyby o poloměrech 9 až 26 mm a vysílaný signál byl na vlnové délce 1550 nm. Pro co nejvyšší rozlišení měření každého poloměru ohybu byl nastaven puls 3 ns a délka měření

byla nastavena na 60 sekund. Na obr. 6.2 lze vidět jednotlivé naměřené útlumy, kde znatelnější výkyv byl zaznamenán od poloměru 16 mm a menším.



Obr. 6.2: Graf naměřených hodnot útlumu makroohybu metodou OTDR.

6.2.3 Výsledky měření makroohybů

V rámci měření útlumu makroohybu bylo zjištěno, jakého útlumu dosahují jednotlivé poloměry ohybu. Z obou použitých metod byl makroohyb detekován a u obou metod přibližně od stejného poloměru. Vhodnější metodou se ale jeví metoda OTDR, která nejenže detekuje makroohyby, ale ještě dokáže přesně určit, kde na trase k ohybu došlo, takže případná eliminace hrozby je snazší.

6.2.4 Měření vložení děliče metodou OTDR

K měření vložení děliče reflektometrickou metodou byl použit stejný přístroj jako u měření makroohybu a to FTB-2 od společnosti EXFO se stejně dlouhým předřadným i zařadným vláknem, 1 km respektive 500 m, dále jednotlivé děliče od 50:50 po 99:1 a spojky SC/FC, protože některé děliče byly vybaveny FC konektory a OTDR bylo vybaveno SC konektorem. V tabulce 6.1 lze vidět naměřené útlumy v porovnání s hodnotou udávanou výrobcem.

Dělič	INPUT	OUTPUT	Útlum [dB]	Útlum dle data sheetu [dB]
50:50	White	Black	3,194	3,03
	White	White	3,584	2,91
80:20	Red	Black	1,116	1,28
	Red	Yellow	7,347	7,34
90:10	Red	Black	0,452	0,58
	Red	Yellow	10,963	10,51
95:5	Red	Black	0,424	0,42
	Red	Yellow	13,441	13,38
99:1	Red	Black	0,483	0,33
	Red	Blue	20,415	20,08
	White	Black	19,991	19,81
	White	Blue	0,321	0,28

Tab. 6.1: Naměřené hodnoty útlumu jednotlivých děličů metodou OTDR.

6.2.5 Měření vložení děliče přímou metodou (LSPM)

K měření přímou metodou byly opět použity zdroj EXFO FLS-600 Light Source a měřič výkonu EXFO FPM-600 Power Meter, kalibrované na referenční hodnotu. Měřeny byly stejné děliče jako u metody OTDR a u obou metod také probíhalo měření pouze na vlnové délce 1550 nm, protože všechny děliče byly vyrobené pouze na tuto vlnovou délku. V tabulce 6.2 lze vidět naměřené hodnoty a jejich porovnání s data sheetem od výrobce.

6.2.6 Měření vložení děliče metodou BERT

K měření útlumu a detekci vložení děliče rozpojením a spojením trasy byl použit stejně jako u detekce makroohybu přístroj FTB-1 s modulem FTB-7200G+23B-EA Ethernet & Multi-Service, SFP Ubiquiti, který pracuje na vlnové délce 1550 nm a aplikací NetBlazer. Útlum celé trasy bez děličů byl 6 dB. Měření každého děliče probíhalo 30 sekund, kdy po 10 sekundách byla trasa rozpojena, byl vložen dělič a trasa byla opět spojena. V tabulce 6.3 jsou zaznamenány útlumy jednotlivých děličů a pro porovnání i referenční hodnota měření bez děliče, kdy byla jen rozpojena trasa a následně znovu spojena.

Dělič	INPUT	OUTPUT	Útlum [dB]	Útlum dle data sheetu [dB]
50:50	White	Black	3,29	3,03
	White	White	3,62	2,91
80:20	Red	Black	1,49	1,28
	Red	Yellow	7,64	7,34
90:10	Red	Black	0,63	0,58
	Red	Yellow	11,26	10,51
95:5	Red	Black	0,48	0,42
	Red	Yellow	13,6	13,38
99:1	Red	Black	0,65	0,33
	Red	Blue	20,81	20,08
	White	Black	20,21	19,81
	White	Blue	0,51	0,28

Tab. 6.2: Naměřené hodnoty útlumu jednotlivých děličů přímou metodou (LSPM).

6.2.7 Výsledky měření vložení děliče

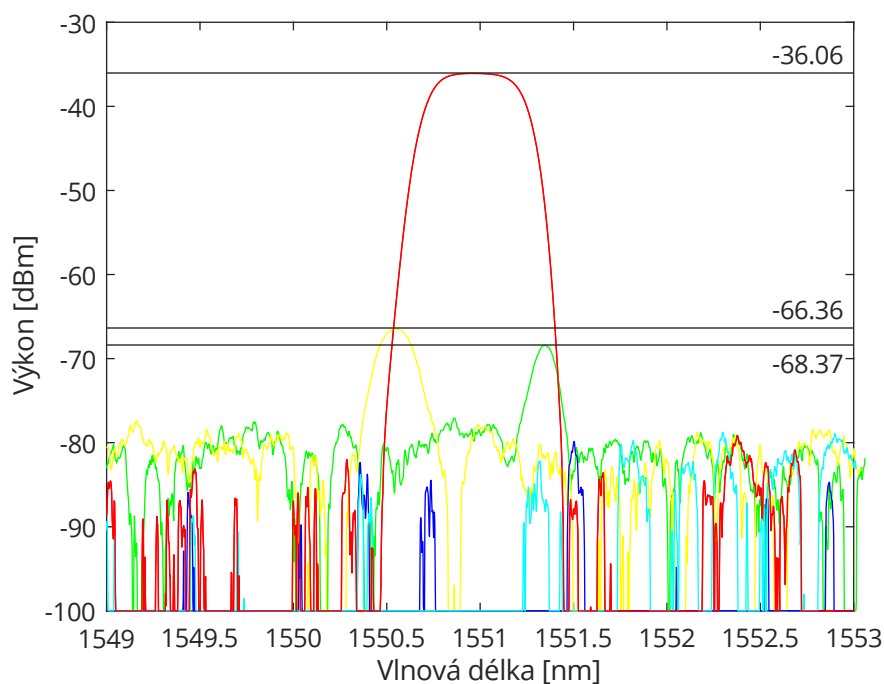
Z výsledků metod vložení děliče je patrné, že metoda OTDR lépe a přesněji detekovala dělič a jeho druh na trase. Co se týče BERT metody, která zkoumala nejen útlumy děličů, ale také jak se znovuspojená trasa zachová, lze z tabulky hodnot naměřených vždy pro vyšší vložení útlum vidět, že pro všechny děliče, kromě 99:1, trasa na 11 sekund vypadla a následně bylo spojení úspěšně obnoveno, ale výrazně se zvýšil útlum. U děliče 99:1 se po spojení provoz trasy neobnovil, protože útlum způsobený děličem byl moc vysoký. Když byl do trasy vložen vždy ten z nižších vložených útlumů děliče, tak kromě děličů 50:50 a 80:20 byla detekce velmi složitá, protože vložený útlum byl nižší než 0,5 dB. U všech děličů se při vložení vyššího z útlumů a následném spojení trasy buď zvýšil útlum, případně nedošlo ke znovuspojení, takže bylo jasné, že je s trasou něco v nepořádku.

	Bez děliče	50:50	80:20	90:10	95:5	99:1
Útlum [dB]	0	4,4	7,9	13	15,3	21,8
LOS [s]	10	10	10	10	10	21
Link Down [s]	11	11	11	11	11	21
No Traffic [s]	1	1	1	1	1	0
Pattern Loss [s]	1	1	1	1	1	0

Tab. 6.3: Naměřené hodnoty jednotlivých děličů metodou BERT.

6.2.8 Měření a výsledky přeslechů multiplexu - metoda OSA

U tohoto měření byla zjištěna velikost přeslechu na sousedních kanálech multiplexu pomocí optické spektrální analýzy. K měření byl použit zdroj záření od společnosti INPHENIX INC, osmikanálový, 100 GHz DWDM MUX/DEMUX modul od společnosti BANK PHOTONICS INC a optický spektrální analyzátor Yenista Optics OSA20. Vstupní signál byl vyslán ve vlnové délce 1550,95 nm, což odpovídá kanálu 33. Následně byly měřeny vedlejší kanály 32, 34 a vzdáleněji vedlejší kanály 31 a 36. Z měření, zpracovaného v grafu 6.3, kde červená linka odpovídá hlavnímu kanálu, zelená se žlutou kanálům přímo vedlejším a světle a tmavě modrá kanálům vzdálenějším lze pozorovat, že k přeslechu dochází pouze na přímo vedlejších kanálech, kde výkon dosahoval hodnot -66,36 dBm a -68,37 dBm, což po odečtení od hlavního kanálu (naměřený výkon 36,06 dBm) znamená izolaci 30,3 dB a 32,31 dB. Na vzdálenějších kanálech k výraznému přeslechu nedochází.



Obr. 6.3: Graf naměřených hodnot přeslechů kanálů.

6.2.9 Měření a výsledky zpětného odrazu

Měření zpětného odrazu mělo za úkol zjistit, jaké mají konektory vliv na velikost zpětného odrazu. K měření byl použit zdroj EXFO FLS-600 a měřič optického výkonu EXFO FPM-600, dělič a konektory UPC a APC. Z naměřených hodnot v tabulce vyplývá, že konektor UPC produkuje nižší útlum zpětného odrazu než konektor APC a to konkrétně o zhruba 13 dB, tudíž je vhodnější jeho použití.

Zakončení	Změřený útlum odrazu [dBm]
UPC - nezapojený	-41,99
UPC - zapojený	-48,05
APC - nezapojený	-53,16
APC - zapojený	-62,87

Tab. 6.4: Naměřené hodnoty útlumu zpětného odrazu pro různá zakončení.

Závěr

Cílem práce byl teoretický rozbor problematiky bezpečnostních rizik, které jsou spojeny s optickými sítěmi. Dále bylo cílem experimentální ověření alespoň pěti metod z pohledu detekce modifikací optických sítí.

V první, teoretické části práce, byla probrána struktura optického vlákna, přenos v optických sítích s jevy, které při přenosu vznikají a prvky optických infrastruktur. Dále zde byly popsány použité i nepoužité metody měření a monitorování optických tras a možné útoky na tyto trasy.

V praktické části práce byla provedena analýza rizik měřených útoků s návrhem pro minimalizaci těchto rizik. Dále zde bylo provedeno experimentální měření vybraných metod pro detekci útoků na vytvořeném testovacím pracovišti. Z měření vyplývá, že skoro všechny útoky jsou detekovatelné na základě výraznějšího zvýšení útlumu celé trasy, až na měření přeslechů multiplexu, kde je detekce velmi složitá. Nejvhodnější metodou k detekci modifikace optické sítě je metoda OTDR, která na rozdíl od ostatních metod dokáže přesně určit, na jakém místě na trase k modifikaci došlo. K prevenci a minimalizaci těchto útoků by mělo přispět použití kvalitně vyrobených prvků optické infrastruktury a šifrování komunikace.

Literatura

- [1] *The Basic Structure of Optical Fiber*. Online. AFL. 2022. Dostupné z: <https://learn.aflglobal.com/fttx/the-basic-structure-of-optical-fiber>. [cit. 8. 12. 2023].
- [2] SPURNÝ, Vladimír. *Únik informací na aktivních a pasivních prvcích optických vláknových infrastruktur*. Online. Brno, 2021, 65 s. Dostupné z: https://www.vut.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=227312. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav telekomunikací. Vedoucí práce: doc. Ing. Petr Münster, Ph.D. [cit. 8. 12. 2023].
- [3] *Optical Fiber*. Online. The Fibre Optic Association, 2015. Dostupné z: <https://www.thefoa.org/tech/ref/basic/fiber>. [cit. 8. 12. 2023].
- [4] *G652D Vs G657A2 Singlemode Optical Fibre Differences and Advantages*. Online. Warren and Brown Networks, 2022. Dostupné z: <https://wbnetworks.com.au/blog/g652d-vs-g657a2-singlemode-optical-fibres-differences-and-advantages>. [cit. 8. 12. 2023].
- [5] FILKA, Miloslav. *Optoelektronika pro telekomunikace a informatiku..* Druhé, rozšířené vydání. Brno: Prof. Ing. Miloslav Filka, Csc. a kol., 2017. ISBN 978-80-86785-14-1. [cit. 12. 12. 2023].
- [6] MERYOVÁ, Barbora. *Měření intenzity vyzařování optických vláken*. Online. Liberec, 2012. Dostupné z: https://dSPACE.tul.cz/bitstream/handle/15240/12635/mgr_24370.pdf. Diplomová práce. Technická univerzita v Liberci, Fakulta textilní. Vedoucí práce: Doc. Dr. Ing. Dana Křemenáková. [cit. 12. 12. 2023].
- [7] *The Importance Of Fiber Optic Cable Jacket Material And Fire Ratings*. Online. Shenzhen Optico Communication. 2023. Dostupné z: <https://www.fiberopticom.com/info/the-importance-of-fiber-optic-cable-jacket-mat-83860105.html>. [cit. 9. 5. 2023].
- [8] BUBNÍK, Lukáš, Jíří KAJBL a Petr MAZUCH. *Optoelektrotechnika*. Online. Code Creator, 2015. ISBN 978-80-88058-20-5. Dostupné z: <https://publi.cz/download/publication/185?online=1>. [cit. 18. 1. 2024].

- [9] HOLOMEČEK, Petr a Martin HÁJEK. *CHROMATICKÁ DISPERZE JEDNOVIDOVÝCH OPTICKÝCH VLÁKEN A JEJÍ MĚŘENÍ*. Online. Dostupné z: <https://docplayer.cz/10698556-Chromaticka-disperze-jednovidovych-opticky-ch-vlaken-a-jeji-mereni.html>. [cit. 18. 1. 2024].
- [10] KYSELÁK, Martin. *Disperzní vlivy optických vláken namultiplexní přenosy*. Online. Brno, 2008. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace?zp_id=16660. Dizertační práce. Vysoké učení technické v Brně. [cit. 18. 1. 2024].
- [11] SENIOR, John. *Optical Fiber Communications Principles and Practice*. Online. Třetí vydání. Harlow: Prentice Hall, 2009. ISBN 978-0-13-032681-2. Dostupné z: <https://shjuinpallotti.files.wordpress.com/2019/07/optical-fiber-communications-principles-and-pr.pdf>. [cit. 26. 1. 2024].
- [12] KUMAR, Shiva a Jamal DEEN. *Fiber Optic Communications: Fundamentals and Applications*. Online. Hoboken: Wiley, 2014. ISBN 978-1-118-68344-6. [cit. 26. 1. 2024].
- [13] GUO, Y.L., C.K. KAO, H.E. LI, K.S. CHIANG. *Nonlinear Photonics: Nonlinearities In Optics, Optoelectronics And Fiber Communications*. Germany: Springer-Verlag Berlin And Heidelberg Gmbh & Co. Kg. 432 s. ISBN 9783540431237. [cit. 12. 2. 2024].
- [14] ŽÁČEK, Martin. *Nelineární charakter optického prostředí*. Online. Brno, 2008. Dostupné z: https://www.vut.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=7994. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně. [cit. 12. 2. 2024].
- [15] PETERKA, P. *Vláknové lasery – jasné světlo ze skleněných nitek*. Online. Dostupné z: https://www.ufe.cz/sites/default/files/peterka/fjfi/10_peterka_cescasfyz_50_let_laseru-vlaknove_lasery.pdf. [cit. 22. 2. 2024].
- [16] SALEH, Bahaa E.A., Malvin Carl TEICH. *Základy fotoniky, svazek 4.* Praha 2: MATFYZPRESS. 276 s. ISBN 80-85863-12-X. [cit. 22. 2. 2024].
- [17] ALWAYN, Vivek. *Fiber-Optic Technologies: Fiber-Optic Cable Termination*. Online. Cisco Press, 2004. Dostupné z: <https://www.ciscopress.com/articles/article.asp?p=170740&seqNum=8>. [cit. 25. 5. 2024].
- [18] GIRARD, Andre. *FTTx PONT Technology and Testing*. Online. Quebec: EXFO, 2005. ISBN 1-55342-006-3. Dostupné z: <https://www.exfo.com>. [cit. 25. 5. 2024].

- [//www.exfo.com/contentassets/a3e19d4de01a4d64a3686ab7801d714d/exfo_book_fttx-pon-technology-testing_en.pdf](https://www.exfo.com/contentassets/a3e19d4de01a4d64a3686ab7801d714d/exfo_book_fttx-pon-technology-testing_en.pdf). [cit. 22. 2. 2024].
- [19] MLEJNEK, Zbyněk. *Optické zesilovače..* Brno, 2008. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=8652. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně. [cit. 26. 2. 2024].
- [20] DASAN, Meena, Fredy FRANCIS, Kundil T. SARATH, Elambilayi DIPIN, Talabattula SRINIVAS. *Optically Multiplexed Systems: Wavelength Division Multiplexing*. Online. IntechOpen, 2019. ISBN 978-1-78984-568-6. Dostupné z URL: <https://www.intechopen.com/chapters/68586>. [cit. 10. 3. 2024].
- [21] *Basics of OTDR (Optical Time-Domain Reflectometer)*. Online. FS. 2018. Dostupné z: <https://community.fs.com/article/understanding-otdr-dead-zone-specifications.html>. [cit. 10. 3. 2024].
- [22] *Light source and power meters*. Online. Optical Technology Training. Dostupné z: <https://www.ott.co.uk/resources/guide/light-source-power-meters/>. [cit. 29. 3. 2024].
- [23] *Optical Spectrum Analyzers (OSA)*. Online. VIAVI Solutions. Dostupné z: <https://www.viavisolutions.com/en-us/products/optical-spectrum-analyzers-osa>. [cit. 29. 3. 2024].
- [24] KAMP, Phil *What is Optical Return Loss*. Online. Fiber Instrument Sales. 2020. Dostupné z: <https://www.fiberinstrumentsales.com/blogs/what-is-optical-return-loss.html>. [cit. 29. 3. 2024].
- [25] *Bit Error Rate Test (BERT)*. Online. VIAVI Solutions. Dostupné z: <https://www.viavisolutions.com/en-us/products/bit-error-rate-test-bert>. [cit. 16. 5. 2024]
- [26] HÁJEK, M., HOLOMEČEK, P. *Chromatická disperze jednovlákenných optických vláken a její měření*. Online. Dostupné z: <https://www.mikrokom.cz/wp-content/uploads/2017/06/chrom-disperze.pdf>. [cit. 16. 5. 2024]
- [27] ZAFAR IQBAL, M., Habib FATHALLAH a Nezih BELHADJ. *Optical fiber tapping: Methods and precautions*. In: 8th International Conference on High-capacity Optical Networks and Emerging Technologies Online. IEEE, 2011. ISBN 978-1-4577-1169-5. Dostupné z: <https://ieeexplore.ieee.org/document/6149809>. [cit. 3. 4. 2024].

- [28] MARIA, Furdek a Skorin-Kapov NINA. *Physical-Layer Attacks in Transparent Optical Networks*. Online. 2012. Dostupné z: <https://www.intechopen.com/books/optical-communications-systems/physical-layer-attacks-in-transparent-optical-networks>. [cit. 3. 4. 2024].
- [29] *Intra-Channel and Inter-Channel Crosstalk in WDM Technology*. Online. Cadence System Analysis. Dostupné z: <https://resources.system-analysis.cadence.com/blog/msa2022-intra-channel-and-inter-channel-crosstalk-in-wdm-technology>. [cit. 25. 5. 2024].
- [30] JUNG KARKI, Sachin. *Hacking Fiber optics easier than copper cable: Freelance IT Security professional*. Online. 2016. Dostupné z URL: <http://bit.ly/210HXS8>. [cit. 3. 4. 2024].
- [31] *Measuring Reflectance or Return Loss*. Online. The Fiber Optic Association, 2018. Dostupné z: <https://www.thefoa.org/tech/ref/testing/test/reflectance.html>. [cit. 14. 4. 2024].
- [32] SPURNÝ, Vladimír, Petr Munster, Adrian Tomasov, aj.: *Physical Layer Components Security Risks in Optical Fiber Infrastructures*. Sensors, ročník 22, č. 2, 2022, ISSN 14248220, doi:10.3390/s22020588. Dostupné z: <https://www.mdpi.com/1424-8220/22/2/588>. [cit. 14. 4. 2024].
- [33] *Testing Fiber Optic Couplers, Splitters Or Other Passive Devices*. Online. The Fibre Optic Association, 2019. Dostupné z: <https://foa.org/tech/ref/testing/test/couplers.html>. [cit. 14. 4. 2024].

Seznam symbolů a zkratek

μm	mikrometr
ITU-T	International Telecommunication Union Telecommunication Standardization Sector
nm	nanometr
LED	Light-Emitting Diode
LAN	Local Area Network
VLAN	Virtual Local Area Network
PMMA	Polymethylmethakrylát
PE	Polyethylen
PVC	Polyvinylchlorid
PVDF	Polyvinylidenfluorid
LSZH	Low Smoke Zero Halogen
OFNP	Optical Fiber Non-conductive Plenum
OFNR	Optical Fiber Non-conductive Riser
km	kilometr
Hz	herz
Mhz	megahertz
dB	decibel
Gb	gigabyte
OLT	Optical Line Terminal
ONU	Optical Network Unit
FBT	Fused Bionical Taper
PLC	Planar Lightwave Circuit
AON	Active Optical Network

FTTH	Fiber To The Home
FTTB	Fiber To The Building
QoS	Quality of Service
CLI	Command Line Interface
SNMP	Simple Network Management Protocol
SFP	Small Form-factor Pluggable
WDM	Wavelength-division Multiplexing
CWDM	Coarse Wavelength-division Multiplexing
DWDM	Dense Wavelength-division Multiplexing
FBG	Fiber Bragg Grating
AWG	Arrayed Waveguide Grating
UV	Ultra Violet
OTDR	Optical Time Domain Reflectometry
LSPM	Light Source Power Meter
OSA	Optical Spectrum Analyzer
ORL	Optical Return Loss
MiTM	Man in The Middle
UPC	Ultra Physical Contact
APC	Angled Physical Contact
SC	Subscriber Connector
ST	Straight Tip
FC	Ferrule Connector
LC	Lucent Connector