



# 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

## **DETEKCE A KLASIFIKACE UDÁLOSTÍ V BLÍZKÉM OKOLÍ OPTICKÝCH VLÁKNOVÝCH INFRASTRUKTUR S VYUŽITÍM ZMĚN STAVU POLARIZACE SVĚTLA**

DETECTION AND CLASSIFICATION OF EVENTS IN THE VICINITY OF OPTICAL FIBER INFRASTRUCTURES  
USING CHANGES IN THE POLARIZATION STATE OF LIGHT

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

BACHELOR'S THESIS

**AUTOR PRÁCE**

AUTHOR

**Jan Obšivač**

**VEDOUCÍ PRÁCE**

SUPERVISOR

**doc. Ing. Petr Münster, Ph.D.**

**BRNO 2025**

# Bakalářská práce

bakalářský studijní program **Telekomunikační a informační systémy**

Ústav telekomunikací

**Student:** Jan Obšivač

**ID:** 229063

**Ročník:** 3

**Akademický rok:** 2024/25

## NÁZEV TÉMATU:

### **Detekce a klasifikace událostí v blízkém okolí optických vláknových infrastruktur s využitím změn stavu polarizace světla**

## POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Cílem bakalářské práce je detailní teoretický rozbor problematiky polarizace v optickém vlákně z pohledu možné detekce událostí působících na optická vlákna. V rámci praktické části projektu bude zkoumán vliv událostí v blízkém okolí vláken na stav polarizace světla. Bude provedena charakterizace minimálně 5 běžných událostí (klimatizace, manipulace s kabelem, apod.), včetně následného zpracování dat a jejich analýzy.

## DOPORUČENÁ LITERATURA:

- [1] Fiber optic sensors: an introduction for engineers and scientists. 2nd ed. Editor Eric UDD, editor William B. SPILLMAN. Hoboken: Wiley, c2011. ISBN 978-0-470-12684-4.
- [2] HARTOG, Arthur H. An introduction to distributed optical fibre sensors. Boca Raton: CRC Press, Taylor & Francis Group, 2017. Series in fiber optic sensors. ISBN 978-1-4822-5957-5.

**Termín zadání:** 10.2.2025

**Termín odevzdání:** 3.6.2025

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

**prof. Ing. Jiří Mišurec, CSc.**  
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 práce se zabývá frekvenčně-časovou analýzou běžných událostí, se kterými je možné se setkat ve vnitřních prostorách budovy s cílem identifikovat a klasifikovat specifické jevy a zdroje rušení na základě analýzy jejich spektrálních charakteristik. Pomocí krátkodobé Fourierovy transformace byly analyzovány situace jako hluk způsobený skupinou studentů vcházející do učebny, bouchnutí dveří, provoz stropní klimatizace a manipulace s těžkými protipožárními dveřmi. Analýza byla rozdělena do tří částí zaměřených na různé frekvenční rozsahy, přičemž největší důraz byl kladen na rozsah do 200 Hz. Byly potvrzeny shody s referenčními studiemi, například v oblasti akustických frekvencí nebo provozních charakteristik klimatizace. Naopak u rušení způsobeného výtahem nebylo možné vliv jednoznačně prokázat kvůli konzistentnímu rušení v odpovídajících frekvenčních pásmech. Práce ukazuje potenciál frekvenčně-časové analýzy pro detekci běžných událostí uvnitř budovy a zároveň poukazuje na její limity při současném výskytu vícero zdrojů rušení.

## KLÍČOVÁ SLOVA

detekce událostí, Fourierova transformace, optické sítě, polarizace, polarizační analyzátor

## ABSTRACT

This thesis deals with frequency-time analysis of common events that can be encountered in indoor areas of a building in order to identify and classify specific phenomena and sources of interference based on the analysis of their spectral characteristics. Situations such as noise caused by a group of students entering a classroom, slamming of doors, operation of the ceiling HVAC system, and handling of heavy fire doors were analyzed using the short-term Fourier transform. The analysis was divided into three parts focusing on different frequency ranges, with the greatest emphasis on the range up to 200 Hz. Agreements with reference studies were confirmed, for example in the area of acoustic frequencies or air conditioning operating characteristics. On the other hand, for the interference caused by the elevator, the effect could not be clearly demonstrated due to consistent interference in the corresponding frequency bands. This paper demonstrates the potential of frequency-time analysis for the detection of common indoor events while pointing out its limitations when multiple sources of interference are present simultaneously.

## KEYWORDS

event detection, Fourier transform, optical networks, polarization, polarization analyzer

OBŠIVAČ, Jan. *Detekce a klasifikace událostí v blízkém okolí optických vláknových infrastruktur s využitím změn stavu polarizace světla*. Bakalářská práce. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav telekomunikací, 2025. Vedoucí práce: doc. Ing. Petr Münster, Ph.D.

# Prohlášení autora o původnosti díla

**Jméno a příjmení autora:** Jan Obšivač  
**VUT ID autora:** 229063  
**Typ práce:** Bakalářská práce  
**Akademický rok:** 2024/25  
**Téma závěrečné práce:** Detekce a klasifikace událostí v blízkém okolí optických vláknových infrastruktur s využitím změn stavu polarizace světla

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	10
<b>1 Základní principy polarizace světla</b>	<b>12</b>
1.1 Princip polarizace v optickém vlákně	12
1.2 Popis polarizačního vektoru	12
1.2.1 Jonesův vektor	14
1.3 Způsoby polarizace světla	15
1.3.1 Polarizace rozptylem	15
1.3.2 Polarizace odrazem a lomem	16
1.3.3 Polarizace dvojlomem	16
1.3.4 Polarizace polaroidem	17
1.4 Typy polarizace	18
1.4.1 Lineární polarizace	18
1.4.2 Kruhová polarizace	18
1.4.3 Eliptická polarizace	19
1.5 Možnosti grafického zobrazení polarizace	19
1.5.1 Polarizační elipsa	19
1.5.2 Poincarého sféra	20
1.5.3 Stokesovy parametry	20
1.5.4 Müllerova matice	22
1.6 Měřitelné polarizační vlastnosti	23
1.6.1 Stupeň polarizace	23
1.6.2 Polarizační extinkční poměr	23
1.6.3 Ztráta závislá na polarizaci	23
1.6.4 Diferenciální skupinové zpoždění	23
1.6.5 Polarizační módová disperze	24
1.7 Mechanismy ovlivňující polarizaci světla	24
1.7.1 Polarizační módová disperze	24
1.7.2 Vliv mechanických a teplotních faktorů na polarizaci	25
1.7.3 Polarizační blednutí	26
1.8 Praktické využití polarizace	27
1.8.1 Aplikace polarizace v telekomunikacích	27
<b>2 Měření a kontrola polarizačního stavu</b>	<b>28</b>
2.1 Metody měření polarizace	28
2.1.1 Polarizační analyzátory	28
2.1.2 Polarizační regulátory	30

2.1.3	Optický reflektometr v časové oblasti . . . . .	30
2.1.4	Srovnání a použití technik měření polarizace . . . . .	32
2.2	Metody pro udržení polarizace . . . . .	32
2.2.1	Polarizační scramblery . . . . .	32
2.2.2	Polarizační stabilizátory . . . . .	34
2.3	Potlačování nežádoucích vlivů na polarizaci . . . . .	35
2.3.1	Technika polarizačního scamblování . . . . .	35
2.3.2	Optická vlákna udržující polarizaci . . . . .	35
2.4	Optické polarizátory . . . . .	38
2.4.1	Polarizační dělič svazku . . . . .	38
2.4.2	Polarizační rotátory . . . . .	38
2.5	Optické depolarizátory . . . . .	38
<b>3</b>	<b>Analýza signálů</b>	<b>39</b>
3.1	Rychlá Fourierova transformace . . . . .	39
3.1.1	Nyquistova věta a aliasing . . . . .	40
3.2	Krátkodobá Fourierova transformace . . . . .	40
3.2.1	Časová okna . . . . .	40
3.3	Vlnková transformace . . . . .	42
3.4	Pokročilé metody zpracování signálu . . . . .	43
3.4.1	Konvoluční neuronové sítě . . . . .	43
3.4.2	Strojové učení . . . . .	43
<b>4</b>	<b>Praktické měření</b>	<b>45</b>
4.1	Detekce a klasifikace událostí . . . . .	46
4.1.1	Chůze a hluk způsobený skupinou studentů . . . . .	47
4.1.2	Bouchnutí dveří, klimatizace, výtah . . . . .	50
	<b>Závěr</b>	<b>52</b>
	<b>Literatura</b>	<b>53</b>
	<b>Seznam symbolů a zkratk</b>	<b>62</b>

# Seznam obrázků

1.1	Polarizace rozptylem . . . . .	15
1.2	Znázornění Brewsterova úhlu lomu . . . . .	17
1.3	a) lineární polarizace b) kruhová polarizace c) eliptická polarizace d) nepolarizované světlo . . . . .	18
1.4	Polarizační elipsa . . . . .	20
1.5	Reprezentace polarizačních stavů pomocí Poincarého sféry . . . . .	21
1.6	Dva ortogonálně polarizované módy podél optického vlákna a časové zpoždění mezi nimi . . . . .	25
2.1	Základní uspořádání pro měření pomocí P-OTDR . . . . .	31
2.2	Srovnání vnitřní struktury různých typů vláken . . . . .	37
4.1	Frekvenčně-časové spektrum hluku způsobený skupinou studentů . . . .	48
4.2	Frekvenčně-časové spektrum chůze . . . . .	49
4.3	Frekvenčně-časové spektrum mechanických vibrací . . . . .	51

# Úvod

Optické sítě v dnešní době představují páteřní infrastrukturu moderní komunikace, ať už v oblasti datových přenosů, telekomunikací či internetu. Optická vlákna tvořící základ těchto sítí, umožňují extrémně rychlý a velmi efektivní přenos informací díky své zásadní schopnosti přenášet světelné signály na velké vzdálenosti a to s minimálními ztrátami. Tato technologie je založena na principu úplného vnitřního odrazu světla, kde jádro optického vlákna vede světlo podél svého směru, zatímco plášť vlákna zajišťuje, že se světelný paprsek nezačne šířit ven z vlákna. To je dosaženo rozdílnými indexy lomu jádra a pláště. Sítě optických vláken jsou klíčové pro širokou škálu aplikací, od místních přístupových sítí, přes celostátní komunikace až po globální podmořské kabely, které propojují jednotlivé kontinenty. Výhody optických vláken zahrnují jejich vysokou kapacitu, odolnost vůči elektromagnetickému rušení a schopnost přenášet data na velké vzdálenosti bez potřeby opakovačů.

Navzdory robustnímu designu optických sítí zůstávají náchylné k různým druhům útoků, které mohou narušit bezpečnost a integritu přenosu dat. Fyzické útoky, jako je nelegální připojení k optickému kabelu (tzv. tapping), mohou útočnickům umožnit získat přístup k datům, aniž by došlo k významnému narušení služby, což činí detekci těchto útoků velmi obtížnou. Například studie[1] se zabývá bezpečnostními hrozbami, které představují odposlechy v optických vláknových komunikačních systémech. Konkrétně se zaměřuje na zranitelnost různých metod generování tajných klíčů na fyzické vrstvě (PL-SKG), pokud čelí sofistikovaným technikám odposlechu. Výzkumníci zde analyzovali různé strategie odposlechu a jejich dopad na účinnost generování tajných klíčů. Další hrozbou jsou útoky na fyzickou vrstvu sítě, kde útočníci manipulují s vlákny, aby poškodili nebo zpomalili komunikaci. Optické sítě mohou být také cílem sofistikovaných kybernetických útoků zaměřených na destabilizaci nebo přerušení služeb, například prostřednictvím denial-of-service (DoS) útoků, jejichž konečným cílem je zhroutit celou infrastrukturu v dané oblasti. Běžným způsobem je neúnavné odesílání zbytečných datových paketů do cílových počítačů až do momentu, kdy se výpočetní zátěž stane příliš velkou a systém se zhroutí. Tento typ útoku zabírá prostředky na třetí (síťové) a čtvrté (transportní) vrstvě, takže lze jen obtížně určit, zda je paket s požadavkem opravdový, nebo ne. Útokům typu DoS je velmi obtížné zabránit nebo proti němu bojovat, jelikož útočníci mohou jednoduše útok přesměrovat na nové počítače a začít ho znovu, pokud byl první pokus zastaven. Útoky na infrastrukturu mohou také probíhat pomocí podvodných praktik, kdy se útočník vydává za legitimní síťové komponenty nebo signály, kvůli získání neoprávněného přístupu – spoofing. Poté už je pro něj vcelku jednoduché zachytit citlivá data nebo narušit danou službu[2].

Zabezpečení optických sítí je proto klíčové nejen z hlediska ochrany dat, ale i zajištění plynulosti kritických služeb, které na těchto sítích závisí. I když jsou optická vlákna méně náchylná k odposlechu ve srovnání s tradičními měděnými kabely, jejich zranitelnost při fyzických útocích a manipulaci představuje vážnou hrozbu. Jedním z hlavních slabých míst je obtížnost detekce nelegálních zásahů, což vyžaduje pokročilé metody monitorování, jako jsou distribuované optické senzory schopné sledovat změny ve stavu polarizace světla. Navíc je nezbytné zavést kvantové šifrovací technologie nebo další zabezpečovací protokoly na fyzické vrstvě sítě, aby bylo zajištěno, že i při fyzickém napadení nebudou data kompromitována. Problematikou bezpečnostních hrozeb a efektivních způsobech ochrany a prevence a zároveň možných negativních dopadech na provoz služeb komplexně shrnuje práce, ve které autoři rozdělují útoky na pasivní a aktivní, přičemž mezi efektivní techniky lokalizace a zamezení pasivních útoků řadí optický reflektometr (OTDR), MP sensor připojení a upozornění na falešné ověření OSC[3]. K ochraně proti aktivním útokům se ukazuje jako velmi efektivní monitorování optických kanálů (OCM), zavedení speciálního optického kontrolního kanálu (OSC) a BER monitorování. Zároveň zmiňují důležitost předběžných opatření na optických kanálech, jako je například pokročilá kryptografie, steganografie, omezení zranitelných míst v síťové architektuře a plánování s ohledem na možnost útoku.

Optické sítě mohou být rovněž narušeny neúmyslnými incidenty, které jsou často důsledkem lidské chyby nebo nehod při stavebních pracích. K překopnutí optických kabelů může dojít při běžných výkopových pracích, což vede k přerušení služby na rozsáhlých úsecích sítě. Tyto nehody jsou častým jevem v hustě osídlených oblastech, kde infrastruktura optických vláken prochází pod městskými komunikacemi. Opravy mohou být časově náročné a nákladné, což zdůrazňuje potřebu pravidelného monitorování a preventivní ochrany kritických tras optických kabelů, například prostřednictvím senzorů schopných detekovat vibrace nebo změny v napětí vláken.

# 1 Základní principy polarizace světla

Polarizace je podle fyziky jev vyvolaný vlnovou povahou elektromagnetického záření. Sluneční světlo je příkladem elektromagnetického vlnění, protože se k Zemi dostává přes vakuum. Protože elektrické pole interaguje s magnetickým polem, jsou tyto vlny známy jako elektromagnetické vlny. Elektrické pole  $E$  a magnetické pole  $H$  jsou spojená a proměnná v čase – pole  $E$  generuje pole  $H$  (a naopak). Polarizace je proces přeměny nepolarizovaného světla na světlo polarizované. Mezi nejběžnější typy polarizace patří **lineární polarizace**, **kruhová polarizace** a **eliptická polarizace**. Světlo, ve kterém částice kmitají ve všech různých rovinách, se nazývá nepolarizované světlo[4].

## 1.1 Princip polarizace v optickém vlákně

Optická vlákna vykazují zvláštní polarizační vlastnosti. Vedená elektromagnetická pole ve vlnovodech z optických vláken se nazývají nehomogenní rovinné vlny, protože jejich amplitudy nejsou v rámci rovinné vlny stabilní a pole se ve většině případů vyznačují nepřechodnými složkami. Při popisu polarizačních jevů v optických vláknech existují obecně dva přístupy. První z nich považuje optické vlákno za optický vlnovod, v němž může být světlo jakožto druh elektromagnetické vlny optických frekvencí vedeno v podobě vlnovodných módů. Tento přístup identifikuje základní vlastní polarizační módy vlákna a vztahuje je k polarizačnímu stavu vedeného světla. Změny výstupní polarizace jsou popsány v termínech polarizačně-módové vazby v důsledku změn dvojlomu působících jako poruchy podél vlákna.

Jiný přístup přistupuje k optickému vláknu jako k jakémukoli jinému optickému zařízení, přes které lze přenášet světlo, a vlákno lze rozdělit na oddělené úseky chováající se jako měniče polarizačního stavu. Zde lze vývoj polarizace ve vlákně popsat jedním ze tří obecných formalismů: formalismem Jonesových vektorů a matic, formalismem Stokesových vektorů a Muellerových matic nebo reprezentací Poincarého sféry.

Jelikož optická vlákna umožňují velmi velké vzdálenosti šíření, mohou se podél vlákna kumulovat i velmi malé efekty dvojlomu a jejich náhodné rozložení na velkých délkách způsobuje, že polarizační vlastnosti vedeného světla jsou obecně obtížné určit[5].

## 1.2 Popis polarizačního vektoru

Světlo je elektromagnetické vlnění, které splňuje Maxwellovy rovnice a z nich odvozenou vlnovou rovnici. Protože elektrické pole je vektor, který kmitá v určitém

směru, říkáme, že vlna má určitou polarizaci. Začneme rovnicemi (1.3) a (1.4), které ukazují, že elektrické pole  $\mathcal{E}(r, t)$  rovinné vlny je vždy kolmé na směr šíření, což je směr vlnového vektoru  $k$ . Nechť se vlna šíří ve směru  $z$ :

$$\mathbf{k} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ k \end{pmatrix} \quad (1.1)$$

Pak vektor elektrického pole nemá složku  $z$ , a proto lze reálné elektrické pole v bodě  $z$  a v čase  $t$  zapsat jako

$$\mathcal{E}(z, t) = \begin{pmatrix} A_x \cos(kz - \omega t + \varphi_x) \\ A_y \cos(kz - \omega t + \varphi_y) \\ 0 \end{pmatrix}, \quad (1.2)$$

kde  $A_x$  a  $A_y$  jsou kladné amplitudy a  $\varphi_x$ ,  $\varphi_y$  jsou fáze složek elektrického pole. Zatímco  $k$  a  $\omega$  jsou v tomto případě pevné,  $A_x$ ,  $A_y$ ,  $\varphi_x$  a  $\varphi_y$  můžeme měnit. Tento stupeň volnosti je důvodem existence různých stavů polarizace: stav polarizace je určen poměrem amplitud a fázovým rozdílem  $\varphi_y - \varphi_x$  mezi dvěma kolnými složkami světelné vlny. Změna veličiny  $\varphi_y - \varphi_x$  znamená, že „posouváme“  $\mathcal{E}_y(r, t)$  vzhledem k  $\mathcal{E}_x(r, t)$ . Uvažujme elektrické pole v pevné rovině  $z = 0$ [6]:

$$\begin{pmatrix} E_x(0, t) \\ E_y(0, t) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A_x \cos(-\omega t + \varphi_x) \\ A_y \cos(-\omega t + \varphi_y) \end{pmatrix} \quad (1.3)$$

$$= \operatorname{Re} \left\{ \begin{pmatrix} E_x(0) \\ E_y(0) \end{pmatrix} e^{-i\omega t} \right\} \quad (1.4)$$

$$= \operatorname{Re} \left\{ \begin{pmatrix} A_x e^{i\varphi_x} \\ A_y e^{i\varphi_y} \end{pmatrix} e^{-i\omega t} \right\}. \quad (1.5)$$

## 1.2.1 Jonesův vektor

Používá se ke zpracování složitých polarizačních problémů na amplitudové úrovni[7]. Jonesův maticový vzorec umožňuje vyhodnotit polarizační stav světla procházejícího složitou přenosovou cestou pomocí maticové algebry. Polarizační stav vlny je reprezentován dvousložkovým komplexním číslem tvaru

$$a = \begin{bmatrix} E_x e^{j\delta_x} \\ E_y e^{j\delta_y} \end{bmatrix}, \quad (1.6)$$

kde  $E_i$  popisuje amplitudu vektoru elektrického pole a  $\delta_i$  jeho fázi. Výše uvedený výraz popisuje obecný případ pro elipticky polarizovanou vlnu. V případě lineárně polarizované světelné vlny, jejíž směr elektrického pole svírá s osou  $x$  úhel  $\theta$ , lze Jonesovu matici zjednodušit na

$$a = \begin{bmatrix} E_x \cos \theta \\ E_x \sin \theta \end{bmatrix}. \quad (1.7)$$

Kruhově polarizovanou vlnu lze popsat takto

$$\mathbf{a} = \begin{bmatrix} E \cos(\omega t) + i \sin(\omega t) \\ -E \sin(\omega t) + i \cos(\omega t) \end{bmatrix}. \quad (1.8)$$

Vezmeme-li reálné složky každé vlny, zjistíme, že  $E_x = E \cos(\omega t)$  a  $E_y = -E \sin(\omega t)$ . Při  $t = 0$  je složka  $x$  dána  $E$  a složka  $y$  je nulová. S postupujícím časem se složka vektoru elektrického pole ve směru  $x$  zmenšuje, zatímco složka  $y$  roste. Jak již bylo řečeno, pozorovateli, který se dívá do dopředu putující vlny, se tedy zdá, že se pole elektrického vektoru otáčí ve směru hodinových ručiček[8].

Jednoduchým příkladem Jonesovy matice je absorpční prostředí, které zeslabuje přenos světla, ale nemění polarizační orientaci. V tomto případě lze médium popsat jako

$$A = \begin{bmatrix} \alpha & 0 \\ 0 & \alpha \end{bmatrix}, \quad (1.9)$$

kde  $\alpha$  představuje útlum světla procházejícího tímto médiem. Ideální polarizátor bude blokovat světlo, kde je elektrické pole orientováno jedním směrem, a bude propouštět veškeré světlo v ortogonálním stavu polarizace. Přenosovou funkci pro takový polarizátor lze zapsat jako

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad (1.10)$$

a světlo procházející tímto polarizátorem se tak změní:

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_x \\ E_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E_x \\ 0 \end{bmatrix} \quad (1.11)$$

Matice pro lineární polarizátor, jehož přenosová osa svírá s osou  $x$  úhel  $y$  v rovině  $xy$ , se zapisuje jako

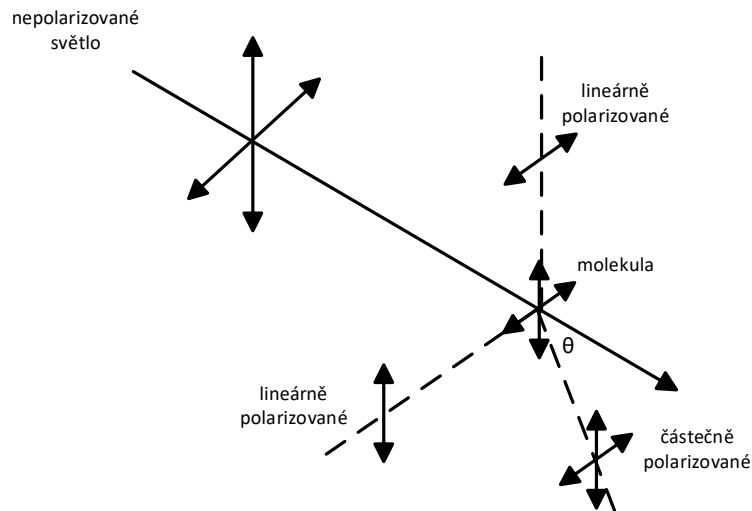
$$P = \begin{bmatrix} \cos^2 \theta & \cos \theta \sin \theta \\ \cos \theta \sin \theta & \sin^2 \theta \end{bmatrix}. \quad (1.12)$$

Výstupní polarizační stav se získá vynásobením vstupního polarizačního stavu řadou maticových prvků, které se používají k popisu jednotlivých prvků v rámci optické dráhy[8].

## 1.3 Způsoby polarizace světla

### 1.3.1 Polarizace rozptylem

Rozptyl, obecně známý jako Rayleighův rozptyl, může částečně polarizovat nepolarizované světlo. Sluneční paprsek se rozptyluje, když se dostane do kontaktu s molekulami vzduchu nebo prachovými částicemi, které jsou řádově stejné jako vlnová délka světla. Rovinná polarizace charakterizuje rozptýlené světlo, které je vnímáno kolmo ke směru dopadu. Princip polarizace rozptylem můžeme vidět na obrázku 1.1[9].



Obr. 1.1: Polarizace rozptylem[10]

### 1.3.2 Polarizace odrazem a lomem

Jelikož koeficient odrazu pro světlo, jehož elektrické pole je rovnoběžné s rovinou dopadu, se v určitém úhlu mezi  $0^\circ$  a  $90^\circ$  rovná nule, je odražené světlo v tomto úhlu lineárně polarizované, přičemž vektory jeho elektrického pole jsou kolmé k rovině dopadu a rovnoběžné s rovinou povrchu, od kterého se odráží. Úhel, při kterém k tomu dochází, se nazývá polarizační úhel nebo **Brewsterův úhel** (viz obr. 1.2). Při jiných úhlech je odražené světlo částečně polarizované. Z Fresnelovy rovnice (1.13) lze určit, že součinitel rovnoběžného odrazu je nulový, když se úhly dopadu a průchodu rovnají  $90^\circ$ [11]. Použitím Snellova zákona (1.14) získáme výraz pro Brewsterův úhel (1.15).

$$r_{\parallel} = \frac{\tan(\theta_i - \theta_t)}{\tan(\theta_i + \theta_t)} = 0 \quad (1.13)$$

$$n_i \sin \theta_i = n_t \sin(90^\circ - \theta_i) \quad (1.14)$$

$$\tan \theta_i = \frac{n_t}{n_i} \quad (1.15)$$

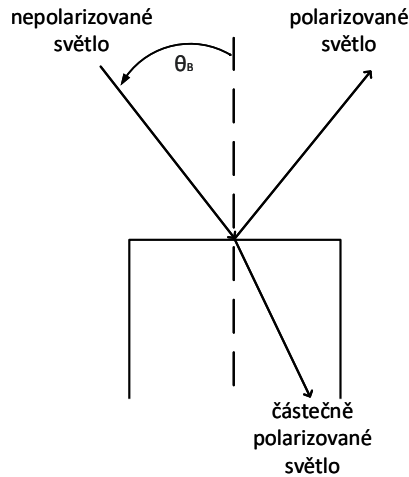
Když paprsek světla dopadne na povrch průhledného materiálu, paprsek se rozdělí – část paprsku se od povrchu odrazí, zatímco zbytek projde do materiálu. U prošlého paprsku je dráha, kterou světlo prochází z jednoho prostředí do druhého, ohnutá. Toto ohnutí světelného paprsku se nazývá lom. Úhel lomeného paprsku souvisí s úhlem dopadajícího paprsku (viz obr. 1) podle Snellova zákona(1.14):

$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2, \quad (1.16)$$

kde  $n_1$  a  $n_2$  jsou indexy lomu prostředí 1 a prostředí 2. Index lomu materiálu je definován jako poměr rychlosti světla ve vakuu a rychlosti světla v materiálu,  $n = \frac{c}{v}$ . Index lomu vzduchu se od jedničky liší jen nepatrně ( $< 0,03 \%$ )[12].

### 1.3.3 Polarizace dvojlomem

Polarizace dvojlomem znamená, že v materiálu jsou dvě osy s různými indexy lomu. Když je materiál popsán jako dvojlomný, znamená to, že světelná vlna, která jím prochází, může mít dvě různé rychlosti. Jinými slovy, materiál má dvě různé hodnoty indexu lomu. Dvojlom je základním principem, na kterém funguje udržování polarizace nebo HiBi vlákno. Termín „osy dvojlomu“ označuje roviny, ve kterých bude světelná vlna vystavena každé ze dvou různých hodnot indexu lomu – podle definice mohou být pouze dvě osy dvojlomu. Protože se index podél nich bude lišit, bude se lišit i fázová rychlost světla podél těchto os, a proto se označují jako pomalé (s vyšším indexem) a rychlé (s nižším indexem) osy[13].



Obr. 1.2: Znázornění Brewsterova úhlu lomu[14]

Analýza vlastností jednovidových vláken vede k šíření jednoho příčného módu zvaného  $LP_{01}$ , přesněji řečeno dvou ortogonálních degenerovaných módů  $LP_{01x}$  a  $LP_{01y}$ . Dvojlom jako parametr je definován jako lokální absolutní hodnota rozdílu mezi konstantami šíření obou módů:

$$\Delta\beta = |\beta_x - \beta_y| = \frac{2\pi}{\lambda} |n_x - n_y| = \frac{\omega}{c} \Delta n, \quad (1.17)$$

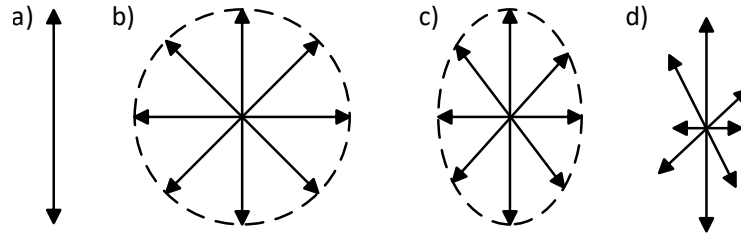
kde  $c$  je rychlost světla ve vakuu a  $\Delta n$  je rozdíl indexu lomu, nazývaný také stupeň dvojlomu. U standardních vláken je stupeň dvojlomu přibližně  $10^{-7}$ [15].

### 1.3.4 Polarizace polaroidem

Při této metodě se používají filtrační materiály, které mají speciální chemické složení. Jsou známé jako polaroidové filtry. Skládají se z paralelního uspořádání molekul s dlouhým řetězcem, jejichž elektrony se mohou pohybovat podél molekul, ale nemohou se volně pohybovat přes úzké molekuly. Pokud je elektrické pole dopadajícího světla rovnoběžné s dlouhými molekulami, dochází k toku mikroskopických proudů elektronů a energie světla je nakonec absorbována a rozptýlena jako teplo (odpor proti toku proudu). Na druhou stranu, pokud je dopadající světlo polarizováno tak, že jeho elektrické pole je kolmé na dlouhé řetězce, elektrony nemohou proudit, takže nedochází k žádnému čistému proudu ani zahřívání či absorpci. Prochází tedy pouze světlo jedné polarizace (napříč molekulami). Takto polarizované světlo má poloviční intenzitu[16, 17].

## 1.4 Typy polarizace

Stav polarizace (SOP) elektromagnetické vlny šířící se podél osy  $z$  lze zjistit z dráhy, kterou sleduje hrot vektoru elektrického pole  $E$  v rovině  $xy$ . Lze definovat tři stavy polarizace: lineární, kruhová a eliptická (viz obr. 1.3)[8].



Obr. 1.3: a) lineární polarizace b) kruhová polarizace c) eliptická polarizace d) nepolarizované světlo[18]

### 1.4.1 Lineární polarizace

V lineárně polarizované vlně, která se pohybuje ve směru  $z$ , kmitá vektor elektrického pole podél přímky v rovině  $xy$ . Vlnu lze rozdělit na dvě ortogonální složky podél os  $x$  a  $y$  ( $E_x$  a  $E_y$ ) s rozdílem drah  $\delta = m\pi$ , kde  $m$  je celé číslo. Je-li  $m$  0 nebo sudé celé číslo, pak jsou obě složky ve fázi. Je-li  $m$  liché, pak je vlna stále lineárně polarizovaná, ale je orientována ortogonálně[8].

### 1.4.2 Kruhová polarizace

Kruhová polarizace vzniká superpozicí dvou lineárně polarizovaných vln se stejnou amplitudou, ale s fázovým rozdílem  $\delta = \pm\pi/2$ . V tomto případě hrot vektoru elektrického pole opisuje kružnici, která se otáčí ve směru (nebo proti směru) hodinových ručiček podle fázového vztahu. Fázový rozdíl  $\delta = -\pi/2 + 2m\pi$ , kde  $m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$ , vede k pravé kruhové polarizaci světla, tj. vektor elektrického pole se při pohledu ke zdroji otáčí ve směru hodinových ručiček a fázový rozdíl  $\delta = \pi/2 + 2m\pi$  vede k levé kruhové polarizaci světla. Je užitečné poznamenat, že lineárně polarizované vlny lze syntetizovat ze dvou opačně polarizovaných kruhových vln o stejných amplitudách. Orientace os  $x$  a  $y$  je nepodstatná a kruhově polarizované světlo lze specifikovat jeho amplitudou a tím, zda je levotočivě nebo pravotočivě polarizované[8].

### 1.4.3 Eliptická polarizace

Za všech ostatních okolností se hrot vektoru elektrického pole otáčí a vytváří elipsu v rovině  $xy$ , přičemž se mění i velikost elektrického vektoru. Elipticky polarizované světlo vzniká superpozicí dvou lineárně polarizovaných vln o libovolných (a různých) amplitudách a fázovém rozdílu podél os  $x$  a  $y$ . Eliptická polarizace je plně specifikována svou amplitudou, elipsovitostí a orientací hlavních os elipsy vzhledem k některým vhodným osám[8].

Lineární a kruhovou polarizaci lze považovat za speciální případy elipticky polarizovaného světla. Existuje několik formálních způsobů reprezentace polarizace a modelování přenosu polarizovaného světla polarizačními prostředími, jako jsou například dvojlomné materiály. Mezi nimi se běžně používají Jonesovy vektory a matice a konstrukce Poincarého sféry[8].

## 1.5 Možnosti grafického zobrazení polarizace

### 1.5.1 Polarizační elipsa

Podle Fresnelovy teorie popisují  $E_x(z, t)$  a  $E_y(z, t)$  sinusové oscilace v rovině  $x-z$  a  $y-z$ . Eliminací časoprostorového propagátoru  $\omega t - kz$  mezi oběma rovnicemi však získáme rovnici elipsy, a to

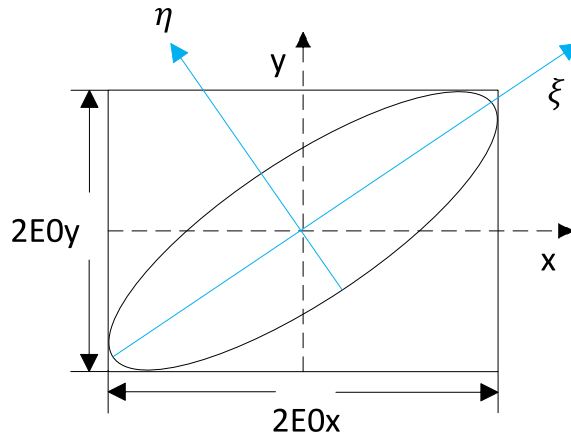
$$\frac{E_x(z, t)^2}{E_{0x}^2} + \frac{E_y(z, t)^2}{E_{0y}^2} - \frac{2E_x(z, t)E_y(z, t)}{E_{0x}E_{0y}} \cos \delta = \sin^2 \delta, \quad (1.18)$$

kde  $\delta = \delta_y - \delta_x$ . Výše uvedená rovnice popisuje elipsu v nestandardním tvaru. Jelikož se rovnice týká polarizovaného světla, nazývá se polarizační elipsa. V rovnici byl explicitně eliminován časoprostorový propagátor. Nicméně složky pole  $E_x(z, t)$  a  $E_y(z, t)$  jsou i nadále závislé na čase a prostoru. Na obrázku 1.4 je zobrazen otočený souřadnicový systém  $\xi - \eta$ . Vzhledem k tomu, že amplitudy  $E_{0x}$  a  $E_{0y}$  a fáze  $\delta$  jsou konstantní, polarizační elipsa zůstává při šíření polarizovaného svazku neměnná.

Obecně je optické pole elipticky polarizované, ale existuje několik kombinací amplitudy a fáze, které jsou obzvláště důležité. Tyto stavy se nazývají **degenerované polarizační stavy**:

- lineárně horizontálně/vertikálně polarizované světlo,
- lineárně polarizované světlo posunuté o  $\pm 45^\circ$ ,
- pravolevě/levě kruhově polarizované světlo.

Tyto polarizační stavy jsou důležité, protože je relativně snadné je vytvořit v laboratoři pomocí lineárních a kruhových polarizátorů a měření polarizace i mnohé polarizační výpočty jsou při použití těchto specifických polarizačních stavů značně



Obr. 1.4: Polarizační elipsa[19]

zjednodušené. To platí zejména v případě, kdy se polarizovaný svazek šíří mnoha polarizačními prvky[19].

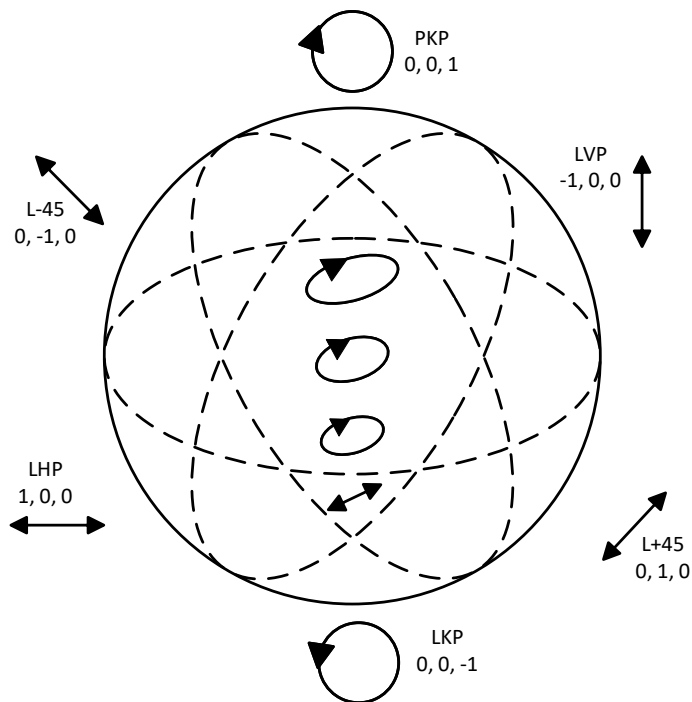
### 1.5.2 Poincarého sféra

Poincarého sféra je jedním z konvenčních způsobů popisu polarizace a změn polarizace šířící se elektromagnetické vlny. Poskytuje pohodlný způsob předpovědi, jak bude jakýkoli daný retardér (mění polarizační stav, aniž by paprsek zeslaboval, vychýlil nebo posunul) měnit tvar polarizace. Každému danému stavu polarizace odpovídá jedinečný bod na sféře. Plně polarizované světlo je reprezentováno body na povrchu sféry, zatímco částečně polarizované světlo se nachází uvnitř sféry. Dva póly sféry představují levotočivě (LKP) a pravotočivě kruhově polarizované (PKP) světlo. Body na rovníku označují lineární polarizaci. Všechny ostatní body na kouli představují eliptické stavy polarizace. Libovolně zvolený bod H na rovníku označuje lineárně horizontální polarizaci (LHP) a diametrálně odlišný bod V označuje lineárně vertikální polarizaci (LVP) (viz obrázek 1.5)[20, 22].

### 1.5.3 Stokesovy parametry

Nejzávažnějším omezením Poincarého sféry a polarizační elipsy jsou taková, že za prvé polarizační elipsa je okamžitým zobrazením polarizovaného světla a zadruhé úhel natočení  $\psi$  ani úhel elipticity  $\chi$  nejsou přímo měřitelné. K překonání těchto omezení je nutné určit měřitelné hodnoty polarizovaného pole. To lze provést úpravou rovnice polarizační elipsy (1.18) pomocí časového průměru, který je definován takto:

$$\langle E_i(z, t)E_j(z, t) \rangle = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T E_i(z, t)E_j(z, t) dt, \quad i, j = x, y, \quad (1.19)$$



Obr. 1.5: Reprezentace polarizačních stavů pomocí Poincarého sféry[20]

kde  $T$  je celková doba průměrování. Aplikací definice časového průměru na polarizační elipsu pak získáme následující rovnici:

$$S_0^2 = S_1^2 + S_2^2 + S_3^2, \quad (1.20)$$

kde

$$S_0 = E_{0x}^2 + E_{0y}^2, \quad (1.21)$$

$$S_1 = E_{0x}^2 - E_{0y}^2, \quad (1.22)$$

$$S_2 = 2E_{0x}E_{0y} \cos \delta, \quad (1.23)$$

$$S_3 = 2E_{0x}E_{0y} \sin \delta, \quad \delta = \delta_y - \delta_x. \quad (1.24)$$

Veličiny  $S_0$ ,  $S_1$ ,  $S_2$  a  $S_3$  jsou pozorovatelné veličiny polarizovaného pole a nazývají se **Stokesovy parametry**. První Stokesův parametr  $S_0$  popisuje celkovou intenzitu optického svazku, druhý parametr  $S_1$  popisuje převahu světla lineárně horizontálně polarizovaného nad světlem lineárně vertikálně polarizovaným, třetí parametr  $S_2$  popisuje převahu světla lineárně polarizovaného s posunem o  $+45^\circ$  nad světlem lineárně polarizovaného s posunem o  $-45^\circ$  a parametr  $S_3$  popisuje převahu světla pravotočivě kruhově polarizovaného nad světlem levotočivě kruhově polarizovaným. Stokesovy parametry lze vyjádřit v komplexní notaci potlačením propagátoru a zá-

pisem:

$$E_x(t) = E_{0x} \exp(i\delta_x), \quad (1.25)$$

$$E_y(t) = E_{0y} \exp(i\delta_y). \quad (1.26)$$

Stokesovy parametry jsou pak definovány v komplexním zápisu pomocí následujících rovnic:

$$S_0 = E_x E_x^* + E_y E_y^*, \quad (1.27)$$

$$S_1 = E_x E_x^* - E_y E_y^*, \quad (1.28)$$

$$S_2 = E_x E_y^* + E_y E_x^*, \quad (1.29)$$

$$S_3 = i(E_x E_y^* - E_y E_x^*). \quad (1.30)$$

kde  $i = \sqrt{-1}$  a \* představuje komplexní konjugát. Stokesovy parametry je vhodné uspořádat do sloupcové matice, která se pro elipticky polarizované světlo označuje jako Stokesův vektor[23]:

$$S = \begin{pmatrix} S_0 \\ S_1 \\ S_2 \\ S_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} E_{0x}^2 + E_{0y}^2 \\ E_{0x}^2 - E_{0y}^2 \\ 2E_{0x}E_{0y} \cos \delta \\ 2E_{0x}E_{0y} \sin \delta \end{pmatrix}. \quad (1.31)$$

#### 1.5.4 Müllerova matice

Polarizační vlastnosti libovolného světelného paprsku lze plně popsat čtyřmi prvky Stokesova vektoru, protože jak vstupní, tak výstupní polarizační stav jsou definovány čtyřprvkovými Stokesovými vektory, je rozumné očekávat, že bude zapotřebí 16 parametrů, které plně popíší, jak vzorek změní polarizační stav. Ukázalo se, že matematika pro tuto interakci je poměrně jednoduchá. Interakci lze definovat pomocí jednoduché přenosové matice 4x4, která se nazývá Müllerova matice  $\mathbf{M}$ .

$$\mathbf{M}\vec{S} = \begin{bmatrix} m_{00} & m_{01} & m_{02} & m_{03} \\ m_{10} & m_{11} & m_{12} & m_{13} \\ m_{20} & m_{21} & m_{22} & m_{23} \\ m_{30} & m_{31} & m_{32} & m_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} s_0 \\ s_1 \\ s_2 \\ s_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} s'_0 \\ s'_1 \\ s'_2 \\ s'_3 \end{bmatrix} = \vec{S}' \quad (1.32)$$

Müllerova matice plně popisuje polarizační změny vzorku. To znamená, že  $\mathbf{M}$  pracuje s libovolným dopadajícím Stokesovým vektorem  $S$  a vypočítá odpovídající vystupující Stokesův vektor  $S'$ . Násobení matice je pouhým součinem, jak je znázorněno níže[24]:

$$\begin{pmatrix} m_{00} & m_{01} & m_{02} & m_{03} \\ m_{10} & m_{11} & m_{12} & m_{13} \\ m_{20} & m_{21} & m_{22} & m_{23} \\ m_{30} & m_{31} & m_{32} & m_{33} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} S_0 \\ S_1 \\ S_2 \\ S_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} m_{00}S_0 + m_{01}S_1 + m_{02}S_2 + m_{03}S_3 \\ m_{10}S_0 + m_{11}S_1 + m_{12}S_2 + m_{13}S_3 \\ m_{20}S_0 + m_{21}S_1 + m_{22}S_2 + m_{23}S_3 \\ m_{30}S_0 + m_{31}S_1 + m_{32}S_2 + m_{33}S_3 \end{pmatrix} \quad (1.33)$$

## 1.6 Měřitelné polarizační vlastnosti

### 1.6.1 Stupeň polarizace

Stupeň polarizace (DOP) je definován jako

$$\text{DOP} = \frac{I_{\text{polarizované}}}{I_{\text{polarizované}} + I_{\text{nepolarizované}}}, \quad (1.34)$$

kde  $I_{\text{polarizované}}$  a  $I_{\text{nepolarizované}}$  jsou intenzity polarizovaného a nepolarizovaného světla. Když je  $\text{DOP} = 0$ , říká se, že světlo je nepolarizované, a když je  $\text{DOP} = 1$ , je zcela polarizované. Mezipřípady odpovídají částečně polarizovanému světlu[20].

### 1.6.2 Polarizační extinkční poměr

Polarizační extinkční poměr (PER) je poměr minimálního a maximálního polarizovaného výkonu vyjádřený v dB. Jakákoli polarizační složka uvede tuto hodnotu jako specifikaci[20].

### 1.6.3 Ztráta závislá na polarizaci

Ztráta závislá na polarizaci (PDL) je maximální (špičková) změna vložné ztráty při změně vstupní polarizace ve všech jejích stavech, vyjádřená v dB[20]. Rovnice pro výpočet PDL vypadá následovně[21]:

$$\text{PDL} = 10 \log \left( \frac{P_{\text{max}}}{P_{\text{min}}} \right), \quad (1.35)$$

### 1.6.4 Diferenciální skupinové zpoždění

V některých situacích je veličinou primárního zájmu diferenciální skupinové zpoždění (DGD), tj. rozdíl dvou různých skupinových zpoždění. Například v dvojlomném optickém prostředí je obecně rozdíl skupinového zpoždění mezi dvěma směry polarizace. To může být problém pro nelineární frekvenční konverzi s ultrakrátkými impulsy v nelineárních krystalech, kde diferenciální skupinové zpoždění vede k časovému rozchodu interagujících impulsů.

V některých případech se diferenciální skupinové zpoždění kompenzuje vložením kousku dvojlomného materiálu, který poskytuje opačné diferenciální skupinové zpoždění. Dalším příkladem je diferenciální skupinové zpoždění pro dva impulsy nebo pro dva optické telekomunikační signály s různými centrálními vlnovými délkami šířící se optickým vláknem. Tento druh diferenciálního skupinového zpoždění vyplývá z disperze skupinové rychlosti vlákna[25].

U vlákna udržujícího polarizaci je to míra rozdílu v době průchodu světla vypuštěného do rychlé osy a světla vypuštěného do pomalé osy. Tato hodnota je určena výhradně dvojlomem  $B$  (nebo délkou kmitu,  $L_p$ , při vlnové délce  $\lambda$ )[26].

$$\text{DGD} \approx \frac{L}{c} B = \frac{L}{c} \frac{\lambda}{L_p} \quad (1.36)$$

### 1.6.5 Polarizační módová disperze

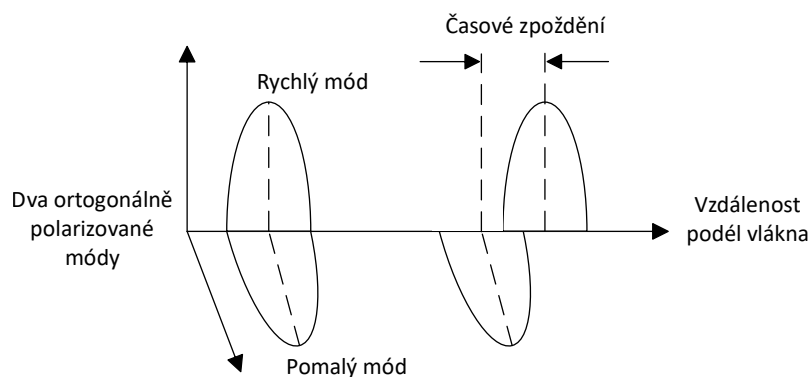
Polarizační módová disperze (PMD) je vlastně další formou materiálové disperze. Jednovidové vlákno podporuje mód, který se ve skutečnosti skládá ze dvou ortogonálních polarizačních módů. V ideálním případě je jádro optického vlákna dokonale kruhové. Ve skutečnosti však jádro dokonale kruhové není a mechanické namáhání, například ohyb, vnáší do vlákna dvojlom. Této problematice je věnována zvláštní kapitola 1.7.1[20].

## 1.7 Mechanismy ovlivňující polarizaci světla

### 1.7.1 Polarizační módová disperze

Efekty PMD jsou lineární jevy elektromagnetického šíření vyskytující se v tzv. jednovidových vláknech. Navzdory svému názvu tato vlákna podporují dva režimy šíření, které se liší svou polarizací. V důsledku optického dvojlomu ve vláknech se oba módy pohybují různými skupinovými rychlostmi a náhodná změna tohoto dvojlomu podél délky vlákna vede k náhodné vazbě mezi módy. V současné praktické přenosové technologii vedou výsledné jevy PMD ke zkreslení impulzů a ke znehodnocení systému, které omezuje přenosovou kapacitu vlákna.

K jevům PMD v optických vláknech obvykle používaných pro komunikaci dochází v důsledku přítomnosti dvojlomu ve vláknech. Tato dvojlomnost se náhodně mění podél délky vlákna. Vzniká v důsledku asymetrií v napětí a geometrii vlákna, jako jsou eliptické průřezy, mikroohybů nebo mikrozávitů. Často se takové vlákno vizualizuje nebo modeluje jako sled náhodných dvojlomných úseků, jejichž osy dvojlomu a velikost se náhodně mění se  $z$  (podél vlákna). V závislosti na zvoleném pohledu existují různé projevy PMD. Při pohledu ve frekvenční oblasti vidíme pro pevnou vstupní polarizaci změnu výstupní polarizace s frekvencí  $\omega$ . V časové oblasti se pozoruje střední časové zpoždění impulsu procházejícího vláknem, které je funkcí polarizace vstupního impulsu. Oba jevy spolu úzce souvisejí[27].



Obr. 1.6: Dva ortogonálně polarizované módy podél optického vlákna a časové zpoždění mezi nimi[28]

### 1.7.2 Vliv mechanických a teplotních faktorů na polarizaci

Optická vlákna se stále častěji používají k monitorování informací i změn v prostředí. Mechanické a teplotní faktory mohou ovlivnit stav polarizace světla uvnitř optického vlákna, což je vlastnost nezbytná pro senzory, např. pro detekci vnějších událostí na trase vlákna.

Mechanické vlivy, jako je ohyb, napětí nebo vibrace, působí na optická vlákna prostřednictvím fyzikálních deformací, které mění optickou dráhu, a tím i stav polarizace světla šířícího se vláknem. Ohyb a mikroohyb (malé lokální ohyby) vytvářejí napětí, které způsobuje změny indexu lomu jádra a pláště vlákna, což může způsobit změnu stavu polarizace. Tento jev je zvláště významný v souboru okolností, kdy vlákna podléhají fyzikálním změnám stavu, vibracím nebo náhlé změně mechanického zatížení, např. při sledování stability konstrukce nebo v průmyslovém prostředí.

Další klíčový vliv na stav polarizace má teplota, protože změny teploty způsobují změny indexu lomu materiálu vlákna a také jeho fyzikálních rozměrů. Tento jev je částečně způsoben tepelnou roztažností vlákna. Brillouinova rozptylu se v oblasti rozložení teploty podél vlákna používá pro svou citlivost na změny teploty a napětí. Tepelné gradienty je možné v praxi sledovat pomocí distribuovaného optického snímání založeného na detekci lokálních změn teploty spojených se změnami stavu polarizace.

Moderní optické senzory založené na polarizačních principech, jako je polarizační optická reflektometrie v časové oblasti (POTDR), umožňují detekovat jemné změny polarizace po celé délce vlákna. POTDR dokáže zkoumat změny stavu polarizace podél délky vlákna s vysokou citlivostí na mechanické a tepelné změny, takže je vhodná pro detekci vnějších událostí, jako jsou fyzikální poruchy, deformace nebo teplotní výkyvy. Tento typ měření je založen na sledování změn odraženého polari-

zovaného světla, které nese informaci o změnách prostředí ve vlákne, což umožňuje identifikovat místo a intenzitu jakékoli události.

Pomocí měření polarizace tak můžeme sledovat mechanické a teplotní poruchy, které ovlivňují vlákno. To má aplikační potenciál v praxi, například při monitorování budov, průmyslových zařízení a infrastruktury, které jsou vystaveny vnějším vlivům. Díky technologickému pokroku v oblasti optiky a související sensorové techniky se očekává další rozvoj technologií umožňujících podrobnější a přesnější detekci mechanických a teplotních změn[8, 29].

### 1.7.3 Polarizační blednutí

Polarizační blednutí (fading), je běžným jevem v oblasti snímání optických vláken. Jednou z příčin polarizačního blednutí je, že SOP světla v běžném jednovidovém vlákne má tendenci náhodně kolísat v důsledku dvojlomu vlákna. Když na optické vlákno působí vnější interference, změní se efekt dvojlomu v optickém vlákne, takže se změní stav polarizace světla, což může způsobit jev polarizačního blednutí. Další příčinou polarizačního blednutí je nesoulad stavu polarizace. Když se v optickém vláknovém snímacím systému generuje bití dvou světelných paprsků, jejichž polarizační stavy jsou na sebe přesně kolmé, dojde k jevu polarizačního nesouladu, který má za následek polarizační blednutí. Polarizační blednutí ve snímacím systému snižuje odstup signálu od šumu, takže efektivní snímací informaci nelze demodulovat.

Za účelem řízení stavu polarizace laseru v optickém vlákne pro různé scénáře existuje mnoho schémat a zařízení k potlačení polarizačního blednutí. Například vzdálený vícekanálový systém snímání optickými vlákny je vhodný pro schéma příjmu polarizační diverzity. Systém zpětného rozptylu světla je vhodný pro schéma polarizačního ortogonálního páru impulsů. Systém dopředné interference světla je vhodný pro metodu Faradayova rotačního zrcadla. Pro snímací systém s vysokými požadavky na citlivost a stabilitu je vhodná metoda kódování polarizačních pulzů. Pro snímací systém založený na Brillouinově rozptylu světla je vhodná zejména metoda polarizačního kódování. Systém, který vyžaduje vysokou přesnost řízení stavu polarizace, může v kombinaci s regulátory polarizace využívat strukturu vlákna udržujícího plnou polarizaci nebo vlákna udržujícího částečnou polarizaci[30].

## 1.8 Praktické využití polarizace

Polarizace je jedním z klíčových aspektů moderní komunikace, se kterým se pojí výzvy a příležitosti ke zlepšení výkonu. S tím, jak se systémy stávají čím dál rychlejšími a náročnějšími, je pochopení a využití polarizačních vlastností stále důležitější. Technologie založené na polarizaci jsou více než jindy hnací silou inovací – od efektivnějšího přenosu dat až po umožnění přesného snímání v různých průmyslových odvětvích.

### 1.8.1 Aplikace polarizace v telekomunikacích

V dnešním době se hojně využívá technika PDM. PDM je technika, která přenáší dva oddělené datové toky přes stejný frekvenční kanál s využitím ortogonálních polarizačních stavů, čímž efektivně zdvojnásobuje kapacitu kanálu. V optických vláknových komunikacích se PDM kombinuje s pokročilými modulačními formáty, jako je například QPSK, aby se dosáhlo vysokých přenosových rychlostí. Například PDM-QPSK umožňuje přenos 100 Gb/s po jediné vlnové délce. Je také nedílnou součástí systémů DWDM, kde se po jednom vlákně přenáší více kanálů PDM, což výrazně zvyšuje celkovou datovou propustnost. Telekomunikační společnosti jako Alcatel-Lucent a Huawei vyvinuly komerční řešení PDM, aby uspokojily rostoucí poptávku po šířce pásma[31, 32]. Jak to bývá zvykem, tato technika má své výhody ale i překážky[33]:

- **Zvýšená kapacita:** Díky současnému přenosu dvou datových toků PDM efektivně zdvojnásobuje šířku pásma, aniž by vyžadoval další spektrální zdroje.
- **Spektrální účinnost:** PDM zvyšuje spektrální účinnost, což umožňuje přenášet více dat ve stejné šířce pásma.
- **Kompatibilita se stávající infrastrukturou:** PDM lze implementovat ve stávajících optických sítích, což usnadňuje modernizaci bez rozsáhlých oprav.
- **Polarizační módová disperze:** Změny v dvojlomu vlákna mohou způsobit rozdílné zpoždění mezi polarizačními módy, což vede ke zkreslení signálu.
- **Ztráty závislé na polarizaci:** Komponenty s různými ztrátovými charakteristikami pro různé polarizační stavy mohou zhoršit kvalitu signálu.
- **Komplexní zpracování signálu:** Přesné demultiplexování polarizačních kanálů vyžaduje sofistikované algoritmy a hardware.

## 2 Měření a kontrola polarizačního stavu

### 2.1 Metody měření polarizace

Techniky měření polarizace hrají ústřední roli v optickém snímání a telekomunikacích, protože umožňují charakterizovat SOP světla a změny podél optického vlákna, které mohou indikovat mechanické namáhání, změny teploty nebo jiné problémy v jeho struktuře. Polarimetry, regulátory polarizace a systémy OTDR upravené pro polarizační analýzu jsou primárními nástroji měření polarizace. Každý z nich poskytuje jedinečné poznatky a jedinečné možnosti[29].

#### 2.1.1 Polarizační analyzátoři

Analyzují polarizaci světla s ohledem na klíčové parametry. Funguje zde tzv. polarizační extinkční poměr. Ten popisuje poměr výkonu v požadovaném polarizačním stavu k ortogonálnímu[8].

#### Polarimetry

Polarimetry jsou specializované přístroje určené k měření SOP světla a k získání informací o DOP, kdy  $DOP = 0$  znamená, že světlo je nepolarizované a když je  $DOP = 1$ , tak je světlo plně polarizované. V telekomunikačních optických sítích jsou základním nástrojem pro analýzu SOP světelných signálů Stokesovy polarimetry. Měří čtyři Stokesovy parametry –  $S_0$ ,  $S_1$ ,  $S_2$  a  $S_3$  – které komplexně popisují SOP, včetně DOP a orientace elektrického pole[23].

Stokesovy polarimetry pracují tak, že světelný signál prochází různými polarizačními prvky, jako jsou polarizátory a vlnové desky, a analyzují jeho polarizační stav[34]. Proces zahrnuje následující kroky:

1. **Polarizační filtrace:** Příchozí světlo je vedeno přes systém polarizačních filtrů orientovaných pod určitými úhly. Tyto filtry selektivně propouštějí složky světla shodné s jejich polarizačními osami.
2. **Měření intenzity:** Po průchodu každým filtrem se pomocí fotodetektorů změří intenzita prošlého světla. Měření intenzity odpovídají různým polarizačním složkám světla.
3. **Výpočet Stokesových parametrů:** Zaznamenané intenzity se použijí k výpočtu Stokesových parametrů pomocí zavedených matematických vztahů. Tyto parametry poskytují úplný popis SOP světla.

Tato metoda umožňuje sledování SOP světla v reálném čase bez narušení optického signálu, takže je velmi vhodná pro dynamické telekomunikační prostředí. Na výrobu Stokesových polarimetrů pro telekomunikace se specializuje několik společností:

- **Hinds Instruments:** Nabízí Stokesův polarimetr POLSNAP™, kompaktní zařízení určené pro aplikace ve volném prostoru a optických vláknech, které je schopné měřit všechny čtyři Stokesovy parametry s vysokou citlivostí.
- **Thorlabs:** Nabízí polarimetry řady PAX1000, které měří SOP kolimovaného monochromatického světla v různých rozsazích vlnových délek a jsou vhodné pro integraci do optických sítí.
- **Meadowlark Optics:** Vyrábí kompaktní polarimetrické systémy, které přesně měří Stokesovy parametry při vysokých vzorkovacích frekvencích a nabízejí grafické zobrazení polarizačních stavů.

Na trhu se lze setkat i s Jonesovými polarimetry, které měří Jonesův vektor. Nicméně tento přístup je použitelný pouze pro plně polarizované světlo a k zachycení fázové informace vyžaduje koherentní detekci, proto se Jonesovy polarimetry používají především v laboratorních podmínkách pro vysoce přesná měření polarizace a v aplikacích, kde jsou důležité podrobné informace o fázi.

Novým a zajímavým konceptem je implementace polarimetrů v telekomunikačních sítích do in-line konfigurací. Tyto in-line polarimetry provádějí nedestruktivní měření vzorkováním malé části optického signálu, což umožňuje nepřetržité sledování SOP světla bez přerušení přenosu dat. Tímto druhem ultrakompaktního polarimetru se zabývali autoři práce[35]. Hlavním konceptem je technologie využívající metapovrchy – ultratenké struktury se subvlnovou délkou, které selektivně rozptylují světlo podle jeho polarizačního stavu. Nový design zahrnuje 2D pole subvlnových antén, které poskytuje vysoce přesný směrový rozptyl pro různé polarizační složky světla. Tento systém nepotřebuje tradiční polarizační filtry, což zjednodušuje konstrukci. Ta nabízí kompaktnost a vysokorychlostní provoz, takže je vhodná pro integraci do optických sítí. Systém byl otestován v telekomunikačním pásmu (1500–1565 nm). Výsledky byly porovnány s komerčním polarimetrem, přičemž byla dosažena vysoká shoda. Nicméně zatím se tento typ polarimetru komerčně nepoužívá.

### **Vysokorychlostní polarizační analyzátory**

Přístroje jako Keysight N7781C nabízejí vysokorychlostní analýzu polarizačních vlastností optických signálů. Pracují v rozsahu vlnových délek 1240-1650 nm a poskytují možnost měření v reálném čase až 1 milion vzorků za sekundu, takže jsou vhodné pro analýzu kolísajících signálů a pro aplikace vyžadující zpětnou vazbu v reálném čase. Typická nejistota měření SOP světla je  $1,5^\circ$ [36].

## **Integrované polarizační analyzátoři na bázi křemíku**

Tato zařízení využívají křemíkovou fotoniku k vytvoření kompaktních a plně integrovaných řešení. Například polarizační analyzátor kompatibilní s CMOS využívá k měření polarizace metastrukturu podobnou fotonickému krystalu, která je spojena s fotodetektory na čipu pro měření v reálném čase. Tato integrace usnadňuje on-line sledování polarizace ve velkých křemíkových fotonických systémech. Tímto typem polarizačního analyzátoru se zabývali výzkumníci v práci[37].

### **2.1.2 Polarizační regulátory**

Jedná se o zařízení, která mění SOP světla v optickém vlákně, obvykle s využitím dvojlomu vlákna. Vlákno je obvykle opatřeno prvky, jako jsou piezoelektrické prvky, nebo vláknovými smyčkami a vlnovými deskami, které působí na vlákno napětím tak, aby bylo dosaženo požadované SOP. Nacházejí uplatnění v systémech, kde je nutná polarizační stabilita, například v interferometrických nebo koherentních komunikačních systémech[8].

### **2.1.3 Optický reflektometr v časové oblasti**

Vnitřní distribuované snímače optických vláken jsou zvláště efektivní pro použití v aplikacích, kde je požadováno monitorování jedné měřené veličiny ve velkém počtu bodů nebo nepřetržitě po celé dráze vlákna. Vnitřní distribuované optické senzory mohou být založeny na různých principech, a proto lze vyvinout různé typy těchto senzorů. Nejpoužívanější technika se nazývá **optická reflektometrie v časové oblasti (OTDR)**. OTDR se široce používá k detekci místa poruchy - nedokonalosti v optických vláknových komunikacích. Jako snímací aplikace může být OTDR účinně použita k detekci lokalizovaných změn vyvolaných měřeními ve ztrátách nebo koeficientu rozptylu spojitého snímacího vlákna[8].

Většinou se jako typické měření určuje celková PMD optického vedení nebo se měří okamžitá změna polarizačního stavu na vstupu nebo výstupu vedení. To však neumožňuje určit místo a příčinu náhlých změn polarizace v optickém vlákně.

#### **Polarizační OTDR**

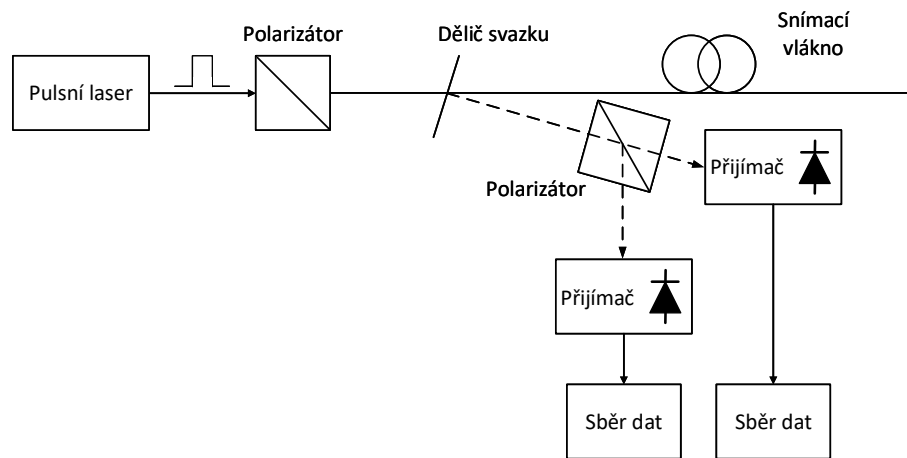
Polarizační OTDR (P-OTDR) je jedním z rozšíření možností konvenčního OTDR o polarizační charakteristiky v závislosti na délce do optického vlákna. Konvenční systémy OTDR měří zpětně rozptýlené světlo podél vlákna, aby zmapovaly ztrátové charakteristiky a našly závady. P-OTDR zavádí polarizační citlivost, která umožňuje měření SOP světla ve velkém počtu bodů po vlákně[38].

P-OTDR má oproti jiným technikám sledování polarizace několik výhod. Je relativně jednoduchá, má rychlou odezvu, umožňuje jednostranné měření lokalizace poruchy, monitorování na velké vzdálenosti atd. Nejjednodušší realizace P-OTDR je založena na použití tradičního optického reflektometru s časovou doménou (OTDR) a dodatečných optických obvodů citlivých na polarizaci[39].

Princip činnosti P-OTDR zahrnuje vysílání polarizovaných světelných pulzů do vlákna a měření SOP světla zpětně rozptýleného světla. Světlo při interakci se změnou dvojlomu podél vlákna, způsobenou namáháním okolním prostředím, ohybem nebo změnou teploty, utrpí změnu svého polarizačního stavu, jehož změny může systém P-OTDR zaznamenat. Úseky uvnitř vlákna tedy mají vysokou PMD – skutečnost velmi důležitá pro vysokorychlostní komunikační systémy. P-OTDR je tedy hodně využitelný v telekomunikacích a při monitorování struktur, u nichž se určuje výskyt možných ohybů vlákna, mechanicky namáhaných míst nebo změn kvality výroby, které mohou ovlivnit SOP světla s časem a vzdáleností[38].

Tato technika má však několik omezení. Není vhodná, pokud[39]:

- odražený signál SOP je kolmý na osu polarizátoru, což vede k dočasné ztrátě signálu,
- odražený signál SOP se shoduje s osou polarizátoru, přestože došlo k vnějšímu zásahu do vlákna.



Obr. 2.1: Základní uspořádání pro měření pomocí P-OTDR[29]

## 2.1.4 Srovnání a použití technik měření polarizace

Každá technika a nástroj pro měření polarizace má své přednosti na základě příslušných požadavků pro různé aplikace. Polarimetry, zejména Stokesovy polarimetry, jsou ideální pro aplikace, které vyžadují přesné měření SOP světla v čase, například v laboratorním prostředí nebo v telekomunikacích, kde je nutná polarizační stabilita. Jsou proto vhodné pro analýzu stavu polarizace ve vláknových snímacích systémech, aby se zkontrolovaly případné výkyvy způsobené mechanickým namáháním nebo změnami prostředí.

P-OTDR je vhodnější pro účely distribuovaného snímání na velké vzdálenosti, kde je vyžadováno prostorové rozlišení polarizačních změn. Poskytuje prostředky ke sledování změn SOP po celé délce vlákna, a umožňuje tak odhalit lokalizované problémy, jako jsou mikroohyb nebo úseky s vysokým PMD. P-OTDR se široce používá v telekomunikačních sítích pro kontrolu integrity vláken a může dobře odhalit vlivy prostředí podél kritické infrastruktury.

Využití všech těchto metod umožňuje inženýrům a výzkumným pracovníkům efektivně monitorovat všechny faktory související s polarizací v optických vláknových systémech a dále tak zvyšovat jejich spolehlivost a výkonnost jak pro telekomunikační sítě, tak pro sensorové systémy používané v různých průmyslových aplikacích[8, 29].

## 2.2 Metody pro udržení polarizace

### 2.2.1 Polarizační scramblery

Jsou to zařízení používané v optických vláknových systémech k náhodné nebo systematické změně stavu polarizace světla při jeho šíření vláknem. Tento proces je nezbytný pro zmírnění problémů, jako je polarizační fading, které může ovlivnit kvalitu signálu tím, že způsobuje kolísání intenzity nebo dokonce ztrátu signálu, když se stav polarizace světla ve vlákně nepředvídatelně mění v důsledku vnějších faktorů, jako je mechanické namáhání, změny teploty nebo dvojlom vlákna.

Funguje tak, že na vlákno nebo světlo v něm působí řízené poruchy, často elektronickými nebo mechanickými prostředky, které rychle a náhodně mění stav polarizace světla. Tato změna zajišťuje, že polarizace světla nezůstává pevně daná, a tím zabraňuje důslednému vyrovnávání polarizačních efektů způsobem, který by zhoršoval kvalitu signálu. „Zakódováním“ polarizace skrambler účinně neutralizuje nebo zprůměruje efekty závislé na polarizaci, což vede ke stabilnějšímu signálu[8].

## **Skramblery LiNbO<sub>3</sub>**

Tyto skramblery využívají elektrooptický efekt k modulaci stavu polarizace. Například fázový modulátor LiNbO<sub>3</sub> lze použít jako skrambler, když je vstupní SOP světla lineárně polarizována pod úhlem 45° vzhledem k aplikovanému modulačnímu elektrickému poli. Takový skrambler je vysokorychlostní, ale trpí vysokými vložnými ztrátami, vysokou PDL, vysokou zbytkovou amplitudovou modulací (aktivační ztrátou), vysokou citlivostí na stav vstupní polarizace a vysokými náklady kvůli vložení vlnovodu do optického vedení. Pro snížení polarizační citlivosti zařízení lze použít více modulačních úseků s různými směry elektrického pole, avšak za cenu zvýšené složitosti a dodatečných nákladů[40].

### **Rezonanční skrambler založený na vláknové cívce**

Rezonanční skrambler je zkonstruován navíjením vlákna kolem rozpínatelného piezoelektrického válce. Působením elektrického pole na válec dochází k jeho rozpínání, což následně vyvolává dvojlom ve vlákně prostřednictvím fotoelastického efektu. Pokud je frekvence elektrického pole v rezonanci s piezoelektrickým válcem, bude indukovaný dvojlom dostatečně velký, aby způsobil dostatečnou polarizační modulaci při relativně nízkém přiloženém napětí. V praxi lze kaskádovat více vláknových válců s různou orientací, aby byl skrambler méně citlivý na polarizaci. Ve srovnání se skramblery z LiNbO<sub>3</sub> mají skramblery založené na expandujících vláknových cívkách výhodu nízkých vložných ztrát, nízké PDL a nízké ceny. Na druhou stranu trpí velkými rozměry, nízkou rychlostí skramblování a velkou zbytkovou fázovou modulací, která je důsledkem značného roztažení vlákna při expanzi vláknové cívky[40].

### **Skrambler založený na stlačení vlákna**

Tento skrambler může vyvolat velký dvojlom ve vlákně prostřednictvím fotoelastického efektu a může způsobit velkou polarizační modulaci, pokud je vstupní polarizace 45° od osy stlačení. Polarizačně necitlivý skrambler lze zkonstruovat kaskádováním několika stlačovačů vláken orientovaných 45° od sebe. Zařízení může pracovat buď rezonančně při vyšších skramblovacích frekvencích, nebo nerezonančně při nižších skramblovacích frekvencích. Ve srovnání se skramblerem z LiNbO<sub>3</sub> má toto zařízení výhodu nízkých vložných ztrát, nízké PDL a nízké ceny. Ve srovnání se skramblerem s vláknovou cívkou má výhodu malých rozměrů, nízké zbytkové fázové modulace a flexibility skramblování. Kromě toho má oproti skramblérům s LiNbO<sub>3</sub> a vláknovými cívkami výhody nízké zbytkové fázové modulace a zbytkové amplitudové modulace (aktivační ztráty). Nízká zbytková fázová modulace je důležitá pro zamezení šumu souvisejícího s interferencí v optických systémech a nízká

zbytková amplitudová modulace je rozhodující pro použití skrambleru pro měření PDL a DOP optických zařízení[40].

## 2.2.2 Polarizační stabilizátory

Polarizační stabilizátory jsou v optických systémech nezbytné pro udržení SOP světla navzdory výkyvům prostředí. Byly vyvinuty různé typy polarizačních stabilizátorů, z nichž každý využívá k dosažení stabilizace jiné mechanismy:

- **Stabilizátory založené na stlačování vláken:** Tato zařízení využívají piezoelektrické aktuátory, které vyvíjejí řízený tlak na optické vlákno, čímž vyvolávají dvojlom, který kompenzuje kolísání SOP. Nastavením tlaku lze dynamicky řídit SOP, aby se zabránilo vnějším poruchám.
- **Stabilizátory na bázi tekutých krystalů:** Tyto stabilizátory využívají elektrooptické vlastnosti kapalných krystalů a upravují SOP změnou indexu lomu v reakci na působící elektrické pole. Tato metoda umožňuje přesné a rychlé řízení polarizace.
- **Magnetooptické stabilizátory (Faradayův rotátor):** Tyto stabilizátory využívají Faradayův jev, kdy se rovina polarizace otáčí pod vlivem magnetického pole. Modulací magnetického pole lze účinně stabilizovat SOP.
- **Stabilizátory integrovaných fotonických obvodů:** Tyto stabilizátory využívají křemíkovou fotoniku a integrují komponenty pro řízení polarizace na jednom čipu. Nabízejí kompaktnost a potenciál pro vysokorychlostní provoz, takže jsou vhodné pro pokročilé komunikační systémy.
- **Stabilizátory založené na vlnových deskách:** Tato zařízení využívají vlnoplochy – optické prvky, které mění fázi světla – k úpravě SOP. Kombinací více vlnových destiček s různou orientací a retardačními schopnostmi se dosáhne přesného řízení polarizace.

Každý typ stabilizátoru nabízí odlišné výhody a vybírá se na základě specifických požadavků aplikace, jako je rychlost odezvy, vložné ztráty a možnosti integrace[41].

## 2.3 Potlačování nežádoucích vlivů na polarizaci

### 2.3.1 Technika polarizačního scramblingu

Pomocí techniky polarizačního scramblingu jsou polarizační změny v optickém vlákne zprůměrovány a fázové poruchy jsou minimalizovány. To poskytuje slibné řešení pro potlačení náhodných poruch polarizace v systému optického přenosu frekvence na bázi vlákna a v systému kvantové distribuce klíčů (QKD). Zároveň je tato technika užitečná při minimalizaci polarizačního fadingu.

Pozitivní přínos této techniky ověřili autoři článku[42], kteří byli schopni polarizační efekt účinně redukovat a eliminovat periodické fázové fluktuace vyvolané denními změnami teploty. Navíc pozitivní výsledky experimentu proof-of-concept ukazují proveditelnost jejich schématu polarizačního scramblingu platného v obecném případě a ukazují výsledky v konkrétním případě vláknových cívek, kde se vzhledem k omezením cívky rovněž očekává vysoká PMD.

### 2.3.2 Optická vlákna udržující polarizaci

Optická vlákna udržující polarizaci (PM) jsou specializovaná jednovláknová vlákna, která jsou konstruována tak, aby zachovávala stav polarizace světla během jeho šíření. Ve standardních optických vláknech mohou vnější faktory, jako jsou teplotní výkyvy, mechanické namáhání a ohyb, vyvolat dvojlom, což vede ke změnám SOP světla. Tato vlákna jsou schopna tento problém vyřešit zavedením záměrného dvojlomu, který zajišťuje, že světlo vypuštěné s určitou polarizací si tuto orientaci zachová po celou dobu přenosu. PM vlákna jsou konstruována tak, aby zachovávala SOP světla, což je nezbytné pro aplikace, jako je optické snímání, interferometrie a QKD. V telekomunikacích se obvykle používají k připojení zdrojového laseru k modulátoru, protože modulátory často vyžadují polarizované světlo pro optimální výkon. PM vlákna se však běžně nepoužívají pro samotný přenos dat na velké vzdálenosti, a to z několika důvodů[43]:

- **Cena:** Výroba PM vláken je dražší než výroba standardních jednovláknových vláken, což vede k vyšším nákladům na zavedení.
- **Útlum:** V porovnání s jednovláknovými vlákny vykazují vyšší ztráty šířením, což může zhoršit kvalitu signálu na dlouhé vzdálenosti.
- **Složitost manipulace:** Pro spojování a zarovnávání PM vláken je potřeba přesné nastavení jejich polarizačních os, což vyžaduje specializované vybavení a techniky, které zvyšují složitost instalace a náklady.

## Klíčové charakteristiky PM vláken

### Rázová délka

Rázová délka (Beat length –  $L_b$ ) je parametr, který slouží ke kvantifikaci schopnosti vlákna zachovat stálou polarizaci. Rázová délka je nepřímo úměrná dvojlomu. Čím větší je rozdíl indexu lomu mezi oběma osami vlákna, tím větší je dvojlom, tím kratší je beatová délka a tím lepší je schopnost vlákna zachovat polarizaci. Oba polarizační módy mají v PM vláknech různé konstanty šíření. Rázová délka je vzdálenost, na které vlna v jednom módu zažívá dodatečné zpoždění jedné vlnové délky (ekvivalentní  $2\pi$ ) ve srovnání s druhým polarizačním módem, a udává se jako[44]:

$$L_B(m) = \left( \frac{2\pi}{\Delta\beta} \right) = \left( \frac{\lambda_0}{B_m} \right) \quad (2.1)$$

### Pomalá osa a rychlá osa

V PM vláknech existují dva polarizační režimy. Módy se šíří podél kolmé osy, která se nazývá rychlá osa a pomalá osa. Směr polarizace módu s větší konstantou šíření se nazývá pomalá osa, protože fázová rychlost tohoto módu je pomalejší než u druhého módu. Zatímco směr polarizace módu s menší konstantou šíření se nazývá rychlá osa[44].

### Polarizační přeslech (Crosstalk)

Jedná se o nežádoucí vazbu nebo interferenci mezi rychlým a pomalým polarizačním módem. Dochází k němu, když se polarizační stav světla ve vláknech odchyluje od ideálního uspořádání podél jedné z ortogonálních os, což vede k částečnému míchání nebo úniku polarizačních módů. Je definován jako:

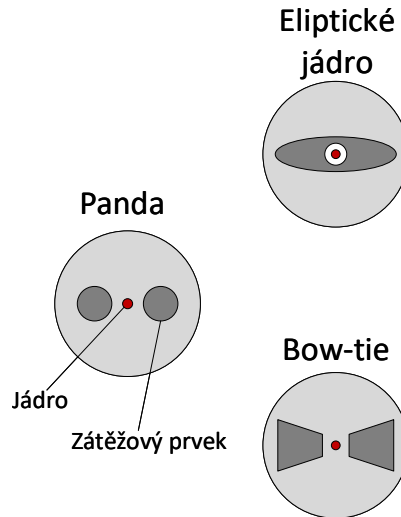
$$\text{Crosstalk (dB)} = \log_{10} \left( \frac{P_1}{P_0} \right), \quad (2.2)$$

kde  $P_0$  je výkon hlavního polarizačního módu (na výstupu) a  $P_1$  je výkon nežádoucího polarizačního módu vzniklého polarizačním přeslechem[44].

PM vlákna dosahují svých polarizačních vlastností prostřednictvím strukturálních modifikací, které vyvolávají vysoký dvojlom:

- **Napětově přizpůsobené části (SAP):** V blízkosti jádra vlákna jsou vloženy materiály s různými koeficienty tepelné roztažnosti. Během výroby tyto materiály vyvolávají napětí, které vytváří asymetrický profil indexu lomu. Mezi běžné konstrukce patří:
  - Vlákno PANDA: Obsahuje dvě válcové napětové tyče na opačných stranách jádra, které v průřezu připomínají obličej pandy.

- Bow-Tie Fiber: Obsahuje napěťové prvky ve tvaru „motýlka“ přiléhající k jádru.
- **Eliptické jádro nebo opláštění:** Změnou tvaru jádra nebo pláště na eliptický se zavádí geometrický dvojlom, který pomáhá udržovat polarizaci.



Obr. 2.2: Srovnání vnitřní struktury různých typů vláken[45]

Tyto konstrukční prvky vytvářejí dva ortogonální polarizační módy s odlišnými konstantami šíření. Když je světlo spuštěno v jednom z těchto módů, zůstává v tomto stavu, čímž se minimalizuje vzájemné propojení mezi polarizačními osami.

PM vlákna mají zásadní význam v aplikacích, kde je důležité udržet stabilní SOP. Zde jsou hlavní místa využití:

- **Vláknové optické gyroskopy:** Využívají se v navigačních systémech a spoléhají na konzistentní polarizaci, aby přesně detekovaly změny rotace.
- **Koherentní komunikační systémy:** Zajišťují integritu signálu zachováním polarizace, což je nezbytné pro techniky koherentní detekce.
- **Senzory s optickými vlákny:** Používají se v interferometrických senzorech k zachování polarizace, což zvyšuje přesnost měření.
- **Kvantová distribuce klíčů:** Klíčové pro zachování polarizačních stavů fotonů, což je zásadní pro bezpečnou kvantovou komunikaci.

PM vlákna jsou sice účinná při zachování polarizace, ale jsou obvykle dražší a mají vyšší útlum ve srovnání se standardními jednovidovými vlákny. Proto je jejich použití často omezeno na aplikace, kde je polarizační stabilita nejdůležitější[46].

## 2.4 Optické polarizátory

### 2.4.1 Polarizační dělič svazku

Polarizační dělič svazku (PBS) je optické zařízení, které rozděljuje přicházející světelný paprsek na dvě ortogonální polarizační složky – obvykle označované jako horizontální (s-polarizované) a vertikální (p-polarizované) světlo. V optických vláknech umožňuje PBS směřování nebo kombinování světla na základě jeho polarizačního stavu. V kontextu polarizační analýzy může PBS sloužit jako fundamentální komponenta. Tím, že směřuje oddělené polarizační složky na různé detektory, umožňuje měřit intenzitu každého polarizačního stavu, což je nezbytné pro určení celkové polarizační charakteristiky světla. Obě složky jsou zachyceny fotodetektory, které měří intenzitu napětí[47]. Naměřená intenzita napětí je následně převedena pomocí A/D převodníku z analogových signálů na digitální. Pomocí nich lze analyzovat změny v SOP, jako jsou změny amplitudy nebo fáze mezi složkami. Samostatný PBS však neposkytuje komplexní polarizační analýzu, protože pouze rozděljuje světlo na dvě lineární polarizační složky bez měření dalších parametrů, jako je elipticita nebo úplný stav polarizace[48].

### 2.4.2 Polarizační rotátory

Slouží k otočení polarizační roviny světla o specifický úhel, což je užitečné při sladění polarizace v různých částech optického systému. Pomocí polarizačního rotátoru lze měnit intenzitu prošlého světla, pokud je umístěn mezi dvěma vzájemně pootočenými polarizátory. Mezi polarizační rotátory se řadí Faradayovy rotátory využívající Faradayův jev, dvojlomné destičky (půlvlnné a čtvrtvlnné) a prizmatické rotátory.

## 2.5 Optické depolarizátory

Depolarizace spočívá ve změně amplitudy a fáze vln v závislosti na čase, místě a vlnové délce. Mezi depolarizátory se řadí Lyotovy depolarizátory. Ty se skládají z několika dvojlomných krystalů s různými tloušťkami a vzájemně pootočenými optickými osami. Tato konfigurace způsobuje, že různé polarizační složky světla procházejí odlišnými fázovými zpožděními, což vede k efektivní depolarizaci výstupního světla. Dále depolarizátory s optickými vlákny. Ty zase využívají speciálně navržená optická vlákna, která indukují změny polarizace během šíření světla, čímž se dosahuje depolarizace signálu[49].

## 3 Analýza signálů

Zpracování signálů zahrnuje konverzi nebo transformaci dat způsobem, který nám umožňuje vidět v nich věci, které nejsou možné přímým pozorováním. Zpracování signálů nám umožňuje analyzovat, optimalizovat a korigovat signály, včetně vědeckých dat, zvukových proudů, obrázků a videa. V této kapitole se podíváme na základní metody analýzy signálů v oblasti telekomunikací.

### 3.1 Rychlá Fourierova transformace

Rychlá Fourierova transformace (FFT) je důležitou měřicí metodou v oblasti měření zvuku a akustiky. Převádí signál na jednotlivé spektrální složky, a tím poskytuje frekvenční informace o signálu. FFT se používá pro analýzu poruch, kontrolu kvality a monitorování stavu strojů nebo systémů. FFT je optimalizovaný algoritmus pro realizaci diskretní Fourierovy transformace (DFT). Signál je vzorkován po určitou dobu a rozdělen na své frekvenční složky. Tyto složky jsou jednotlivé sinusové kmity o různých frekvencích, z nichž každá má svou amplitudu a fázi. Při vytváření FFT jsou důležité dva parametry[50]:

- Vzorkovací frekvence  $f_s$  měřicího systému – jedná se o průměrný počet vzorků získaných za jednu sekundu.
- Zvolený počet vzorků  $BL$  – jedná se vždy o celou mocninu základu 2 v FFT.

Z těchto dvou základních parametrů lze určit další parametry:

- Šířka pásma  $f_n$  – tato hodnota udává teoretickou maximální frekvenci, kterou lze určit pomocí FFT.

$$f_n = \frac{f_s}{2} \quad (3.1)$$

- Doba trvání měření  $D$  – doba trvání měření je dána vzorkovací frekvencí  $f_s$  a délkou bloku  $BL$ .

$$D = \frac{BL}{f_s} \quad (3.2)$$

- Frekvenční rozlišení  $d_f$  – frekvenční rozlišení udává frekvenční odstup mezi dvěma výsledky měření.

$$d_f = \frac{f_s}{BL} \quad (3.3)$$

V praxi je vzorkovací frekvence  $f_s$  obvykle proměnnou danou systémem. Volbou délky bloku  $BL$  však lze definovat dobu trvání měření a frekvenční rozlišení. Při Fourierově transformaci se předpokládá, že se vzorkovaný úsek signálu periodicky opakuje po nekonečně dlouhou dobu. Z toho vyplývají dva závěry: FFT je vhodná pouze pro periodické signály a vzorkovaný segment signálu musí obsahovat celý počet period[50].

### 3.1.1 Nyquistova věta a aliasing

Harry Nyquist byl objevitelem základního pravidla pro vzorkování analogových signálů – vzorkovací frekvence musí být nejméně dvojnásobkem nejvyšší frekvence signálu. Má-li být například vzorkován signál obsahující frekvence do 24 kHz, je k tomu zapotřebí vzorkovací frekvence alespoň 48 kHz. Polovina vzorkovací frekvence, v tomto příkladu 24 kHz, se nazývá Nyquistova frekvence. Při nedodržení tohoto pravidla je signál tzv. podvzorkován a může dojít ke vzniku aliasingu, při kterém je frekvence signálu chybně identifikována. V FFT se to projeví jako zrcadlové frekvence. Pokud je Nyquistova frekvence překročena, signál se na této pomyslné hranici odrazí a spadne zpět do užitečného frekvenčního pásma[50].

## 3.2 Krátkodobá Fourierova transformace

Tradiční Fourierovy transformace popisují frekvenční složky signálu zprůměrované za celý čas. Pokud ovšem chceme analyzovat, jak se jednotlivé frekvence vyvíjejí v čase, prostá Fourierova transformace není dostatečná. Zde přichází na řadu krátkodobá Fourierova transformace (STFT). STFT bere v úvahu pouze krátký úsek (okna) delšího signálu a počítá jeho Fourierovu transformaci. Obvykle se toho dosáhne vynásobením delší časové funkce  $x[n]$  funkcí okna  $w[n]$ , která má krátké trvání. V praxi je běžné vyhodnocovat STFT pouze v konečné množině rovnoměrně rozmístěných bodů podél frekvenční osy, stejně jako se v běžných aplikacích digitálního zpracování signálu často používá DFT místo DTFT[51].

### 3.2.1 Časová okna

Časových oken a s nimi spojených metod existují desítky[52]. My se zaměříme jen na nejčastěji používaná. Začneme tím, že obrátíme pozornost k vlivu tvaru a trvání okna na charakter STFT. Vzájemný vztah mezi původní časovou funkcí, velikostí a tvarem okna a výslednou STFT můžeme formalizovat takto. Vezmeme-li nejprve v úvahu spojitou frekvenční verzi STFT. Fourierova transformace  $w[n - m]$  je:

$$w[n - m] \iff \sum_{m=-\infty}^{\infty} w[n - m]e^{-j\omega m}. \quad (3.4)$$

Necháme-li  $l = n - m$  a  $m = n - l$ , dostaneme:

$$w[n - m] \iff \sum_{l=-\infty}^{\infty} w[l]e^{-j\omega(n-l)} = e^{-j\omega n}W(e^{-j\omega}). \quad (3.5)$$

Z toho vyplývá, že

$$w[n - m]x[m] \iff \frac{1}{2\pi} \left( W(e^{-j\omega})e^{-j\omega m} \right) \circledast X(e^{j\omega}). \quad (3.6)$$

Jinými slovy si lze STFT představit také jako kruhovou frekvenční konvoluci Fourierovy transformace původního vstupního signálu s Fourierovou transformací časově obrácené a posunuté funkce okna. Protože kratší funkce v čase vytvářejí širší Fourierovy transformace ve frekvenci, použití krátkého analytického okna  $w[n]$  nám poskytne dobré časové rozlišení na úkor velkého rozmazání ve frekvenci, zatímco širší časové okno poskytne ostré spektrální rozlišení na úkor sníženého časového rozlišení. To platí i pro diskrétně-frekvenční implementaci STFT[51].

Výběr nejvhodnější okenní funkce pro danou aplikaci je otázkou vyvážení mnoha faktorů, včetně rozlišení, úniku, výpočetní jednoduchosti a specifických charakteristik signálu. Pokud hledáme přesnou amplitudu signálu, je optimální volbou ploché horní okno, protože vykazuje nejlepší rozlišení amplitudy. Pokud hledáme přesnou frekvenci vrcholů signálu – a má potřebnou délku, aby se zabránilo nespojitostem – pak je ideální obdélníkové okno. Jinak se dobře osvědčují Blackmanovo, Hammingovo nebo Hanningovo okno. Každé z nich má ve srovnání s ostatními dvěma určité výhody a nevýhody. Například Hammingovo okno má lepší výšku postranních laloků než Hanningovo, ale horší míru odvalování postranních laloků. Blackmanovo okno je kombinací ostatních dvou oken s lepší mírou odklonu bočních laloků než Hanningovo a lepší výškou bočních laloků než obě okna. V důsledku toho má Blackmanovo okno větší šířku hlavního laloku. Všechna okna tyto metriky ohrožují a je na uživateli, aby rozhodl, které metriky jsou důležité a které lze obětovat[53].

### Obdélníkové okno

Obdélníkové okno, které se díky svému tvaru nazývá také jednotné okno nebo okno skříňového vozu, je definováno takto:

$$f(t) = \begin{cases} 1, & |t| \leq \tau \\ 0, & \text{jinak} \end{cases} \quad (3.7)$$

Je to základní typ, často používaný pro jednoduché aplikace. Obdélníkové okno je výsledkem přímého zkrácení signálu. Fourierova transformace tohoto okna ukazuje, že první postranní lalok tohoto okna je přibližně jedna pětina vrcholu hlavního laloku a postranní laloky klesají rychlostí  $\frac{1}{\Omega}$ [52].

### Hannovo okno

Toto okno navrhl rakouský meteorolog Julius von Hann. Lze ho definovat následujícím vztahem:

$$f(t) = \begin{cases} 0.5 + 0.5 \cos\left(\frac{\pi t}{\tau}\right), & |t| \leq \tau \\ 0, & \text{jinak} \end{cases} \quad (3.8)$$

Hannovo okno se často používá u náhodných dat, protože má mírný vliv na frekvenční rozlišení a amplitudovou přesnost výsledného frekvenčního spektra, zejména ve srovnání s účinky jiných oken. Maximální amplitudová chyba Hannova okna je 15 %, zatímco frekvenční únik je obvykle omezen na 1,5 spektrální čáry na každou stranu původního sinusového signálu. Z toho vyplývá, že Hannovo okno se nejčastěji používá při analýze obecného hluku a vibrací[54].

### Hammingovo okno

Hammingovo okno lze považovat za optimalizovanou formu Hannova okna. Koeficienty tohoto okna jsou optimalizovány tak, aby bylo dosaženo minimální úrovně prvního bočního laloku (FSL) – nedosahuje zcela nuly, a proto je v něm stále patrná mírná nespojitost signálu. Kvůli tomuto rozdílu Hammingovo okno lépe potlačuje nejbližší postranní lalok, ale hůře potlačuje všechny ostatní. Hammingovo okno nachází uplatnění v optice při apodizaci, která vyhlazuje vstupní profil intenzity nebo přenosu tak, že se na okrajích blíží téměř nule. Jeho funkční tvar je reprezentován vztahem[52, 55]:

$$f(t) = \begin{cases} 0.54 + 0.46 \cos\left(\frac{\pi t}{\tau}\right), & |t| \leq \tau \\ 0, & \text{jinak} \end{cases} \quad (3.9)$$

### Blackmanovo okno

Blackmanovo okno lze definovat následujícím vztahem[52]:

$$f(t) = \begin{cases} 0.42 + 0.5 \cos\left(\frac{\pi t}{\tau}\right) + 0.08 \cos\left(\frac{2\pi t}{\tau}\right), & |t| \leq \tau \\ 0, & \text{jinak} \end{cases} \quad (3.10)$$

Blackmanovo okno je zúžení vytvořené pomocí prvních tří členů součtu kosinusů. Bylo navrženo tak, aby mělo téměř minimální možný únik[56].

## 3.3 Vlnková transformace

Vlnková transformace se stává běžným nástrojem pro analýzu lokalizovaných změn výkonu v časové řadě. Rozložením časové řady do časově-frekvenčního prostoru lze určit jak dominantní módy variability, tak i to, jak se tyto módy mění v čase. Aby byla tato funkce přípustná jako vlnková transformace, musí mít nulovou střední hodnotu a musí být lokalizována v časovém i frekvenčním prostoru. Příkladem je Morletova vlnka, která se skládá z rovinné vlny modulované Gaussem:

$$\psi_0(\eta) = \pi^{-1/4} e^{i\omega_0 \eta} e^{-\eta^2/2}, \quad (3.11)$$

kde  $\omega_0$  je nedimenzionální frekvence. Termín „vlnková funkce“ se používá obecně pro ortogonální nebo neortogonální vlnky. Termín „vlnková báze“ se vztahuje pouze na ortogonální soubor funkcí. Použití ortogonální báze znamená použití diskrétní vlnkové transformace, zatímco neortogonální vlnkovou funkci lze použít buď s diskrétní, nebo spojitou vlnkovou transformací[57].

Principem vlnkové transformace je získání skupiny signálů, které představují stejný signál, ale všechny odpovídají různým frekvenčním pásmům. Víme, který signál odpovídá kterému frekvenčnímu pásmu, a pokud je všechny spojíme a zakreslíme do trojrozměrného grafu, budeme mít na jedné ose čas, na druhé frekvenci a na třetí amplitudu. To nám následně ukáže, které frekvence existují v jakém čase. Oproti STFT poskytuje vlnková transformace proměnné rozlišení – vyšší frekvence jsou lépe rozlišeny v čase a nižší frekvence jsou lépe rozlišeny ve frekvenci. To znamená, že určitá vysokofrekvenční složka může být lokalizována lépe v čase (s menší relativní chybou) než nízkofrekvenční složka. Naopak nízkofrekvenční složka může být lokalizována lépe frekvenčně než vysokofrekvenční složka[58].

## 3.4 Pokročilé metody zpracování signálu

### 3.4.1 Konvoluční neuronové sítě

Konvoluční neuronová síť (CNN) je třída hlubokých neuronových sítí, které se nejčastěji používají k analýze vizuálních obrazů. Architektura CNN využívá speciální techniku zvanou konvoluce, místo aby se spoléhala pouze na násobení matic jako tradiční neuronové sítě. Ta kombinuje dvě funkce a ukazuje, jak jedna z nich mění tvar druhé[59]. Konvoluční sítě kombinují tři architektonické myšlenky, které zajišťují určitý stupeň invariance posunu, měřítka a zkreslení: lokální receptivní pole, sdílené váhy (nebo replikace vah) a prostorové nebo časové podvzorkování[60].

### 3.4.2 Strojové učení

Strojové učení je studium počítačových algoritmů, které se učí předpovídat a/nebo klasifikovat na základě pouhého souboru shromážděných dat a bez pevného předpokladu základního modelu. Představuje podmnožinu umělé inteligence, která označuje schopnost digitálního počítače nebo počítačem řízeného robota vykonávat úkoly běžně spojované s vnímajícími bytostmi. Obor strojového učení využívá různé přístupy k tomu, aby naučil počítače plnit úkoly v případech, kdy není k dispozici žádný uspokojivý model[61].

Strojové učení chápeme jako přirozené rozšíření klasického paradigmatu zpracování signálů, kde jsou lineární bloky zpracování nahrazeny nelineárními ekviva-

lenty, což umožňuje zvládnout mnohem širší množinu problémů. Zpracování signálů a strojové učení lze použít jako ortogonální techniky, kdy se znalosti domény používají s klasickým zpracováním signálů k získání reprezentací signálů, které jsou vhodné pro strojové učení. V moderních přístupech jsou techniky strojového učení integrovány přímo do grafu zpracování signálu a provádějí nelineární predikci nebo redukci dimenzionality jako nedílnou součást systému. Přístupy se tradičně dělí do tří širokých kategorií v závislosti na povaze signálu nebo zpětné vazby, kterou má učící se systém k dispozici[61]:

- **Učení pod dohledem:** Cílem je naučit se obecné pravidlo, které přiřazuje vstupy k výstupům. Jedná se o nejběžnější aplikaci strojového učení, která se vztahuje jak na regresní, tak na klasifikační úlohy.
- **Učení bez dohledu:** V tomto případě nejsou algoritmu strojového učení zadány žádné značky a cílem procesu učení je obnovit široké struktury v datech. To lze následně využít k učení základního statistického rozdělení, jak generovat umělé datové body podobné těm v datovém souboru nebo jako krok před zpracováním v řetězci zpracování signálu.
- **Učení posilováním:** V prostředí posilovacího učení algoritmus přímo interaguje s procesem, který pozoruje. Příkladem může být hraní hry, řízení automobilu nebo řízení průmyslového procesu. Cílem posilování učení je najít optimální politiku, která dosáhne cíle procesu, jímž může být výhra ve hře, bezpečná jízda autem z bodu A do bodu B nebo řízení procesu v rámci provozních parametrů.

## 4 Praktické měření

Metoda monitorování optického vlákna za využití změn SOP světla má velice široké uplatnění zvláště v situacích, kdy je potřeba co nejefektivnějšího a nízkonákladového monitorování, nebo kdy je obtížné použít jiné metody nebo specializované přístroje, což je zásadní pro monitorování geofyzikálních jevů. Například autoři práce[62] úspěšně snímali seismické a vodní vlny na více než 10 000 km dlouhém podmořském kabelu spojujícím Los Angeles v Kalifornii a Valparaiso v Chile sledováním polarizace běžných optických telekomunikačních kanálů. Podél kabelu detekovali několik středně velkých až velkých zemětřesení v pásmu 10 mHz až 5 Hz. Byli schopni také zaznamenat tlakové signály z oceánských vln v primárním pásmu mikroseismů, což naznačuje potenciál pro snímání tsunami. Za zmínku stojí práce[63], kde autoři také popisují možnost monitorování změn SOP světla pro detekci různých typů seizmických událostí a tlakem způsobených mořskými vlnami. V článku je vytvořen model, který propojuje fluktuace dvojlomnosti vlákna s pozorovanými změnami SOP, mezi nimiž byl potvrzen lineární vztah. Detekce umožňuje měřit optické dráhy s přesností  $10^{-10}$  m, což odpovídá relativní citlivosti  $10^{-17}$ . Tato vysoká citlivost je dosažena i při použití běžných telekomunikačních laserů. V neposlední řadě se autoři práce[64] zaměřili na vliv vnějších elektromagnetických polí na optické kabely a popisují, jak různé faktory – blesky, vysokonapěťové elektrické vedení, gama záření spojené s výboji – ovlivňují optická vlákna. Zjistili, že například úder blesku v blízkosti optického kabelu může mít významný vliv na rotaci polarizační roviny – dokonce i několik stupňů.

Další slibnou oblastí je monitorování mechanických, teplotních a dalších vnějších vlivů na přenos dat na optických vláknech v městských sítích. Zde je také důležité, aby daná metoda byla lehce implementovatelná a efektivní. Výzkumníci v rámci práce[65] sledovali, jestli monitorování SOP umožňuje detekci vibrací na dlouhých trasách a může být potencionálně aplikováno v reálných provozních podmínkách. Výhodami použití této metody je, že nevyžaduje koherentní přístroje a zároveň je levnější a jednodušěji implementovatelná než například metoda DAS. Ovšem na druhou stranu tato metoda neumožňuje lokalizaci konkrétní události, protože integruje všechny změny na celé délce optického vlákna. Konkrétně v této práci byla zkoumána optická trasa s celkovou délkou 6 km, kdy na prvních 4,5 km bylo pozorováno podzemní vlákno vedoucí podél železnice a silnice a na zbylém úseku vlákno omotané kolem vzdušného vedení vysokého napětí. Bylo pozorováno, že naměřené signály odrážejí mechanické poruchy, jako jsou stochastické změny (např. vliv větru) i harmonické modulace (např. vliv pravidelných mechanických vibrací). Autorům se podařilo ověřit, že metoda monitorování SOP umožňuje sledovat nízkofrekvenční vibrace v prostředí reálné městské optické sítě a také ukazuje potenciál pro kon-

tinuální environmentální sledování pomocí existujících telekomunikačních vláken. Podobným tématem se zabývali i autoři práce[66], která se skládala ze dvou částí. První experiment sledoval rychlé změny polarizace způsobené vibracemi vlaků. Byly identifikovány významné body trasy, jako jsou mosty, kde se polarizace výrazně měnila. Druhý experiment sledoval pomalé změny způsobené teplotními výkyvy během tří dnů. Změny polarizace korelovaly s denním teplotním cyklem. Byly zde použity dva druhy polarimetrů. Rychlý polarimetr založený na rozptylu světla na nakloněných mřížkách a polarimetr s PBS, který měří ortogonálně polarizované složky světla. Data z rychlého polarimetru byla následně analyzována pomocí Stokesových parametrů a data z PBS byla analyzována pomocí rychlostí rotace polarizace (PRR).

## 4.1 Detekce a klasifikace událostí

Praktické část bakalářské práce je zaměřena na detekci a klasifikaci běžných událostí a jejich vliv na SOP v optickém vlákně. Měření bylo zaměřeno na běžné situace, se kterými se můžeme v budově setkat. Bylo provedeno celkem dvě měření, z nichž první se zaměřilo na chůzi a hluk způsobený skupinou studentů, tedy situace přímo způsobené člověkem. Druhé na silné bouchnutí dveří, klimatizaci, výtah a manipulace s těžkými protipožárními dveřmi, tedy situace přímo nezpůsobené člověkem. Jako základní vzhled do problematiky hluku v budově posloužila práce[67], která se zabývá širokou škálou událostí. Měření probíhalo na reálné optické trase vedené přes celé patro v pátém patře v budově T12 na Fakultě elektrotechniky a komunikačních technologií. Jako zdroj byl použit nízkošumový DFB laser Koheron LD100 vyzařující světelný paprsek s vlnovou délkou 1550 nm. Konec kabelu byl připojen do polarizačního analyzátoru obsahující PBS s balančními fotodiodami a polarimetr pro detekci Stokesových vektorů, který však nebyl při analýze využit. PBS rozdělilo přicházející paprsek na dvě ortogonální polarizační složky (princip fungování je detailněji popsán v kapitole 2.4.1). Data z analyzátoru byla uložena do souboru formátu HDF5, který umožňuje efektivně ukládat rozsáhlá data a metadata. Následně byla data zpracována a vizualizována ve skriptovacím programovacím jazyce MATLAB.

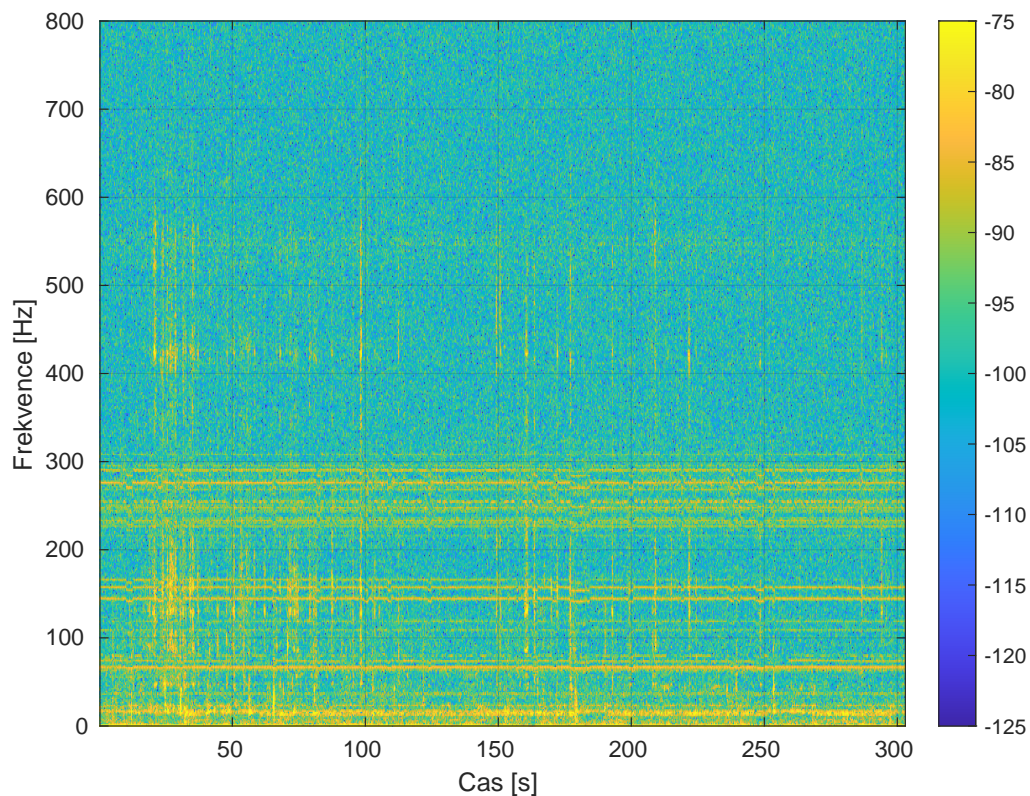
Pro správnou analýzu a vizualizaci jednotlivých událostí se nabízí jako nejlepší varianta využít krátkodobou Fourierovu transformaci (STFT) se zaměřením na jemnější frekvenční rozlišení pomocí zero-paddingu a využitím Hammingova okna. Data načtena ze souboru formátu HDF5 jsou oříznuta o posledních 256 hodnot kvůli odstranění přechodových artefaktů. V další fázi probíhá předzpracování signálu pomocí definice vzorkovací frekvence  $F_s = 13000$  Hz a odstranění tzv. DC složky, tedy průměrné hodnoty signálu. Tím se zajistí, že spektrum nebude zatíženo nulovou frekvencí odpovídající stejnosměrnému posunu. Následuje volba parametrů pro samotné provedení STFT s jemnějším frekvenčním rozlišením. Jako délka jednoho

časového okna je zvoleno 8192 vzorků a pro dosažení hladké časové osy se pak používá překryv o velikosti 75%. Parametr určující délku Fourierovy transformace včetně zero-paddingu (vyplnění posloupnosti nulami) byl nastaven na 16384, což efektivně zdvojnásobí rozlišení ve frekvenční ose oproti samotné délce okna. K minimalizaci úniků spektra při okenní funkci se použije Hammingovo okno. V kroku výpočtu STFT skript zavolá funkci spectrogram, která vrací tři vektory a jednu matici: S (komplexní spektrální koeficienty), F (vektor frekvencí), T (vektor časových okamžiků) a P (mřížka výkonových spekter). Díky nastaveným parametrům okna, překryvu a délce Fourierovy transformace metoda spočítá spektrum s dostatečným kompromisem mezi časovým a frekvenčním rozlišením. Pro vizualizaci spektra se výkonové spektrum převede na decibely a vykreslí jako obraz. Frekvenční rozsah se následně upraví podle požadavků daného měření.

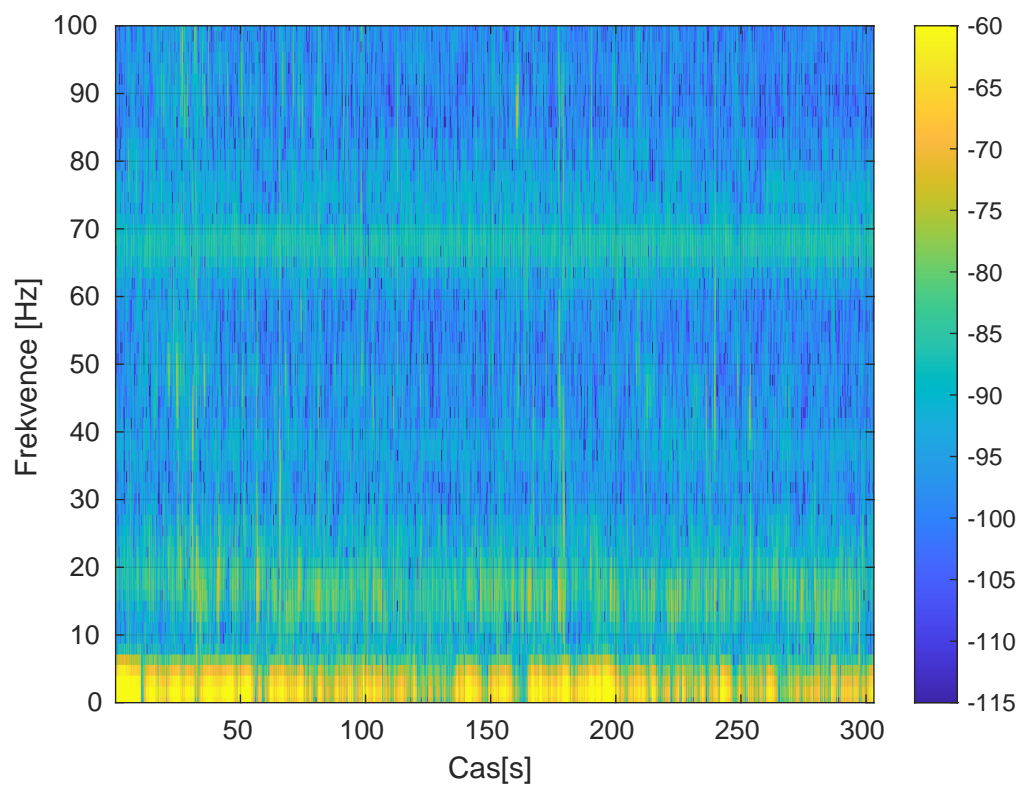
### 4.1.1 Chůze a hluk způsobený skupinou studentů

Prezentovaná frekvenčně-časová analýza, provedená v pětiminutovém náměru, vychází z měření provedeného při příchodu dvaceti studentů, převážně mužů, do učebny. Studenti přicházeli ve dvou, resp. třech odlišných fázích, přičemž mezi druhou a třetí fází byl větší časový rozestup. Toto chování je dobře viditelné na výsledném spektrogramu (viz obr. 4.1), který zachycuje intenzitu zvuku v závislosti na čase a frekvenci. Analyzované měření bylo zaměřeno na frekvenční rozsah od 0 Hz do 800 Hz, přičemž výběr tohoto rozsahu koresponduje se studií [68], která právě v tomto rozsahu zkoumala relevantní zvukové projevy skupiny dvanácti lidí. Výsledky zobrazené na spektrogramu potvrzují, že zvukové frekvence v tomto rozsahu jsou jasně zřetelné. Zároveň si lze všimnout, že nejvyšší intenzita zvukových signálů je patrná zejména v pásmu 100–200 Hz. Tento poznatek odpovídá výsledkům studie [69], která stanovila typické hlasové frekvence pro muže v rozmezí 89–175 Hz a pro ženy v rozsahu 164,5–260 Hz. Převládající zastoupení mužských jedinců mezi měřenými studenty koresponduje s dominantním výskytem intenzivních zvuků právě v nižším uvedeném pásmu, tedy v rozmezí 100–200 Hz. Z tohoto experimentu můžeme vyvodit, že skupina lidí a její chování v uzavřeném prostoru má velký vliv na SOP světla v optické trase. Dále jsou na spektrogramu patrné horizontální čáry, které představují stálé rušení způsobené jinými, neidentifikovanými jevy. Toto rušení se jeví jako konzistentní napříč celým průběhem měření, čímž naznačuje jejich původ v trvalých vnějších zdrojích zvuku nebo vibrací, jejichž identifikace by vyžadovala další cílenou analýzu.

Druhá část analýzy se zaměřila na velmi nízké frekvence (do 5 Hz), přičemž byla upravena metoda STFT s cílem přesnějšího vykreslení frekvenčního obsahu za cenu snížení časového rozlišení – velikost okna snížena na 4096 vzorků, překryv stejný jako původní měření, délka Fourierovy transformace snížena na 8192 vzorků. Navíc bylo při výpočtu použito Blackmanovo okno namísto Hammingova kvůli přesnějšímu frekvenčnímu rozlišení. Zároveň byl upraven rozsah frekvenční stupnice od 0 do 100 Hz pro lepší zřetelnost velmi nízkých frekvencí (viz obr. 4.2. Výsledky ukazují zřetelný nárůst intenzity v tomto nízkofrekvenčním pásmu převážně během první a třetí fáze příchodu studentů. První a druhá fáze vzhledem k jejich krátkému časovému odstavu splývají. Naopak v časových úsecích mimo aktivní fáze vstupu je pozorován pokles intenzity. Tento jev odpovídá výsledkům studie[70], která se zabývala rušením způsobeným lidskými kroky uvnitř budov, kde byly zaznamenány frekvence v rozmezí 1–4 Hz, což podporuje správnost výše uvedeného pozorování.



Obr. 4.1: Frekvenčně-časové spektrum hluku způsobený skupinou studentů



Obr. 4.2: Frekvenčně-časové spektrum chůze

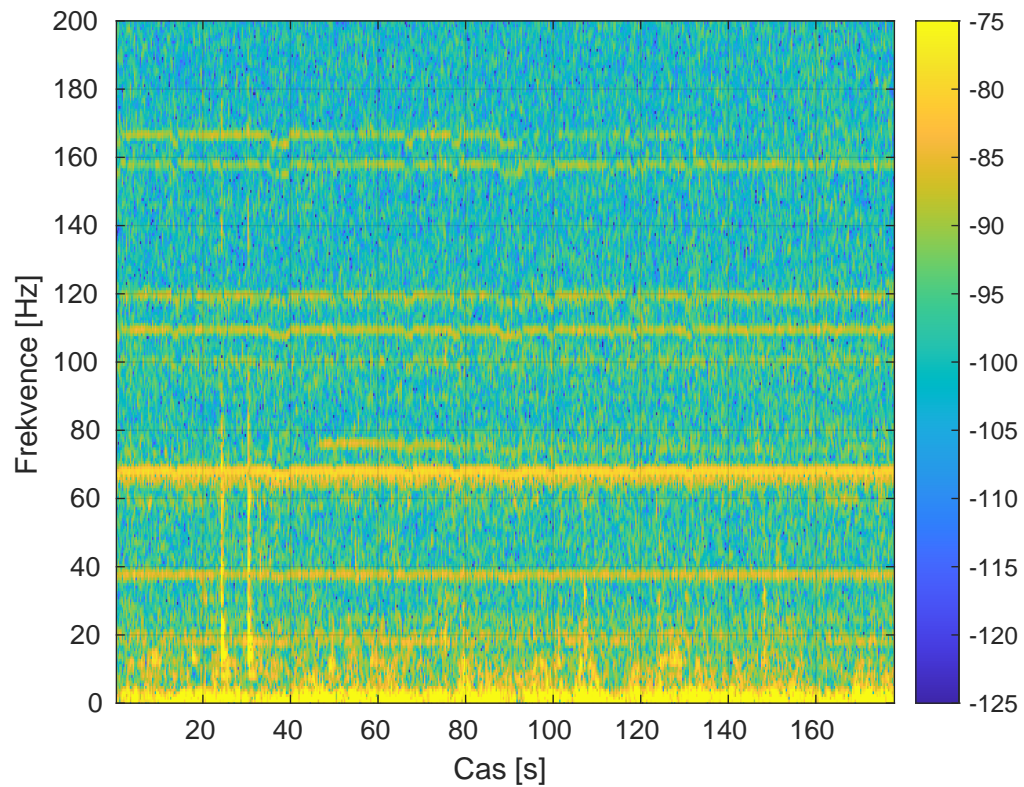
## 4.1.2 Bouchnutí dveří, klimatizace, výtah

Poslední část měření se zaměřila na frekvenční rozsah do 200 Hz, jelikož se ve vyšších frekvencích zkoumané vlivy již nevyskytovaly. Náměr trval čtyři minut a byl proveden ve večerních hodinách mimo vyučování pro co největší omezení nežádoucího rušení. Pro STFT byly použity stejné parametry jako při předchozí analýze hluku způsobeného studenty – velikost okna 8192 vzorků, Hammingovo okno, překryv stejný jako v původním měření, délka Fourierovy transformace 16384 vzorků. V rámci této části byly zkoumány specifické vlivy, které se projeví odlišnými charakteristikami na spektrogramu. Spektrogram znázorňující tyto jevy je uveden na obrázku 4.3.

Nejprve byla analyzována situace bouchnutí obyčejných dveří, kdy došlo ke dvěma výrazným a časově krátkým, po sobě jdoucím událostem mezi prvními dvaceti a čtyřiceti sekundami. Obě bouchnutí se projeví s nejvyšší intenzitou ve frekvenčním pásmu 5–100 Hz a zároveň velmi slabě v pásmu 130–180 Hz. Z toho vyplývá, že bouchnutí dveřmi, ať už záměrně způsobené člověkem nebo vzniklým průvanem, má na SOP světla poměrně velký rušivý vliv v širokém pásmu nízkých frekvencí. Následně byla zkoumána situace, kdy byla stropní klimatizace nastavena na maximální výkon. Zde bylo patrné rušení přibližně na 75 Hz spolu se slabším rušením na 20 Hz. Tato pozorování korespondují se studií[71], která zaznamenala intenzivní vliv provozu klimatizace právě v pásmu do 100 Hz. Tento experiment potvrdil, že při minimalizaci rušení optické trasy vnějšími faktory je potřeba brát v potaz i aktuální typ provozu klimatizační jednotky. Nakonec byla zkoumána manipulace s těžkými ocelovými protipožárními dveřmi. V tomto případě se na spektrogramu objevily dvě poměrně slabé anomálie v intervalu mezi stou a stočtyřicátou sekundou, přičemž jejich rozložení bylo širší v čase především na velmi nízkých frekvencích, tedy do 20 Hz, které bylo pravděpodobně způsobeno dodatečným rozkmitáním ocelového rámu nebo konstrukčních prvků budovy. Naopak ve frekvenčním pásmu 20–40 Hz se daný jev vyskytuje jen velmi krátce. Nejvyšší intenzita rušení v tomto případě byla pozorována mezi stou a stodvacátou sekundou měření, tzn. prvotní manipulace. Intenzity jednotlivých situací jsou zřetelně viditelné v grafu (viz obr. 4.3), který potvrzuje uvedená pozorování. Z tohoto pozorování lze usoudit, že prostá manipulace s těžkými dveřmi nemá na SOP světla tak velký rušivý vliv, jako silné bouchnutí obyčejnými dveřmi.

V další části byla zkoumána situace s rušením způsobeným provozem výtahu, kterou však nebylo možné jednoznačně prokázat. Podle studie[72] se nejintenzivnější rušivý vliv provozu výtahu projevuje na frekvenci 63 Hz, což potvrzuje také studie[73], která navíc doplňuje přítomnost rušení kolem 150 Hz. V provedeném měření se však objevilo konzistentní rušení jiného neznámého původu přesně v těchto

frekvenčních pásmech, přičemž nejvýraznější bylo zaznamenáno v rozsahu 65–70 Hz. Z tohoto důvodu nebylo možné jednoznačně potvrdit rušivý vliv výtahu na SOP světla, a jeho případná detekce by vyžadovala aplikaci sofistikovanějších analytických metod.



Obr. 4.3: Frekvenčně-časové spektrum mechanických vibrací

## Závěr

Provedené experimenty prokázaly, že optická vlákna jsou citlivá na nejrůznější typy vnějších vlivů a podle jejich povahy se liší charakter odezvy. S tím je spojená nutnost úvahy nad vedením trasy za účelem minimalizování vnějších rušivých vlivů. Závěrem lze konstatovat, že pomocí frekvenčně-časová analýzy bylo možné efektivně identifikovat několik klíčových událostí a zdrojů rušení ve zkoumaném prostředí. Bylo potvrzeno, že vstup studentů do učebny je doprovázen zvýšenou intenzitou ve frekvenčním rozsahu 100–200 Hz, což koresponduje s očekávanými akustickými frekvencemi uvedenými ve studiích. Detailní analýza nízkých frekvencí (do 5 Hz) potvrdila citlivost měření na kroky a pohyb osob, což odpovídá závěrům příslušných studií o rušení způsobeném lidskými kroky. Specifické situace, jako bouchnutí dveří, činnost stropní klimatizace či manipulace s těžkými dveřmi, byly rovněž jasně rozpoznatelné a potvrzené odpovídajícími frekvenčními charakteristikami ve spektrogramech. Naopak vliv výtahu nebylo možné jednoznačně potvrdit kvůli existenci konstantního rušení nejasného původu v kritických frekvenčních pásmech. Budoucí výzkum by se měl zaměřit na detailnější identifikaci těchto rušení a použití sofistikovanějších metod pro jednoznačnou detekci specifických jevů, například využití strojového učení.

## Literatura

- [1] HU, Wenxiu; POPOV, Sergei; WEI, Zhuangkun; LEESON, Mark a XU, Tianhua. Tapping Eavesdropper Designs Against Physical Layer Secret Key in Point-to-Point Fiber Communications. Online. *Journal of Lightwave Technology*. 2023, roč. 41, č. 5, s. 1406–1414. ISSN 1558-2213. Dostupné z: <https://doi.org/10.1109/JLT.2022.3223025>. [cit. 2024-12-07].
- [2] ATAN, F. M.; ZIN, A. M.; ISMAIL, N. A.; ZULKIFLI, N. a IDRUS, S. M. An Overview on Security Issues in The Optical Access Network. Online. *2018 IEEE 7th International Conference on Photonics (ICP)*. 2018. Dostupné z: <https://doi.org/10.1109/ICP.2018.8533171>. [cit. 2024-12-10].
- [3] SHARMA, Purva; CHOI, Kwonhue; KREJCAR, Ondrej; BLAZEK, Pavel; BHATIA, Vimal et al. Securing Optical Networks Using Quantum-Secured Blockchain: An Overview. Online. *Sensors*. 2023, roč. 23, č. 3, s. 186–200. ISSN 1751-8768. Dostupné z: MDPI, <https://doi.org/10.1049/iet-opt.2016.0150>. [cit. 2024-11-06].
- [4] Polarization of Light. Online. Geeks for Geeks. 6 Jun 2024. Dostupné z: <https://www.geeksforgeeks.org/polarization-of-light/>. [cit. 2024-10-26].
- [5] WOLIŃSKI, T. R. Polarization in Optical Fibers. Online. *Acta Physica Polonica A*. 1999, roč. 95, č. 5, s. 749–760. Dostupné z: <http://przyrbwn.icm.edu.pl/APP/PDF/95/a095z5p07.pdf>. [cit. 2024-11-16].
- [6] Polarisation States and Jones Vectors. Online. LibreTexts. 2024. Dostupné z: [https://phys.libretexts.org/Bookshelves/Optics/BSc\\_Optics\\_\(Konijnenberg\\_Adam\\_and\\_Urbach\)/04%3A\\_Polarization/4.02%3A\\_Polarisation\\_States\\_and\\_Jones\\_Vectors](https://phys.libretexts.org/Bookshelves/Optics/BSc_Optics_(Konijnenberg_Adam_and_Urbach)/04%3A_Polarization/4.02%3A_Polarisation_States_and_Jones_Vectors). [cit. 2024-11-10].
- [7] Jones Vector Representation of Polarization States. Online. Fiber Optics for Sale. c2024. Dostupné z: <https://www.fiberoptics4sale.com/blogs/wave-optics/102087110-jones-vector-representation-of-polarization-states>. [cit. 2024-11-10].
- [8] YU, Francis T. S. a YIN, Shizhuo, eds. *Fiber Optic Sensors*. New York: Marcel Dekker, 2002. ISBN 0-8247-0732-X.
- [9] Polarisation by Scattering. Online. Testbook. 2023. Dostupné z: <https://testbook.com/physics/polarisation-by-scattering>. [cit. 2024-11-10].

- [10] Polarization by Scattering. Online. Harvard University. c2024. Dostupné z: <https://sciencedemonstrations.fas.harvard.edu/presentations/polarization-scattering>. [cit. 2024-11-12].
- [11] Polarization by Reflection. Online. HyperPhysics. c2024. Dostupné z: <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/phyopt/polref.html>. [cit. 2024-11-12].
- [12] Reflection, Refraction and Polarization. Online. College Physics Lab - Electricity and Magnetism. c2011. Dostupné z: [https://www.webassign.net/question\\_assets/unccolphysem11/lab\\_5/manual.html](https://www.webassign.net/question_assets/unccolphysem11/lab_5/manual.html). [cit. 2024-11-12].
- [13] Birefringence. *Online*. Fibercore. c2024. Dostupné z: <https://fibercore.humaneticsgroup.com/services-support/fiberpaedia/b/birefringence>. [cit. 2024-10-29].
- [14] Polarizační filtry: Teorie. Online. *Paladix*. 2001. Dostupné z: <https://www.paladix.cz/clanky/polarizacni-filtry-teorie.html>. [cit. 2024-12-10].
- [15] What is Birefringence and Beat Length? *Online*. Fiber optic for sale. c2024. Dostupné z: <https://www.fiberoptics4sale.com/blogs/archive-posts/95042886-what-is-birefringence-and-beat-length>. [cit. 2024-10-29].
- [16] Polarisation of Light. Online. Vedantu. c2024. Dostupné z: <https://www.vedantu.com/jee-main/physics-polarisation-of-light>. [cit. 2024-11-12].
- [17] Polarization by Absorption. Online. Harvard University. c2024. Dostupné z: <https://sciencedemonstrations.fas.harvard.edu/presentations/polarization-absorption>. [cit. 2024-11-12].
- [18] KRÁLOVÁ, Magda. Polarizace světla. Online. *Techmania*. c2007. Dostupné z: <https://edu.techmania.cz/cs/encyklopedie/fyzika/svetlo/polarizace-svetla>. [cit. 2024-12-10].
- [19] The Polarization Ellipse. Online. Spie. c2024. Dostupné z: [https://spie.org/publications/spie-publication-resources/optipedia-free-optics-information/fg05\\_p07-09\\_polarization\\_ellipse#=\\_](https://spie.org/publications/spie-publication-resources/optipedia-free-optics-information/fg05_p07-09_polarization_ellipse#=_). [cit. 2024-11-12].
- [20] Polarization in Fiber Optics. Online. Newport. c2024. Dostupné z: [https://www.newport.com/t/polarization-in-fiber-optics?srsltid=AfmB0orIPncEWtGho\\_JcKjRTFMyI1pc\\_1CevW3J8Z\\_JpV74ABTTCS2L5](https://www.newport.com/t/polarization-in-fiber-optics?srsltid=AfmB0orIPncEWtGho_JcKjRTFMyI1pc_1CevW3J8Z_JpV74ABTTCS2L5). [cit. 2024-11-12].

- [21] LUNAINC. Application Note for PDL Measurement. Online. *Luna Innovations*. c2025. Dostupné z: <https://lunainc.com/sites/default/files/assets/files/resource-library/Application-Note-for-PDL-Measurement.pdf>. [cit. 2025-06-02].
- [22] Understanding Waveplates and Retarders. Online. Edmund Optics. c2024. Dostupné z: [https://www.edmundoptics.com/knowledge-center/application-notes/optics/understanding-waveplates/?srsltid=AfmB0ooBByurukvurlEyleDvnP0movXEICvH\\_2adm54vTorDhDcnCxDI](https://www.edmundoptics.com/knowledge-center/application-notes/optics/understanding-waveplates/?srsltid=AfmB0ooBByurukvurlEyleDvnP0movXEICvH_2adm54vTorDhDcnCxDI). [cit. 2024-11-12].
- [23] The Stokes Polarization Parameters. Online. Spie. c2024. Dostupné z: [https://www.spie.org/publications/spie-publication-resources/optipedia-free-optics-information/fg05\\_p12-14\\_stokes\\_polarization\\_parameters#=\\_](https://www.spie.org/publications/spie-publication-resources/optipedia-free-optics-information/fg05_p12-14_stokes_polarization_parameters#=_). [cit. 2024-11-12].
- [24] Understanding the Mueller Matrix. Online. Axometrics. c2021. Dostupné z: <https://www.axometrics.com/articles/understanding-the-mueller-matrix>. [cit. 2024-11-12].
- [25] PASCHOTTA, Rüdiger. Group Delay. Online. RP Photonics. [2022]. Dostupné z: [https://www.rp-photonics.com/group\\_delay.html](https://www.rp-photonics.com/group_delay.html). [cit. 2024-11-26].
- [26] Differential Group Delay. Online. Humanetics. c2024. Dostupné z: <https://fibercore.humaneticsgroup.com/services-support/fiberpaedia/d/differential-group-delay-dgd>. [cit. 2024-11-26].
- [27] GORDON, J. P. a KOGELNIK, H. PMD fundamentals: Polarization mode dispersion in optical fibers. Online. *PNAS*. 2000, roč. 97, č. 9, s. 4541–4550. ISSN 1091-6490. Dostupné z: <https://doi.org/10.1073/pnas.97.9.4541>. [cit. 2024-12-10].
- [28] JABEENA; JAIN, Ashna a BASHA, N. Effects of polarization mode dispersion in optical communication system. Online. 2016. Dostupné z: <https://www.semanticscholar.org/paper/EFFECTS-OF-POLARIZATION-MODE-DISPERSION-INOPTICAL-Jabeena-Jain/d593343dfb61284740fab70977c9ad42b6b52734>. [cit. 2024-12-10].
- [29] A. H. Hartog, *An Introduction to Distributed Optical Fiber Sensors*. New York: Taylor & Francis Group, 2017. ISBN 978-1-4822-5957-5.
- [30] XIAO, Lin; WANG, Yu; LI, Yan; BAI, Qing; LIU, Xin et al. Polarization Fading Suppression for Optical Fiber Sensing: A Review. Online. *IEEE Sensors*

- Journal*. 2022, vol. 22, no. 9, s. 8295–8312. Dostupné z: <https://doi.org/10.1109/JSEN.2022.3161075>. [cit. 2024-12-10].
- [31] ORTIZ, Andrés M. a HORCHE, Paloma R. Pulse-Shape Analysis of PDM-QPSK Modulation Formats for 100 and 200 Gb/s DWDM transmissions. Online. *Universidad Politécnica de Madrid*. Dostupné z: <https://oa.upm.es/33849/1/Pulse-Shape%20for%20PDM-QPSK.pdf>. [cit. 2024-12-09].
- [32] YU, Jianjun a ZHOU, Xiang. Ultra-High-Capacity DWDM transmission system for 100G and beyond. Online. *IEEE Communications Magazine*. 2010, roč. 48, č. 10, s. 56–64. ISSN 1558-1896. Dostupné z: <https://doi.org/10.1109/MCOM.2010.5434379>. [cit. 2024-12-09].
- [33] IVANOVICH, Darko; POWELL, Samuel B.; GRUEV, Viktor a CHAMBERLAIN, Roger D. Polarization Division Multiplexing for Optical Data Communications. Online. *SPIE Photonics West*. 2018. Dostupné z: <https://www.cs.wustl.edu/~roger/papers/ipgc18.pdf>. [cit. 2024-12-09].
- [34] WANG, Yong; SU, Yuqing; SUN, Xiangyu; HAO, Xiaorui; LIU, Yanping et al. Principle and Implementation of Stokes Vector Polarization Imaging Technology. Online. *MDPI*. 2022, roč. 12, č. 13. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/app12136613>. [cit. 2024-12-10].
- [35] BALTHASAR MUELLER, J. P.; LEOSSON, Kristjan a CAPASSO, Federico. Ultracompact metasurface in-line polarimeter. Online. *Optica*. 2016, roč. 3, č. 1, s. 42–47. Dostupné z: <https://doi.org/10.1364/OPTICA.3.000042>. [cit. 2024-12-03].
- [36] N7781C Polarization Analyzer. Online. Keysight. c2000–2024. Dostupné z: <https://www.keysight.com/us/en/product/N7781C/polarization-analyzer.html>. [cit. 2024-12-08].
- [37] ZHOU, Hailong; YAN, Siqi; WEI, Yanxian; ZHAO, Yuhe; CHENG, Ziwei et al. Silicon-based polarization analyzer by polarization-frequency mapping. Online. *APL Photonics*. 2018, roč. 3, č. 10. Dostupné z: <https://doi.org/10.1063/1.5044379>. [cit. 2024-12-08].
- [38] FOUGÈRES, André. Polarization OTDR: Locating High-PMD Fibers. Online. *EXFO Electro-Optical Engineering*, c2005. Dostupné také z: [https://www.exfo.com/contentassets/72f9ff202d89425c8923b3b2919a4a11/exfo\\_anote087\\_locating-high-pmd-fibers\\_en.pdf](https://www.exfo.com/contentassets/72f9ff202d89425c8923b3b2919a4a11/exfo_anote087_locating-high-pmd-fibers_en.pdf).

- [39] BRAUNFELDS, Janis; SPOLITIS, Sandis; GEGERE, Lilita; PIKULINS, Dmi-trijs; STEPANOV, Vsevolods et al. Demonstration of polarization optical-time-domain reflectometer for monitoring of optical fiber lines. Online. *2022 Workshop on Microwave Theory and Techniques in Wireless Communications (MTTW)*. c2022, s. 9–12. Dostupné z: <https://doi.org/10.1109/MTTW56973.2022.9942583>. [cit. 2024-11-15].
- [40] YAO, Steve; SHI, Yongqiang a MA, Jianwei. Scrambling to Minimize Polarization Related Impairments. Online. General Photonics Corporation. 2020, s. 104–106. Dostupné z: <https://lunainc.com/sites/default/files/assets/files/resource-library/Scrambling-to-Minimize-Polarization-Related-Impairments.pdf>. [cit. 2024-11-13].
- [41] Laser Components, *Polarization Controller and Stabilizer*. Online. c2024. Dostupné z: <https://www.lasercomponents.com/de-en/fiber-and-network-technologies/product/polarization-controller-and-stabilizer/>. [cit. 2024-11-03].
- [42] XU, Dan; LOPEZ, Olivier; AMY-KLEIN, Anne a POTTIE, Paul-Eric. Polarization Scramblers to Solve Practical Limitations of Frequency Transfer. Online. *Journal of Lightwave Technology*. 2021, vol. 39, no. 10, s. 3106–3111. ISSN 1558-2213. Dostupné z: <https://doi.org/10.1109/JLT.2021.3057804>. [cit. 2024-12-10].
- [43] MILLER, Kevin. An Introduction to Polarization-Maintaining (PM) Optical Fibers. Online. *M2 Optics*. 2023. Dostupné z: <https://www.m2optics.com/blog/an-introduction-to-polarization-maintaining-optical-fibers>. [cit. 2024-11-03].
- [44] Optical Fibers Fundamentals. Online. MEETOPTICS LABS. c2019-2024. Dostupné z: <https://www.meetoptics.com/academy/optical-fibers-fundamentals?srsltid=AfmB0ooThcten1vaDlih1UrG7rD-ceZkHfRUVp3RLopwfIGQKAXzdWw0#optical-fiber-types>. [cit. 2024-11-17].
- [45] Polarization Components. Online. Oftech. c2024. Dostupné z: <https://opticfibertech.com/products/polarization-components>. [cit. 2024-12-10].
- [46] RP Photonics, *Polarization-maintaining Fibers*. Online. [2022]. Dostupné z: [https://www.rp-photonics.com/polarization\\_maintaining\\_fibers.html](https://www.rp-photonics.com/polarization_maintaining_fibers.html). [cit. 2024-11-03].

- [47] RUŽIČKA, Michal; MÜNSTER, Petr; DEJDAR, Petr; JUREK, Martin a HORVÁTH, Tomáš. Citlivost detekce vibrací v závislosti na dílčích parametrech zapojení polarizačního analyzátoru. Online. *Elektrorevue*. 2022, roč. 24, č. 3. ISSN 1213-1539. Dostupné z: <https://dspace.vut.cz/server/api/core/bitstreams/df712a88-a776-4ad7-93f2-48e5cc140dc7/content>. [cit. 2024-12-09].
- [48] SU, Yang; ZHANG, Chao; XU, Zhiyong a WANG, Yimin. The Pressure Sensing Method Based on Polarization Properties in Fiber. Online. *2021 13th International Conference on Advanced Infocomm Technology (ICAIT)*. 2021, s. 9–15. ISSN 2770-1603. Dostupné z: <https://doi.org/10.1109/ICAIT52638.2021.9702021>. [cit. 2024-12-09].
- [49] BOHM, Konrad; PETERMANN, Klaus a WEIDEL, Edgar. Performance of Lyot depolarizers with birefringent single-mode fibers. Online. *Journal of Lightwave Technology*. 1983, roč. 1, č. 1, s. 71–74. ISSN 1558-2213. Dostupné z: <https://doi.org/10.1109/JLT.1983.1072097>. [cit. 2024-12-09].
- [50] Fast Fourier Transformation FFT - Basics. Online. *FFT*. Dostupné z: <https://www.nti-audio.com/en/support/know-how/fast-fourier-transform-fft>. [cit. 2025-05-31].
- [51] STERN, Richard. Short-Time Fourier Transforms. V: *Digital Signal Processing* [online]. Carnegie Mellon University, 2019. Dostupné z: <https://course.ece.cmu.edu/~ece491/>. [cit. 2025-05-31].
- [52] PRABHU, K. M. M. Window Functions and Their Applications in Signal Processing. Online. Verze: 20130809. Taylor & Francis Group, 2014. ISBN 978-1-4665-1583-3. Dostupné z: <https://doi.org/10.1201/9781315216386>. [cit. 2025-05-31].
- [53] VR UNIVERSITY. Windowing. Online. *VR University – Free Vibration Testing Courses – VRU*. c2025. Dostupné z: <https://vru.vibrationresearch.com/lesson/windowing-process-data/>. [cit. 2025-05-31].
- [54] SIEMENS COMMUNITY. Window Types: Hanning, Flattop, Uniform, Tukey, and Exponential. Online. *Siemens Digital Industries Software and Xcelerator*. 2019. Dostupné z: <https://community.sw.siemens.com/s/article/window-types-hanning-flattop-uniform-tukey-and-exponential>. [cit. 2025-06-02].
- [55] NATIONAL INSTRUMENTS. Understanding FFTs and Windowing. Online. *Test and Measurement Systems, a part of Emerson - NI*. c2025.

- Dostupné z: <https://download.ni.com/evaluation/pxi/Understanding%20FFTs%20and%20Windowing.pdf>. [cit. 2025-05-31].
- [56] THE SCIPY COMMUNITY. Blackman. Online. *SciPy*. c2008–2025. Dostupné z: <https://docs.scipy.org/doc/scipy/reference/generated/scipy.signal.windows.blackman.html>. [cit. 2025-06-02].
- [57] TORRENCE, Christopher a COMPO, Gilbert P. A Practical Guide to Wavelet Analysis. Online. *Bulletin of the American Meteorological Society*. 1998, s. 61–78. Dostupné z: <https://paos.colorado.edu/research/wavelets/>. [cit. 2025-05-31].
- [58] POLIKAR, Robi. Fundamental Concepts and an Overview of the Wavelet Theory. Online. *Robi Polikar, Ph.D At Rowan University*. 1996. Dostupné z: <https://users.rowan.edu/~polikar/WTpart1.html>. [cit. 2025-06-02].
- [59] MANAV, M. Convolutional Neural Networks (CNN) in Deep Learning. Online. *Analytics Vidhya*. 2025. Dostupné z: <https://www.analyticsvidhya.com/blog/2021/05/convolutional-neural-networks-cnn/>. [cit. 2025-05-31].
- [60] LECUN, Y.; BOTTOU, L.; BENGIO, Y. a HAFFNER, P. Gradient-based learning applied to document recognition. Online. *Proceedings of the IEEE*. 1998, roč. 86, č. 11, s. 2278–2324. ISSN 1558-2256. Dostupné z: <https://doi.org/10.1109/5.726791>. [cit. 2025-05-31].
- [61] SINTEF. Signal processing and machine learning. Online. *SINTEF – Applied research, technology and innovation*. Dostupné z: <https://www.sintef.no/en/expert-list/digital/sustainable-communication-technologies/signal-processing-and-machine-learning/>. [cit. 2025-05-31].
- [62] ZHAN, Zhongwen; KAMALOV, Valey; MECOZZI, Antonio; MÜLLER, Rafael; YIN, Shuang et al. Optical polarization–based seismic and water wave sensing on transoceanic cables. Online. *Science*. 2021, roč. 371, č. 6532, s. 931–936. Dostupné z: <https://doi.org/10.1126/science.abe6648>. [cit. 2024-11-29].
- [63] MECOZZI, Antonio; CANTONO, Mattia; CASTELLANOS, Jorge C.; KAMALOV, Valey; MULLER, Rafael et al. Polarization sensing using submarine optical cables. Online. *Optica*. 2021, roč. 8, č. 6, s. 788–795. Dostupné z: <https://doi.org/10.1364/OPTICA.424307>. [cit. 2024-11-29].

- [64] SOKOLOV, Stanislav. External Electromagnetic Influences upon Optical Cables. Online. In: *FRUCT'24: Proceedings of the 24th Conference of Open Innovations Association FRUCT*. Helsinki: FRUCT Oy, 2019, s. 729–734. ISSN 2305-7254. Dostupné z: <https://doi.org/10.5555/3338290.3338394>. [cit. 2024-12-02].
- [65] SKARVANG, Kristina S. Y.; BJØRNSTAD, Steinar a HJELME, Dag Roar. A Practical Approach to Vibration Monitoring on a Metro Length Fiber Cable Using Low-Cost State of Polarization Monitoring. Online. In: *2023 IEEE Photonics Society Summer Topicals Meeting Series (SUM)*. Itálie: IEEE, 2023. ISSN 2376-8614. Dostupné z: <https://doi.org/10.1109/SUM57928.2023.10224456>. [cit. 2024-11-30].
- [66] BARCÍK, Peter a MÜNSTER, Petr. Measurement of slow and fast polarization transients on a fiber-optic testbed. Online. *OPTICS EXPRESS*. 2020, roč. 28, č. 10, s. 15250-15257. ISSN 1094-4087. Dostupné z: <https://doi.org/10.1364/OE.390649>. [cit. 2024-11-30].
- [67] LEVENTHALL, Geoff. Low Frequency Noise in Buildings - Internal and External Sources. Online. *Journal of Low Frequency Noise and Vibration*. 1988, roč. 7, č. 2, s. 74–85. Dostupné z: <https://doi.org/10.1177/026309238800700204>. [cit. 2025-05-22].
- [68] HOPKINS, C.; GRAETZER, S. a SEIFFERT, G. SOUND POWER OF NORMAL SPEECH FOR BUILDING ACOUSTICS. Online. *Proceedings of the Institute of Acoustics*. 2024, roč. 46, č. 2, s. 1–5. Dostupné z: <https://doi.org/10.25144/23650>. [cit. 2025-05-29].
- [69] COX, Violet O. a SELENT, Mark. Acoustic and Respiratory Measures as a Function of Age in the Male Voice. Online. *Journal of Phonetics & Audiology*. 2015, roč. 1, č. 1, s. 1–7. Dostupné z: <https://doi.org/10.4172/2471-9455.1000105>. [cit. 2025-05-29].
- [70] EKIMOV, Alexander a SABATIER, James M. Vibration and sound signatures of human footsteps in buildings. Online. *The Journal of the Acoustical Society of America*. 2006, roč. 120, č. 2, s. 762–768. Dostupné z: <https://doi.org/10.1121/1.2217371>. [cit. 2025-05-30].
- [71] THAKRE, Chaitanya a VIJAY, Ritesh. Impact of low-frequency noise on a residential zone due to commercial HVAC systems. Online. *Journal of Building Engineering*. 2024, roč. 91. ISSN 2352-7102. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.jobee.2024.109616>. [cit. 2025-06-02].

- [72] KANG, Min-Woo a OH, Yang-Ki. Validity of Elevator Noise Measurement Method in International Standards on High-Rise Residential Buildings. Online. *Sustainability*. 2021, roč. 13, č. 17, s. 1–15. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/su13179806>. [cit. 2025-06-02].
- [73] IGOLKIN, Alexander; RODIONOV, Leonid; BALYABA, Maksim a RODIONOVA, Elena. Elevator Equipment Noise Reduction in Multi-Apartment Buildings. Online. Samara: IEEE, 2020. ISBN 978-1-7281-7526-3. Dostupné z: <https://doi.org/10.1109/DVM49764.2020.9243918>. [cit. 2025-06-02].

## Seznam symbolů a zkratek

<b>HiBi</b>	vysoce dvojlomná – Highly Birefringent
<b>SOP</b>	stav polarizace – State Of Polarization
<b>DOP</b>	stupeň polarizace – Degree Of Polarization
<b>PER</b>	polarizační extinkční poměr – Polarization Extinction Ratio
<b>PDL</b>	ztráta závislá na polarizaci – Polarization Dependent Loss
<b>DGD</b>	diferenční skupinové zpoždění – Differential Group Delay
<b>PMD</b>	polarizační módová disperze – Polarization Mode Dispersion
<b>P-OTDR</b>	polarizační optická reflektometrie s časovou doménou – Polarization Optical Time-Domain Reflectometry
<b>OTDR</b>	optická reflektometrie s časovou doménou – Optical Time-Domain Reflectometry
<b>PDM</b>	polarizační multiplexování – Polarization Division Multiplexing
<b>QPSK</b>	kvadrurní klíčování s fázovým posunem – Quadrature Phase Shift Keying
<b>DWDM</b>	multiplexování s hustým dělením vlnové délky – Dense Wavelength Division Multiplexing
<b>nm</b>	nanometr
<b>CMOS</b>	komplementární kovovo-oxidový polovodič – Complementary Metal-Oxide-Semiconductor
<b>LiNbO<sub>3</sub></b>	niobičnan lithný
<b>QKD</b>	kvantová distribuce klíčů – Quantum Key Distribution
<b>PM</b>	zachovávající polarizaci – Polarization-Maintaining
<b>PBS</b>	polarizační dělič svazku – Polarization Beam Splitter
<b>Hz</b>	hertz
<b>mHz</b>	milihertz
<b>m</b>	metr

<b>DFB</b>	distribuovaná zpětná vazba – Distributed Feedback
<b>s</b>	sekunda
<b>SMF</b>	jednomódové vlákno – Single-Mode Fiber
<b>FFT</b>	rychlá Fourierova transformace – Fast Fourier transform
<b>DFT</b>	diskrétní Fourierova transformace – Discrete Fourier transform
<b>BL</b>	délka bloku – blocklength
<b>DTFT</b>	Fourierova transformace v diskretním čase – Discrete-time Fourier transform
<b>CNN</b>	konvoluční neuronová síť – Convolutional Neural Networks