

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

DIZERTAČNÍ PRÁCE

Brno, 2023

Ing. Petr Dejdar



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

OPTICKÉ VLÁKNOVÉ SENZORY

FIBER-OPTIC SENSORS

DIZERTAČNÍ PRÁCE

DOCTORAL THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Ing. Petr Dejdar

ŠKOLITEL

SUPERVISOR

doc. Ing. Petr Münster, Ph.D.

BRNO 2023

ABSTRAKT

Optické sítě se neustále rozšiřují a tím vzniká prostor k využití optických vláken i pro nedatové přenosy. Jedním z nich je využití pro účely sensoriky, kde je možné uplatnit optická vlákna pro měření teplot, tlaku, vibrací aj. ve standardních podmínkách nebo v podmínkách, kde není umístění klasických senzorů vhodné (zvýšená vlhkost, radiace, nedostatek místa atd.). Tato práce se věnuje porovnání technologií hodnotících senzorické systémy a popisuje jejich princip a možnosti jejich využití. Následně jsou jednotlivé systémy postaveny a otestovány. Na základě měření jsou poté navržena možná vylepšení, kde u reflektometrického systému jsou kvantifikovány výhody použití algoritmů detekce hran. U detektorů polarizace jsou vylepšením využité klasifikační algoritmy strojového učení s úspěšností klasifikace nad 97 %. V práci je také popsáno podrobné měření citlivosti optických vláken na akustické vibrace ve třech různých prostředích, s různými konfiguracemi tras, kabely, materiály pro tlumení vibrací atd. Těmito měřeními byla dokázána možnost odposlechu optických vláken pomocí interferometrického, reflektometrického i polarizačního systému, kde polarizační je prokazatelně nejméně citlivý a zaznamenává pouze nižší frekvence. Na základě těchto měření je pak navržen systém pro zabezpečení fyzické vrstvy optických sítí, který je schopen přesně rozlišit klidové stavy a stavy manipulace s kabely z námi vytvořených datasetů.

KLÍČOVÁ SLOVA

Braggovy vláknové mřížky, distribuované měření, interferometrie, měření vibrací, optické senzory, optická vlákna, polarizace, reflektometrie, zabezpečení

ABSTRACT

Optical networks are continuously expanding and this creating space for the use of optical fibers for non-data transmissions. One of them is the use for sensing purposes, where optical fibers can be used to measure temperature, pressure, vibration, etc. In standard conditions or in conditions where the placement of conventional sensors is not suitable (increased humidity, radiation, lack of space, etc.). This paper is devoted to the comparison of technologies comparing sensing systems and describes their principle and their possible applications. Subsequently, the different systems are built and tested. Possible improvements are then proposed based on the measurements, where for the reflectometric system the advantages of using edge detection algorithms are quantified. For the polarization detectors, improvements are made using machine learning classification algorithms with classification success rates above 97 %. Detailed measurements of the sensitivity of optical fibers to acoustic vibrations in three different environments, with different path configurations, cables, vibration-damping materials, etc. are also described. These measurements proved the possibility of intercepting optical fibers using interferometric, reflectometric, and polarization systems, where the polarization system is proven to be the least sensitive and records only lower frequencies. Based on these measurements, a system for securing the physical layer of optical networks is then proposed, which is able to accurately distinguish the quiescent and cable manipulation states from the datasets we created.

KEYWORDS

fiber Bragg gratings, distributed sensing, interferometry, optical fibers, optical sensors, vibration measurement, polarization, reflectometry, security

DEJDAR, Petr. *Optické vláknové senzory*. Brno, 2023, 128 s. Dizertační práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav telekomunikací. Vedoucí práce: doc. Ing. Petr Münster, Ph.D.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svou dizertační práci na téma „Optické vláknové senzory“ jsem vypracoval samostatně pod vedením školitele dizertační 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 dizertační práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této dizertační 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

PODĚKOVÁNÍ

Jako první bych rád poděkoval svému školiteli Petrovi Münsterovi za motivaci pro začátek doktorského studia, stejně jako za vedení mé disertační práce a v neposlední řadě za mnoho nápadů, kam by můj výzkum měl směřovat, bez kterých bych se ke zdárnému odevzdání nikdy nedostal. Stejně díky patří taky kolegovi Tomášovi Horváthovi za jeho nápady a úpravy ke všem mým pracím i za jeho legendární motivační otázku „Děláš něco?“ Toto mi pravidelně zlepšuje den a doufám, že s tím nepřestane. Velké díky patří také mému školiteli na zahraniční stáži ve Slovinsku Boštjanovi Batageljovi za skvělé pracovní prostředí a mnoho užitečných informací. Jedná se například o informaci, že pokud nemám čas na práci tak den má 24 hodin a poté je možné pracovat ještě o večerech a víkendech.

Dále bych chtěl poděkovat kolegům z kanceláře SD5.66. Jmenovitě Adriánovi Tomašovi za jeho výrazné obohacení mé práce o strojové učení a zároveň o mnoho nových poznatků, jako že Windows je k ničemu a indexuje se od nuly. Dále Pavlovi Závíškovi, který do mé práce přispěl nejen metodami pro detekci hran, ale zlepšil i mé typografické dovednosti, kdy z jeho výrazu a žíly na čele přesně poznám, co si o mém textu myslí. Ondřejovi Mokrému za matematické základy, které dodává do našich článků, bez nichž bychom se neobešli. Zároveň doufám, že mi z matematiky bude předávat méně informací, nebo že si alespoň nechá pro sebe své sny o počítání integrálů. Dále samozřejmě velké díky patří ostatním kolegům z kanceláře za časté desetiminutové pauzy v podobě Xonoticu, nebo za herní večery, které nádherně fungovaly jako odreagování při práci. Poslední kancelářské poděkování patří Vladovi a Naty za to, že tuto práci museli číst, aby byla lépe napsaná a hlavně s méně chybami.

Poděkování patří samozřejmě celému UTKU za skvělé pracovní prostředí, za kvalitní zásobování kávou, kvalitní motivační systém a mnoho příležitostí seberealizace. Také bych chtěl poděkovat všem spoluautorům publikací, jak z fakulty, tak i mimo ni.

Na závěr bych chtěl poděkovat své rodině za morální podporu po celé bakalářské, magisterské i doktorské studium. Můj děda vždycky říkal, že ze mně jednou bude doktor, jen asi myslel, že se stanu doktorem medicíny. Stejnou podporu jsem vždy viděl i u svých kamarádů, která ve velké míře spočívala v možnosti odreagování se od práce, což mi pomáhalo občas více než motivace pracovat více.

Obsah

Úvod	12
1 Optická vlákna	14
1.1 Základy optických vláken	14
1.2 Vlastnosti optických vláken	15
1.2.1 Útlum	15
1.2.2 Disperze	16
1.3 Nelineární jevy	16
1.3.1 Rayleighův rozptyl	17
1.3.2 Brillouinův rozptyl	17
1.3.3 Ramanův rozptyl	18
1.4 Parametry optických zdrojů a detektorů	18
2 Detekce vibrací pomocí OVS	20
2.1 FBG pro detekci vibrací	20
2.2 Interferometrické systémy	22
2.2.1 Machův–Zehnderův interferometr	22
2.2.2 Michelsonův interferometr	24
2.2.3 Sagnacův interferometr	26
2.2.4 Fabryův–Pérotův interferometr	27
2.3 Detekce vibrací založené na reflektometrii	29
2.3.1 Detekce vibrací pomocí Φ -OTDR	29
2.3.2 POTDR	34
2.3.3 OFDR	36
2.3.4 BOTDA	39
2.4 Detekce vibrací na bázi polarizace	40
3 Detekce dalších veličin pomocí OVS	45
3.1 Teplotní senzory	46
3.2 Tlakové senzory	48
3.3 Ostatní bodové senzory	50
4 Měření citlivosti optických vláken na akustické vibrace	51
4.1 Měření v ideálních podmínkách	51
4.2 Měření optických kabelů v lištách v běžné laboratoři	55
4.3 Venkovní měření pro testování citlivosti systémů	59

5	OVS využívající analýzu změny stavu polarizace	65
5.1	Optimalizace pracovního bodu	65
5.2	Srovnání citlivosti MZI a polarizačního senzoru	67
5.3	Měření citlivosti polarizačního analyzátoru v závislosti na konfiguraci systému	72
5.4	Detekce kolejových vozidel na základě polarizačních změn	75
6	Zabezpečení fyzické vrstvy proti nežádoucí manipulaci	83
7	Detekce vibrací pomocí Φ-OTDR	87
	Závěr	91
	Autorova bibliografie	94
	Literatura	99
	Seznam symbolů, veličin a zkratk	125

Seznam obrázků

1.1	Profil indexu lomu pro a) mnohavidové, b) jednovidové, c) mnohavidové vlákno s gradientním indexem lomu.	14
1.2	Srovnání velikostí jednovidových a mnohavidových vláken.	15
1.3	Příklad spektra optického laseru.	19
2.1	Rozdělení optických vláknových sensorických systémů [59].	20
2.2	Znázornění Braggovy mřížky v optickém vlákně.	21
2.3	Rozdělení interferometrických systémů [227].	22
2.4	Schéma dvojramenného MZI [111].	23
2.5	Schéma duálního MZI.	24
2.6	Schéma symetrického MI [222].	25
2.7	Základní schéma Sagnacova interferometru.	26
2.8	Schéma FPI, kde je zobrazen dopadající, odražený a přenášený výkon v dutině (P_i , P_r a P_t) [61].	28
2.9	Naznačení jednotlivých rozptylů v optickém vlákně.	29
2.10	Naznačení Rayleighova rozptylu v optickém vlákně.	30
2.11	Základní schéma systému založeného na Φ -OTDR.	31
2.12	Základní schéma systému založeného na POTDR.	36
2.13	Základní schéma systému struktury MI založeného na OFDR.	37
2.14	Základní schéma systému struktury MZI založeného na OFDR.	37
2.15	Základní schéma systému založeného na BOTDA.	39
2.16	Polarizační části elektromagnetické vlny \mathbf{E}	41
2.17	Poincarého sféra používaná pro znázornění rotace polarizace.	42
2.18	Schéma zapojení přímého měření polarizačních změn.	44
3.1	Rozdělení optických vláknových sensorů podle změny snímaných jevů [155].	45
3.2	Schéma zapojení systému FBG, včetně více sensorů v sérii [51].	46
3.3	Senzor využívající zúžené FBG a kulovitě-EFPI [233].	48
3.4	Schéma aktivní double-peanut vláknové struktury [50].	48
3.5	Nákres speciálního senzoru tlaku využívajícího FBG [203].	49
4.1	Fotografie testovacího pracoviště v bezodrazové komoře.	52
4.2	Porovnání citlivosti jednotlivých technologií na akustické vibrace.	53
4.3	Spektrogramy měření jednotlivými technologiemi.	53
4.4	Porovnání citlivosti 5 druhů kabelů.	54
4.5	Porovnání citlivosti podle polohy kabelu.	54
4.6	Porovnání citlivosti při použití molitanové výplně.	55
4.7	Závislost typu panelu a způsobu uchycení na citlivosti.	56
4.8	Schematická podoba vytvořeného pracoviště pro měření citlivosti optických vláken na akustické vibrace.	57

4.9	Finální podoba testovacího pracoviště.	57
4.10	Naznačení optických kabelů umístěných v plastových lištách s mikrofonem.	58
4.11	Porovnání citlivosti jednotlivých technologií v reálných podmínkách.	59
4.12	Porovnání citlivosti jednotlivých úrovní hlasitostí při měření v reálných podmínkách.	60
4.13	Porovnání citlivosti konfigurace trasy v reálných podmínkách pro interferometr.	61
4.14	Porovnání citlivosti konfigurace trasy v reálných podmínkách pro DAS.	61
4.15	Testovací polygon.	62
4.16	Fotka venkovní šachty.	62
4.17	Frekvenční zobrazení waterfall grafu z DAS systému průjezdu vozidla.	63
4.18	Frekvenční zobrazení waterfall grafu z DAS systému chůze.	63
4.19	Frekvenční zobrazení waterfall grafu z DAS systému poklepů na šachtu.	64
4.20	Frekvenční zobrazení waterfall grafu z DAS systému skoků.	64
4.21	Spektrogram pro 10 klepnutí rukou na víko šachty z detektoru změny polarizace.	64
5.1	Zapojení testovacího systému pro porovnání citlivosti v závislosti na vstupním výkonu.	65
5.2	Detekované signály z reproduktoru pomocí optického vlákna a mikrofonu.	66
5.3	Porovnání SNR na jednotlivých hodnotách výkonu.	67
5.4	Porovnání podobnosti signálů pomocí křížové korelace.	68
5.5	Zapojení systému pro porovnání MZI a polarizačního detektoru.	69
5.6	Schéma laboratoře, kde bylo testování realizováno.	69
5.7	Srovnání metod pro vibrace způsobené otevíráním a zavíráním dveří racku.	70
5.8	Srovnání metod pro vibrace způsobené otevíráním a zavíráním vstupních dveří.	70
5.9	Srovnání metod pro vibrace způsobené otevíráním a zavíráním rackových dveří ve spektrogramu.	71
5.10	Zapojení systému na detekci vibrací přímou metodou.	72
5.11	Zapojení systému na detekci vibrací přímou metodou s trojitou smyčkou.	73
5.12	Zapojení systému při použití cirkulátoru a Faradayova zrcátka.	73
5.13	Porovnání SNR ve frekvenční oblasti podle konfigurace.	74
5.14	Porovnání SNR ve frekvenční oblasti podle vlnové délky laseru.	74
5.15	Porovnání SNR ve frekvenční oblasti podle typu vlákna.	75

5.16	Porovnání signálů z polarimetru pro směr Žďár nad Sázavou pro dva typy vlaků.	77
5.17	Porovnání signálů z polarimetru pro směr Tišnov pro dva typy vlaků.	78
5.18	Porovnání signálů z polarimetru pro směr Tišnov pro dlouhý nákladní vlak a lokomotivu bez vagonů.	79
5.19	Přehled toku dat v systému detekce vlaků.	80
5.20	Noční průjezd lokomotivy v klidovém stavu zobrazen ve spektrogramu.	81
5.21	Noční průjezd nákladního vlaku v klidovém stavu zobrazen ve spektrogramu.	82
6.1	Schéma navrženého systému pro ochranu fyzické vrstvy.	83
6.2	Finální verze sensorového systému se skutečným hardwarem.	84
6.3	Matice záměn vyhodnocená na testovacím souboru dat po učení, která ukazuje skutečný výkon navrhované metody klasifikace událostí.	86
7.1	Schéma systému založeného na Φ -OTDR se znázorněním trasy pro přípravu datasetu.	87
7.2	OTDR náměr z testovací trasy.	88
7.3	Detekci chůze je možné vidět 12krát na celé délce 6 km.	88
7.4	Porovnání SNR pro jednotlivé metody a scénáře.	90
7.5	Výsledky SNR lokalizace chůze v závislosti na vzdálenosti od vlákna.	90

Seznam tabulek

2.1	Porovnání aktuálních systémů založených na SI.	27
2.2	Porovnání základních parametrů aktuálních Φ -OTDR systémů.	35
2.3	Porovnání aktuálních Φ -OTDR systémů.	39
2.4	Porovnání aktuálních BOTDA systémů.	41
2.5	Reprezentace typů polarizací Jonesovým a Stokesovým vektorem [109, 110].	43
3.1	Porovnání citlivostí jednotlivých teplotních senzorů.	49
5.1	Přehled velikosti jednotlivých datových souborů.	78
5.2	Matice záměn s výsledky modelu na souboru testovacích dat	79
7.1	Parametry Φ -OTDR systému.	88

Úvod

V posledním desetiletí optická vlákna dominují datovým přenosům, jak u páteřních sítí, tak i v sítích propojujících koncové uživatele. Jsou využívána primárně kvůli vyšším přenosovým rychlostem než u metalických vedení, což je v době vysokorychlostních sítí, zvyšujícím se počtu uživatelů a narůstajícímu množství přenesených dat klíčové. Velkou měrou k tomu přispívají video a audio streamovací služby, cloudová uložení nebo vysokorychlostní bezdrátové přenosy (5G), které zvyšují datový tok a bývají zpravidla připojeny pomocí optických kabelů k páteřní síti [37].

Využití optických sítí navíc přesahuje možnost datových přenosů tím, že jsou využívány pro další fotonické služby, jako je přenos přesného času [78], kvantová distribuce klíčů [70] nebo právě využití jako senzor [107]. V senzorických systémech má optika obrovskou výhodu oproti metalickým sensorům svými rozměry, možnostmi využití v nepříznivých prostředích, převážně v místech se zvýšenou vlhkostí, velkým elektromagnetickým rušením, nebo v místech se zvýšenou radiací, extrémně těkavým prostředím či v prostředí, kde je dbáno na nízkou hmotnost sensorů, jako je letectví nebo kosmonautika [59].

Optické senzorické systémy byly v minulosti využívány ve velice omezeném počtu aplikací, kvůli své ceně a mnohdy větší prostorové konstrukci detekčních jednotek. Se snižováním cen jednotlivých komponentů přibývá výzkumů zabývajících se touto problematikou a tím dochází ke zvyšování citlivostí a dalšímu snižování cen. Zároveň dochází k uplatnění senzorických systémů pro velkou škálu aplikací od zabezpečení perimetru [206], inženýrských sítí [69], jaderných zařízení [207], v biomedicíně [164] až po mnoho dalších odvětví.

Tato práce se primárně zabývá návrhem, měřením a optimalizací systémů využívajících optické vláknové senzory (OVS) pro detekci vibrací, které jsou významnou kategorií OVS. Práce se tedy zabývá referenčním měřením akustických vibrací, jelikož takové měření v daném rozsahu nebylo dosud provedeno. Toto měření přinese znalost zdrojů rušení pro optimalizaci OVS a umožní měření akustických vibrací, kdy je nutné znát, jaká je skutečná citlivost akustických vibrací optického vlákna/kabelu, t.j. jaké frekvence s ním lze měřit. Dále se zaměřuje na optimalizaci a návrh nových metod využívajících strojové učení k detekci vibrací pomocí OVS.

Text je rozdělen do sedmi kapitol. Kapitola 1 popisuje základy optických vláken. Následující kapitola 2 obsahuje rozdělení sensorů vibrací a podrobný popis a použití jednotlivých technologií. Kapitola 3 se obecně zabývá OVS pro měření fyzikálních veličin, např. teploty nebo tlaku. V kapitole 4 jsou pak popsána měření citlivosti optických vláken a kabelů na akustické vibrace. Výsledky těchto měření prokazatelně dokazují, že je možné efektivně odposlouchávat nebo zabraňovat odposlechu událostí narušujících bezpečnost infrastruktury nebo lidské řeči v okolí optického

vlákna. Kapitola 5 se zabývá vlastním měřením změny polarizačních stavů pro využití detekce vibrací a různými scénáři umožňujícími zvýšit citlivost polarizačních detektorů. Následně popisuje implementaci systémů pro detekci kolejových vozidel na železnici. Z předchozích měření byl vyvozen závěr, že detekce polarizace je díky nízké citlivosti vhodná pro zabezpečení fyzické vrstvy proti nežádoucí manipulaci, o které pojednává kapitola 6. Kapitola 7 popisuje implementaci systému na bázi optické reflektometrie a možnosti vylepšení v podobě využití algoritmů pro detekci hran a tím zvýšení odstupů signálu od šumu (Signal-to-Noise Ratio – SNR) celého systému.

V rámci těchto měření vzniklo několik anotovaných datasetů pro využití strojového učení, které dokáže automaticky klasifikovat události napříč systémy a tím přiblížit senzorické systémy k reálným využitím v praxi. Implementované algoritmy strojového učení vykazovaly vysokou přesnost u dat generovaných optickými senzorickými systémy, jež ve většině případů odpovídají audio signálům. Z tohoto důvodu byly také testovány zvukové karty pro záznam dat, které mají větší bitové rozlišení, menší šum a nižší cenu. Pro detekci událostí z reflektometrického systému byly otestovány a implementovány algoritmy detekce hran, které byly následně posouzeny podle své složitosti a vlivu na SNR, kde nejlépe fungují algoritmy využívající Sobelova nebo Prewittova operátoru s maticí rozměru 5×5 .

1 Optická vlákna

Optické vlákno je válcový nevodivý vlnovod vyrobený z materiálu s nízkým optickým útlumem. Nejčastěji je vyráběno z taveného křemenného skla vysoké chemické čistoty SiO_2 . Další možností jsou plastová optická vlákna, která mohou být vyrobena z polymerů, jako jsou polystyren, polykarbonát a dalších, jak uvádí [127].

1.1 Základy optických vláken

Optická vlákna se skládají z jádra, které vede světlo, a pláště obklopujícího jádro. Jádro optického vlákna má větší index lomu n_1 , než je index lomu pláště n_0 , čímž dochází na rozhraní těchto dvou prostředí k totálnímu odrazu světla. Z tohoto důvodu je světlo vedeno pouze v jádře. Podmínka pro úplný vnitřní odraz na rozhraní jádra a pláště je dána vztahem $n_1 \sin(\pi/2 - \phi) \geq n_0$. Protože úhel θ souvisí s úhlem dopadu θ podle vztahu $\sin \theta = n_1 \sin \phi \leq \sqrt{n_1^2 - n_0^2}$, vyplývá podmínka pro totální odraz ve tvaru [147]

$$\theta \leq \sin^{-1} \sqrt{n_1^2 - n_0^2} \equiv \theta_{\max}, \quad (1.1)$$

kde θ_{\max} je tedy maximální úhel, pod kterým je možné navázat světlo do vlákna. Tento úhel je známý jako numerická apertura NA.

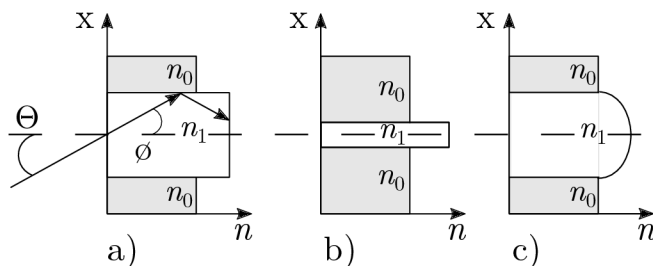
Pro výpočet NA je nutné vypočítat elativní rozdíl indexu lomu mezi n_1 a n_0 , který je definován jako [147]

$$\Delta = \frac{n_1^2 - n_0^2}{2n_1^2} \cong \frac{n_1 - n_0}{n_1}, \quad (1.2)$$

z něhož je pak možné vypočítat numerickou aperturu jako

$$\text{NA} = \theta_{\max} \cong n_1 \sqrt{2\Delta}. \quad (1.3)$$

Naznačení jednotlivých úhlů a indexů lomů je vidět na obrázku 1.1.

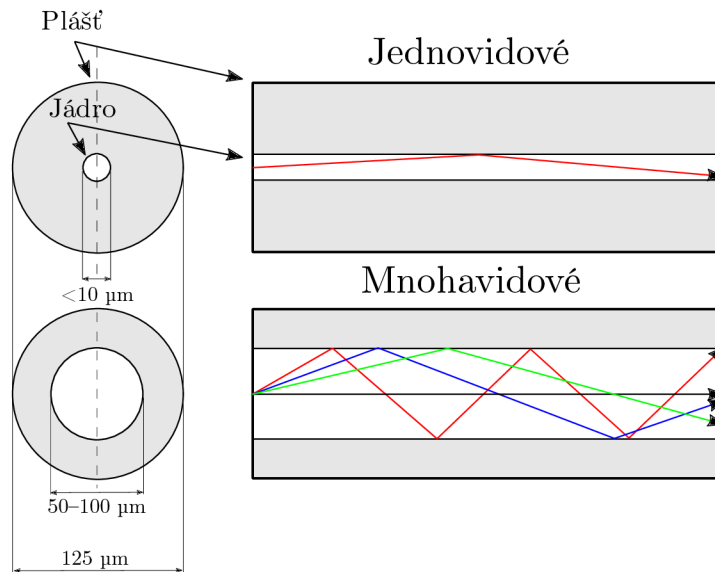


Obr. 1.1: Profil indexu lomu pro a) mnohavidové, b) jednovidové, c) mnohavidové vlákno s gradientním indexem lomu.

Optická vlákna dělíme do dvou skupin. Jedná se o jednovidová a mnohavidová vlákna, jak je vidět na obrázku 1.2. Počet vidů, které je možné navázat do optického vlákna se skokovým indexem lomu, je dán průměrem jádra ρ , vlnovou délkou světla λ a indexy lomu jádra a pláště n_1 a n_0 . Následně je možné vypočítat takzvaný parametr V jako [139]

$$V = \frac{2\pi\rho}{\lambda} \sqrt{(n_1^2 - n_0^2)}. \quad (1.4)$$

Jestliže je $V \leq 2,405$, vede jádro vlákna jeden vid, jakmile je $V > 2,405$, vede jádro více vidů.



Obr. 1.2: Srovnání velikostí jednovidových a mnohavidových vláken.

1.2 Vlastnosti optických vláken

1.2.1 Útlum

Útlum optických vláken způsobuje snižování výkonu při průchodu vláknem a je možné jej spočítat pomocí jednoduché rovnice

$$A = 10 \log \frac{P_1}{P_2}, \quad (1.5)$$

kde P_1 je vstupní a P_2 výstupní výkon. Útlum je udáván v jednotkách dB. Velice často je pak používán měrný útlum, který je nejčastěji vztažen ke kilometru optického vlákna a udává se v jednotkách dB/km

$$A = \frac{1}{L} 10 \log_{10} \frac{P_1}{P_2}, \quad (1.6)$$

kde L je délka vlákna.

Útlum v optickém vlákně vzniká absorpcí materiálu, ze kterého je vlákno vyrobeno, a závisí na vlnové délce světla. Dále útlum vzniká rozptyly světla na molekulové struktuře vlákna (Rayleighův rozptyl) a dalšími nelineárními jevy [167]. Též se útlum objevuje na konektorech, nebo mikro a makro ohybech optického vlákna. U konektorů dochází k útlumu Fresnelovým odrazem na rozhraní jádra vlákna a vzduchu. Jestliže je úhel vystupujícího světla roven 0, můžeme Fresnelův odraz vypočítat jako [107]

$$R = \left(\frac{n - 1}{n + 1} \right)^2, \quad (1.7)$$

kde n je index lomu jádra a index lomu vzduchu je nahrazen 1.

1.2.2 Disperze

Disperze signálu zjednodušeně spočívá v rozšíření optických pulsů v čase z důvodu zpoždění způsobených následujícími typy disperzí.

1. Vidová disperze je způsobena různými rychlostmi jednotlivých vidů v mnohavidových vláknech. Disperze je větší u vláken se skokovým indexem lomu než u gradientních vláken, jelikož v gradientních vláknech se index lomu v jádře zvyšuje směrem k ose, čímž dochází právě k částečné kompenzaci rychlostí jednotlivých vidů [88].
2. Materiálová disperze vzniká z důvodu spektrální závislosti indexu lomu. Jelikož vysílaný signál má určitou spektrální šířku a každá vlnová délka se šíří jinou rychlostí, vzniká disperze. Na základní úrovni souvisí původ materiálové disperze s rezonančními frekvencemi atomů, při kterých materiál absorbuje elektromagnetické záření [40].
3. Vlnovodná disperze závisí na příčném rozložení pole v závislosti na poloměru vlákna a parametru V z rovnice (1.4). Tato disperze je významná u jednovidových vláken, u kterých nepozorujeme vidovou disperzi [40].
4. Polarizační vidová disperze omezuje vysokorychlostní přenosové systémy z důvodu různých rychlostí šíření ortogonálních složek polarizace [88].

Jako další disperze se poté označují vzájemné disperze, jako je například souběh materiálové a vlnovodné disperze, která se nazývá monochromatická disperze. Ta význačně ovlivňuje přenosovou kapacitu u jednovidových vláken [168].

1.3 Nelineární jevy

Odezva optických vláken na světlo se v případě intenzivních elektromagnetických polí stává nelineární. Přestože oxid křemičitý není ze své podstaty vysoce nelineární

materiál, geometrie vlnovodu, která omezuje světlo na malý průřez na dlouhých délkách vláken, způsobuje, že se světlo stává nelineárním [40].

1.3.1 Rayleighův rozptyl

Rayleighův rozptyl, o kterém dále pojednává kapitola 2.3, je příkladem pružného rozptylu, při němž se frekvence rozptýleného světla nemění. Rayleighův rozptyl má největší podíl na útlumu optického vlákna. Molekuly oxidu křemičitého se v roztaženém stavu pohybují náhodně a při výrobě vláken po vychlazení ztuhnou na místě. Kolísání hustoty vede k náhodným kolísáním indexu lomu na škále menší než optická vlnová délka λ . V důsledku toho lze vlastní ztráty křemíkových vláken z Rayleighova rozptylu zapsat jako [40]

$$\alpha_R = C/\lambda^4, \quad (1.8)$$

kde C je konstanta v rozmezí 0,7–0,9 v závislosti na složení jádra vlákna. Hodnotu Rayleighova rozptylu lze snížit na méně než 0,01 dB/km pro vlnové délky delší než 3 μm . V této oblasti vlnových délek nelze použít křemíková vlákna, protože při vlnových délkách nad 1,8 μm začíná převažovat infračervená absorpce nad celkovými ztrátami [40].

Naproti tomu při nepružném rozptylu je frekvence rozptýleného světla nižší než frekvence původního světla. Dvěma příklady nepružného rozptylu jsou Ramanův rozptyl a Brillouinův rozptyl. Při vysokých výkonech nabývají na významu nelineární jevy stimulovaného Ramanova rozptylu a stimulovaného Brillouinova rozptylu. Brillouinův rozptyl se vyskytuje pouze ve zpětném směru, zatímco Ramanův se může vyskytovat v obou směrech [39].

1.3.2 Brillouinův rozptyl

Brillouinův rozptyl generuje Stokesovu vlnu šířící se ve směru zpět, jak je uvedeno výše, a využívá se v systémech BOTDA (viz kapitola 2.3.4). Frekvence Stokesovy vlny je nižší o hodnotu, která závisí na vlnové délce dopadajícího signálu. Tento posun je známý jako Brillouinův posun a činí přibližně 11 GHz v oblasti vlnových délek okolo 1550 nm. Intenzita Stokesovy vlny roste exponenciálně, jakmile vstupní signál překročí prahovou hodnotu [39]. Pro úzkopásmové spojitě vlny lze prahový výkon P_{th} odhadnout pomocí [177]

$$g_B P_{\text{th}} L_{\text{eff}} / A_{\text{eff}} \approx 21, \quad (1.9)$$

kde g_B je Brillouinův koeficient zesílení a A_{eff} je efektivní plocha jádra. Efektivní délka interakce je menší než skutečná délka vlákna kvůli ztrátám ve vláknech a je dána vztahem

$$L_{\text{eff}} = \int_0^L e^{-\alpha z} dz = \frac{1 - \exp(-\alpha L)}{\alpha}, \quad (1.10)$$

kde α je koeficient útlumu a L značí délku vlákna [177].

Prahová hodnota se zvyšuje pro paprsky, jejichž spektrální šířka je větší než šířka Brillouinovy čáry, která je 20 MHz. Zvyšuje se také při šíření krátkých optických pulsů vlákem kvůli jejich relativně velké šířce pásma [40].

1.3.3 Ramanův rozptyl

Oproti Brillouinovu rozptylu generuje Ramanův rozptyl dopředně se šířící Stokesovu vlnu. Za druhé, Ramanův posun, o který je frekvence Stokesovy vlny posunuta, se blíží 13 THz. Spektrum Ramanova zisku je extrémně široké a zasahuje do frekvenčního rozsahu širšího než 20 THz. Hodnota Ramanova zisku je ve srovnání s hodnotou Brillouinova zisku nižší více než stonásobně [39].

Výkonový práh Ramanova rozptylu, při kterém se Ramanův proces stimuluje a přenáší většinu výkonu signálu na Stokesovu vlnu, se odhaduje pomocí vztahu podobného rovnici 1.9. Lze jej zapsat jako [177]

$$P_{\text{th}} \approx 16A_{\text{eff}} / (g_R L_{\text{eff}}). \quad (1.11)$$

L_{eff} lze nahradit hodnotou $1/\alpha$ pro velké délky vláken. Při použití $g_R 1 \times 10^{13} \text{ m/W}$ je P_{th} přibližně 500 mW ve spektrální oblasti blízké 1550 nm [39].

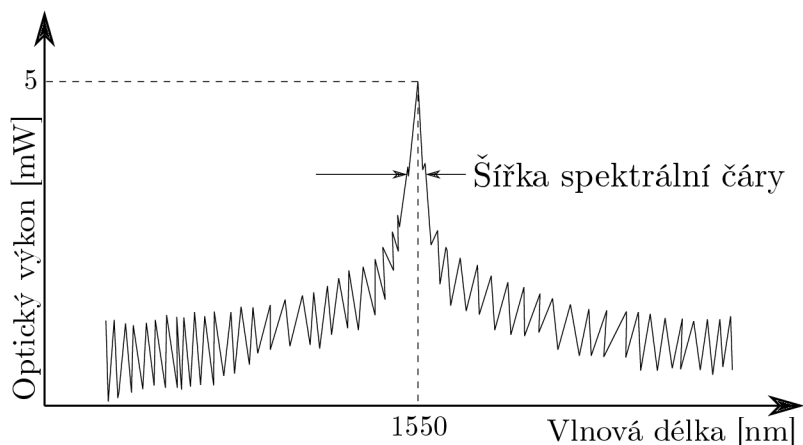
1.4 Parametry optických zdrojů a detektorů

Zdroje optického záření mají několik základních parametrů, které budou níže vysvětleny a znázorněny na obrázku 1.3.

- Optický výkon je udáván ve mW nebo dBm, kde přepočítání mezi jednotkami je $P_{(\text{mW})} = 1 \text{ mW} \cdot 10^{P(\text{dBm})/10}$.
- Vlnová délka udává délku světelné vlny v metrech (typicky nm), jednoduchý přepočítání je $\lambda = c/f$, kde c je rychlost světla a f je frekvence.
- Šířka spektrální čáry je uváděna v metrech (typicky v nm), ale častěji v MHz.
- Koherenční délku lze spočítat ze spektrální šířky laseru a je důležitá pro interferenci záření.

Optické zdroje také generují šum. Mezi základní typy šumů patří relativní intenzitní šum, který způsobuje rychlé kolísání výkonu laseru vlivem spontánní emise fotonů.

Fázový šum je způsoben náhodným kolísáním fáze optického signálu, který určuje spektrální čistotu laserového paprsku [89].

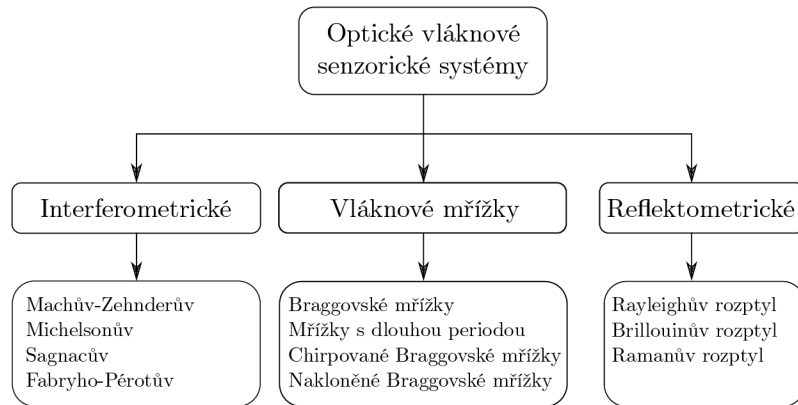


Obr. 1.3: Příklad spektra optického laseru.

Základní parametry fotodetektorů jsou totožné jako u laserů: rozsah měřitelných vlnových délek a maximální vstupní výkon. Mezi důležité parametry fotodiody patří citlivost, rychlost detekce a šумы vnášené do procesu detekce. Odezva fotodiody uváděná v A/W je důležitá pro účinnost detekce světla. Citlivost fotodiody je obecně závislá na vlnové délce, což je dáno pásmovou mezerou polovodičového materiálu a také energií fotonů optického signálu. Další důležitou vlastností fotodiody je rychlost detekce, která je často reprezentována elektrickou šířkou pásma udávanou v MHz [90].

2 Detekce vibrací pomocí OVS

Senzory vibrací je možné seřadit do kategorií podle technologie snímání, jak je vidět na obrázku 2.1. Principiálně lze konstatovat, že interferometrické systémy jsou využívány k bodovému i distribuovanému snímání vibrací, mřížkové k vícebodovému snímání a reflektometrické k distribuovanému snímání [59]. Toto samozřejmě nemusí nutně platit při různých modifikacích těchto systémů.



Obr. 2.1: Rozdělení optických vláknových senzorických systémů [59].

2.1 FBG pro detekci vibrací

Braggovy vláknové mřížky (Fiber Bragg Gratings – FBG), znázorněné v jádře jednovodového vlákna na obrázku 2.2, ve kterém se působením prostorového vzoru ultrafialového světla vytváří periodická modulace indexu lomu jádra. Délky FBG jsou obvykle v rozmezí 1–20 mm a mohou dosahovat odrazivosti až 100 %. Když je do FBG vysíláno světlo širokopásmovým světelným zdrojem, FBG odráží určitou vlnovou délku, kterou nazýváme Braggovou vlnovou délkou. Ta je dána vztahem [160]

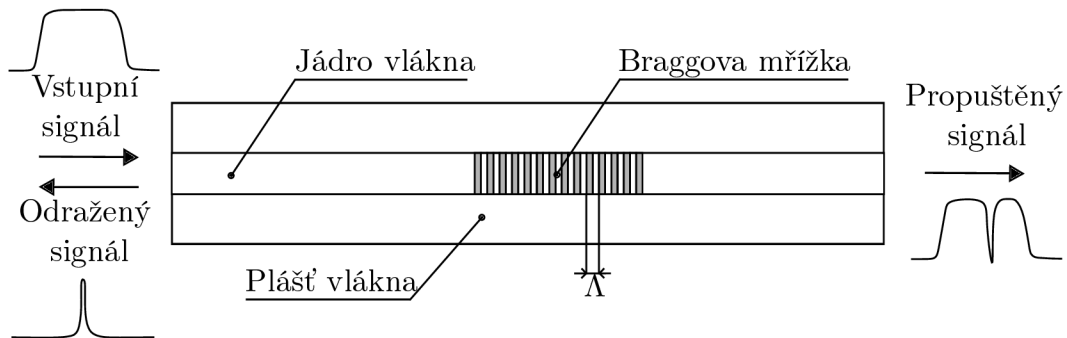
$$\lambda_B = 2n\Lambda, \quad (2.1)$$

kde n značí index lomu jádra a Λ je perioda vláknové mřížky.

Z rovnice vyplývá, že střední vlnová délka odraženého světla je lineární s n . Hodnota n je spojena s deformací jádra a teplotou. Když je tedy FBG narušena vnější teplotou nebo deformací, změní se Braggova vlnová délka odraženého světla odpovídajícím způsobem. Z toho vyplývá, že změnu Braggovy vlnové délky lze určit jako [119]

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = (1 - \rho_e) \Delta\varepsilon + (\alpha_f + \xi_f) \Delta T, \quad (2.2)$$

kde ε je změna podélné deformace, T značí přírůstek teploty, ρ_e je elasto-optický koeficient vlákna, α_f a ξ_f jsou termo-optický koeficient a koeficient tepelné roztažnosti vlákna.



Obr. 2.2: Znázornění Braggovy mřížky v optickém vlákně.

Současný stav systémů využívajících FBG

Senzory s FBG mají primární využití jako senzory teploty, tlaku a tahu. Mají však i uplatnění jako senzory vibrací. Velice často jsou využívány takzvané FBG s nízkou reflektivitou. Tyto senzory využívá například [69], pro snímání teploty a vibrací. Detekce, je pak schopná identifikovat únik z parovodu.

Další velkou kategorií jsou FBG pro zabezpečení perimetru. Systém spočívá v periodickém rozmístění FBG (nebo rozmístění podle specifikace aplikace). Toto pole senzorů FBG je možné přichytit například k oplocení, nebo zakopat do země. Článek [121] uvádí dokonce kombinované využití. Jedno pole mřížek s ultra nízkou reflektivitou je uchyceno na oplocení a druhé zakopáno přibližně 1 m od oplocení v hloubce 30 cm. Pomocí tohoto systému autoři snímají tři abnormální události (klepání do plotu, přelézání a foukání větru) a další dvě běžné události (chůze člověka kolem plotu a průjezd nákladního vozu). Tyto dvě skupiny klasifikují s přesností 98 %.

Článek [52] navrhuje systém rozpoznávání událostí založený na minimální redundanci, maximální relevanci a modifikované stochastické konfigurační síti pro senzorový systém s FBG. Jako v předchozím případě, se věnuje zabezpečení perimetru, kde detekuje dotek, bouchnutí, přelézání a střihání plotu. Pomocí algoritmů strojového učení je možné klasifikovat tyto události s přesností téměř 97 %.

V člancích [101, 142] je probíráno zabezpečení tunelů. Konkrétně se jedná o metro, kde autoři popisují detekce jízdy vlaků v tunelu v kombinaci se zabezpečením proti nepovoleným výkopovým pracím, jež mohou narušit integritu tunelu a ohrozit tím plynulost nebo bezpečnost dopravy. Zároveň není detekce zatížená běžným

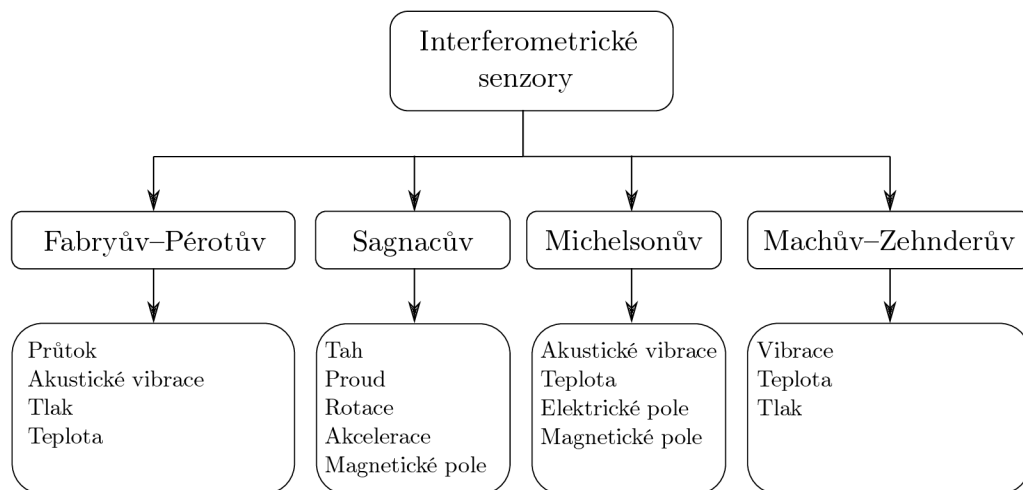
šumem, jako je například lehká automobilová doprava, která není schopna generovat zaznamenané vibrace. Článek [213] pak klasifikuje jedoucí metro, průjezd nákladního vozu nad tunelem a sbíjení pomocí bagru.

V článku [190] autoři popisují vývoj a testování vysoce citlivého seismického senzoru s FBG. Výkon seismických senzorů FBG testují jak v laboratoři, tak i v terénu. Seismický senzor FBG má výrazně lepší výkon při detekci velmi malých signálů, pro detekci slabých mikroseismických signálů. Tento seismický senzor má maximální detekční dosah přibližně 70 metrů pro detekci člověka a přibližně 200 metrů pro malé vozidlo.

Další obrovskou kategorií uplatňující FBG jsou senzory vibrací využívající různé konstrukce [119]. Citlivost těchto senzorů je pak závislá právě na konstrukci, od které se následně odráží její použití. Takto sestavené konstrukce mohou detekovat vibrace i ve více osách [99, 179, 204, 205].

2.2 Interferometrické systémy

Interferometrické senzory pracují na základě měření interference mezi světelnými paprsky. V interferometru se vstupní optické záření rozdělí do dvou ramen, kterými je světlo přeneseno na výstup interferometru, kde se takto rozdělené paprsky rekombinují [227].



Obr. 2.3: Rozdělení interferometrických systémů [227].

2.2.1 Machův-Zehnderův interferometr

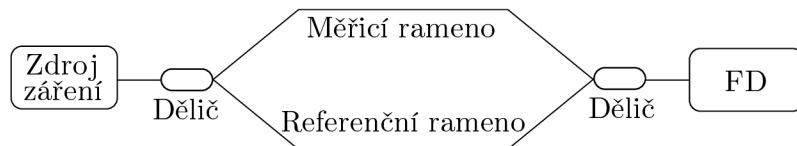
Machův-Zehnderův interferometr (MZI) je široce využíván pro svou flexibilitu použití. Základní dvouramenné zapojení je vidět na obrázku 2.4. V takové konfiguraci

je nutné použít laser s dostatečně dlouhou koherenční délkou. Laserové světlo se rozdělí na dva svazky stejné intenzity pomocí děliče a následně prochází měřicím a referenčním ramenem. Po průchodu vlákny se paprsky spojí pomocí děliče a jsou detekovány FD [159]. MZI může mít samozřejmě více než dvě ramena, přičemž počet vstupů a výstupů děliče je pak roven počtu ramen.

Výstupní intenzitu světla lze vypočítat ve zjednodušené verzi, za předpokladu děliče 50:50, kde není brán v potaz útlum podle vzorce [93]

$$I = I_o \cos^2 \left[\frac{\pi}{\lambda} (n_s L_s - n_r L_r) \right], \quad (2.3)$$

kde I_o je konstantní intenzita výstupního světla z děliče, L_s a n_s jsou délka a index lomu měřicího vlákna, L_r a n_r jsou délka a index lomu referenčního vlákna. A konečně λ je vlnová délka. Interferenci záření ze dvou ramen lze snímat pomocí FD.



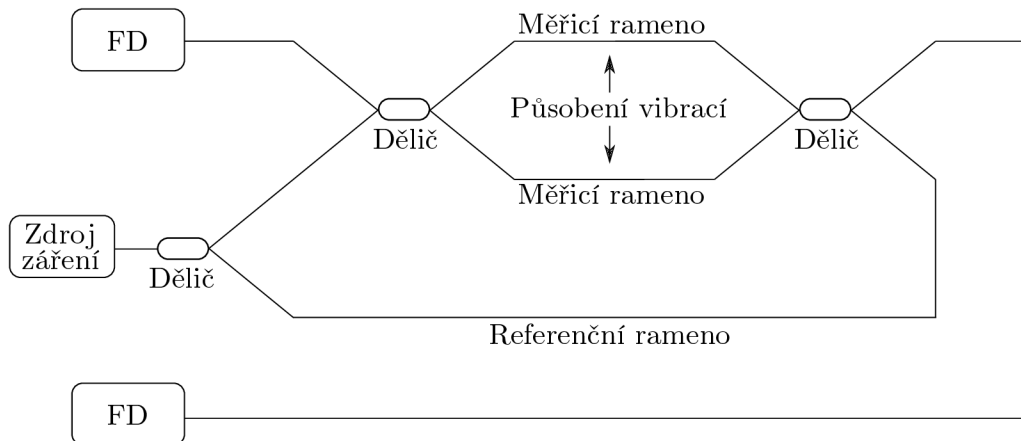
Obr. 2.4: Schéma dvojamenného MZI [111].

MZI stejně jako MI může být také nevyvážený použitím různých délek jeho dvou ramen. Obě optická pole v něm mají totiž fyzicky oddělené dráhy. Nicméně, stejná vlastnost také způsobuje, že interferometr je náchylný k vlivům prostředí. Obě pole produkovaná na výstupu prvního vláknového děliče procházejí různými cestami, a získávají tak pouze fázové posuny vyvolané vlastní fázovou modulací. Obecně platí, že dva děliče nemusí být identické a mohou mít různé podíly rozdělení výkonu. Dvě ramena interferometru mohou mít také různé délky a konstanty šíření [39].

Současný stav MZI

MZI může být používán v různých konfiguracích. V základní konfiguraci, zobrazené na obrázku 2.4, se využívá v jednodušších systémech pro detekci vibrací [4]. Základní zapojení se používá hlavně kvůli své citlivosti a nízké ceně. I v základní konfiguraci může být velice přesný, viz porovnání MZI se seismickým senzorem [206], a může být například využit pro detekci kolejových vozidel [143]. Základní zapojení konkrétně tří MZI namotaných na modelu raketového motoru můžeme vidět ve studii [240], kde autoři měří rychlost hoření tuhého paliva a linearitu jeho vyhořívání.

Pokročilejší zapojení MZI se nazývá duální MZI. Jeho zapojení můžeme vidět na obrázku 2.5. Takové zapojení MZI umožňuje lokalizaci událostí působících na optické vlákno. Tento systém byl nasazen do městské infrastruktury procházející metrem



Obr. 2.5: Schéma duálního MZI.

pro otestování detekce vibrací k zabezpečení infrastruktury a zároveň koexistenci senzorického systému s běžným vysokorychlostním přenosem [126].

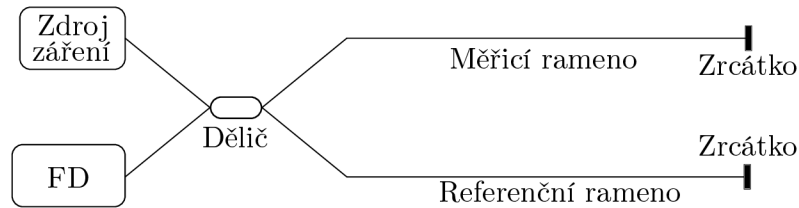
Vylepšením duálního MZI spočívá v nastavení počáteční polarizace světla pomocí polarizátoru. V porovnání s klasickým duálním MZI je využití polarizátoru výhodnější [171]. Tento experiment probíhal na systému pro zabezpečení plynovodu. Využití takového systému je velice žádané například pro ochranu perimetru, jelikož dokáže měřit až na 100 km s přesností až ± 25 m při vzorkovací frekvenci 500 kS/s, jak uvádí studie [83]. Podle této studie právě počáteční stav polarizace zvyšuje SNR u polarizačních děličů paprsku.

Další možná řešení využívají asymetrického MZI v kombinaci s polarizátorem, kde jsou tyto systémy také schopny detekovat vibrace na vzdálenosti až 61 km s přesností $\pm 52,5$ m [129] respektive 82 km s přesností ± 20 m [188]. Sofistikovanější systémy pro detekci vibrací pak využívají kombinace jednotlivých detekčních systémů, jako je spojení MZI s fázově citlivou optickou reflektometrií v časové oblasti (Phase-sensitive Optical Time-Domain Reflectometry – Φ -OTDR) [130] nebo spojení MZI, MI a Φ -OTDR [225].

2.2.2 Michelsonův interferometr

Michelsonův interferometr (MI) je velmi podobný MZI. Obsahuje pouze jediný dělič, přes který se koherentní světlo dělí z laserového zdroje do měřicího a referenčního ramene, jak je vidět na obrázku 2.6. Na konci těchto ramen jsou zrcátka nebo Faradayova zrcátka odrážející světlo zpět do děliče, který opět paprsky spojí a FD světlo detekuje. Jelikož MI odráží veškerý výkon zpět do děliče, je vhodné použít izolátor, který zabrání poškození laseru. Světlo prochází rameny dvakrát, z tohoto důvodu se optický fázový posun s délkou zdvojnásobí. To způsobuje, že je MI citlivější než

MZI. Srovnání citlivosti optických vláknových akustických sensorů je možné najít v [125].



Obr. 2.6: Schéma symetrického MI [222].

Současný stav MI

MI jsou často využívány jako hydrofony snímající ultrazvuk [62], ale také jako senzory detekující zvuky ve slyšitelném spektru [242]. Byly zaznamenány také aplikace pro snímání seismických jevů [135]. Za zmínku stojí také výzkum, který se zabývá zlepšením šumové stability MI [80].

Práce [184] využívá MI navržený bez polarizačního blednutí s provozně pasivní demodulační technikou využívající tři vzájemně fázově posunuté optické výstupy pro detekci seismické aktivity. Výsledky měření pak porovnává s běžnými senzory měřícími seismické otřesy. Článek [98] pak testuje MI se dvěma vlnovými délkami, skládající se z děliče 3×3 , dvou FBG s různými vlnovými délkami a společného referenčního ramene. Dva MI s různými vlnovými délkami jsou multiplexovány na 3×3 děliči. Toto schéma je vhodné pro měření vysokofrekvenčních signálů s vysokou citlivostí.

Další výzkum používá podobné schéma s dvěma FBG a děličem 3×3 . Jedná se o dvou-smyčkový MI, který dokáže snímat frekvence od 500 Hz do 19 kHz. Toto schéma také umožňuje využití laseru s nízkou koherenční délkou [97]. Přidáním cirkulátoru, polarizačního kontroleru a balančního FD u MI je možné také snímat vysoké frekvence. Snímané frekvence jsou v řádech MHz, konkrétně 1,7 MHz a vyšší harmonické frekvence [103].

Velice časté pak bývají kombinace MI s reflektometrickou metodou, díky které dochází ke zvýšení citlivosti a případně k možnosti lokalizace jednotlivých působících vibrací, respektive měření vibrací ve více částech vlákna [189]. Je možné také využít nesymetrický MI pro snímání vibrací z více míst téhož vlákna při dosažení nízkých hodnot šumu [224] využitím demodulace s fázově generovanou nosnou, která je u interferometrických systémů velice často využívána, díky vysoké citlivosti a velkému dynamickému rozsahu [131].

2.2.3 Sagnacův interferometr

Sagnacův interferometr (SI), který je vidět na obrázku 2.7, je složen z děliče, z něhož je vlákno vedeno ve tvaru smyčky. Je možné využít obyčejné jednovidové vlákno, nebo kombinaci jednovidového vlákna a vysoce dvojlomé vláknové zrcadlové smyčky (Highly Birefringent Fiber Loop Mirror – HiBi FLM), pro zlepšení přesnosti měření. Tento sensorický systém umožňuje měření vibrací a teploty současně. Hlavními výhodami této konfigurace je její rozlišení a přesnost. Zároveň zde není nutnost využívat kontrolérů polarizace [113], jelikož právě HiBi FLM je schopné udržet stejnou polarizaci světla při průchodu celým vláknem [112]. Výstup přenášené intenzity lze vyjádřit jako [104]

$$I = \frac{1}{2} \left(1 - \cos \frac{2\pi BL}{\lambda} \right), \quad (2.4)$$

kde L je délka dvojlomného vlákna, B je rozdíl indexu lomu mezi rychlou a pomalou osou dvojlomného vlákna, λ je vlnová délka světelného paprsku ve volném prostoru. Pokud fázový rozdíl splňuje podmínku

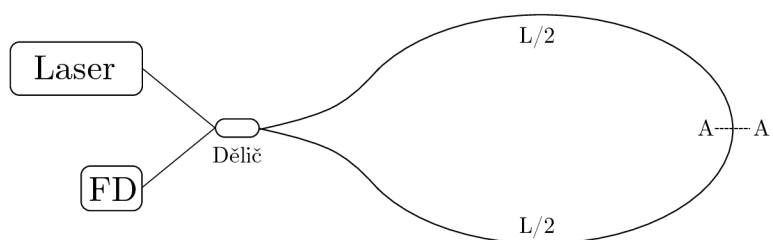
$$\frac{2\pi BL}{\lambda_{\text{pokles}}} = 2k\pi, \quad (2.5)$$

pak lze ve vysílaném spektru pozorovat rezonanční pokles, který je dán vztahem

$$\lambda_{\text{pokles}} = BLk, \quad (2.6)$$

kde k je celé číslo. Rozteč vlnových délek mezi přenosovými poklesy lze vyjádřit jako

$$\Delta\lambda = \frac{\lambda^2}{BL}. \quad (2.7)$$



Obr. 2.7: Základní schéma Sagnacova interferometru.

Současný stav SI

Jedním z možných využití SI je zabezpečení potrubí, jak je vidět z experimentu [71], který snímá frekvence od 170 do 230 Hz, jež jsou podstatné právě pro zabezpečení potrubí. Další možností je detekce vibrací kuličkových ložisek. Na základě frekvenční

analýzy je možná predikce jejich selhání. V experimentu byl SI použit pro měření jak vnějšího, tak vnitřního prstence ložiska [137].

Při využití základního schématu SI, které je vidět na obrázku 2.7 je možné lokalizovat události narušení pomocí strojového učení až na vzdálenosti 50 km, jak uvádí [63]. Dále se v článku také porovnává vliv tvaru signálu nebo šířky pásma. Další článek popisuje výhody využití hlubokého učení, kde tento model dosahoval lepších výsledků přesnosti. Pomocí iterací sítě se také model dokázal přizpůsobovat a upravovat svoje parametry [81].

Jelikož se často od snímání vlákna očekává lokalizace, je možné schéma SI upravit do podoby duálního SI, které lokalizaci umožňuje v některých případech s vysokou přesností, jak je možné vidět v tabulce 2.1. Takové schéma pak umí události lokalizovat s přesností na desítky metrů [193]. Duální SI je také možné využít pro zabezpečení perimetru [80] v podobě asymetrického duálního SI nebo symetrického duálního SI s dosahem až 150 km [82]. Mezi algoritmy používané v těchto systémech se řadí generalizovaná křížová korelace [202] nebo algoritmy založené na hlubokém učení [208]. Pro zlepšení parametrů je využívána kombinace systémů, jako je například spojení Φ -OTDR a SI, jak uvádí práce [187].

Výzkum [238] pak pro detekci nízkých vibrací využívá speciální, polarizaci udržující vlákno a frekvenční modulaci optické pumpy.

Tab. 2.1: Porovnání aktuálních systémů založených na SI.

Autor SI	Přesnost lokalizace	Frekvenční rozsah	Typ SI	Rozsah
Esmail [63]	55 m	–	Klasický	50 km
Hu [79]	10 m	0,1-2 kHz	Duální	50 km
Huang [82]	30 m	0,1-2 kHz	Duální	150 km
Santiago [170]	–	0–22 kHz	Kroucený	300 m
Sun [187]	20 m	0-2,5 MHz	Φ -OTDR+SI	4 km
Teng [193]	<2 m	20-450 Hz	Duální	450 m
Wang [202]	<100 m	1-20 kHz	2 x SI	5 km

2.2.4 Fabryův–Pérotův interferometr

Senzory založené na FPI jsou zobrazeny na obrázku 2.8. Jsou zde dvě zrcadla R_1 a R_2 , mezi kterými je dutina [61]. Oba povrchy jsou charakterizovány odrazivostí R_1 a R_2 a propustností T_1 a T_2 . Vibrace lze detekovat na základě interference mezi dopadajícím a odraženým světlem. Odražené světlo se mění právě změnou podmínek v dutině. Odrazivost R_{FP} a propustnost T_{FP} FPI lze vypočítat pomocí [222]

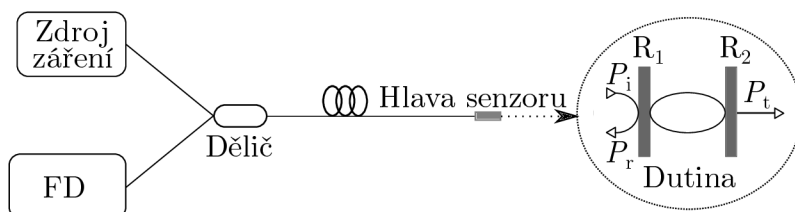
$$R_{\text{FP}} = \frac{R_1 + R_2 + 2\sqrt{R_1 R_2} \cos \phi}{1 + R_1 R_2 + 2\sqrt{R_1 R_2} \cos \phi}, \quad (2.8)$$

$$T_{\text{FP}} = \frac{T_1 T_2}{1 + R_1 R_2 + 2\sqrt{R_1 R_2} \cos \phi}. \quad (2.9)$$

Fázový posun při kruhovém šíření v interferometru je dán vztahem

$$\phi = \frac{4\pi n L}{\lambda}, \quad (2.10)$$

kde λ je optická vlnová délka v dutině, L je šířka dutiny a n je index lomu dutiny [222].



Obr. 2.8: Schéma FPI, kde je zobrazen dopadající, odražený a přenášený výkon v dutině (P_i , P_r a P_t) [61].

Současný stav FPI

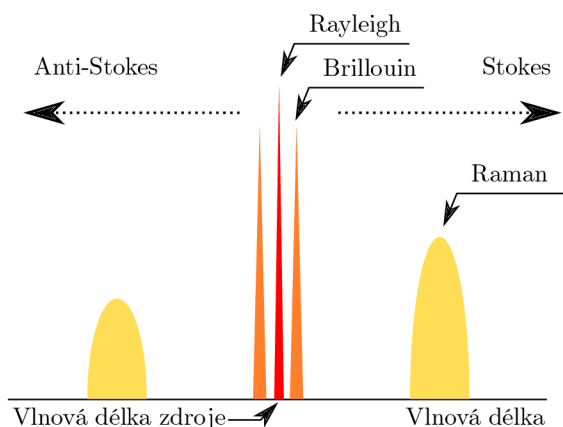
FPI pro snímání vibrací se nejvíce používají ve třech typických aplikacích. Jedná se o použití senzorů jako bodových optických mikrofonů pro snímání akustických vibrací [209]. V [56, 73, 75, 220, 245] jsou uvedeny různé konstrukce mikrofonů. Z těchto publikací můžeme porovnat závislosti délky dutiny a použitých materiálů. Tyto mikrofony lze také použít pro vícebodové snímání, například pomocí děliče 1:4, jak je navrženo v [74]. Speciální využití FPI lze vidět v [186], kde se k detekci akustických vibrací používá mnohavidová-jednovidová-mnohavidová struktura a přímá detekce. U FPI senzorů je také možné použít FBG jako zrcadlo, kde je mezi mřížkami vytvořena dutina. Sensory jsou vhodné pro použití jako mikrofony a hydrofony [72, 232]. Největší nevýhodou těchto snímačů je omezená možnost měření pouze v jednom nebo více bodech a potřeba speciálně upraveného vlákna.

Dalším odvětvím jsou senzory vibrací v prostředích se zvýšenou teplotou. Zmíněny jsou již v kapitole 3.1, kde jsou využívány primárně FBG senzory. Právě použití fs laseru je využito pro vytvoření dutiny pro FPI, které jsou schopny měřit až do 800°C a frekvence mechanických vibrací do 2 kHz [219]. Případně se používá dutá trubice z křemenného skla, kde testovaný senzor [49] byl schopen funkce až do 500°C , nebo jsou využita vlákna s dutým jádrem v kombinaci s fs laserem [230].

Třetí kategorií jsou pak senzory detekující nízké frekvence v rozsahu od 0,01 Hz do 20 Hz. Jedním ze systémů je senzor využívající membránovou strukturu setrvačnicku, kde je hmotnostní blok přilepen uprostřed, zatímco nosník setrvačnicku funguje jako pružina. Citlivý prvek tvoří soustavu pružina-hmota-tlumič s jedním stupněm volnosti [231], nebo systém snímání pomocí dvojitého FPI integrovaného s levnou a nízkokoherenční diodou pro detekci dynamických vibrací způsobených akustickými vlnami s frekvencí nižší než 200 Hz [199].

2.3 Detekce vibrací založené na reflektometrii

Tento způsob detekce vibrací závisí na snímání zpětných rozptylů. Zpětné rozptyly jsou primárně složeny ze tří složek (Rayleighovy, Brillouinovy a Ramanovy, viz kapitola 1.3). Kde Ramanovy a Brillouinovy rozptyly obsahují Stokesovu a anti-Stokesovu složku [107]. Znázornění jednotlivých rozptylů můžeme vidět na obrázku 2.9.



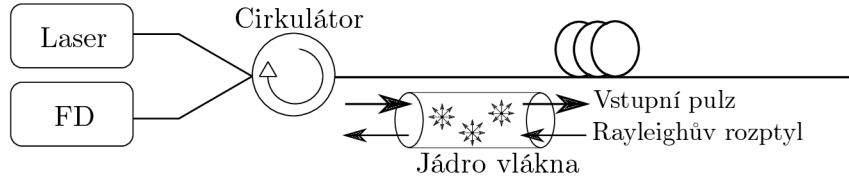
Obr. 2.9: Naznačení jednotlivých rozptylů v optickém vlákně.

Rayleighova složka nevykazuje žádný posun vlnové délky a vyskytuje se na stejné vlnové délce jako dopadající světelná vlna. Brillouinovy složky mají řádově nižší intenzitu, úzkou spektrální čáru a jsou od zdrojové vlnové délky vzdáleny přibližně 11 GHz (pro vlnovou délku zdroje 1550 nm). Naproti tomu složky Ramanova rozptylu mají o tři až pět řádů menší intenzitu než Brillouinovy složky a od Rayleighových složek je dělí přibližně 13 THz a mají širší spektrální čáru (přibližně 6 THz). Vlnové délky Stokesových a anti-Stokesových složek jsou znázorněny na obrázku 2.9 [107].

2.3.1 Detekce vibrací pomocí Φ -OTDR

Technika snímání zpětných odrazů způsobených Rayleighovým rozptylem zvaná (Optical Time-Domain Reflectometry – OTDR) je známá již desítky let a její histo-

rie sahá až do 80. let 20. století [43, 144]. Pomocí metody OTDR jsou v současnosti měřeny parametry nově instalovaných i stávajících optických tras. Princip OTDR spočívá ve vyslání výkonného pulsu optického záření pomocí laserové diody do snímaného vlákna, kde je tento puls odražen na celé délce vlákna. Na základě výkonu zpět odraženého z vlákna a časového zpoždění lze distribuovaně měřit charakteristiku útlumu ve vlákne a jeho délku. Zpětné odrazy jsou zachytávány pomocí FD, ukládány do časových řad a průměrovány. Princip Rayleighova rozptylu lze vidět na obrázku 2.10.



Obr. 2.10: Naznačení Rayleighova rozptylu v optickém vlákne.

Φ -OTDR je novější metoda, která pravděpodobně vychází z patentu [192]. Φ -OTDR se primárně nezabývá charakteristikou vlákna, ale změnami fázového posuvu v zpětně rozptýleném světle způsobenými okolními vlivy. Za předpokladu, že se vnitřní struktura vláken nemění, což lze v klidovém stavu předpokládat, je možné pomocí Φ -OTDR snímat vibrace v okolí vlákna. Jak uvádí review [65, 162, 247] pro generování signálů je nutné využít vysoce koherentního záření, například využitím úzkopásmového laseru. Pro generování pulsů je nutné použít například optického modulátoru (OM) a signálového generátoru. Jelikož může mít samotné vlákno délku až několik stovek kilometrů, je často využíván zesilovač s vláknem dopovaným erbiem (Erbium Doped Fiber Amplifier – EDFA) nebo jiný typ optického zesilovače, pro zvýšení výkonu optického záření. EDFA při zesílení produkuje šum, který by měl být pokud možno odfiltrován pomocí filtru, jak uvádí [247]. Po průchodu snímaným vláknem, je před detekcí signálu pomocí FD také možné využít EDFA jako předzesilovač pro zesílení výkonu odraženého signálu k FD [65]. Následně je signál navzorkován pomocí analogově digitálního převodníku (Analog-to-Digital Converter – ADC) a finálně zpracováván.

Teoreticky můžeme dopadající světelnou vlnu pole E Φ -OTDR vyjádřit jako

$$E = E_0 e^{-j\omega_s t}, \quad (2.11)$$

kde E_0 je amplituda vyslaného pulsu a ω_s úhlový kmitočet dopadajícího světla.

Jelikož délka dráhy Rayleighova rozptylu je pro každou část vlákna odlišná v závislosti na vzdálenosti místa rozptylu od zdroje pulsů, je nutné počítat elektrickou vlnu z každého místa, kterou můžeme vyjádřit jako [162]

$$E_R = \hat{r}(z) E_0 e^{-\alpha z} e^{(j2\beta z - \omega_s t)}, \quad (2.12)$$

kde z je prostorová poloha vráceného objektu, β je konstanta šíření, $\hat{r}(z)$ zahrnuje vliv poměru a fáze Rayleighova zpětného rozptylu v různých prostorových podmínkách. Z tohoto teoretického vzorce je možné zjednodušením vyjádřit rovnici pro výpočet zpět odraženého výkonu P_R . Je možné použít vzorec z [154], upravený jako [43]

$$P_R = PS\alpha_s W \frac{v}{2}, \quad (2.13)$$

kde P je výkon vysílaného impulsu, α_s je ztráta způsobená Rayleighovým rozptylem, W je šířka impulsu a v je rychlost světla ve vlákně [43]. Parametr S popisuje část zachyceného světla [43].

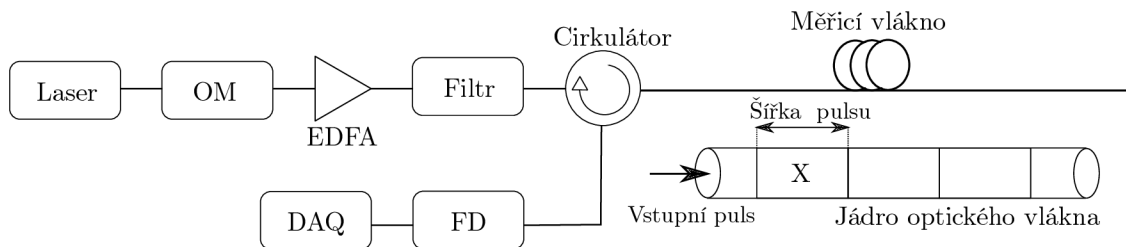
Vzdálenost měřeného odrazu l lze poté určit pomocí vzorce pro výpočet rychlosti světla ve vlákně jako:

$$l = \frac{ct}{2n_g}, \quad (2.14)$$

kde c je rychlost světla ve vakuu, t je zpoždění mezi odesláním pulsu a přijetím jeho odražené složky a n je index lomu. Dělení dvěma je způsobeno dvojnásobnou uraženou vzdáleností zapříčiněnou časem, než dorazí puls k danému místu, a tím samým časem pro přijetí na FD.

Konfigurace systému

Typická základní konfigurace systému založeného na Φ -OTDR je k vidění na obrázku 2.11.



Obr. 2.11: Základní schéma systému založeného na Φ -OTDR.

Při nastavování parametrů systému je nutné dbát na správné nastavení periody pulsu (P_P). Perioda pulsu by měla být

$$P_P \geq 2L/v_g, \quad (2.15)$$

kde L je délka vlákna a v_g je skupinová rychlost pulsu. Podle Nyquistovy věty pak maximální možná měřitelná frekvence odpovídá:

$$f_{\max} \leq \frac{1}{2P_P} \leq \frac{1}{2} \left(\frac{v_g}{2L} \right). \quad (2.16)$$

Délka pulsu pak ovlivňuje další parametr Φ -OTDR, kterým je prostorové rozlišení SR. To lze definovat jako

$$SR = \frac{c\tau_p}{2n_g}, \quad (2.17)$$

kde τ_p je doba trvání impulsu. Dalším parametrem je maximální opakovací frekvence, kterou lze definovat jako počet impulsů vyslaných za 1 s. Tento parametr můžeme vypočítat následujícím způsobem

$$f_{s,ac} = \frac{c}{2n_gL}. \quad (2.18)$$

Posledním parametrem, který ovlivňuje dosah systému, je SNR, který je nejvíce závislý na výkonu vstupního impulsu. Vyhodnocení Φ -OTDR se provádí vzorkováním detekovaného signálu pomocí FD, přičemž výsledek systému je dosažen odečtením každých dvou po sobě jdoucích period a výpočtem absolutního rozdílu. Počet period za sekundu odpovídá opakovací frekvenci. SNR lze zvýšit pomocí vlastností detekční jednotky, kde je možné zvýšit vzorkovací frekvenci a parametry bitového rozlišení.

Současný stav systémů Φ -OTDR

Celkový pokrok v oblasti systémů Φ -OTDR je shrnut v nedávném přehledu [247]. V tabulce 2.2 jsou uvedeny parametry některých systémů, které byly publikovány. U systémů navržených v [67, 92, 94] a v mnoha dalších byly použity externí AD převodníky, nebo laboratorní generátory funkcí, tudíž tyto systémy nejsou vhodné pro průmyslové použití z důvodu své velikosti. Tyto systémy vyžadují pro zpracování dat počítač, výhodnějším způsobem je však vzorkování pomocí karty programovatelných hradlových polí (Field Programmable Gate Array – FPGA) [16].

Vylepšením hardwarové části Φ -OTDR se zabývá řada výzkumů, které zkoumají všechny součásti systému. U laseru velice závisí na spektrální šířce, čemuž se věnují autoři [116] a dochází k závěru, že s klesající spektrální šířkou, roste citlivost systému. Vliv typu laseru zmiňuje například [182], jenž porovnává komerční vláknový laser s nízkonákladovým distribuovaným zpětnovazebním laserem. Další součástí systému je optický zesilovač, kdy je možné volit ze tří typů. Tím jsou Ramanův zesilovač, EDFA a polovodičový optický zesilovač (Semiconductor Optical Amplifier – SOA). Porovnáním zesilovačů se zabývá studie [228], ze které vyplývá nejlepší SNR pro SOA zesilovač. Další článek pak popisuje, jak právě řízení SOA zesilovače umožňuje další zvýšení SNR [54].

Pravděpodobně nejnovější varianta Φ -OTDR je varianta využívající chirpovaných pulsů. Tato metoda je založena na stejném principu jako tradiční metoda Φ -OTDR využívající přímou detekci. Zásadní rozdíl spočívá v tom, že impulsy sondy

mají lineární chirp, tj. lineární změnu okamžité frekvence podél šířky impulsu, místo toho, aby se jednalo o impulsy s transformačním omezením jako v tradičním případě. Metoda je vnitřně odolná vůči fadingovým problémům a představuje spolehlivé měření s vysokou citlivostí při zachování omezených nákladů a složitosti nastavení [48, 65].

Další možností je využití dvojpulsů. Používá se selektivní fázové modulace jednoho z dvojice pulsů pro generování nosné, aby bylo možné získat dynamické změny fáze. Metoda zahrnuje také vylepšení fázové demodulace vhodné pro distribuované snímání, neboť je odolná vůči kolísání intenzity světla, nezávisle na hloubce modulace [42, 141].

Systémy na bázi Φ -OTDR jsou také velice často nasazovány pro detekci vibrací v reálném čase, což výrazně zvyšuje nároky na redukci dat a snížení datového toku [223]. Článek také pojednává o časové náročnosti při použití procesoru a grafické karty. Článek [172] pomocí teoretické analýzy i experimentu odhaluje vztah mezi SR, SNR a délkou oblasti vibrací, což naznačuje, že volba vhodného SR pro analýzu vibrací může účinně zvýšit SNR senzorického systému.

Polarizace světla může být u Φ -OTDR systémů také velice důležitá, jak dokazuje [194], kde generují pulsy v obou osách polarizace, čímž dochází ke zvýšení citlivosti systému. Systémy Φ -OTDR se také velice často používají na velké vzdálenosti. Příkladem může být systém využívající Ramanova zesilovače, který je schopen detekce na více než 150 km [114]. Podobný systém akorát duplikovaný a použitý na každou stranu měřeného kabelu byl sestaven v [145]. Tento systém dokáže detekovat události vzdálené více než 200 km.

Jak dokládá práce [214], na náměry z Φ -OTDR je možné aplikovat také metody zpracování signálu, jako je rychlá Fourierova transformace (Fast Fourier Transform – FFT) s následným využitím konvolučních neuronových sítí pro klasifikaci událostí na optickém vlákně s velice vysokou přesností. Konfigurace tohoto konkrétního systému Φ -OTDR není ničím zvláštní, základní parametry jsou uvedeny v tabulce 2.2. Podobný problém řeší také [175], využívající pro předzpracování signálu pásmovou propust nastavenou od 5 Hz do 15 kHz.

Klasifikace událostí pomocí strojového učení je pak velmi důležitá pro praktickou implementaci, například pro monitorování potrubí před vnějšími vlivy nebo vnitřní korozi [153]. Dalším možným využitím je klasifikace událostí narušujících integritu potrubí. U podzemních vedení je jedním z nejpravděpodobnějších narušení integrity kopání při výkopových pracích. Tomuto problému lze předejít včasnou detekcí a klasifikací události. To je možné pomocí klasifikačního algoritmu random forest s přesností téměř 90 % [198]. Porovnání algoritmů strojového učení je tedy velice aktuální téma pro rozvoj systémů založených na Φ -OTDR a věnují se mu nejnovější studie [235].

Pro zabezpečení perimetru je klasifikace událostí klíčová. V článku [217] se autoři zaměřují na tři základní možná narušení bezpečnosti u plotu, kde zaznamenali úder, otřes a klepání do plotu. Navíc také pro eliminaci okolních podmínek zaznamenávají silný déšť s větrem, pravděpodobně pro možnost eliminovat falešné alarmy způsobené extrémním počasím. Další výzkum se zabývá detekcí narušení perimetru pomocí vlákna zakopaného přibližně 5 cm v zemi [175] a klasifikuje chůzi, skákání, otřesy vyvolané lopatou a kopání lopatou s téměř 97% úspěšností. Pro zabezpečení železnice pak byla vybrána jízda autem, manuální výkopové práce, bagrování a chůze [138] s přesností 98,5%. U všech těchto experimentů byla samozřejmě také zaznamenána třída klidová, respektive šumová, aby bylo možné určit případné narušení perimetru oproti běžnému stavu.

Pro zabezpečení železnice a detekování pohybu osob v kolejišti je pak možno využít metodu, která nejprve využívá Φ -OTDR k získání původního signálu vibrační železničních kolejí za určitou dobu, poté provádí filtraci, FFT a odhad spektra původního signálu pomocí autoregresivního modelu. Po analýze frekvenční charakteristiky signálu je možné určit, zda na trati došlo k nějaké události [157].

Dalšími možnostmi jsou zabezpečení podmořských elektrických kabelů, které umí detekovat dopadnutí lodní kotvy do blízkosti kabelu a následně také její tažení po dně, což může ohrozit integritu spoje a zároveň tyto dva stavy od sebe odlišit [128].

Na základě těchto publikací je možné usoudit, že technologie Φ -OTDR má veliké využití v praxi v mnoha odvětvích. Na základě většiny výsledků se také potvrzuje, že systémy založené na Φ -OTDR mají velkou citlivost, která je neustále zvyšována a bude růst s každým novým projektem a publikací. Taktéž to dokazuje možnost aplikovat algoritmy strojového učení pro detekci a klasifikaci událostí zaznamenaných senzorskými systémy. Právě díky zvýšenému zájmu o tyto systémy dochází ke snižování pořizovacích nákladů a tím i k daleko větší pravděpodobnosti nasazení systémů Φ -OTDR do praxe.

S uplatněním nových technologií digitálního zpracování signálu, strojového učení a systému optických infrastruktur se objevuje nová výzva pro budoucí technologie založené na Φ -OTDR učinit tyto systémy více stabilnější, účinnější, citlivější a spolehlivější než ty, které se v současnosti používají pro praktické aplikace.

2.3.2 POTDR

Polarizační OTDR (POTDR) detekuje změnu stavu polarizace zpětně rozptýlené vlny v optickém vlákne, aby zjistila stav optického vlákna. Princip činnosti senzorského systému založeného na POTDR je stejný jako u Φ -OTDR na Rayleighově rozptylu. Spočívá v tom, že do měřené trasy jsou vysílány lineárně polarizované pulsy. K tomu je v zapojení využíván polarizátor. Stejně jako Φ -OTDR, pak PO-

Tab. 2.2: Porovnání základních parametrů aktuálních Φ -OTDR systémů.

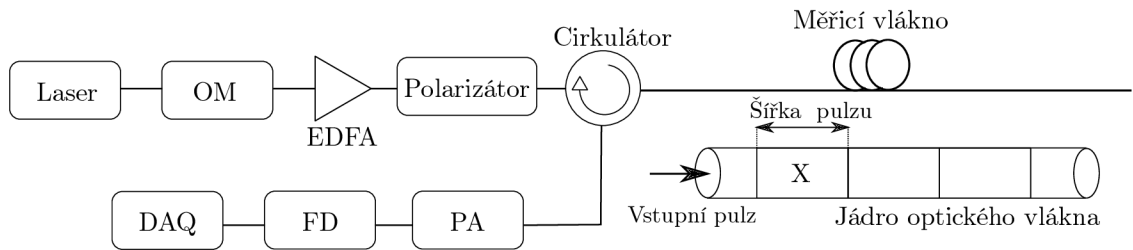
Autor Φ -OTDR	Opakovací frekvence	Vzorkovací frekvence	Šířka pásma laseru	Výkon laseru
Dejdar [16]	20 kHz	250 MS/s	<0,1 kHz	15 dBm
Filograno [66]	–	200 MS/s	–	13 dBm
Francis. [67]	20 kHz	2500 MS/s	200 kHz	0 dBm
Iida [92]	10 kHz	1250 MS/s	1 kHz	–
Jason [94]	20,2 kHz	1000 MS/s	0,1 kHz	16 dBm
Jiang [100]	1 kHz	100 MS/s	3 kHz	–
Li G. [114]	1 kHz	–	5 kHz	13 dBm
Li S. [118]	2 kHz	100 MS/s	3 kHz	–
Meng [138]	5 kHz	100 MS/s	0,1 kHz	–
Mingchao [145]	0,4 kHz	250 MS/s	<0,1 kHz	10 dBm
Peng [153]	66 kHz	66 kS/s	6 kHz	10 dBm
Shan [172]	25 kHz	1000 MS/s	3,7 kHz	20 dBm
Shang [173]	50 kHz	100 MS/s	5 kHz	10 dBm
Shao [174]	1,5 kHz	1000 MS/s	0,1/2,2 kHz	13 dBm
Shi [175]	20 kHz	50 MS/s	3 kHz	–
Tomboza [194]	–	100 MS/s	0,075 kHz	11 dBm
Xu Ch. [214]	5 kHz	25 MS/s	0,1 kHz	16 dBm
Xu W. [215]	60 kHz	240 MS/s	5 kHz	14 dBm
Yusri [226]	50 kHz	500 MS/s	0,1 kHz	16 dBm

TDR dokáže na základě znalosti rozdílu času mezi vyslaným pulsem a zaznamenaným odrazem určit místo, na které působí vibrace. Obrázek 2.12 znázorňuje základní blokové schéma distribuovaného POTDR. Zde je možné si všimnout, že pro Φ -OTDR obsahuje navíc pouze polarizátor a polarizační analyzátor (PA) [122].

Vzhledem k tomu, že je POTDR v základním principu totožná s Φ -OTDR, vztahují se na tuto technologii i vztahy počítající vzdálenost (2.14), periodu pulsu (2.15), maximální měřitelnou frekvence (2.16), prostorové rozlišení (2.17) i opakovací frekvence (2.18).

Současný stav systémů POTDR

Systémy založené na POTDR využívají pro analýzu polarizace dvou mechanismů. Jedna polarizační analýza spočívá ve využití polarimetru a druhá ve využití polarizačního děliče paprsku (Polarization Beam Splitter – PBS). Využití PBS je u tohoto systému výhodnější z důvodu ceny systému. V úvahu připadá využití PBS dělicího světlo do dvou nebo do tří rovin [211], kde pro dvě roviny je využíváno primárně



Obr. 2.12: Základní schéma systému založeného na POTDR.

balančních fotodetektorů, zatímco u tří ramen potřebujeme tři FD. Základní schéma využívající PBS s rozdělení na ortogonální roviny můžeme vidět například v [200], který upozorňuje na nemožnost snímat stejné frekvence na více místech a nabízí teoretické řešení, jež bylo prakticky otestováno právě pro zvýšení citlivosti systému a možnosti snímání stejných frekvencí na různých místech.

Pro detekci vibrací je také možné využití klasického komerčního OTDR, kde je do zpětné větve přidán polarizér. Pomocí měření je vidět, jak polarizér ovlivňuje náměr OTDR a zároveň místo, v němž dochází k vibracím [47]. Také je zřetelné, jak jsou si systémy OTDR a POTDR podobné. Další výzkum popisuje využití vlákna udržujícího polarizaci pro zvýšení citlivosti a prostorového rozlišení systému, kde pro detekci využívá rozdělení na tři roviny a snímání pomocí tří FD [85], stejně tak [86], který se věnuje měření vazby mezi polarizačními vidy.

Další systém se zabývá kódováním pro monitoring telekomunikačních sítí, jako vylepšenou alternativou klasického POTDR. Konkrétně používá Golayovo kódování pro podstatné zvýšení SNR, dělení podle ortogonálních rovin a kartu FPGA pro AD převod [169]. Využití systémů se nabízí například při hlídání proudu plasmy u nových fúzních reaktorů ITER [58] a má využití také pro zabezpečení jednoho nebo i více perimetrů naráz, jak uvádí studie [197].

2.3.3 OFDR

Optické reflektometry ve frekvenční oblasti (Optical Frequency Domain Reflectometry – OFDR) jsou postaveny na interferometrické struktuře. Na obrázku 2.13 je konkrétně vyobrazena struktura Michelsonova interferometru. To však není jediná možná konfigurace. OFDR lze také konfigurovat podle struktury MZI, jak je vidět na obrázku 2.14. Jako zdroj záření je zde využit laditelný laser, který vysílá lineárně kmitočově stoupající signál. To znamená, že signál lineárně zvyšuje frekvenci s časem. Jedna část signálu je vysílána do testovacího vlákna jako sonda, kde zapříčiňuje Rayleighův rozptyl, a druhá část je vysílána do referenčního ramena jako referenční světlo pro koherentní detekci.

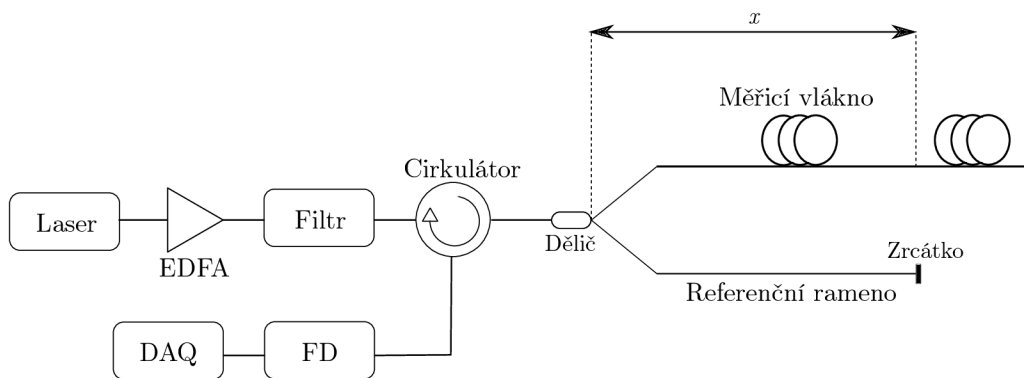
Při ladění frekvence laseru vznikají interferenční rázy, které jsou následně rozděleny na dvě části, detekovány FD a nakonec zaznamenány pomocí DAQ. Následně je nutné udělat Fourierovu transformaci. Když na měřicí vlákno působí vnější vibrace, vzniká tak rytmický signál, jehož intermediální frekvence f_0 je úměrná vzdálenosti, kde vibrace působí x , kterou lze spočítat [122]

$$x = (c \cdot f_0) / (2n\gamma), \quad (2.19)$$

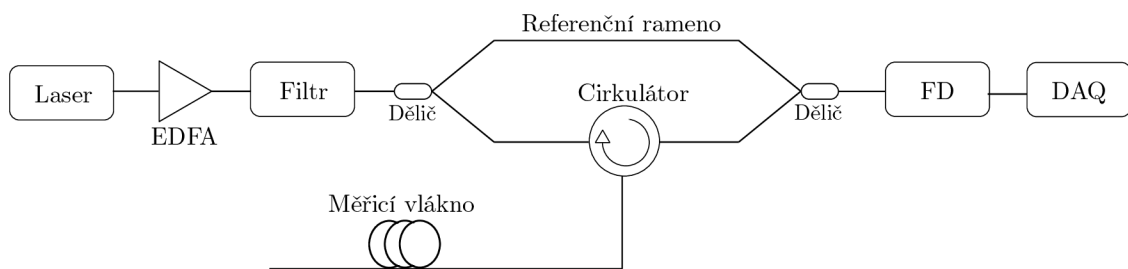
kde γ je rychlost změny kmitočtu laditelného laseru. Polohu vibrací lze tedy získat pomocí následujícího postupu analýzou frekvenčního spektra. Kromě toho lze prostorové rozlišení v OFDR (Δz) vyjádřit jako

$$\Delta z = c / (2n\Delta F) \quad (2.20)$$

kde ΔF je frekvenční rozsah laseru.



Obr. 2.13: Základní schéma systému struktury MI založeného na OFDR.



Obr. 2.14: Základní schéma systému struktury MZI založeného na OFDR.

Současný stav systémů OFDR

Nedávná studie [120] uvádí možnosti využití systémů OFDR pro detekci mnoha jevů, jako jsou vibrace, teplota, magnetické pole, tlak atd. Taktéž uvádí možnosti zlepšení citlivosti snímání pomocí technik jako vylepšení linearit laditelných zdrojů,

metod externí modulace nebo kompenzace fázového šumu. Dále také uvádí další možné konfigurace systému mimo již zmíněných v kapitole 2.3.3. Vybrané systémy s parametry snímání jsou porovnány v tabulce 2.3.

Práce [148] využívá systém OFDR pro snímání a vizualizaci tahu vznikajícího u nadzemních vedení z důvodů prověšení kabelů mezi dvěma pevnými body (sloupy) a zároveň uvádí možnost detekce vibrací způsobených působením větru na kabel. Práce uvádí, že systém je schopný detekovat vibrace až na 10 km s prostorovým rozlišením 0,9 m.

Se zrychlujícími datovými přenosy také vzrůstá potřeba zmírňovat okolní vlivy na vlákno, mezi které se řadí i vibrace. Právě na detekci vibrací ovlivňující optické sítě se zaměřuje článek [158]. Tuto problematiku zkoumá i článek [91], který porovnává detekci vibrací pomocí několika reflektometrických systémů.

Systémy OFDR se však potýkají s několika citelnými problémy. Jedním z nich je nelinearita zvyšování frekvence laseru, jak zmiňuje [44], což se velice často řeší kontrolním interferometrem. Tato metoda tak přináší zvýšení nákladů na senzorický systém, jelikož je třeba další FD. Autoři tedy představili systém, který pro eliminaci nelinearity nevyužívá druhý FD.

Článek [115] zmiňuje vliv vyšších vibrací (řádově desítky kHz) na demodulační algoritmy z důvodu frekvenčního posunu, čímž může docházet k přeslechům událostí do dalších částí vlákna, což má nepříznivý vliv na prostorové rozlišení a také na citlivost systému. Navrhuje řešení pomocí adaptivní dvourozměrné vzájemné korelace pro kompenzaci posunu frekvence, ve kterém se odhaduje a kompenzuje okamžitý posun frekvence uvnitř signálu sondy pro přesnou demodulaci. Výzkum [151] také potvrzuje možnost zarušení měření právě silným zdrojem vibrací na začátku měřené úseku a jeho kompenzace [150].

Stejně jako u Φ -OTDR je i u systémů OFDR možné využít FPGA karty jak pro zrychlení výpočtů, tak i pro kompaktizaci celého systému [76].

Systémy OFDR jsou využívány hlavně díky nízkému prostorovému rozlišení pro detekci vibrací na kratších úsecích. Tyto systémy pak zpravidla nejsou schopny měření na stovky kilometrů. Jedna z aplikací může spočívat v detekci strukturálního narušení například u větrných turbín, jak je uvedeno v [87], kde jsou porovnávány systémy Φ -OTDR a OFDR.

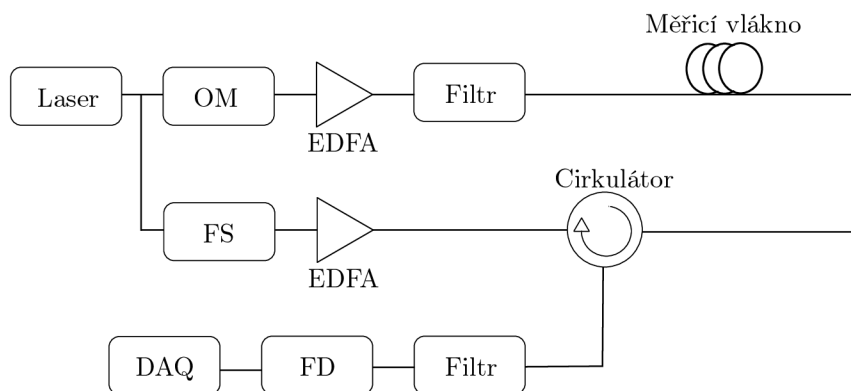
Dalším odvětvím, kde mohou být OFDR senzory použity je detekce seismické aktivity [149] nebo pro monitoring podmořských kabelů, kde se autorům podařilo snímat až 400 km vlákna pomocí dvou totožných OFDR jednotek [156].

Tab. 2.3: Porovnání aktuálních Φ -OTDR systémů.

Autor OFDR	Prostor. rozlišení	Vzorkovací frekvence	Šířka pásma	Výkon laseru	Způsob modulace	Rozsah měření
Okam. [148]	90 cm	500 MS/s	<1 kHz	–	modulátor	10 km
Muda. [44]	3 cm	20 MS/s	–	–	laditelný laser	–
He [76]	30 cm	100 MS/s	1 kHz	16 dBm	modulátor	50 m
Li [115]	12 cm	2500 MS/s	<1 kHz	16 dBm	modulátor	100 m

2.3.4 BOTDA

Tento typ distribuovaného senzoru závisí na detekci stimulovaného Brillouinova rozptylu a je zobrazen na obrázku 2.15. Zdroj záření, například úzkopásmový laser, je rozdělen do dvou ramen. Jedno rameno (nazývané pumpa) funguje stejně jako v předchozích případech (tj. generuje pulsy do testovaného vlákna). Světlo v druhém rameni vychází z laseru ve formě spojitě vlny (Continuous Wave – CW) a pomocí frekvenčního posunu (Frequency Shift – FS) slouží jako signál sondy. Běžně se pro frekvenční posun používá elektrooptického modulátoru řízeného mikrovlnným signálem za účelem generování dvojitého postranního pásma potlačeného nosnou CW, přičemž v tomto případě musí být jedno z postranních pásem před detekcí odfiltrováno [140].



Obr. 2.15: Základní schéma systému založeného na BOTDA.

Rozdíl frekvencí mezi signály v prvním a druhém rameni je snímán kolem Brillouinovy frekvence měřicího vlákna (prostřednictvím řízení frekvence CW), DAQ zaznamenává časové stopy (Brillouinova optická analýza v časové oblasti – Brillouin Optical Time-Domain Analysis – BOTDA) při různých frekvenčních posunech. Obvykle se před FD používá FBG nebo jiný úzkopásmový optický filtr k odfiltrování nežádoucích spektrálních složek, jako je Rayleighovo zpětně rozptýlené světlo (odražené pulsy) [181].

Pro pevný frekvenční rozdíl mezi interagujícími optickými signály z obou ramen je množství výkonu přeneseného z pumpy $P_P(z)$ do sondy $P_s(z)$ dáno vztahem [181]

$$\Delta P_s(z) = P_s(z) \left[\exp \left(\frac{g_B(z)}{A_{eff}} P_P(z) \Delta z \right) - 1 \right], \quad (2.21)$$

kde $g_B(z)$ představuje lokální Brillouinův koeficient zesílení, A_{eff} je nelineární efektivní plocha vedeného vidu a Δz je délka interakce, která je ekvivalentní prostorovému rozlišení a je určena polovinou trvání pulsu pumpy vynásobenou skupinovou rychlostí vedeného vidu.

Současný stav systémů BOTDA

Možnosti měření dynamických veličin pomocí reflektometrických systémů jsou popsány v přehledovém článku [237], kde je nejčastěji zmiňováno Φ -OTDR a BOTDA. Podrobněji se systémům snímajícím Brillouinův rozptyl věnuje článek [57]. Porovnání systémů BOTDA, případně BOTDA s vylepšenou citlivostí je možné vidět v tabulce 2.4. Systém zlepšující rozsah dynamického měření se nazývá BOTDA využívající dvojnásobný interferometr (DVI-BOTDA), v případě kterého můžeme vidět i porovnání mezi DVI a BOTDA. Další výzkum zkoumá využití systémů Φ -OTDR a BOTDA současně a porovnává jejich citlivost při snímání dlouhých vzdáleností [68].

Jedno z možných schémat zapojení BOTDA je využití polarizačně nezávislého rychlého BOTDA (PN-BOTDA), který využívá techniku polarizační diverzity a cyklického kódování, jež eliminuje polarizační blednutí a zvyšuje SNR [239]. U dalšího BOTDA systému je pomocí hlubokého učení prodloužena maximální délka snímání, kde pro zrychlení algoritmů strojového učení autoři používají GPU, což umožňuje využití v monitorovacích systémech pracujících v reálném čase [236].

Pro zvýšení prostorového rozlišení je možné využít takzvaného modifikované sledování profilu zisku (Modified Gain-Profile Tracing – MGPT), což může být využito pro distribuované monitorování stavu konstrukcí v reálném čase [246]. Existuje mnoho dalších pokročilejších systémů pro snímání mnoha veličin, které je možné využít pro detekci vibrací, jak uvádějí například [64, 218, 241].

2.4 Detekce vibrací na bázi polarizace

Šíření světla lze popsat jako příčné elektromagnetické vlnění s ortogonálními elektrickými a magnetickými složkami. Šíření těchto složek lze popsat Maxwellovými rovnicemi. Takovou vlnu lze popsat jako superpozici dvou kolmých a lineárně polarizovaných složek podél os x a y , kde příslušné amplitudy a počáteční fáze jsou dány

Tab. 2.4: Porovnání aktuálních BOTDA systémů.

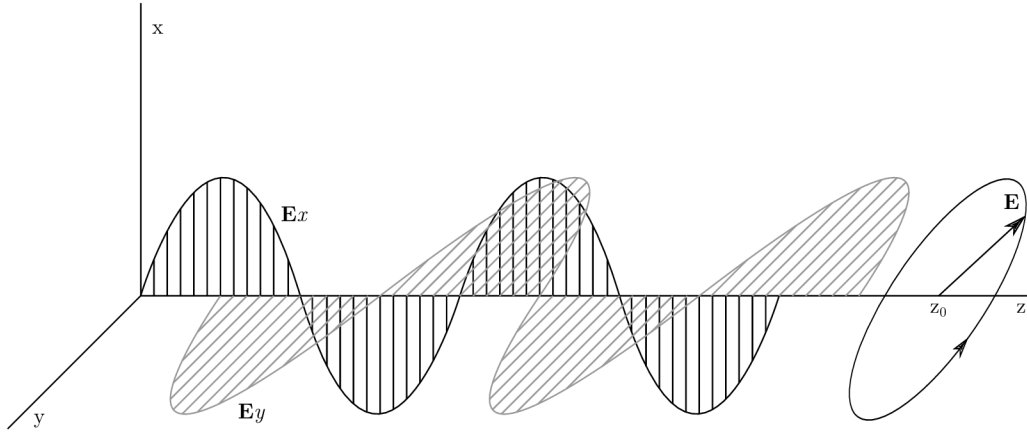
Autor BOTDA	Typ BOTDA	Rozlišení	Vzorkovací frekvence	Rozsah
Fu [68]	BOTDA/ Φ -OTDR	9 m/30 m	100 MHz/25 MHz	150 km
Wang [196]	BOTDR	2 m	62,5 Hz	172 m
Zheng [236]	BOTDA	2 m	23 Hz	10 km
Zheng [238]	F-BOTDA	0,5 m	2,6 kHz	230 km
Zheng [239]	PN-BOTDA	1,5 m	440 Hz	2 km
Zhou [244]	DVI-BOTDA	2 m	10 kHz	2 km
Zhu [246]	MGPT-BOTDA	0,5 m	200 MHz	248 m

vztahem [108]

$$\begin{aligned} E_x &= a_x \cos(\omega t - kz + \delta_x), \\ E_y &= a_y \cos(\omega t - kz + \delta_y), \end{aligned} \quad (2.22)$$

kde z značí směr šíření, n je index lomu, $k = (2\pi/\lambda_0)n$, λ_0 značí vlnovou délkou, a δ_0 a a jsou počáteční fáze a amplituda [108].

Jednotlivé ortogonální vlny jsou naznačeny na obrázku 2.16 [222].



Obr. 2.16: Polarizační části elektromagnetické vlny \mathbf{E} .

$$\mathbf{E}(z, t) = \begin{bmatrix} E_x \\ E_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_x \cos(\omega t - kz + \delta_x) \\ a_y \cos(\omega t - kz + \delta_y) \end{bmatrix}. \quad (2.23)$$

Polarizaci světla lze také popsat pomocí Stokesových parametrů, které je možné definovat jako [176]

$$\begin{aligned} S_0 &= I_0, \\ S_1 &= I_H - I_V, \\ S_2 &= I_{+45} - I_{-45}, \\ S_3 &= I_{\text{RCP}} - I_{\text{LCP}}, \end{aligned} \quad (2.24)$$

kde I_0 označuje intenzitu světelného paprsku a $I_H, I_V, I_{+45}, I_{-45}, I_{RCP}$ a I_{LCP} představují intenzity přeneseného paprsku procházejícího lineárním horizontálním polarizátorem, lineárním vertikálním polarizátorem a pravým kruhovým a levým kruhovým polarizátorem.

Stokesovy parametry jsou velmi často reprezentovány Stokesovými vektory reprezentovanými maticí 4×1 [110]:

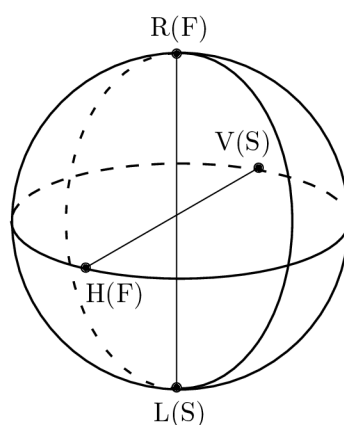
$$\mathbf{S} = \begin{bmatrix} S_0 \\ S_1 \\ S_2 \\ S_3 \end{bmatrix} \text{ nebo } \{S_0, S_1, S_2, S_3\}. \quad (2.25)$$

Polarizaci lze definovat pomocí tří základních stavů, tj. lineární, kruhové a eliptické [108].

- Lineární – obě složky elektromagnetické vlny mohou mít odlišné amplitudy, ale mají stejnou fázi.
- Kruhová – obě složky elektromagnetické vlny mají stejnou amplitudu a jsou posunuty o fázi $\frac{\pi}{2}$.
- Eliptická – elektrické pole lze popsat elipsou díky různým amplitudám a/nebo různým fázím složek.

Reprezentace jednotlivých typů polarizací pomocí Jonesových a Stokesových vektorů je možné vidět v tabulce 2.5.

Obrázek 2.17 zobrazuje Poincarého sféru jako měřítko aktuálního stavu polarizace nebo vývoje polarizace v čase. Značky $V(S)$ a $H(F)$ na osách ukazují hodnoty vertikální, resp. horizontální polarizace na rychlé, resp. pomalé ose. Ostatní osy představují pravotočivou a levotočivou osu [152].



Obr. 2.17: Poincarého sféra používaná pro znázornění rotace polarizace.

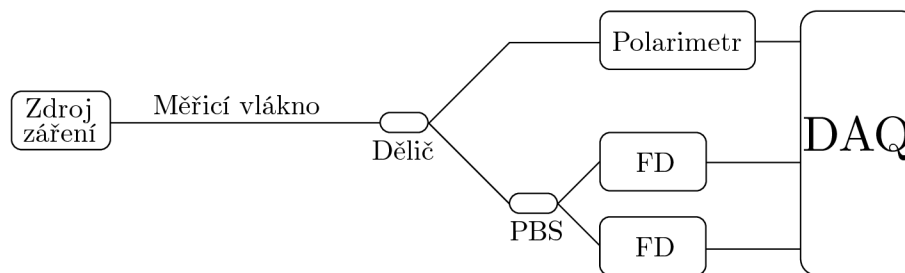
Tab. 2.5: Reprezentace typů polarizací Jonesovým a Stokesovým vektorem [109, 110].

Polarizace	Jonesův vektor	Stokesův vektor
Lineární, horizontální	$\begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$
Lineární, vertikální	$\begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1 \\ -1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$
Lineární, obecná	$\begin{bmatrix} \cos \alpha \\ \pm \sin \alpha \end{bmatrix}$	-
Kruhová, pravotočivá	$\frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 \\ i \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}$
Kruhová, levotočivá	$\frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 \\ -i \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 0 \\ -1 \end{bmatrix}$

Současný stav systémů využívajících detekce polarizace

Detekce polarizace nejčastěji probíhá dvěma způsoby. Jedním z nich je detekce polarizace polarimetrem, druhým je použití PBS [185]. Právě porovnání obou metod je možné vidět na obrázku 2.18, kde je zobrazeno porovnání snímání vibrací jedním optickým vláknem pomocí polarimetru i PBS, jak uvádí [45]. Autoři v [185] využívají podobného schématu zapojení, jejich měření navíc obsahuje polarizátor před a za testovaným segmentem. Další rozdíl je také v tom, že jedna práce se zabývá bodovým měřením a druhá zaznamenává otřesy z celého vlákna.

Pro detekci polarizace tedy mohou být použity jak komerční polarimetry [95] [5], tak využity levnější varianty pomocí PBS, který dělí světlo do dvou ortogonálních [180] [14] nebo tří rovin [211]. Stejného principu přímé metody měření využívá také [216], kde testují vliv akustických vibrací na cívku jednořivového vlákna, kterým se šíří dva vidy, jelikož je využíváno laserové diody s vlnovou délkou 980 nm. Zároveň také testují vliv pozice reproduktoru vzhledem k cívce na detekovaný signál. Detekce polarizačních změn je možná i s využitím cirkulátoru a zrcátka, jak je možné vidět v [105]. Schéma zapojení potom principiálně vypadá jako schéma na obrázku 5.12.



Obr. 2.18: Schéma zapojení přímého měření polarizačních změn.

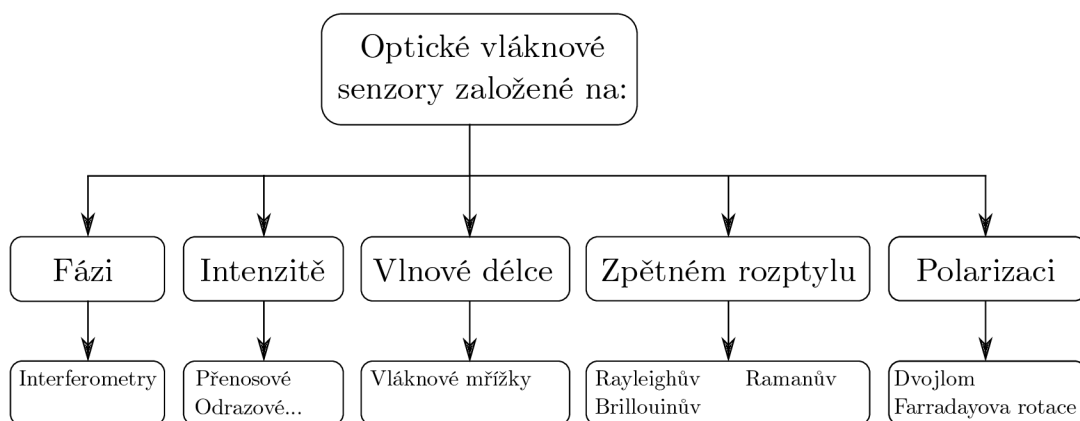
PBS je možné využít i ve složitějších distribuovaných optických senzorech, jako je POTDR [200]. Citlivostí senzorů se zabývá například práce [96], která zkoumá citlivost Sagnacova interferometru na délce vlákna nebo [102] vliv zdroje světelného záření.

3 Detekce dalších veličin pomocí OVS

Pro měření veličin, jako je teplota, tlak nebo akustické vibrace existuje několik druhů OVS. Základní dělení je na bodové, distribuované a kvazi-distribuované senzory. Bodové senzory mohou být speciálně upravená vlákna ke snímání daných veličin, kde je možné snímat měřenou veličinu pouze v jednom bodě. U některých technologií, jako jsou FBG, lze senzory připojovat za sebe a tím dosáhnou takzvaného vícebodového měření. FBG je možné při využití jedné mřížky zařadit do bodových senzorů. Jestliže dojde k zařazení několika mřížek do série, je nutné tuto technologii zařadit do takzvaných multiplexovaných nebo kvazidistribuovaných senzorů. Pro tento způsob snímání není možné použít datovou infrastrukturu, nebo je nutné infrastrukturu upravit [107].

Druhá kategorie jsou optické distribuované systémy, které mohou být rozděleny na další dvě podkategorie, a to senzory založené na zpětném rozptylu a na interferometrické systémy. Obě kategorie dokáží snímat hlídané veličiny pouze za pomoci optického vlákna, které nemusí být nijak speciálně upraveno. Největší výhoda těchto senzorů je schopnost měřit po celé délce optického vlákna použitého jako senzor. Senzory založené na zpětném rozptylu mají další výhodu, a tou je možnost měření pouze z jednoho konce vlákna, zatímco u interferometrických senzorů je většinou nutné přidat zrcátko nebo přístup k oběma stranám vlákna [107].

U bodových i distribuovaných senzorů je dále možné dělení podle způsobu vyhodnocování signálů. Takto se senzory dělí na fázové, intenzitní, polarizační, frekvenční, chromatické a vlnové délky. Podle typu senzoru tak zaznamenáváme tyto změny [107], jak je možné vidět na obrázku 3.1.

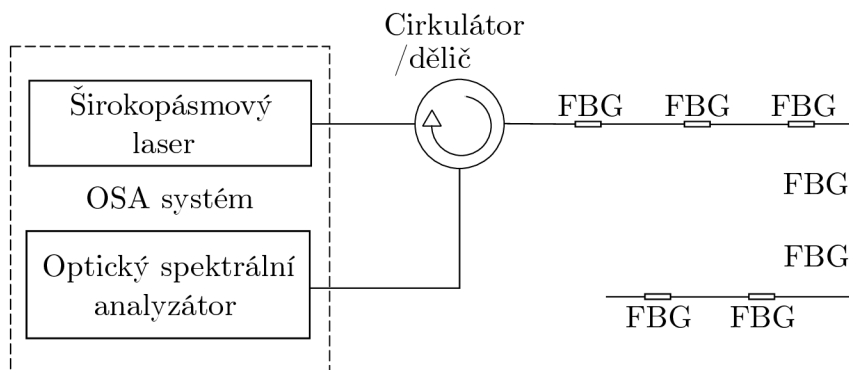


Obr. 3.1: Rozdělení optických vláknových senzorů podle změny snímaných jevů [155].

3.1 Teplotní senzory

Pro bodové měření teploty pomocí optických senzorů existuje mnoho komerčních řešení, která však slouží především k základním měřením teploty, typicky od -20 do 80 °C. Pro specializovaná měření je většinou nutné hledat v senzorech navržených pro určitou konkrétní aplikaci.

Pro měření teploty je využíváno již dříve zmíněné FBG. U této technologie dochází k odrazu určité vlnové délky a na základě změny frekvence odraženého záření je možné pomocí vzorce vypočítat hodnotu naměřené teploty nebo tlaku, jak je vidět na obrázku 2.2. Pro separátní měření těchto veličin je nutné použít referenční FBG pouze pro měření jedné veličiny a využít tuto mřížku pro kompenzaci druhé veličiny (typicky se jedná například o FBG uložené v kovovém pouzdře, které eliminuje tlak na mřížku a tím umožní měření pouze teploty). Hlavní výhodou Braggových mřížek je možnost sériového zapojení až desítek mřížek a tím rozšíření senzoru na vícebodový [51], jak je vidět na obrázku 3.2.



Obr. 3.2: Schéma zapojení systému FBG, včetně více senzorů v sérii [51].

Pomocí technologie FBG lze také realizovat senzory pro extrémně vysoké teploty. Při použití safírového optického vlákna s FBG mřížkou lze měřit teploty dosahující až 1300 °C [60]. Takovéto senzory je možné využít v ocelářském průmyslu, například pro kontrolu teploty určitých kritických částí pecí.

Porovnání odezvy tří optických vláken s FBG a termočlánků můžeme nalézt v [163]. Článek popisuje odhad doby odezvy optických snímačů teploty na základě analytického modelu přenosu tepla mezi snímačem a jeho okolím. Z výsledků jednoznačně vyplývá, že čím tenčí je přídavná ochrana, tím rychlejší odezvu vlákno má. S nejtenčí formou ochrany má vlákno rychlejší odezvu než testované termočlánky. Testování probíhalo s regenerovanými FBG senzory s délkou mřížky $0,5$ cm.

Na základě článků [123, 134, 166] je možné konstatovat, že opláštění optických vláken má malý vliv na citlivost vlákna. Primárně je využíván pro zvýšení přesnosti měření, avšak za cenu snížení rozsahu měření. Dalším zjištěním je změna odezvy

na základě opláštění (například zlatem, stříbrem, karbidem křemíku, oxidem zinečnatým, nebo oxidem grafitu), kde odezva klesá s tloušťkou opláštění stejně jako v předchozím případě.

Závislost délky FBG pro vysokoteplotní snímání shrnuje článek [165], kde probíhalo testování na dvou mřížkách o délce 1 a 3 cm při výrobě pomocí fázové masky. Článek vyvozuje závěr, že menší mřížka vykazuje menší posun vlnové délky na teplotě, zároveň větší linearitu v měření. V problematice měření vysoké teploty při použití řádově jednotek mřížek, se ani výroba například apodizovaných mřížek nezdá být klíčová [53].

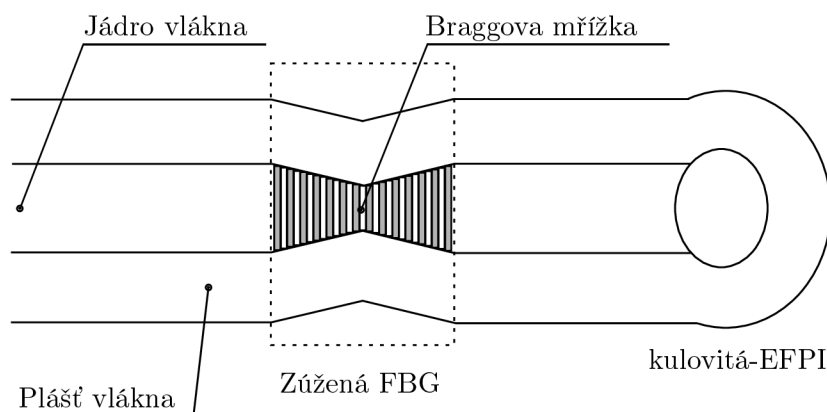
Další studie se zaměřuje na vliv teploty na výkon odražené vlnové délky, kde výkon postupně klesá až k nule při 850 °C [210]. Opět je měření teploty v celém rozsahu lineární. V článku je také zmiňován odkaz na starší studii, která uvádí, že by se neměla používat holá vlákna při teplotách nad 300 °C kvůli křehkosti skla. Při působení teplot nad 300 °C FBG pomalu degradují a již okolo 600 °C běžně dochází k destrukci FBG vlivem okolní teploty. Tuto skutečnost může vyřešit jiná technologie výroby mřížek, například FBG indukované molekulární vodou [229] nebo použití safírového vlákna [46], které zvyšuje odolnost mřížek až k teplotám okolo 1100 °C. Pravděpodobně nejlepším způsobem je použití femtosekundového (dále v textu pouze jen jako fs) laseru. Takto vyrobené mřížky byly testovány až do 1100 °C [117].

Použitím fs laseru pro výrobu mřížek je dokázána odolnost mřížek při teplotě 500 °C vůči destrukci [132, 133, 146]. Tato vlákna byla opláštěna polyimidem a zlatem. Opět je patrné, že opláštěním není možné zvýšit odezvu senzoru, avšak je zde zmíněno zvýšení koeficientu teplotní roztažnosti, která se po pokovení logicky blíží roztažnosti daného kovu. V publikaci [234] probíhalo třítýdenní měření FBG vyrobené pomocí fs laseru na 5 kanálech a celkově 30 mřížkách při konstantních 910 °C. Průměrná chyba proti termočlátku je menší než 1 °C, nedochází k mazání mřížek a zdroj konkrétně uvádí i unikátní vhodnost pro použití v aplikacích pro jadernou energetiku. K mazání by nemělo docházet ani při netypické Braggově vlnové délce, například v [77], kde byla tato hodnota kolem 2000 nm.

Pro měření teploty lze dále využívat i cílené rozšíření nebo zúžení vláken v kombinaci s měřením zakřivení optického vlákna. Takto vyrobený senzor je možné použít jako in-line senzor [55].

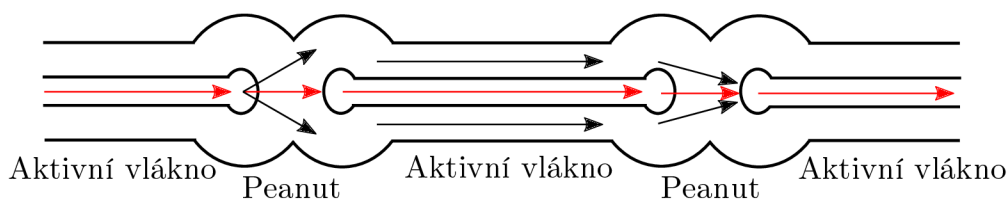
Nejčastější kombinace senzorů teploty je kombinace se senzory tlaku, jako u FBG. Pro příklad takového senzoru je nutné uvést senzor založený na zúženém FBG v kombinaci s vnějším Fabryovým-Pérotovým interferometrem (FPI) s kulovitým tvarem (kulovitá-EFPI), viz obrázek 3.3. Zde měření probíhá za pomoci cirkulátoru a díky tomu je možné využít zpětného odrazu. Maximální možná teplota měření dosahuje až 400 °C [233].

Pro příklad vysoce citlivého teplotního senzoru je vhodné uvést senzor založený



Obr. 3.3: Senzor využívající zúžené FBG a kulovitá-EFPI [233].

na aktivní double-peanut vláknové struktuře zobrazené na obrázku 3.4. Na základě experimentu je tento senzor velice přesný v měření teploty okolo 30 °C, kde dochází k lineárnímu posunu vlnové délky na základě změny teploty. Chování při teplotních extrémech není v experimentu vysvětleno, ale lze předpokládat že si senzor uchová lineární charakteristiku při běžných teplotách vzduchu [50].



Obr. 3.4: Schéma aktivní double-peanut vláknové struktury [50].

Přesnost všech senzorů výše uvedených je také závislá na přesnosti detekční jednotky, která zaznamenává vlnovou délku. Z logiky věci vyplývá, že čím je vyšší přesnost detekční jednotky, tím více je finančně nákladná. Je proto nutné volit senzory a detekční jednotky dle potřebné přesnosti měření teploty, tj. je nutné optimalizovat senzorický systém podle nároků na přesnost měření, případně na rozsahu měření teploty. Hodnoty jednotlivých citlivostí a teplotních rozsahů jsou uvedeny v tabulce 3.1.

3.2 Tlakové senzory

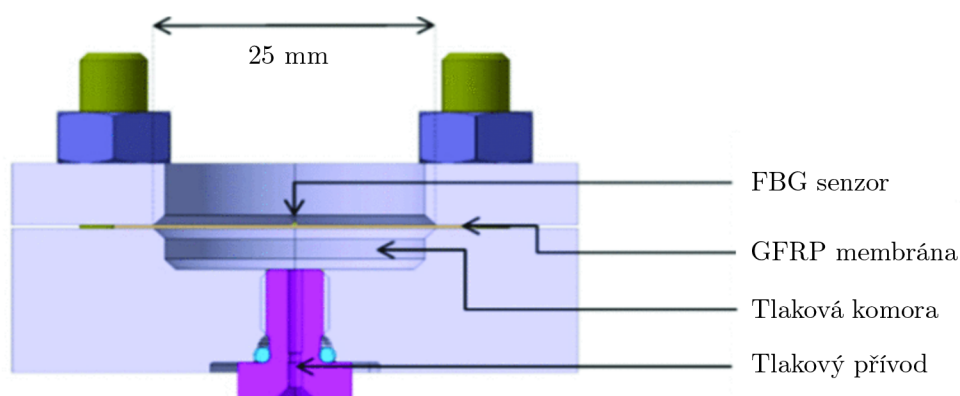
Základní tlakové změny je možné pozorovat jednoduchým měřením útlumu optického vlákna, jelikož působení tlaku způsobuje nárůst útlumu. V praxi je tento způsob v podstatě nepoužitelný, jelikož na vlákno může působit tlak ve více bodech a zároveň je vlákno ovlivňováno dalšími rušivými elementy.

Tab. 3.1: Porovnání citlivostí jednotlivých teplotních senzorů.

typ senzoru -	teplotní rozsah (°C)	citlivost (pm/°C)
Klasické FBG [161]	nespecifikováno	13
FBG D-shape	20–45	28,7
HFC se zúženými	20–90	25,76
Zúžené FBG s kulovitou-EFPI	40–400	12,03
Aktivní double-peanut	25–40	1268

Proto pro měření tlaku je využíváno FBG, kde tlakové změny způsobují větší frekvenční změny odražené vlnové délky, než změny teplotní. Ale právě kvůli působení obou dvou veličin současně je nutné měřit tlak v prostředí, kde nedochází k teplotním změnám, nebo využitím druhého senzoru pro měření teploty a ze známých změn teploty, poté matematicky vykompenzovat naměřený tlak. Existují samozřejmě i senzory, které nevyužívají FBG, ale u většiny experimentů, jsou to právě FBG senzory s kompenzací teploty, nebo FBG senzory měřící obě veličiny současně.

Většina klasických FBG senzorů dokáže měřit tlak řádově do desítek kPa. Pro zvýšení přesnosti je poté nutné vlákno vést skrze speciální pouzdro, které je navrženo tak, aby zvýšilo přesnost měření pro požadovaný rozsah tlaků. Například je možné využít jednolitě křemíkové pouzdro, které nevyužívá Braggových mřížek [124], nebo pouzdro použité v kombinaci s FBG a polymerem vyztuženým speciálními skleněnými vlákny [41], které je znázorněno na obrázku 3.5.



Obr. 3.5: Nákres speciálního senzoru tlaku využívajícího FBG [203].

Pro specializovaná měření je možné využít Fabryův–Pérotův rezonátor uložený do speciálního keramického obalu s využitím optického vlákna s polyamidovou ochranou, pro větší teplotní odolnost. Tímto optickým senzorem je možné detekovat tlak až do 100 kPa při přesnosti $\pm 0,5$ kPa [178].

Jestliže se měřený tlak pohybuje ve vyšších hodnotách, je nutné použití jiné technologie snímání tlaku, například využití kapiláry z čistého oxidu křemičitého, který umožňuje navýšení měřeného tlaku do 1 MPa při přesnosti 3,881 nm/MPa, respektive 4,067 nm/MPa. Opět je tedy přesnost měření určena přesností detekční jednotky, stejně jako u měření teploty [221].

3.3 Ostatní bodové senzory

Pomocí bodových optických vláknových senzorů je možné měřit mnohé další veličiny, jako je například koncentrace ethanolu v roztoku [136]. Mají také velké využití v těžko přístupných místech, nebo při extrémních podmínkách, jak je uvedeno výše. Nachází také uplatnění v biomedicíně, například jako senzor pro měření koncentrace kyslíku u hypoxických tumorů během radioterapie, založený na Fabryově–Pérotově principu [195]. Kombinací senzorů dostáváme možnost měřit více veličin současně. Jedním v praxi využitelným senzorem může být senzor kombinující měření relativní vlhkosti a teploty. Kombinací FBG a FPI je možné účinně měřit tyto veličiny pro analýzu atmosférického prostředí [201]. Další výzkum pak dokazuje možnost měřit magnetické pole. Tento senzor není nijak ovlivňován teplotou ani vibracemi, jak uvádí [243].

Optická vlákna lze použít pro snímání vibrací, čímž je možné detekovat roztažnost materiálů pro odhalení narušení infrastruktur, nebo aplikovat upravený senzor FBG pro detekci frekvencí vibrací [212]. Optická vlákna je možné využívat jako optovláknové mikrofony. Jedním ze způsobů je využití speciálně navržených optických senzorů, u nichž je při průchodu polarizovaného světla cirkulátorem do senzoru a zpět do fotodetektoru (FD) možné vysokorychlostní zpracování dat a záznam zvukových signálů [38]. Další možné způsoby a aplikace vibračních senzorů jsou uvedeny v následující kapitole.

4 Měření citlivosti optických vláken na akustické vibrace

Měření citlivostí optických vláken probíhalo ve třech různých prostředích. V první fázi bylo proměřeno několik typů kabelů v ideálních podmínkách bezodrazové komory, následovalo měření v reálných podmínkách v běžné laboratoři a venkovní měření na testovacím polygonu. Mimo interferometrie a detekce polarizace byl testován také komerční systém pro distribuované akustické snímání (DAS).

4.1 Měření v ideálních podmínkách

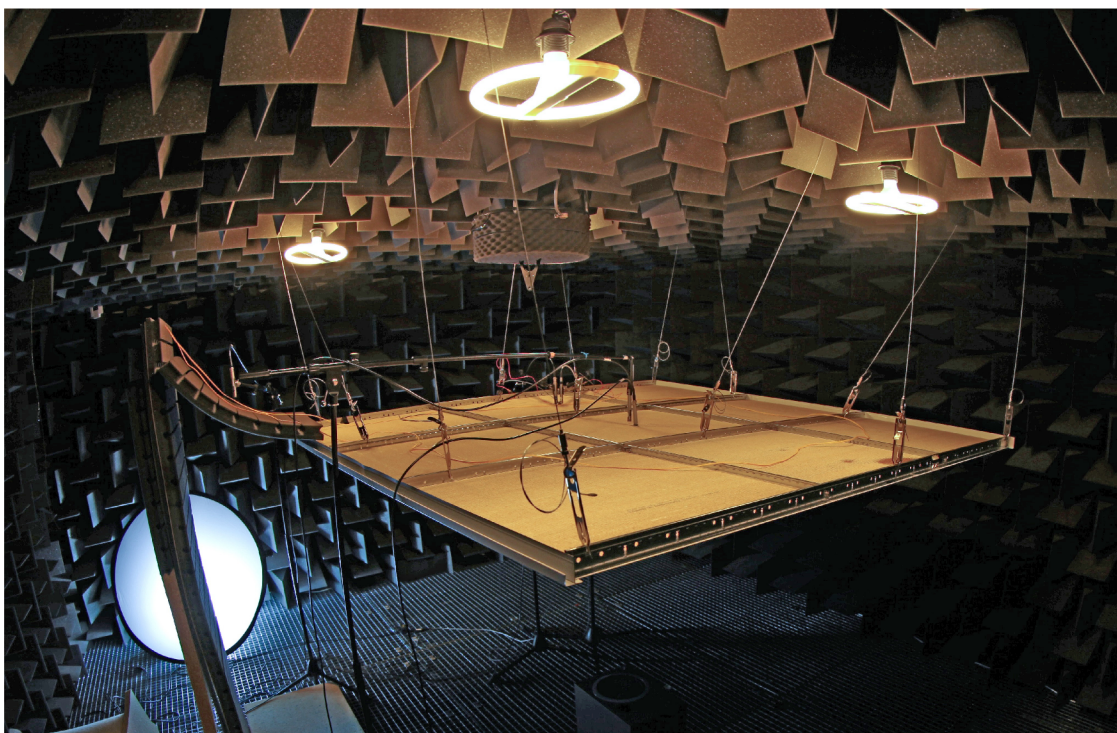
Bezodrazová komora použitá pro měření má objem 90 m^3 a kritickou frekvenci přibližně 120 Hz. Jako zdroj zvuku byl použit standardní dvoupásmový reproduktorový systém Event 20/20. Referenční osa reproduktorového systému byla orientována kolmo na konstrukci nesoucí testované vlákno v jejím středovém bodě. Kompenzace závislosti akustického tlaku na frekvenci v důsledku frekvenční charakteristiky reproduktorového systému a módů místnosti při nízkých frekvencích byla provedena pomocí měřicího mikrofону B&K typ 4190 namontovaného na konstrukci v referenční ose reproduktoru. Konstrukce a systém reproduktoru byly instalovány s použitím mechanických tlumicích prvků, aby se minimalizoval přenos vibrací do zkoušeného vlákna jinými prostředky než akustickými vlnami, viz obrázek 4.1. K měření byl použit akustický analyzátor Audio Precision APx525, jehož jeden kanál byl řízen kompenzačním mikrofonom a druhý zvukovým signálem detekovaným interferometrem.

Určování kvality signálu probíhá pomocí výpočtu SNR ve frekvenční oblasti. Tento výpočet lze vyjádřit vztahem

$$\text{SNR}_f(f) = 10 \log_{10} \frac{\sum_{m=1}^M |\hat{x}_m|^2}{\sum_{m=1}^M |x_m - \hat{x}_m|^2}, \quad (4.1)$$

kde \hat{x}_m je sinusový signál s danou frekvencí a x_m je získaný signál. Hodnota SNR_f je vyjádřena v decibelech. Celý tento postup funguje na základě znalosti signálu, který je pomocí reproduktoru přehráván. Jestliže známe tvar signálu, jeho frekvenci a dobu trvání jednotlivých frekvenčních skoků, jsme schopni pomocí metody nejmenších čtverců najít fázi a amplitudu sinusového signálu \hat{x}_m , který je co nejbližší x . Následně dojde pouze k výpočtu SNR. Pro detekci vibrací byly použity tři systémy a celkově byla provedena měření ve čtyřech různých konfiguracích. Jednalo se o:

- Heterodynní Michelsonův interferometr.
- OptaSense DAS režim fáze.
- OptaSense DAS režim intenzity.



Obr. 4.1: Fotografie testovacího pracoviště v bezodrazové komoře.

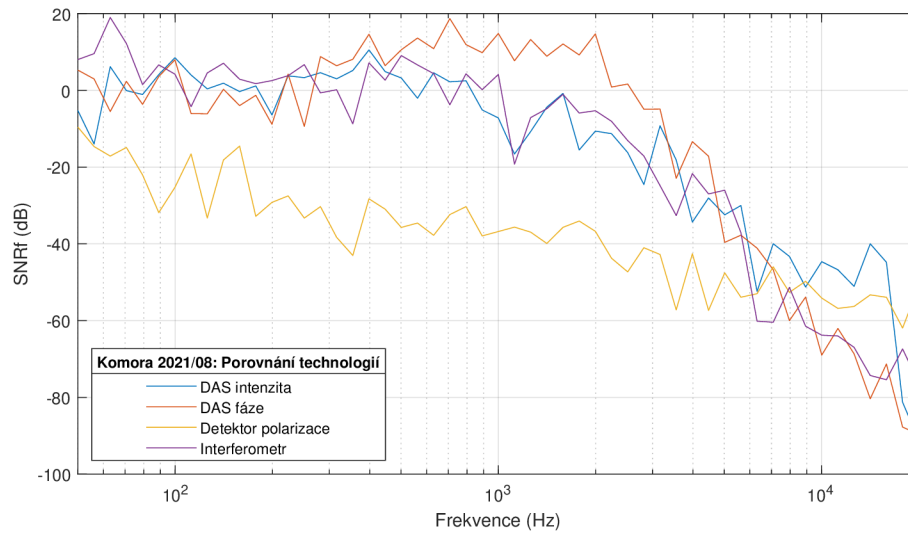
- Polarizační detektor na bázi PBS.

Testovací signál se skládá z 50 po sobě jdoucích časových úseků, z nichž každý odpovídá čisté sinusoidě o předepsané frekvenci. V našich experimentech jsme použili 53 hodnot cílové frekvence logaritmičticky rozložených od 50 Hz do 20 kHz. Na obrázku 4.2 je vidět porovnání citlivosti jednotlivých technologií při totožném uchycení stejného kabelu FTTX, kde ve vyšších frekvencích dominuje fázový režim DAS systému a při nižších heterodynní interferometr. Nejméně citlivý systém je pak polarizační detektor, což odpovídá teoretickým předpokladům [7].

Na obrázku 4.3 je možné vidět vytvořený spektrogram z náměrů signálu s frekvenčními skoky. Je viditelné, jak detektor polarizace snímá pouze nízké frekvence a taktéž jsou zde viditelné jednotlivé frekvenční skoky.

Pro srovnání citlivosti snímání v závislosti na typu kabelu jsme testovali následující možnosti:

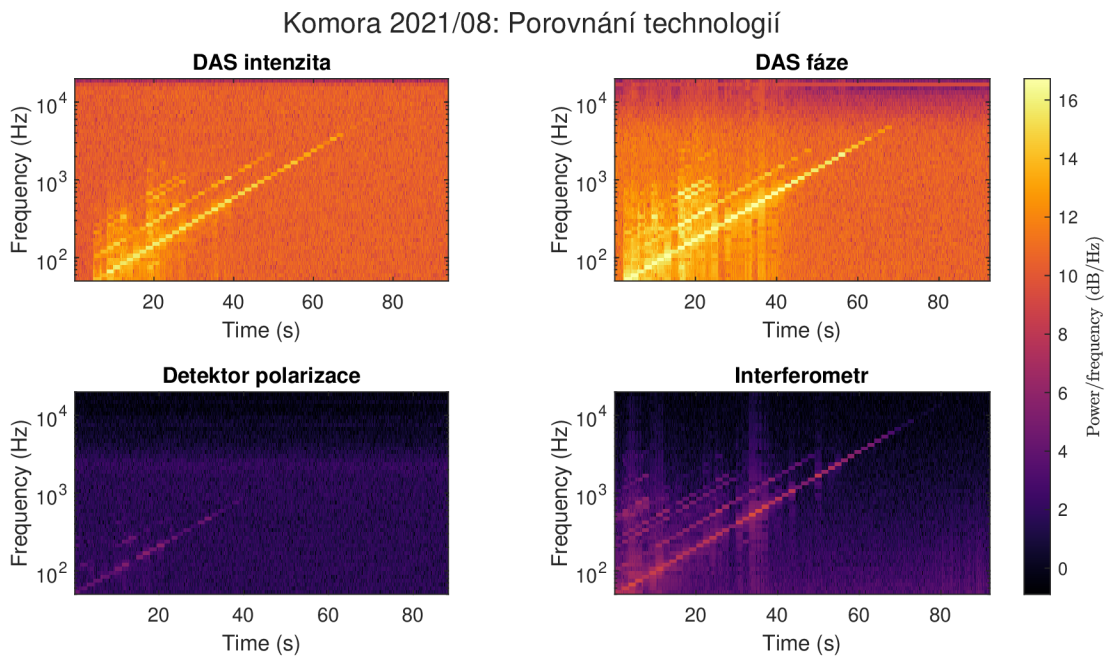
- Standardní Patch Cord G.657.A1 (PC) – průměr 2,0 mm, žluté PVC, Furcation Tubing, kevlarová vlákna.
- FTTX 12 vláken G.657.A1 (FTTX) – průměr 6,0 mm, PE vnější plášť, volná trubička, gel.
- KDP flat drop 2 vlákna G.657.A1 (KDF) – $2,0 \times 3,0$ mm, vnější plášť FR-LSZH, $2 \times$ dielektrický pevnostní člen průměr 0,5 mm.
- KDP 24 vláken G.657.A1 (KDP) – průměr 10,1 mm, vnější plášť FR-LSZH,



Obr. 4.2: Porovnání citlivosti jednotlivých technologií na akustické vibrace.

E-sklo s vodním blokováním, příze s vodním blokováním, volná trubka s optickými vlákny plněná gelem.

- Excel LSOH 24 vláken G.652D OS2 (Excel) – průměr 8,5 mm, vnější plášť FR-LSZH, těsná trubice, pevnostní člen ze skla E.

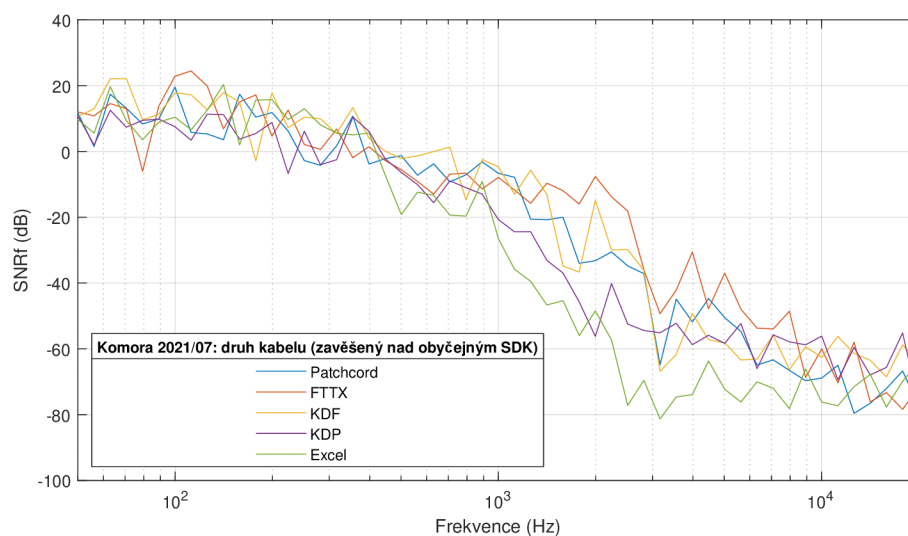


Obr. 4.3: Spektrogramy měření jednotlivými technologiemi.

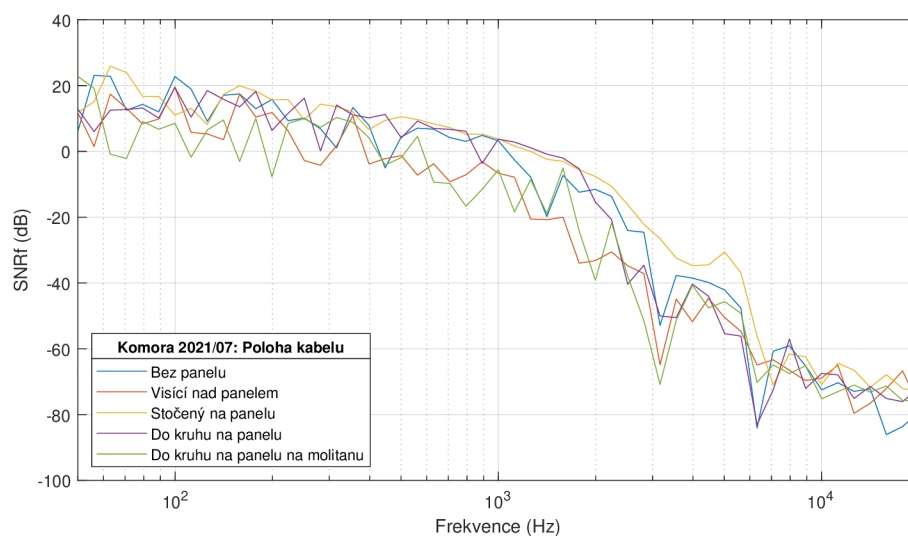
U jednotlivých typů kabelů bylo cílem změřit, jak ovlivňuje opláštění kabelu, nebo počet vláken přenos akustických vibrací. Všechny typy kabelů byly zavěšeny nad testovacím stropem se standardními panely, abychom eliminovali vliv stropnic

a stylu uchycení. Jak je vidět na obrázku 4.4, v nižších frekvencích, které mají vyšší akustický tlak a silněji rozvibrují strop, jsou kabely přibližně stejně citlivé. Ve vyšších frekvencích lze pak pozorovat již značné rozdíly, kde je nejcitlivější kabel FTTX. Obecně lze konstatovat, že čím je silnější ochrana kabelu, tím je kabel méně citlivý na akustické vibrace.

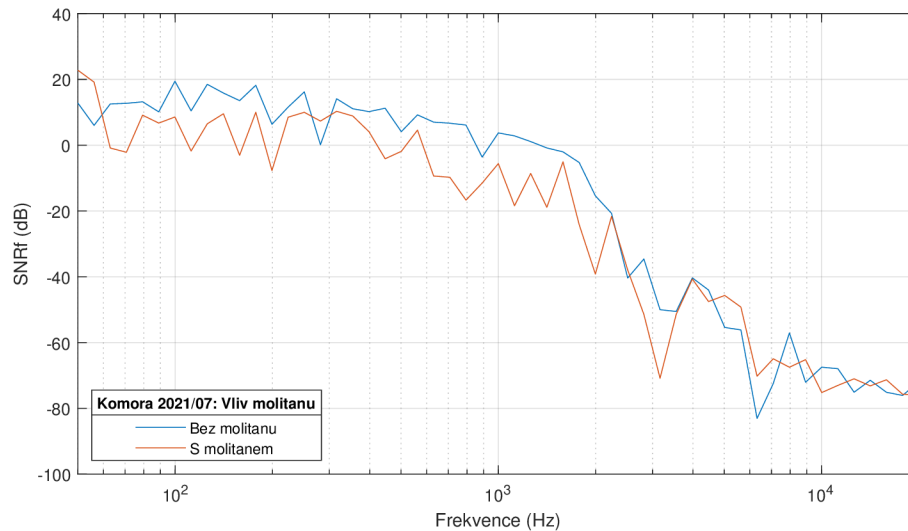
Na kabelu FTTX byla poté změřena závislost různých uchycení kabelu. Jak je možné vidět na obrázku 4.5, konfigurace, u nichž je kabel v přímém fyzickém kontaktu s panelem, mají největší SNRf mimo kabelu, který byl podložen molitanem. Naopak tato konfigurace se jeví jako nejméně citlivá. Speciální porovnání vlivu molitanové výplně pak můžeme vidět na obrázku 4.6.



Obr. 4.4: Porovnání citlivosti 5 druhů kabelů.



Obr. 4.5: Porovnání citlivosti podle polohy kabelu.



Obr. 4.6: Porovnání citlivosti při použití molitanové výplně.

Jako stropní panely byly testovány:

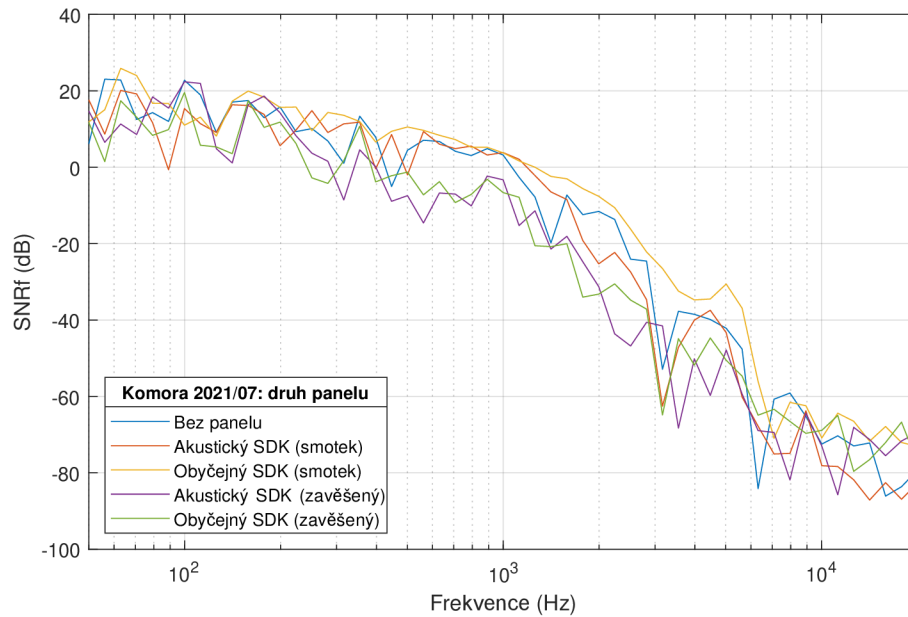
- žádný panel,
- standardní panel,
- AMF ECOMIN Filigran akustický panel.

Z obrázku 4.7 je patrné, že konfigurace obsahující smotek kabelu je obecně citlivější na akustické vibrace, což je pravděpodobně způsobeno rozvibrováním celého stropu, a tím i lepšímu přenosu akustických vibrací na optické vlákno. Zavěšený kabel má potom nižší citlivost. Z grafu je také možné porovnat vliv jednotlivých stropních desek, kde nepozorujeme rozdíl mezi testovanými akustickými a obyčejnými stropnicemi. Jestliže neexistuje jiná možnost než uložit kabel na stropnici, je vhodné jej položit alespoň na molitanovou, tlumivou vrstvu, která částečně eliminuje přenos vibrací ze stropních desek na vlákna.

4.2 Měření optických kabelů v lištách v běžné laboroři

Předchozí měření porovnává citlivosti optických vláken v ideálním prostředí bezodrazové komory, které je pro základní porovnání zásadní, nicméně je nutné otestovat tyto experimenty na reálné infrastruktuře. V budově VUT jsme proto vytvořili optické spoje mezi laboratořemi, které perfektně simulují reálnou infrastrukturu.

Na obrázku 4.8 je vidět schéma vytvořeného testovacího pracoviště. Jako optické kabely byly použity čtyřvláknový SM 09/125 G.657a LSZH a dvanáctivláknový FTTx DROP G657a LSOH kabely. Místnost pro umístění reproduktoru generujícího signál 5.36 (CyberGrid) je spojena kabely s vedlejší místností 5.58 (serverovna) a



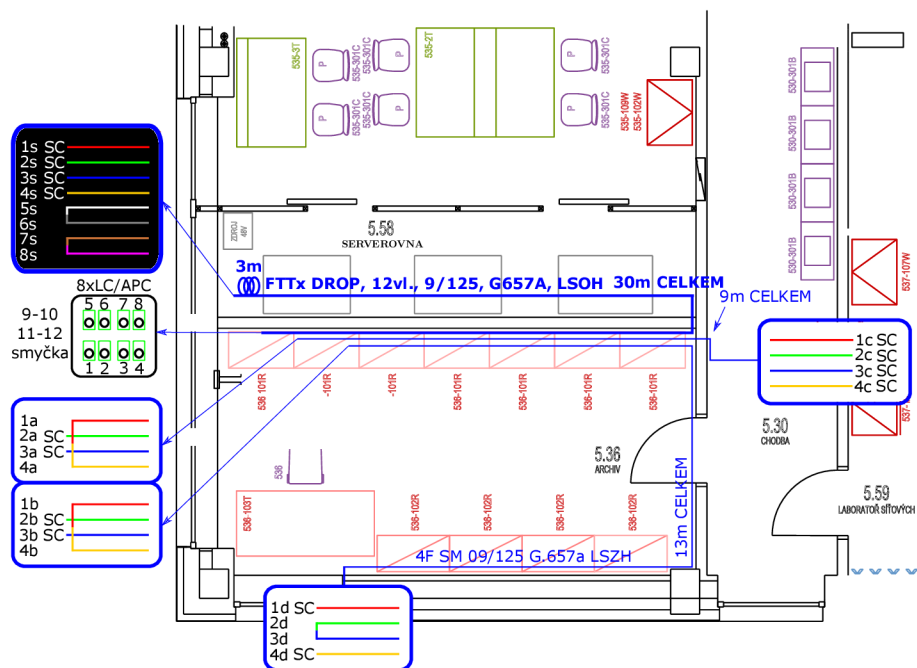
Obr. 4.7: Závislost typu panelu a způsobu uchycení na citlivosti.

s 5.30 (chodba). Z chodby je dále možné udělat propoj do místnosti 5.59 (měřici), kde se nacházely, jak ovládací přístroje pro reproduktor, tak i měřicí technologie: interferometr, DAS a detektor polarizace. Celé měření bylo navrženo tak, aby se citlivost kabelů měřila z oddělené místnosti.

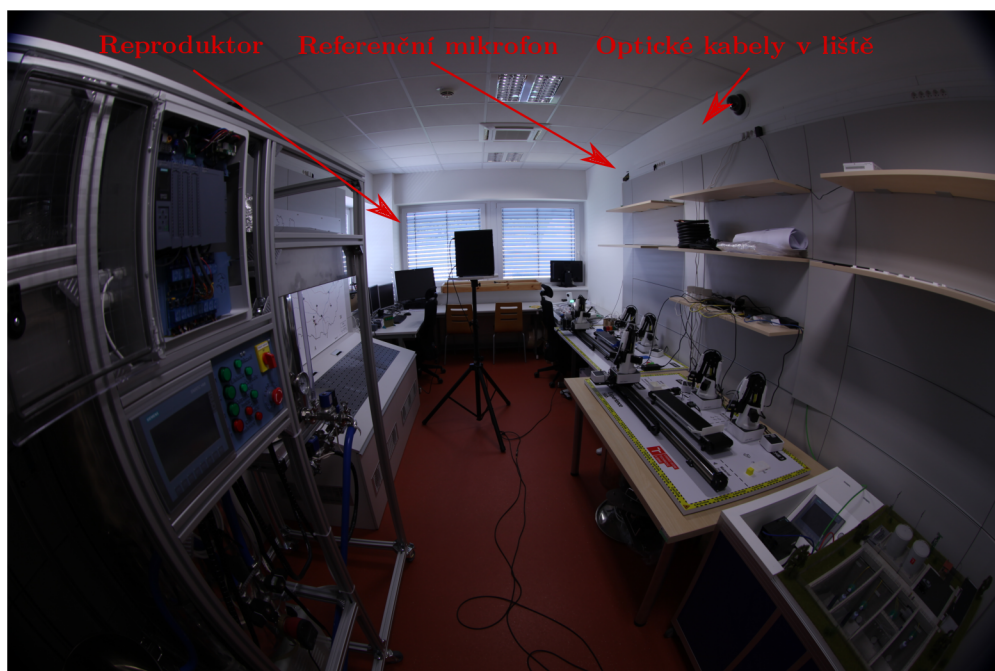
Jednotlivé kabely jsou ve schématu zvýrazněny modrou barvou a na jejich koncích je vždy schematicky naznačeno ukončení konektory, nebo vzájemným provařením vláken. Tímto způsobem bylo možné vytvořit tři různé smyčky, na kterých bylo měření prováděno. Jedná se o připojení z chodby pouze do provařené části vlákna (vlákna 1c a 4c), což je takzvaná krátká smyčka. Druhá topologie spočívala v propojení vláken 2a a 3a s vlákny 2b a 3b, jež vedou na protější stěnu, čímž vznikla dlouhá smyčka. Poslední topologie spočívá v propojení kabelu vedoucího na chodbu (vlákna 2c a 3c) se zásuvkou instalovanou do stolu vedoucí do serverovny (8xLC/APC), čímž vznikla smyčka server.

Tyto tři topologie byly zvoleny z důvodu různorodosti měření, u kterých posuzujeme kabel vedoucí jednou stěnou, na kterou působí reproduktor, kabel vedoucí třemi stěnami obklopujícími reproduktor a kabel, který prochází serverovnou, díky čemuž lze simulovat běžné rušení kabelu vzduchotechnikou a běžícími servery. Testovací pracoviště v CyberGridu bylo tedy vybaveno reproduktorem pro generování signálů a referenčním mikrofonom, který snímal zvuk v plastové liště pro porovnání zvuků zaznamenaných optickým vláknem a mikrofonom. Finální podobu zapojení můžeme vidět na obrázku 4.9.

Na obrázku 4.10 je vidět naznačení kabelů v lištách (modrou barvou) a také

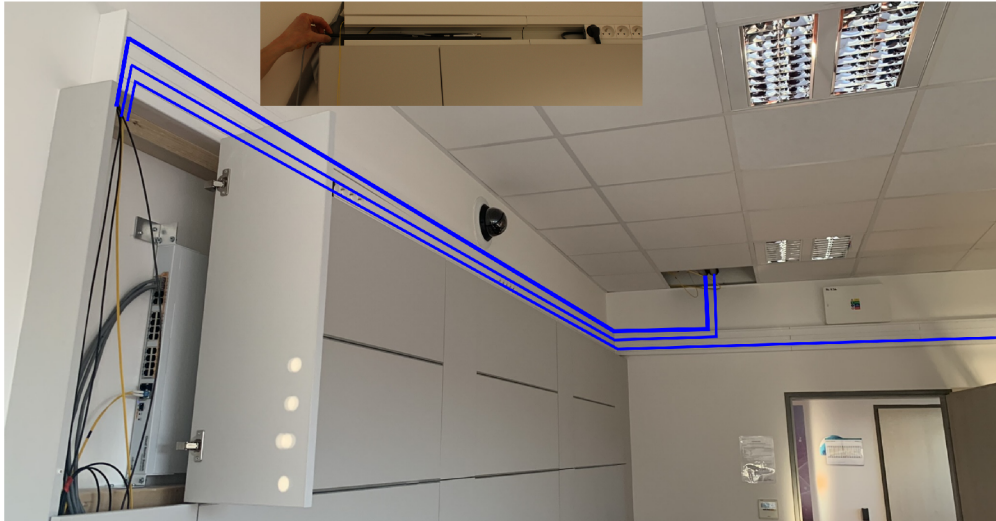


Obr. 4.8: Schematická podoba vytvořeného pracoviště pro měření citlivosti optických vláken na akustické vibrace.



Obr. 4.9: Finální podoba testovacího pracoviště.

způsob umístění reproduktoru do lišty pro srovnání. Kabely vedoucí do stropu pak míří do serverovny (tlustá modrá čára) a na chodbu (tenká modrá čára), kde jsou pak spojeny s vedlejší měřicí místností.



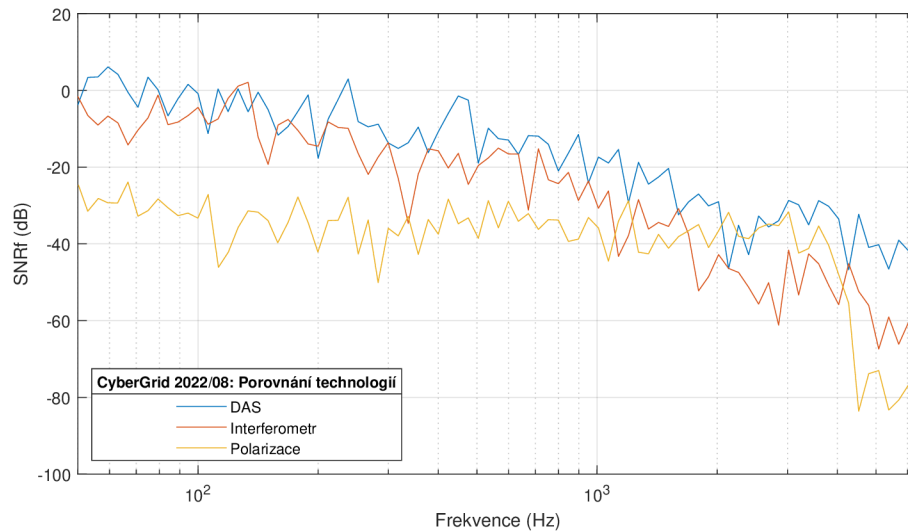
Obr. 4.10: Naznačení optických kabelů umístěných v plastových lištách s mikrofonem.

Na základě zkušeností z měření v bezodrazové komoře byly v reálných podmínkách využity už pouze tři technologie. Jednalo se o heterodynní interferometr, DAS a detektor polarizace. Taktéž byl upraven vysílaný signál, který byl frekvenčně omezen od 50 Hz do 6400 Hz, jelikož vyšší frekvence jsou hůře detekovány. Upraveny byly také frekvenční skoky pro větší přesnost měření, kde každý následující skok je vyšší o 1/12 oktávy. V reálných podmínkách byl také signál reprodukován ve třech různých úrovních hlasitosti, jež úrovní akustického tlaku odpovídají tiché mluvě 54 dB(A) (relaxed), normální hlasitosti 60 dB(A) (normal) a mluvení zvýšeným hlasem 66 dB(A) (raised).

Porovnání citlivostí jednotlivých technologií je vidět na obrázku 4.11. Úroveň hlasitosti odpovídala hodnotě normal. Z grafu je patrné, že v reálných podmínkách je nejcitlivější systém DAS, který má mírně vyšší SNR než interferometr. Polarizační detektor má pak výrazně nižší citlivost.

Při porovnávání jednotlivých úrovní hlasitosti si vystačíme s komparací u jedné technologie, což je MI, jelikož výsledky z ostatních systémů korelují. Logicky se ukazuje, že nejvyšší citlivost je u hlasitosti raised, následovanou normal a nejnižší přenos vibrací pozorujeme u hlasitosti relaxed, jak je vidět na obrázku 4.12. Je to logicky způsobeno nižším akustickým tlakem vznikajícím nižší hlasitostí reproduktoru, čímž nedochází k tak silnému rozvibrování vlákna.

Poněkud zajímavější výsledky nabízí porovnání měření jednotlivých topologií, jež se pro jednotlivé technologie liší. Zatímco u interferometru vychází jako nejcitlivější dlouhá smyčka, viz obrázek 4.14, u DAS je nejcitlivější smyčka server, viz obrázek 4.13, což platí pro všechny měřené hlasitosti. Důvod se pravděpodobně skrývá



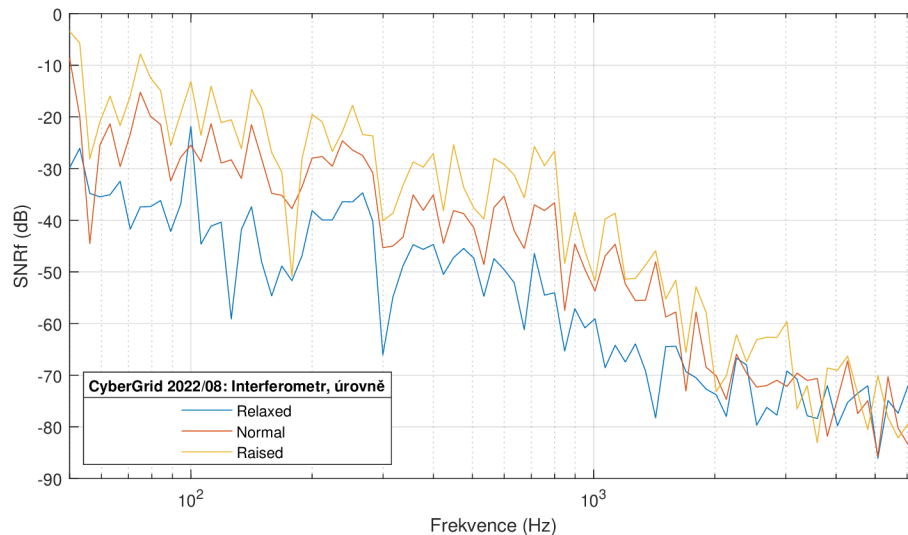
Obr. 4.11: Porovnání citlivosti jednotlivých technologií v reálných podmínkách.

v propojení mezi plastovou lištou a zásuvkou, která je instalovaná ve stole. Propojovací patch byl sice obalen izolačním tubexem, mohlo ovšem dojít k tomu, že právě propojovací patch byl nejcitlivějším místem. Druhá možnost je vibrace plastové zásuvky nebo stolu, ve kterém byla zásuvka instalovaná. Tím pádem tato část smyčky byla nejcitlivější, a jelikož interferometrem zaznamenáváme signál z celého vlákna, došlo u smyčky server k zarušení právě serverovou částí, a tím pádem se jeví jako nejcitlivější dlouhá smyčka. Jelikož DAS funguje na principu Φ -OTDR, dokáže přesně lokalizovat část, na níž působí reproduktor nejsilněji. Díky tomu nedochází k přídavnému rušení servery, a proto je nejcitlivější právě smyčka server.

U detektoru polarizace je signál už na nejnižších frekvencích pod úrovní šumu, tím pádem jsou jeho výsledky irelevantní. Pokud by došlo ke zvýšení hlasitosti, tak by se vzhledem ke konstrukci choval pravděpodobně podobně jako interferometr.

4.3 Venkovní měření pro testování citlivosti systémů

Motivace pro venkovní měření, přesněji měření na venkovním testovacím polygonu VUT, je ověření citlivosti OVS na vibrace v podmínkách mimo vnitřní optickou infrastrukturu. Testovací polygon je vidět na obrázku 4.15 a skládá se z vnitřní infrastruktury, která prochází budovou v podhledech, výtahovými šachtami, a je zakončena v serverovně, odkud probíhala měření, respektive ze serverovny byl natažen patchcord do vedlejší místnosti, která nebyla tak hlučná jako serverovna a kde bylo prováděno měření. Vnitřní infrastruktura je tedy zatížena běžným rušením způsobeným pohybem osob v budově, zapnutou vzduchotechnikou atd. Venkovní část polygonu je zakopána v nezámrzné hloubce a vede z šachty, jež je vidět na

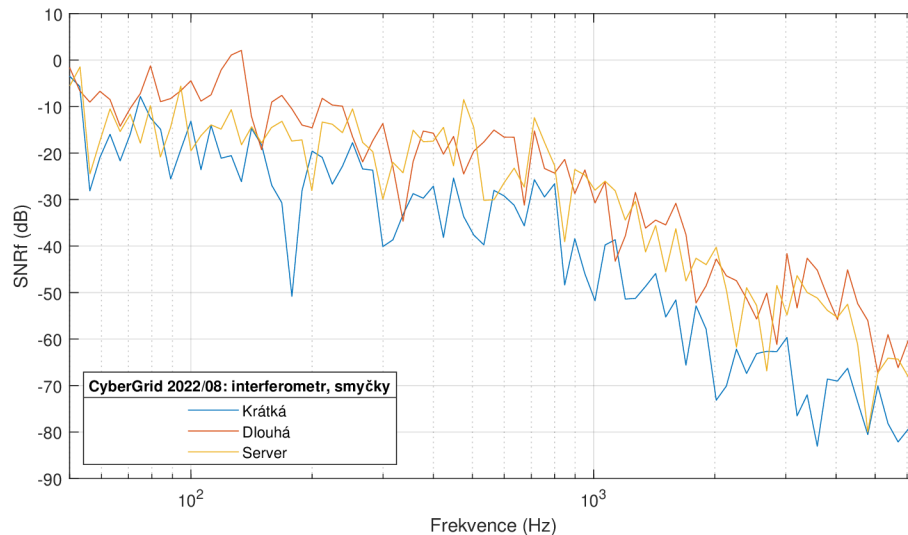


Obr. 4.12: Porovnání citlivosti jednotlivých úrovní hlasitostí při měření v reálných podmínkách.

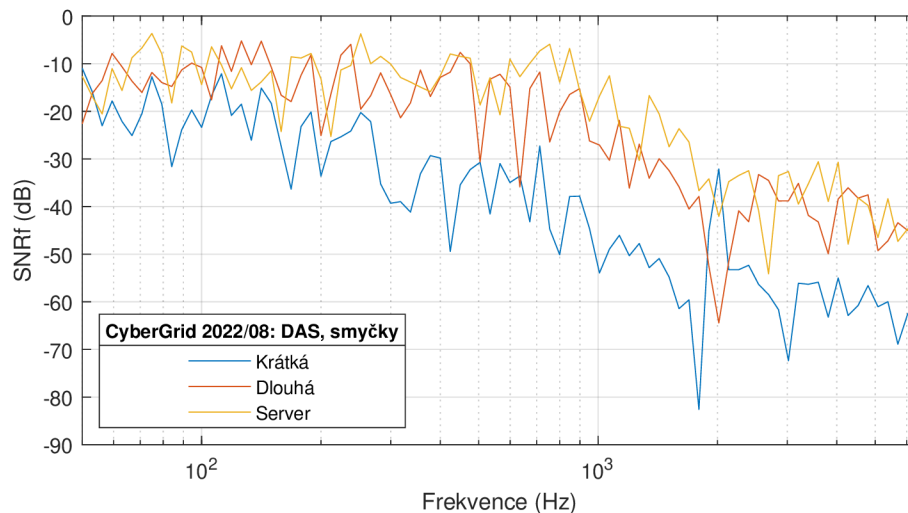
obrázku 4.16 podél chodníku za budovu. Zde je opět zakončena různými způsoby kvůli možnosti modifikovat konfigurace zapojení. Pro účely našeho měření jsme použili vlákno, které je na konci provařeno, čímž nám vznikla smyčka. Venkovní část je rušena pohybem osob po chodníku, jedoucími vozidly na silnici vedle chodníku a provozem parkoviště, kolem něhož kabel vede.

Tato trasa však není vhodná pro porovnání citlivosti jako v předchozím testu kvůli problematickému umístování reproduktoru mimo budovu a částečně také kvůli předchozím testům, kde systémy nereagovaly ani na velice hlasité zvuky. Nicméně systémy mohou být podrobeny testům na odlišné události, jako jsou průjezdy vozidel, pohyb osob, případně manipulace s krytem šachty. Testovací scénáře byly složeny z chůze po chodníku a z průjezdu vozidla pěti různými rychlostmi v obou směrech. Následně došlo ke třem výskokům osoby v blízkosti šachty na silnici, na chodníku a na trávě vedle šachty. Na závěr došlo k přesně deseti poklepáním rukou na plastový kryt šachty. Výsledky tohoto měření byly u interferometru analyzovány poslechem signálu, kde jsou jasně rozeznatelné poskoky u šachty a klepání na kryt šachty.

U DAS systému jsou výsledky o poznání lepší. Zde bylo možné data zobrazit v 2D grafu a pomocí FFT získat frekvenční charakteristiku. Jak je vidět na obrázku 4.17, z náměru jízdy vozidla po silnici je možné jasně určit, že se jedná o vozidlo, jelikož se jeho odezva objevuje na více kanálech současně, což je způsobeno intenzitou generovaných vibrací. Taktéž je v horní části odezva silnější, jelikož tam vůz projíždí v blízkosti venkovní šachty, která není odhlučněná zeminou, ale pouze plastovým krytem.



Obr. 4.13: Porovnání citlivosti konfigurace trasy v reálných podmínkách pro interferometr.



Obr. 4.14: Porovnání citlivosti konfigurace trasy v reálných podmínkách pro DAS.

Oproti tomu chůze nezpůsobuje tak silné vibrace. Jak je vidět na obrázku 4.18, je dobře zaznamenána po celé délce vlákna, a dokonce lze při přiblížení je možné rozpoznat jednotlivé kroky. U obou náměrů je také možné jednoduchým proložením přímkou spočítat rychlost daného objektu.

Jakékoliv narušení šachty je pomocí DAS velice rychle detekovatelné. Na obrázku 4.19 je vidět poklep rukou na víko šachty (konkrétně jde o deset klepnutí). Jednotlivé poklepy jsou zřetelně vidět. Z tohoto hlediska je pak jakákoliv manipulace s víkem detekovatelná.

Na obrázku 4.20 je vidět poslední událost, což je výskok. Z náměru je patrné, že je možné rozlišit výskok od dopadu jak z rychlosti ustálení vibrací, tak i z počtu



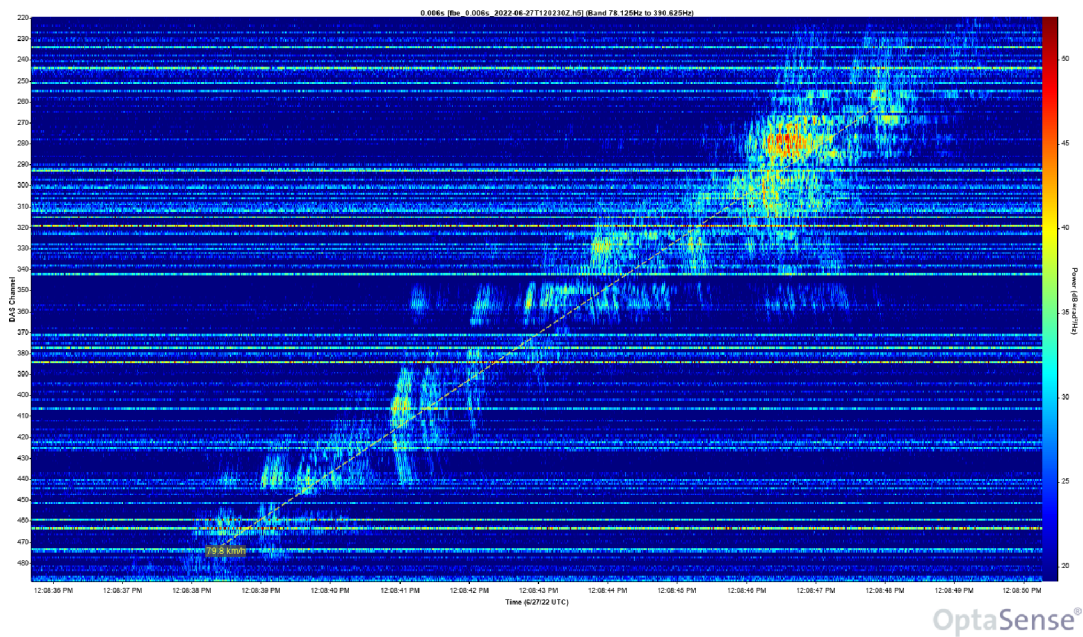
Obr. 4.15: Testovací polygon.



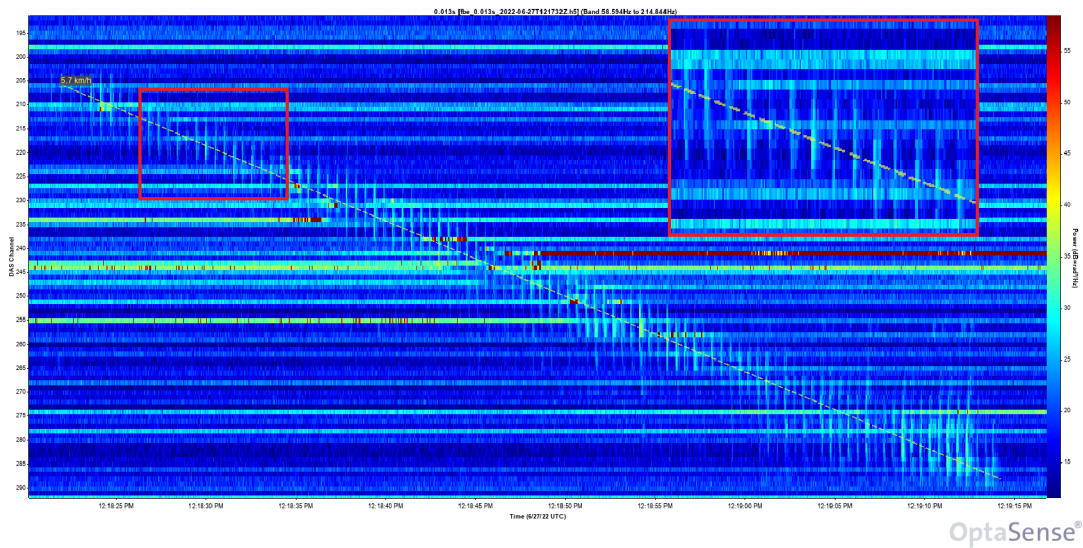
Obr. 4.16: Fotka venkovní šachty.

kanálů, na které se odrazy a dopady promítnou. Z měření je také patrné, že čím blíže figurant skáče, tím je intenzita vyšší (tj. na silnici je intenzita nejslabší a na trávě nejsilnější). Tuto závislost potvrzuje i měření z kapitoly 7, konkrétně obrázek 7.5.

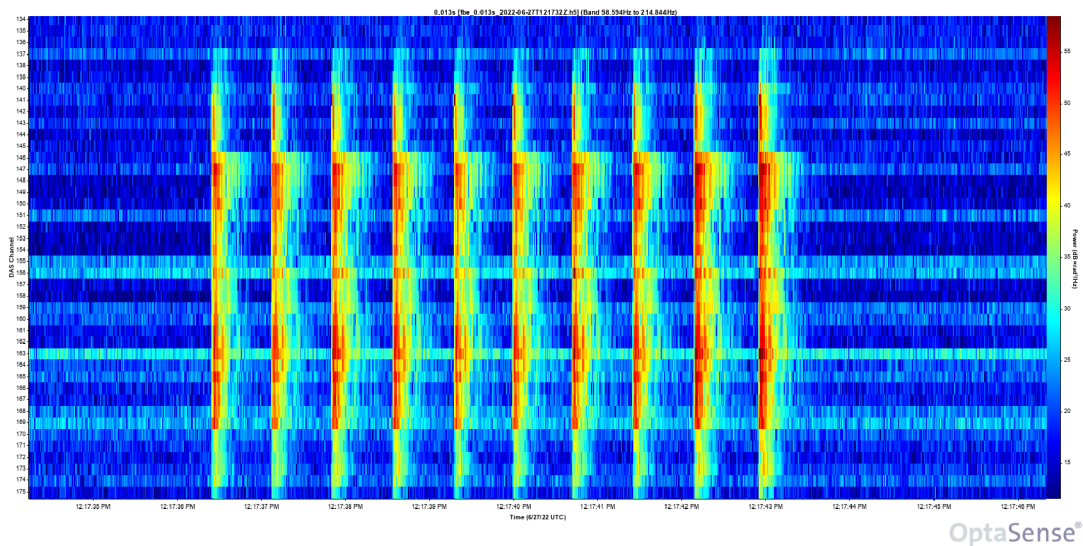
Polarizační detektor zachytil pouze klepání na víka šachty, jak je možné vidět na obrázku 4.21. Zde se nabízí zajímavá možnost využití tohoto cenově dostupného systému pro zabezpečení fyzické vrstvy. To je dáno právě tím, že není zatížen rušením okolních běžných vlivů a dokáže zaznamenat pouze anomálie v těsné blízkosti vláken a velice citlivě odhalit případnou nepovolenou manipulaci s vlákny nebo kabely.



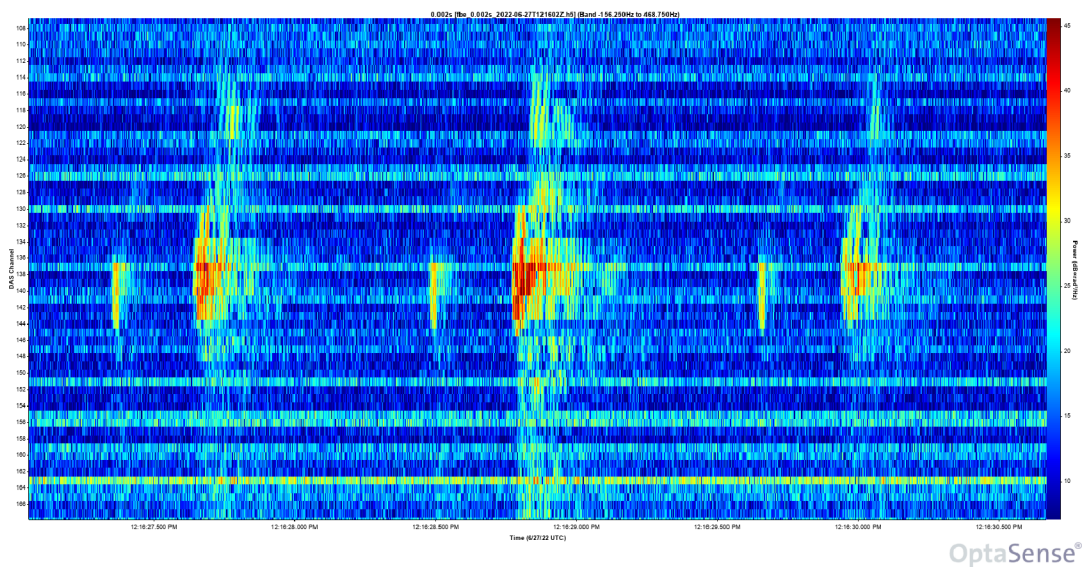
Obr. 4.17: Frekvenční zobrazení waterfall grafu z DAS systému průjezdu vozidla.



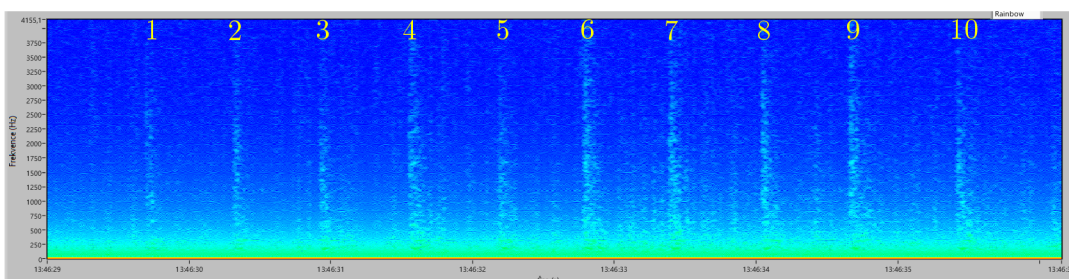
Obr. 4.18: Frekvenční zobrazení waterfall grafu z DAS systému čůže.



Obr. 4.19: Frekvenční zobrazení waterfall grafu z DAS systému poklepů na šachtu.



Obr. 4.20: Frekvenční zobrazení waterfall grafu z DAS systému skoků.



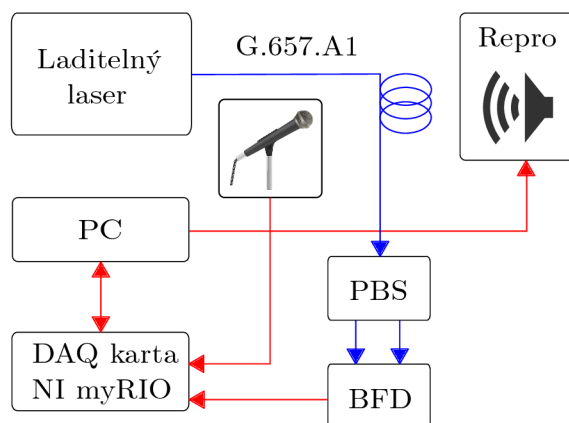
Obr. 4.21: Spektrogram pro 10 klepnutí rukou na víko šachty z detektoru změn polarizace.

5 OVS využívající analýzu změny stavu polarizace

Dle teoretických předpokladů je možné využít měření změn stavů polarizace pro detekci vibrací. Výhodou polarizačních systémů je, že oproti interferometrickým a reflektometrickým systémům jsou, dle teoretických předpokladů, méně citlivé a tedy méně ovlivněny šumem. Pro detekci polarizace byly využity dva systémy. Prvním je využití polarimetru (specifikován v podkapitole 5.4) a druhým je rozdělení polarizace podle polarizačních rovin a následné snímání pomocí balančního fotodetektoru (BFD).

5.1 Optimalizace pracovního bodu

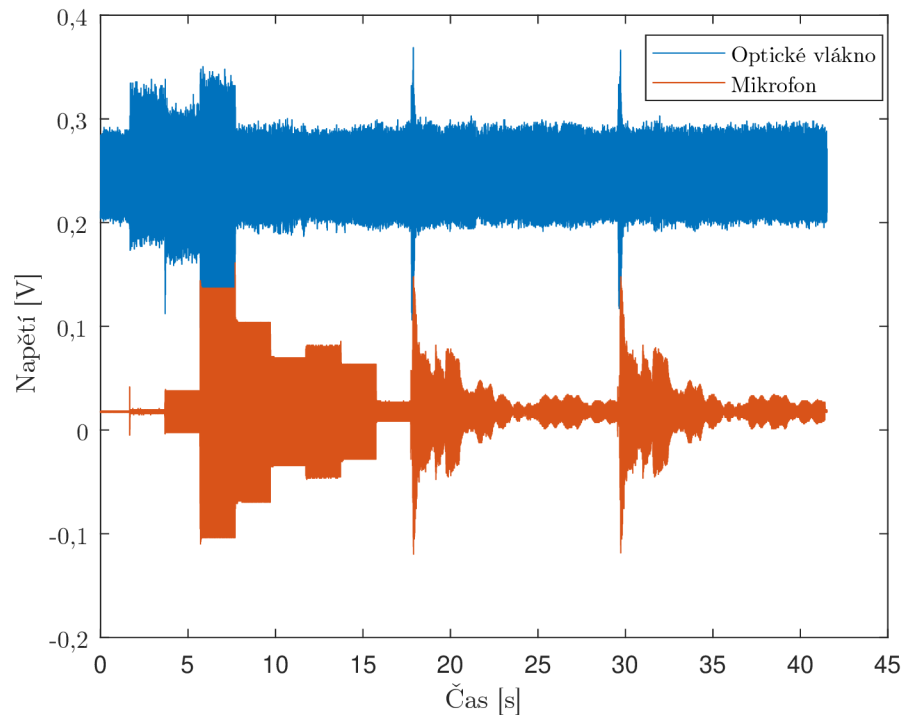
Vzhledem k tomu, že citlivost celkového měřicího systému je vždy závislá na vysílacím výkonu, bylo navrženo zapojení tak, aby mohl být nalezen optimální pracovní bod. Zapojení se skládá z laditelného laseru (ITLA), PBS, BFD a karty zaznamenávající data a je zobrazeno na obrázku 5.1. Pro generování vibrací byl použit reproduktor, v jehož blízkosti byl přichycen patchcord splňující specifikaci G.657.A1. Pro reálný záznam zvuku byl použit stolní mikrofون zaznamenávaný stejnou deskou od NI myRIO. Vstupy a výstupy jednotlivých elektronických komponent jsou na obrázku naznačeny červenými šipkami. Modrými šipkami jsou označeny optické vláknové spoje.



Obr. 5.1: Zapojení testovacího systému pro porovnání citlivosti v závislosti na vstupním výkonu.

Rozsah frekvenčních skoků byl v rozmezí od 60 do 1920 Hz, kde každá vyšší frekvence nabývala dvojnásobné hodnoty předchozí frekvence (kontinuálně zvyšovaná

frekvence), jak je možné vidět na obrázku 5.2. Testovací signál po frekvenčních skocích následně obsahuje signál plynule lineárně přeladovaného sinu, který je generován dvakrát. Pro změnu rozsahu optického výkonu byly stanoveny hranice od $-5,45$ do $+1,25$ dBm před fotodetektorem. ITLA umožňuje regulovat výkon od 6 dBm do 13,5 dBm, tím pádem po zapnutí laseru nebylo nutné zasahovat do zapojení, což by mohlo měření ovlivnit. Byl použit adekvátní útlumový článek a výkon byl redukován pouze nastavení ITLA.



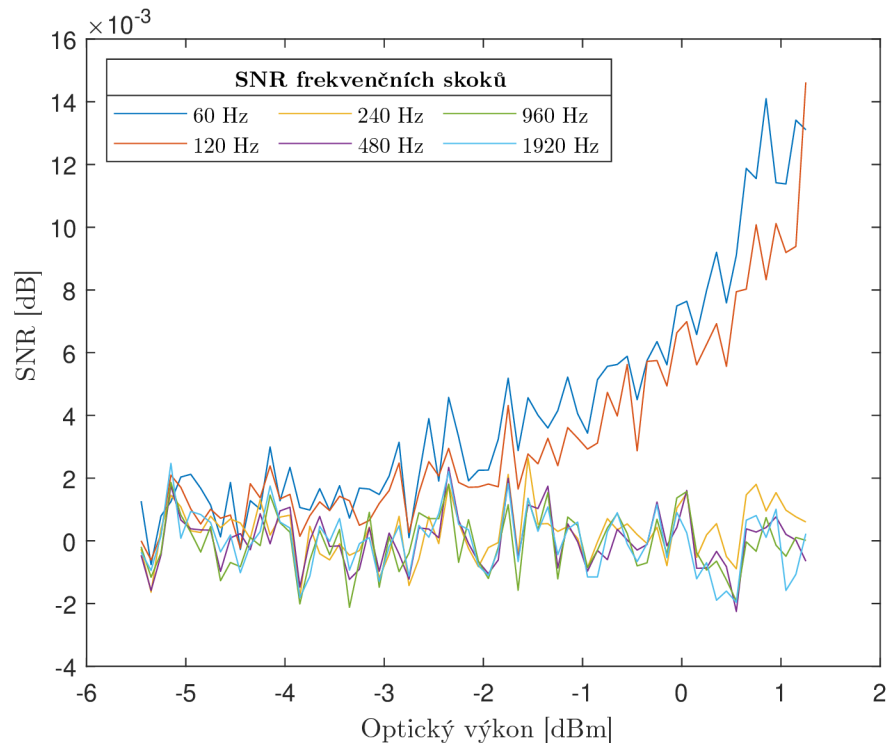
Obr. 5.2: Detekované signály z reproduktoru pomocí optického vlákna a mikrofónu.

Pro vyhodnocení je nutné kvantifikovat potřebný výkon pomocí výpočtu SNR a maximální hodnoty křížové korelace pro jednotlivé frekvence. Z obrázku 5.2 je možné stanovit vyšší citlivost senzoru v nízkých frekvencích. Ve vyšších frekvencích prakticky nelze rozlišit signál od šumu. To je způsobeno silou vibrací, které reproduktor generuje. Pro vyšší citlivost by bylo nutné přichytit vlákno přímo na membránu reproduktoru. Fixace k membráně by však způsobila chyby z důvodu nepřesné charakteristiky přenosu vibrací z membrány na kabel.

Výsledky výpočtů SNR ¹ pro jednotlivé frekvenční schody můžeme vidět na obrázku 5.3. Pro účely srovnání jsou tyto výsledky v testovacím rozsahu mezi $-5,45$ a $+1,25$ dBm, protože vyšší výkony nemají příliš smysl, jelikož je zde generováno zbytečně moc šumu a zároveň při aplikaci na reálné trase málokdy dosáhneme takových koncových výkonů. Při srovnání SNR jednotlivých frekvencí je vidět největší SNR

¹<https://www.mathworks.com/help/signal/ref/snr.html>

u nízkých frekvencí 60 a 120 Hz. Na ostatních frekvencích je SNR zanedbatelné. To je způsobeno vibrací celé ozvučnice reproduktoru basovým reproduktorem, zatímco při vyšších frekvencích přecházíme ke středobasům a výškám, které tolik nerezonují.



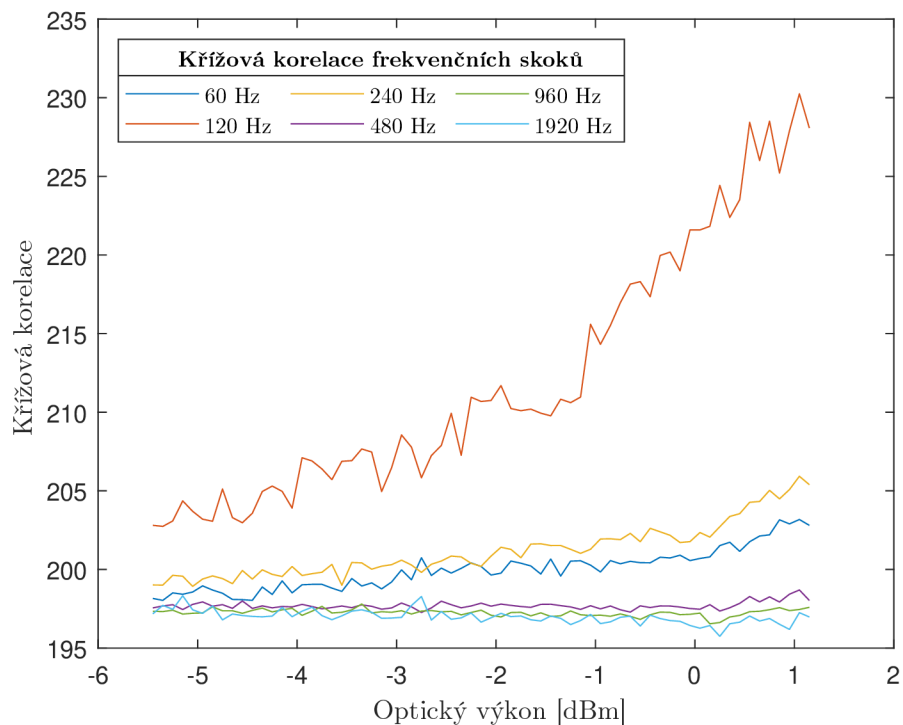
Obr. 5.3: Porovnání SNR na jednotlivých hodnotách výkonu.

Z pohledu podobnosti signálu byl porovnán signál z mikrofonu se signálem z optického senzoru. Na obrázku 5.4 je možné vidět vyšší podobnost signálů v nižších frekvencích konkrétně u 60, 120 a 240 Hz. Pro porovnání signálů byla použita funkce křížové korelace a pro každou z hodnot výkonu byla brána maximální hodnota křížové korelace v absolutní hodnotě². Tyto hodnoty jsou následně vykresleny do grafu. Zde je možné vidět, že podobnost signálů je vyšší v nižších frekvencích u hodnot optického výkonu okolo -5 dBm [24].

5.2 Srovnání citlivosti MZI a polarizačního senzoru

Porovnání citlivosti interferometru a polarizačního analyzátoru můžeme dosáhnout dvěma způsoby. Prvním z nich je vytvoření standardizovaných testů a následného proměření jednotlivých metod samostatně. Druhým, podstatně jednodušším způsobem je vytvoření konfigurace kombinující obě metody. Na obrázku 5.5 je možné vidět

²<https://www.mathworks.com/help/signal/ug/measuring-signal-similarities.html>

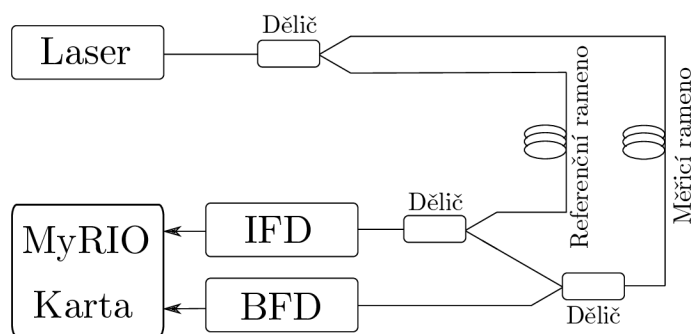


Obr. 5.4: Porovnání podobnosti signálů pomocí křížové korelace.

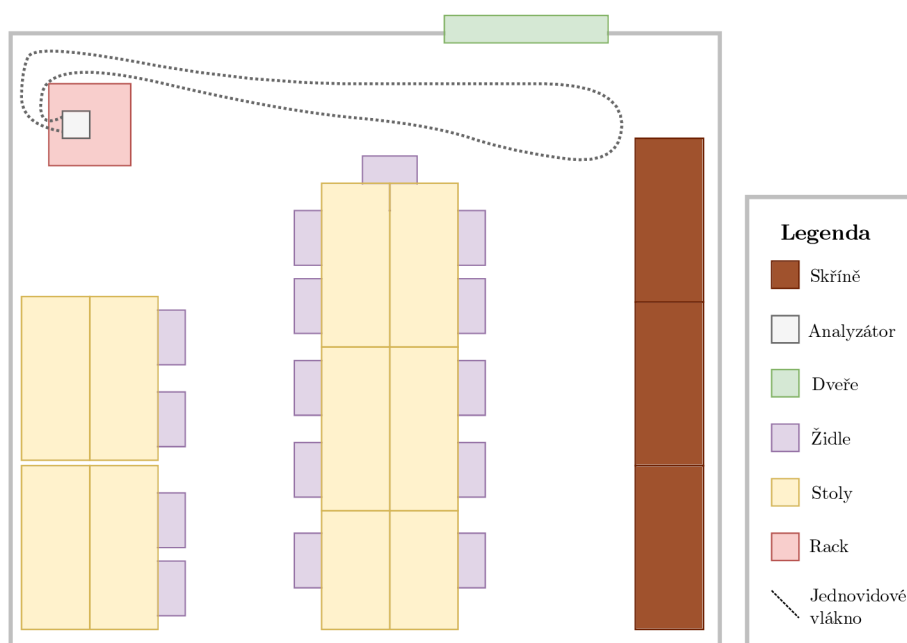
schéma zapojení. Obě metody využívají jednoho laseru a jednoho ADC pro minimalizaci nepřesností způsobených použitím odlišných komponent. Světlo vyzařované laserem je nejprve rozděleno děličem 50:50 do snímaného a referenčního vlákna. Referenční vlákno má stejnou délku jako snímané a je smotané uvnitř analyzátoru. Měřicí rameno je na konci opět rozděleno 50:50 do systému pro detekci polarizace BFD a do děliče, který opět spojí snímané a referenční rameno. Tato větev je přivedena na interferenční fotodetektor (IFD). Signály z obou FD jsou následně pomocí ADC v myRIO kartě odeslány na server pro uložení. Jelikož jsou oba systémy vzorkovány frekvencí 8 kS/s, byl zvolen formát HDF5, který je vhodný pro velké datové soubory. MyRIO ve skutečnosti vzorkuje každý systém frekvencí sedmkrát vyšší, tj. 56 kS/s, a vzorky jsou poté přímo v myRIO průměrovány do výsledných 8 kS/s.

Měřené vlákno pro demonstraci bylo vyvedeno z racku do podhledu laboratoře viz, 5.6. Laboratoř je vybavena stoly, židlemi a skříní. Cílem měření bylo vyzkoušet možnou detekci vibrací způsobených otevřením vchodových dveří do místnosti a otevření rackových dveří.

Výsledky měření jsou vidět na obrázcích 5.7 a 5.8. Obrázek 5.7 znázorňuje průběhy naměřené při otevírání rackových dveří. Konkrétně se jedná o tři otevření a zavření rackových dveří. Z průběhů je možné vidět, že takovéto narušení bezpečnosti může být detekováno jak systémem založeným na PBS, tak interferometrem. Dále je možné si všimnout, že měření MZI je mnohem citlivější než měření pomocí



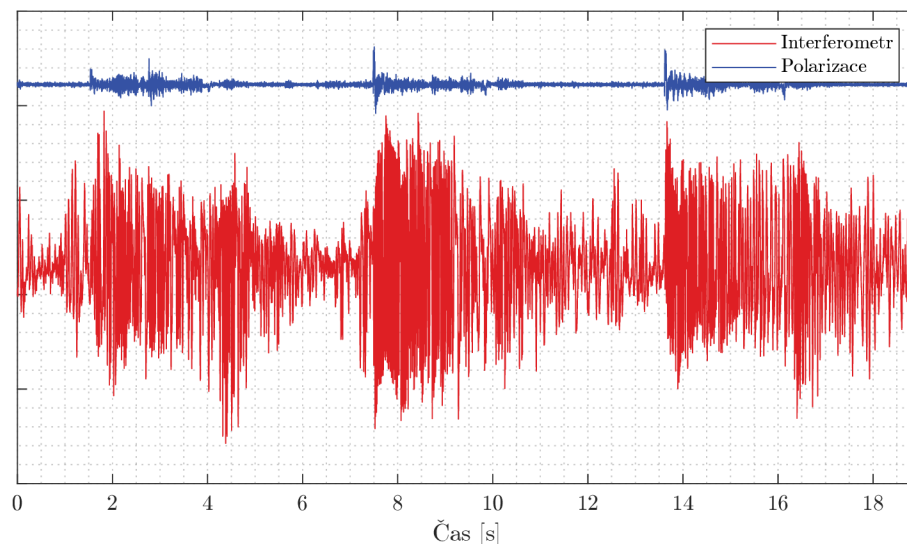
Obr. 5.5: Zapojení systému pro porovnání MZI a polarizačního detektoru.



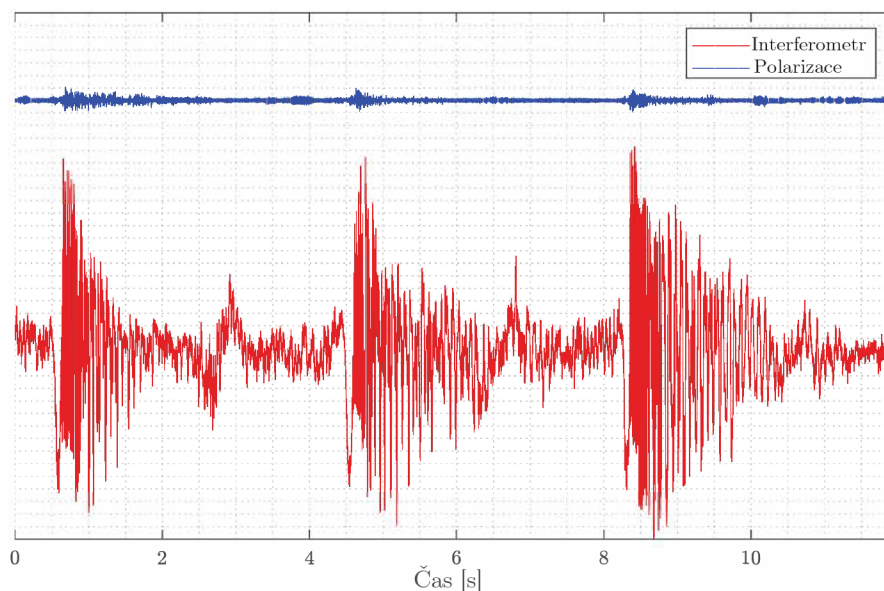
Obr. 5.6: Schéma laboratoře, kde bylo testování realizováno.

PBS a balančního fotodetektoru. Co se týče rychlosti ustalování signálů do klidového stavu, v tomto případě je viditelné, že polarimetr se ustaluje rychleji, což je způsobeno právě jeho nižší citlivostí oproti interferometru a rozvibrováním racku způsobeným zavřením dveří.

Na obrázku 5.8 je zobrazeno otevření a zavření dveří do laboratoře (dveře jsou znázorněny na obrázku 5.6 zelenou barvou). Výchyvky amplitud jsou menší a ustalování do klidového stavu rychlejší. To je způsobeno daleko menší intenzitou vibrací, jelikož rackové dveře jsou v těsné blízkosti optických vláken. Dveře do laboratoře jsou vzdálenější a nemají přímý kontakt s optickým vláknem umístěným ve stropě. V každém případě je možné konstatovat, že lze pomocí těchto systémů zabezpečit prostory optickými vlákny, které jsou náchylné k nežádoucí manipulaci, a tím i k možnému úniku informací.



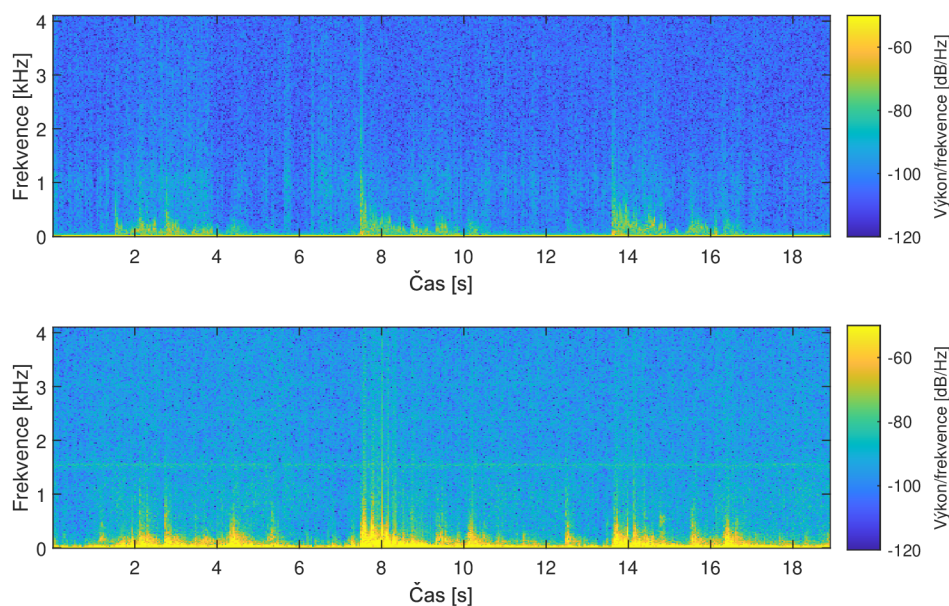
Obr. 5.7: Srovnání metod pro vibrace způsobené otevíráním a zavíráním dveří racku.



Obr. 5.8: Srovnání metod pro vibrace způsobené otevíráním a zavíráním vstupních dveří.

Na obrázku 5.9 jsou náměry z obrázku 5.7 zobrazené ve spektrogramu. I na tomto obrázku je pak vidět, že nejenom intenzita vibrací je u interferometru vyšší, ale interferometr je i citlivější na vyšší frekvence vibrací.

Na základě výsledků měření je možné zhodnotit, že interferometrická metoda je mnohem citlivější pro detekci vibrací, což konkrétně v případě zabezpečení vláken před nepovolenou manipulací může být kontraproduktivní. Většina optické kabeláže v budovách je natažená v podhledech, zdech, nebo podlahách. Tím pádem jsou vy-



Obr. 5.9: Srovnání metod pro vibrace způsobené otevíráním a zavíráním rackových dveří ve spektrogramu.

staveny vibracím způsobeným normálním provozem v budovách, jako jsou například lidé pohybující se po chodbách [13].

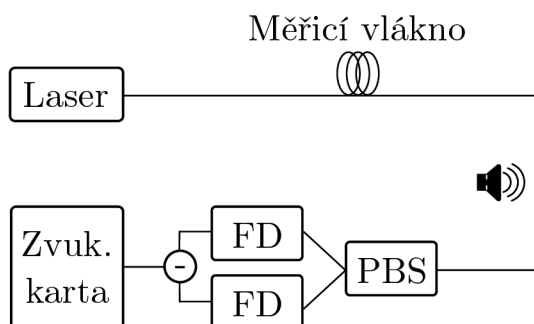
Další výhodou využití analyzátoru polarizačních změn je možná přímá instalace do stávající infrastruktury optických kabelů. Běžnou praxí často bývá předimenzování infrastruktury, kdy se kvůli několika potřebným optickým spojům rovnou natahuje standardní kabel s 12 nebo 24 vlákny, které jsou pak nepoužity a ponechány pro budoucí použití. Analyzátor polarizačních změn je možné tedy napojit přímo na nevyužitá vlákna a tím zabezpečit, jak oba přístupové body, tak kabel se všemi společnými vlákny. U interferometru je vždy nutné počítat s nutnou instalací přídavného referenčního ramene v klidovém stavu, což ve stávající infrastruktuře bývá problematické, nebo využití jiného vlákna ve stejném kabelu.

V případě plného využití stávající infrastruktury, je možné použít vlnový multiplex. To znamená, že je jedna vlnová délka nebo multiplex doplněn o další vlnovou délku pomocí multiplexoru. Tato vlnová délka je využita pouze pro snímání polarizačních změn. Uvedená možnost se volí pouze v případě nedostatečné kapacity optických spojů, což je v praxi méně vídaná situace.

5.3 Měření citlivosti polarizačního analyzátoru v závislosti na konfiguraci systému

V kapitole 2.4 je na mnoha výzkumech dokázána možnost detekce vibrací pomocí snímání polarizačních změn. Tyto výzkumy ovšem neuvádí, jaká je závislost konfigurace systému, použitého optického vlákna, nebo vlnové délky na citlivost senzorického systému. Z tohoto důvodu bylo vytvořeno testovací pracoviště pro snímání akustických vibrací. Na tomto pracovišti bylo testováno několik konfigurací senzorického systému. Jednotlivé konfigurace jsou vidět na obrázcích 5.10, 5.11 a 5.12.

U konfigurace na obrázku 5.10 je vidět základní konfigurace přímé metody, kdy je na jedné straně vlákna laser a na druhé detektor polarizace složený z PBS a dvou FD. Jako zařízení pro sběr dat byla využita zvuková karta, jež má pro snímání akustických vibrací nejlepší předpoklady. Na testované vlákno působí prostřednictvím reproduktoru předem definovaný sinusový signál, který každých 0,7 s změni frekvenci o dvanáctinu oktávy. Tím vznikají frekvenční skoky, jež nám dovolují testovat citlivost optických vláken na větší množství frekvencí harmonického signálu.

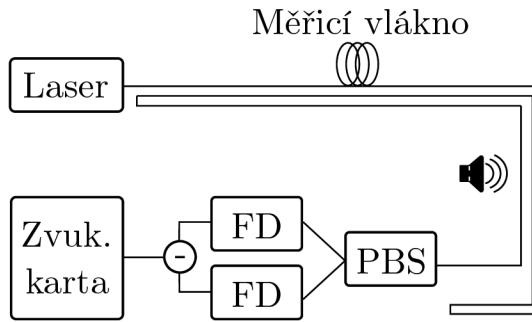


Obr. 5.10: Zapojení systému na detekci vibrací přímou metodou.

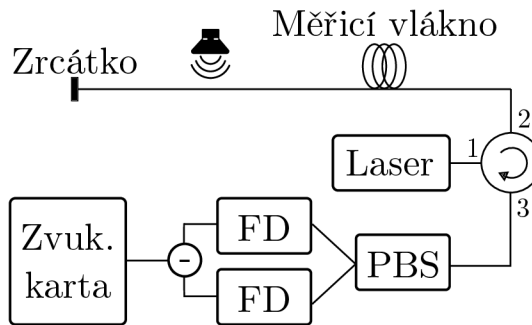
Druhé zapojení na obrázku 5.11 je schématicky stejné jako předchozí, jen je zde optické vlákno dvojnásobné délky přeložené napůl, tím pádem reproduktor působí na vlákno na více místech. U obou přímých konfigurací je výkon laseru nastaven tak, aby při průchodu vlákem měl u PBS totožný výkon 3 dBm, abychom eliminovali vliv výkonu na citlivost.

U třetího zapojení došlo ke změně konfigurace. Do systému byl zapojen cirkulátor, jak je vidět na obrázku 5.12, který záření z laseru přenáší do vlákna, na jehož konci je umístěno Faradayovo zrcátko, jež světlo odráží zpět k cirkulátoru a na PBS. Pro porovnání bylo použito stejné vlákno, jako při první konfiguraci přímou metodou.

Citlivost systému s cirkulátorem byla porovnávána s přímou metodou. V přímé metodě bylo testováno, jaký vliv má vlnová délka záření z laseru na citlivost a také vliv určitých typů vláken. Pro účely testování byl vyměněn obyčejný laser s úzkou



Obr. 5.11: Zapojení systému na detekci vibrací přímou metodou s trojitou smyčkou.



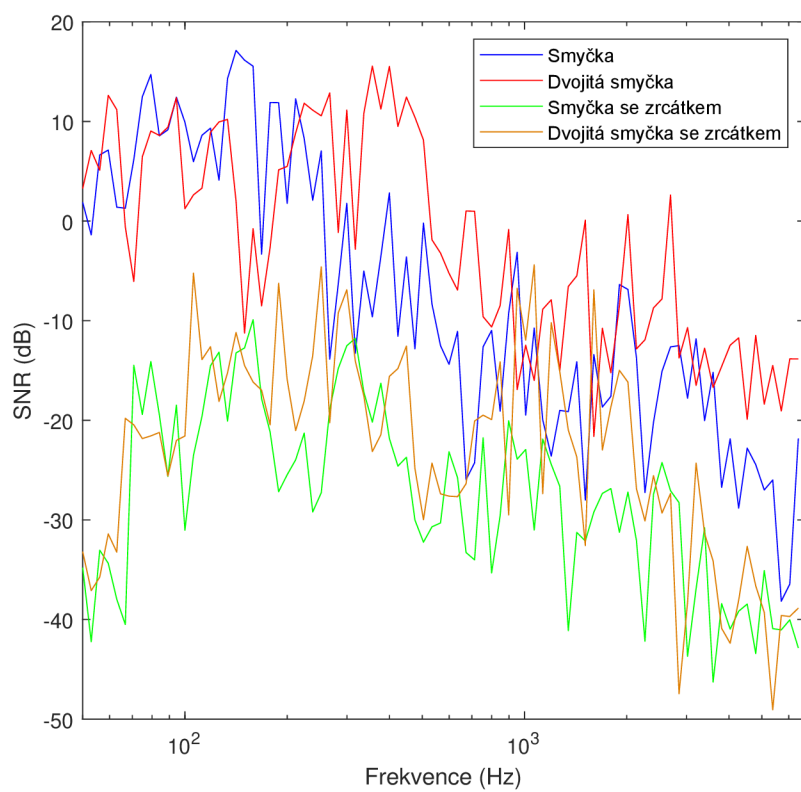
Obr. 5.12: Zapojení systému při použití cirkulátoru a Faradayova zrcátka.

spektrální šířkou za laditelný laser, na kterém je možné otestovat citlivost systému při vlnových délkách vysílaného světla od 1530 do 1565 nm. Výkon změřený u PBS byl opět nastaven na 3 dBm.

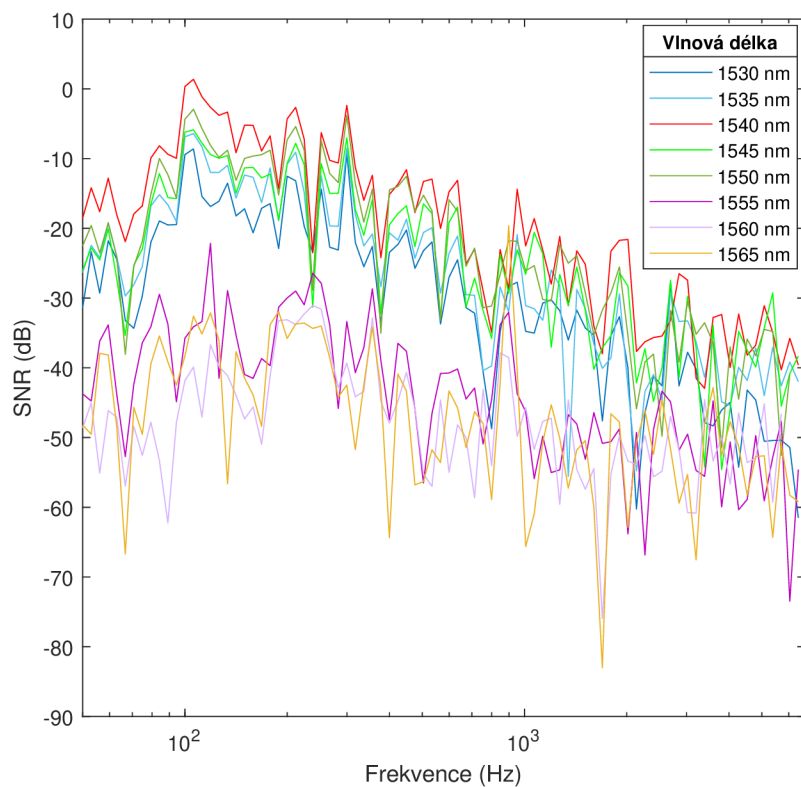
Pro měření závislosti citlivosti na vláknech byly vyzkoušeny tři typy vláken (klasický patchcord, vlákno v primární ochraně a erbiem dopované vlákno). Všechna tři vlákna měla stejnou délku. U tohoto experimentu nebylo možné dodržet výkon u PBS na 3 dBm, jelikož erbiem dopované vlákno má mnohonásobně větší útlum než zbylá dvě vlákna, tudíž byla zvolena hodnota 0 dBm, maximální hodnota, které bylo možno pomocí laditelného laseru dosáhnout.

Pro srovnání citlivostí byla opět použita metoda výpočtu SNR ve frekvenční oblasti ze vzorce 4.1. Z porovnání SNR ve frekvenční oblasti jednotlivých konfigurací je zřejmé, že přímá metoda je mnohem citlivější než metoda využívající cirkulátor, jak je vidět na obrázku 5.13. To je patrně způsobeno tím, že Faradayovo zrcátko má přímý vliv na polarizaci a tím měření velice negativně ovlivňuje. Z grafu je možné si také všimnout, že ve většině frekvenčních skocích dosahuje většího SNR konfigurace s přeloženým vláknem. Z toho plyne, že čím větší plocha vlákna je danou frekvencí ovlivněna, tím větší šance je její přesnější detekce [26].

Dále je porovnáván vliv vlnové délky na SNR ve frekvenční oblasti, kde na obrázku 5.14 můžeme pozorovat, že vlnové délky od 1555 nm do 1565 nm dosahují



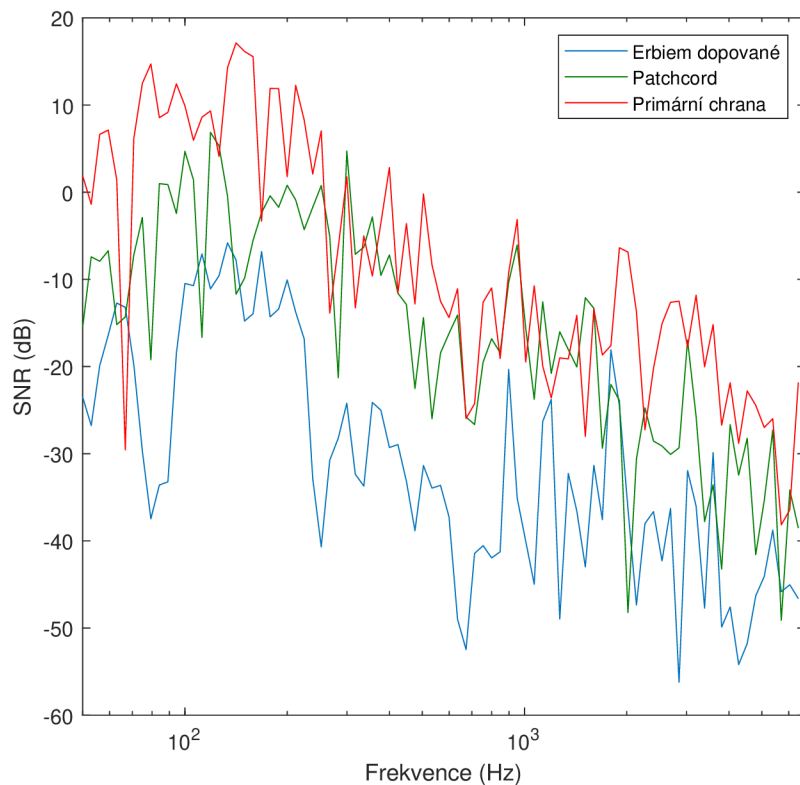
Obr. 5.13: Porovnání SNR ve frekvenční oblasti podle konfigurace.



Obr. 5.14: Porovnání SNR ve frekvenční oblasti podle vlnové délky laseru.

nižšího SNR ve frekvenční oblasti než ostatní vlnové délky. Nejlepších výsledků pak dosahuje vlnová délka 1540 nm. Pozoruhodné je, že tvary křivek pro jednotlivé vlnové délky si jsou velice podobné a liší se pouze jejich posunutí.

Pro měření vlivu typu vlákna bylo zvoleno zapojení přímé metody z obrázku 5.10. Výsledky z tohoto měření odpovídají předpokladům, jak je vidět na obrázku 5.15, nejlepšího SNR ve frekvenční oblasti dosahuje vlákno v primární ochraně, následované patchcordem a nejhorší výsledky má erbiem dopované vlákno. Předpoklad tohoto měření počítal, že čím větší má vlákno opláštění, tím méně citlivé na vibrace bude, což se potvrdilo.



Obr. 5.15: Porovnání SNR ve frekvenční oblasti podle typu vlákna.

5.4 Detekce kolejových vozidel na základě polarizačních změn

V rámci tohoto měření byly využity dva systémy pro měření vibrací způsobených vlaky pohybujícími se po železnici. Cílem bylo určit, jak jsou jednotlivé systémy citlivé a otestovat možnosti využití algoritmů strojového učení pro klasifikaci událostí, konkrétně o rozlišení klidového stavu od projíždějícího vlaku.

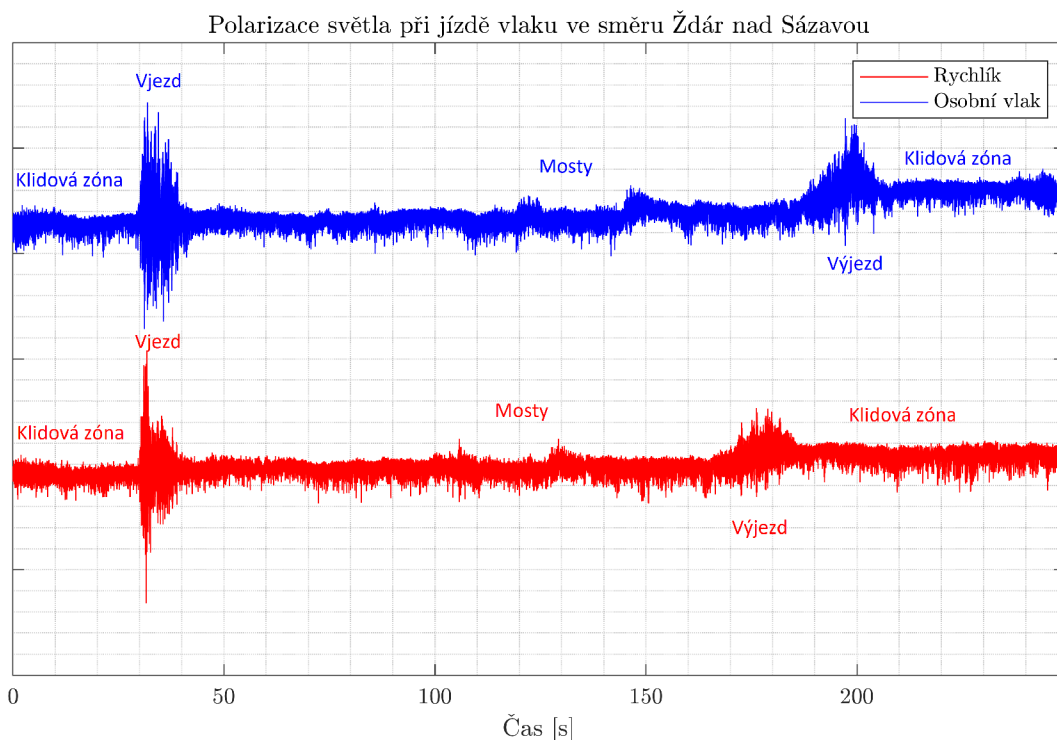
Referenční měření polarimetrem

Základem senzorického systému je komerční 4-diodový polarimetr, který je doplněn o hardwarové zesílení pomocí tranzistorové logiky poměrem $0,9\times$, $1\times$, $5\times$ a $10\times$ [5]. Ze všech čtyř výstupů z fotodiod je tedy nutné zvolit zařízení schopné vzorkovat minimálně čtyři kanály se vzorkovacím kmitočtem alespoň 1 kS/s. Pro tuto konkrétní aplikaci bylo vybráno zařízení od National Instruments myRIO-1950. Toto zařízení je schopné snímat až 12 kanálů při maximální vzorkovacím kmitočtu 500 kS/s (při využití pouze jednoho kanálu). Při využití více kanálů se maximální vzorkovací frekvence dělí počtem kanálů, tudíž při využití čtyř kanálů jsme schopni dosáhnout až 125 kS/s. V praxi však tato hodnota bude podstatně nižší, z důvodu určitého předzpracování dat samotným myRIO. Maximální hodnota, kterou se podařilo naprogramovat, byla 6,5 kS/s a při experimentu byla kvůli velkému množství dat snížena na 5 kS/s, což odpovídá 20 000 vzorků za sekundu. Pro generování záření je použit zpětnovazební laser s vlnovou délkou 1550 nm a spektrální šířkou čáry 3 MHz. a samotné vlákno použité ke snímání, které je zakopáno v nezámrazné hloubce u železniční tratě a prochází podél celé trati, jen v místech mostů je vyvedeno mimo dosah vibrací. Existuje pouze jedna výjimka, kde je vlákno připevněno přímo ke konstrukci mostu.

Polarimetr je citlivý jak na pomalé změny polarizace (změna teploty), tak i na rychlé změny (vibrace). Na obrázcích 5.16 a 5.17 jsou vidět signály z polarimetru pro průjezdy osobního vlaku a rychlíku snímaným úsekem v obou směrech. U obrázku 5.16 jsou na první pohled vidět výchylky amplitudy při průjezdu vlaků přes místa, kde vznikají největší vibrace. Jedná se o vjezd do úseku, kde vlak projíždí nádražím a přejíždí železniční výhybky, vjezd na dva mosty, které se na trase nachází, a výjezd z měřeného úseku. Pro rozlišení typu vlaku se pak využívá porovnání časů jednotlivých průjezdů. Průjezd úsekem trvá rychlíku přibližně 150 sekund, zatímco průjezd osobního vlaku přibližně 180 sekund.

U opačného směru, který je vidět na obrázku 5.17, je jasně patrný rozdíl signálů mezi jednotlivými směry jízdy. Toto je pravděpodobně způsobeno profilem trasy, kde se najíždí do úseků, jako jsou mosty, z každé strany jinou rychlostí atd. Tato charakteristika pak umožňuje na první pohled poznat směr jízdy vlaku. Na obrázku 5.17 je také lépe zřetelný druhý ukazatel, podle něhož je možné určovat typ vlaku. Pokud vezmeme jako dominantní zdroje vibrací mosty, můžeme si všimnout šířky jednotlivých přejezdů po mostě, což je způsobeno délkou vlaku. Ze znalosti délky, nebo alespoň obecně známých předpokladů (rychlík má více vagonů než osobní vlak) je možné opět učit typ vlaku.

To potvrzuje obrázek 5.18, kde je vidět porovnání dvou typů vlaků, a to dlouhého nákladního vlaku s cisternami a lokomotivy bez vagonů. U obou vlaků se jedná



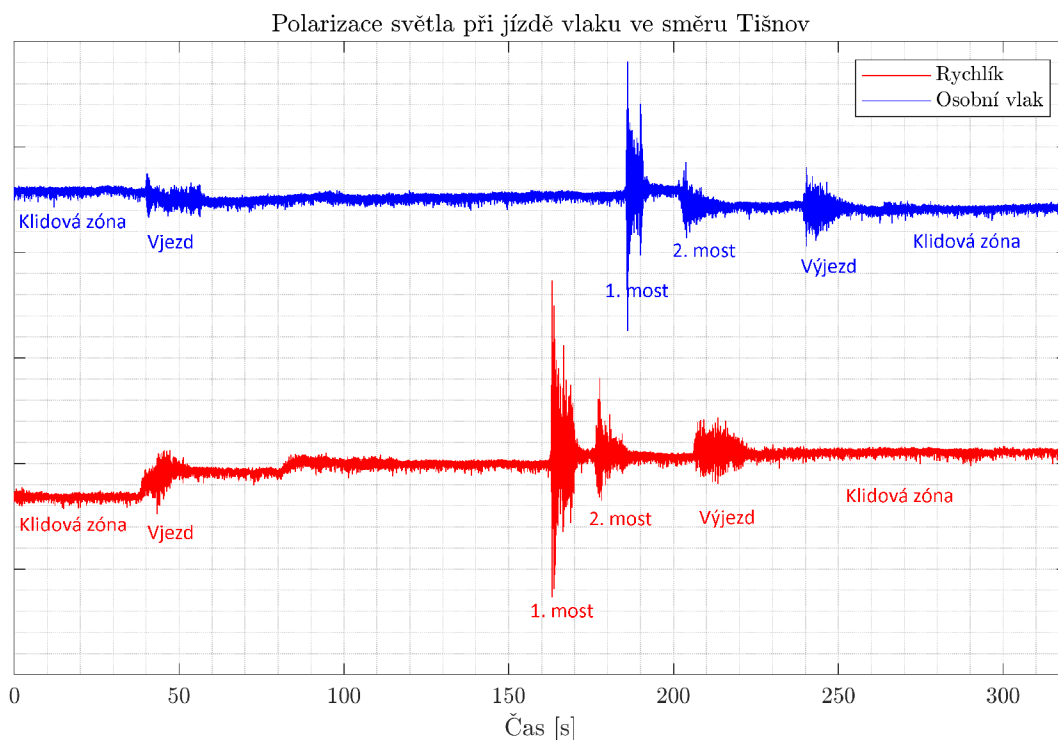
Obr. 5.16: Porovnání signálů z polarimetru pro směr Žďár nad Sázavou pro dva typy vlaků.

o noční průjezdy. Opět můžeme jasně určit směr podle dominantních výchylek na mostech a dále také typ. Jelikož je lokomotiva velice krátká, je v dominantních úsecích (mostech) velice krátkou dobu, zatímco u nákladního vlaku se dominantní úseky téměř překrývají, což je způsobeno právě délkou vlaku, která částečně zasahuje do obou dvou mostů. Je zde také možné pozorovat další identifikátor typu vlaku, a to je výchylka stavu polarizace. Vlaky s větší hmotností způsobují silnější vibrace a tím i větší výchylky ve změnách polarizace.

Přehled toku dat navrhovaného strojového učení je znázorněn na obrázku 5.19. Tento systém je navržen pro snadné nasazení v reálném čase. Je zřejmé, že jediná změna oproti trénovacímu procesu bude spočívat v použití dalšího koncového bodu systému. Namísto získávání dat ze souboru dat budou data přijímána z internetu.

Vzhledem k jedinečnému zaměření tohoto experimentu bylo nutné vytvořit vlastní soubor dat, protože žádný podobný soubor dat není v současné době k dispozici. Výsledkem je soubor dat obsahující dvě sledované kategorie. Konkrétně se jedná o 18 náměrů klidového stavu a 58 náměrů projíždějícího vlaku. Každý soubor obsahuje výsledky měření ze čtyř kanálů. Hodnoty uvedené v tabulce 5.1 odpovídají počtu vzorků dat po rozdělení na menší segmenty.

Pro další následné zpracování bylo nutné upravit strukturu získaných dat, protože surová data získaná z polarimetru nebyla vhodná pro použití jako vstup pro



Obr. 5.17: Porovnání signálů z polarimetru pro směr Tišnov pro dva typy vlaků.

Tab. 5.1: Přehled velikosti jednotlivých datových souborů.

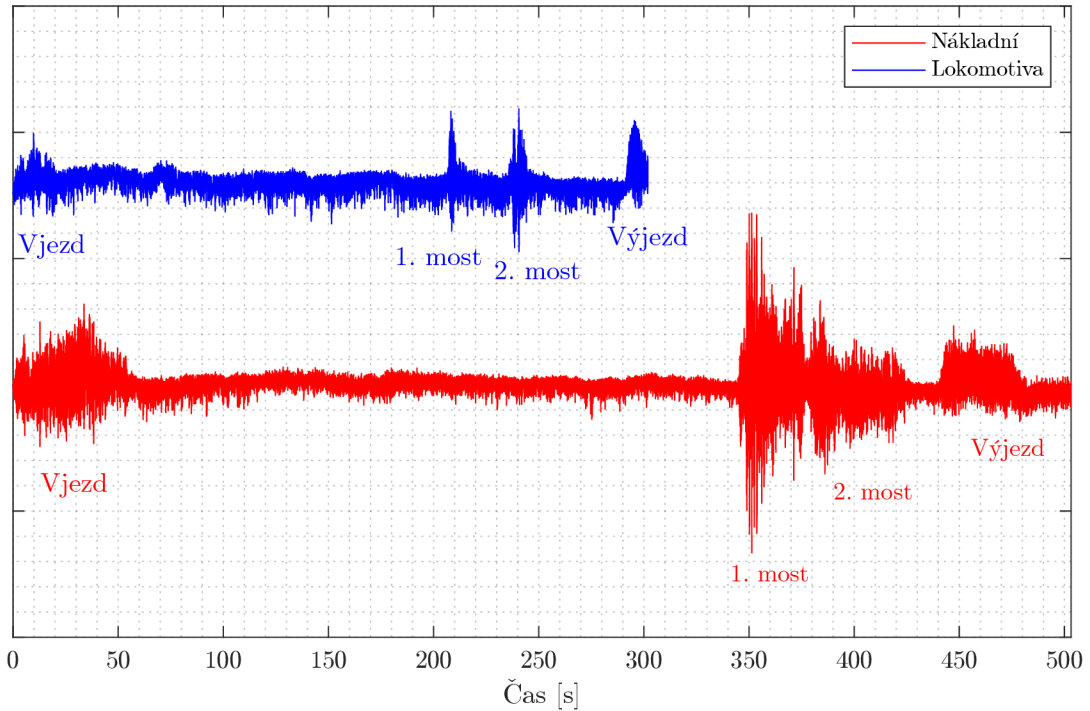
Data set Třída	Trénink	Validace	Testování
Klid	758	110	221
Vlak	2 051	355	771

neuronovou síť. Třemi hlavními důvody pro to jsou: délka toku surových dat, vysoká frekvence vzorkování a rozsah hodnot, kterých mohou vstupní data nabývat.

Nejprve byl proud surových datových signálů rozdělen na menší části (2 000 vzorků) a poté čtyřikrát podvzorkován. Pro zachování určitého kontextu se jednotlivé části dat překrývají o 25% (500 vzorků). Jedná se o techniku tzv. klouzavého okna, která umožňuje zabránit přetrénování modelu a také zvyšuje schopnost generalizace. Často se používá pro klasifikaci časových řad pomocí rekurentních nebo konvolučních neuronových sítí [191]. Poslední operací v rámci předzpracování dat je škálování dat v rozsahu 0,1 až 0,9.

Na základě bližšího zkoumání souboru dat je také možné určit, zda se v daném případě jedná o regionální, dálkový nebo nákladní vlak. To je velmi dobrý základ pro rozšíření této práce a případné navržení sensorového systému, který by bylo možné využít v praxi k posílení bezpečnosti železničních tratí.

Polarizace světla při jízdě vlaku ve směru Tišnov

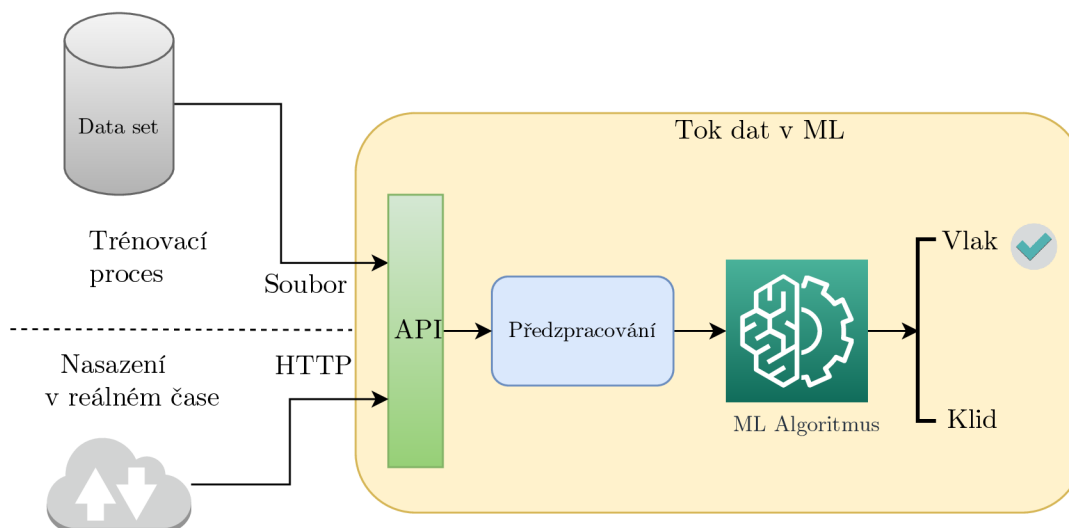


Obr. 5.18: Porovnání signálů z polarimetru pro směr Tišnov pro dlouhý nákladní vlak a lokomotivu bez vagonů.

Tab. 5.2: Matice záměn s výsledky modelu na souboru testovacích dat

		Předpoklad		
		Třída	Klid	Vlak
Skutečnost	Klid	218	3	
	Vlak	9	702	
Přesnost		98,71%		

V tomto experimentu byl navržen proces předzpracování dat a model neuronové sítě založený na konvoluční neuronové síti. Dále byl tento model natrénován na vlastní sadě dat a otestován na nezávislých datech. Získaný model dokáže klasifikovat stav nečinnosti a průjezd vlaku s přesností 98,71 %, jak je vidět z matice záměn v tabulce 5.2. Navržená metoda byla optimalizována s ohledem na své možné nasazení v reálném čase. Hlavním cílem tedy bylo umožnit klasifikaci s rychlou reakční dobou. Toho bylo dosaženo rozdělením toku vstupních dat na krátké sekvence [10].



Obr. 5.19: Přehled toku dat v systému detekce vlaků.

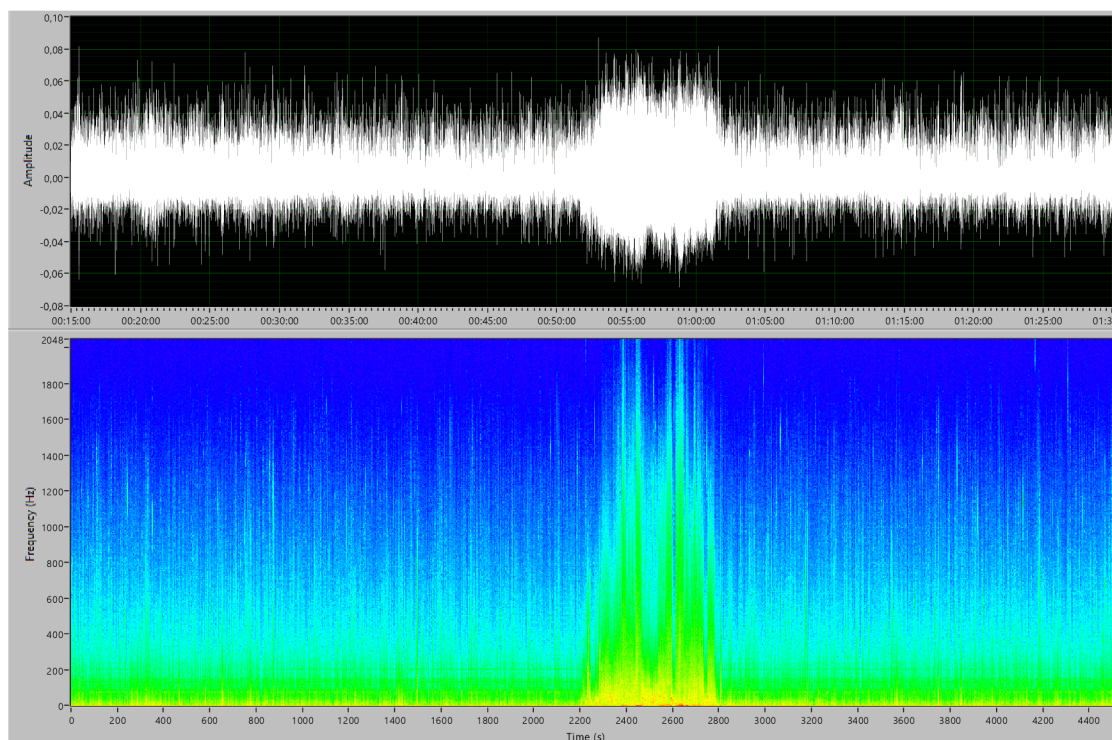
Využití PBS

Konfigurace pro měření změn polarizace se skládá z nízkošumového laseru s vlnovou délkou 1550 nm, spektrální šířkou 5 MHz a výstupním výkonem 5 dBm, který byl spuštěn v režimu spojitě vlny bez modulátoru, PBS a BFD. Snímané jednovidové vlákno bylo totožné s předchozím experimentem. PBS slouží k rozdělení paprsku podle ortogonálních rovin polarizace. Tyto dvě větve jsou následně snímány BFD, čímž dochází ke snímání změn ve stavech polarizace. BFD se skládá z InGaAs fotodiod s rozsahem 900–1700 nm a maximálním vstupním výkonem 1,5 mW.

Pro záznam dat bylo využito zařízení se dvěma analogovými vstupy, rychlostí vzorkování 125 MS/s a rozlišením 14 bitů (Red Pitaya STEMLab 125-14). Zřízení bylo přeprogramováno, aby sloužilo jako server odesílající data do obslužného PC opatřeného TCP klientem v programu Matlab pro ukládání dat. Rychlost byla omezena decimací 4096, což odpovídá $125.000.000/4096$, tj. 30,518 kS/s. Vzhledem k délkám naměrů, které byly dlouhé i několik týdnů, byla daná vzorkovací rychlost dostatečná, aby zároveň zachycená data nezahltila disk.

Ověřování funkčnosti zapojení probíhala původně jen několikaminutovými naměry, ale následně délka naměrů dosahovala desítek minut, kvůli možnosti záznamu projetí vlaku celým úsekem. Validace projetí vlaku byla prováděna vizuálně na začátku testovací trasy v místě uložení laseru, BFD a desky Red Pitaya. Jakmile došlo k ověření funkčnosti byla zaznamenávána data po týdnech. Původně zvolený formát čárkou oddělených hodnot (Comma-Separated Values – CSV) byl následně převeden na formát systému správy technických dat (Technical Data Management System – TDMS) využívaný NI LabVIEW. Data byla poté rozsegmentována do souborů o velikosti 1 hodiny záznamu pro lepší manipulaci.

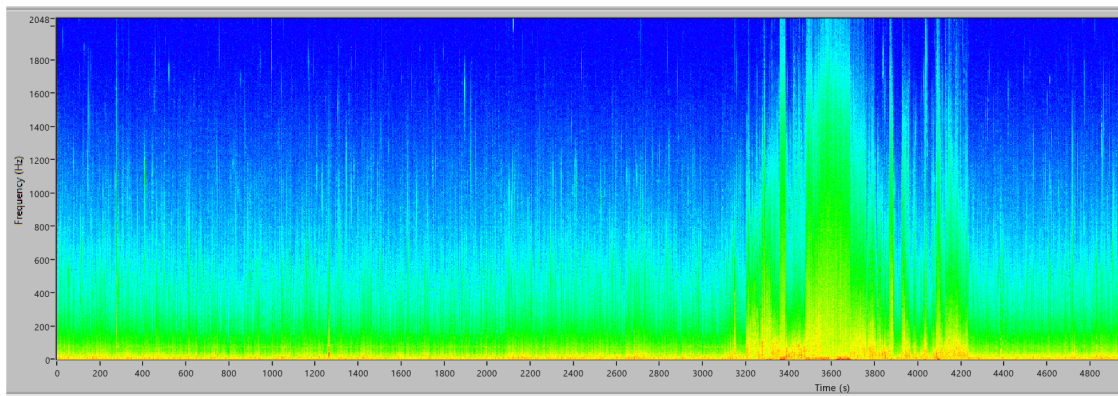
Signál je díky útlumu trasy a následnému dělení PBS relativně slabý, což způsobuje, že je amplituda signálu v časovém grafu malá nebo se nachází v šumu. Z tohoto hlediska tak není možné přesně určit, zda se ve sledované oblasti pohybuje vlak. Signál je tedy nutné převést do frekvenční oblasti a zobrazit ve spektrogramu. Pro nastavení okna spektrogramu bylo zvoleno na Hanningovo okno o délce 4096 s časovým posunem okna odpovídajícím vzorkovací frekvenci, tudíž 30517. Oba typy grafu jsou zobrazeny na obrázku 5.20.



Obr. 5.20: Noční průjezd lokomotivy v klidovém stavu zobrazen ve spektrogramu.

Na obrázku 5.20 je vidět rozdíl ve viditelnosti průjezdu lokomotivy v grafu v čase a ve spektrogramu. Zatímco v časové oblasti je možné průjezd pozorovat pouze na základě znalosti pozorovatele, že vlak projíždí, ve spektrogramu lze pozorovat průjezd jasně.

Jako důkaz porovnatelnosti jednotlivých typů vlaků slouží obrázek 5.21. Na tomto obrázku můžeme vidět průjezd nákladního vlaku, zvýšení intenzity vibrací, tak i zároveň zvýšení doby průjezdu, tudíž stejné fenomény, co byly vidět v předchozí detekci pomocí polarimetru. Na obrázku 5.20 je vidět průjezd lokomotivy trvající pouze 600 sekund zatímco na obrázku 5.21 nákladní vlak s časem 1000 sekund. Delší průjezd vysvětluje pomalejší rychlost nákladního vlaku. Větší intenzitu vibrací vysvětluje hmotnost naloženého nákladního vlaku [14].

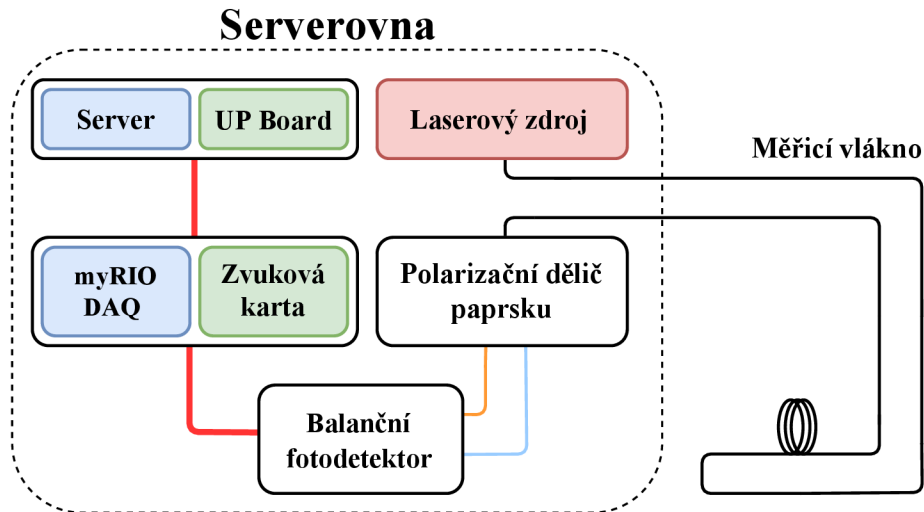


Obr. 5.21: Noční průjezd nákladního vlaku v klidovém stavu zobrazen ve spektrogramu.

6 Zabezpečení fyzické vrstvy proti nežádoucí manipulaci

Jedinečnou vlastností navrhovaného systému je, že k ochraně fyzické vrstvy se používá detekce polarizace, která je doplněna použitím algoritmů strojového učení pro klasifikaci událostí, což umožňuje snadné nasazení systému. Největšími výhodami navrhovaného systému jsou nízké náklady, možnost nasazení v reálné infrastruktuře a kompaktnost. Systém dokáže snímat vibrace pomocí nepoužívaných vláken v kabelu a zajistit tak bezpečnost celého kabelu [28].

Experimentální sestava použitá k testování systému pro zabezpečení fyzické vrstvy se skládá ze dvou částí. První část slouží k výpočtům a skládá se z počítače a zařízení pro snímání zvukových signálů. Druhou část tvoří optický systém s laserovým zdrojem (nízkošumovým zpětnovazebním laserem s vlnovou délkou 1550 nm a typickou šířkou spektrální čáry 3 MHz), PBS a BFD (složeným z fotodiod InGaAs s vlnovými délkami 900–1700 nm a šířkou pásma signálu 100 MHz při 3 dB). Celá sestava je umístěna v serverovně, z níž vede optické vlákno ven z budovy v rámci testovací infrastruktury. Celá konstrukce je znázorněna na obrázku 6.1, kde jsou optická spojení vyznačena černě, oranžově a modře. Signálové a napájecí spoje jsou vyznačeny červeně.

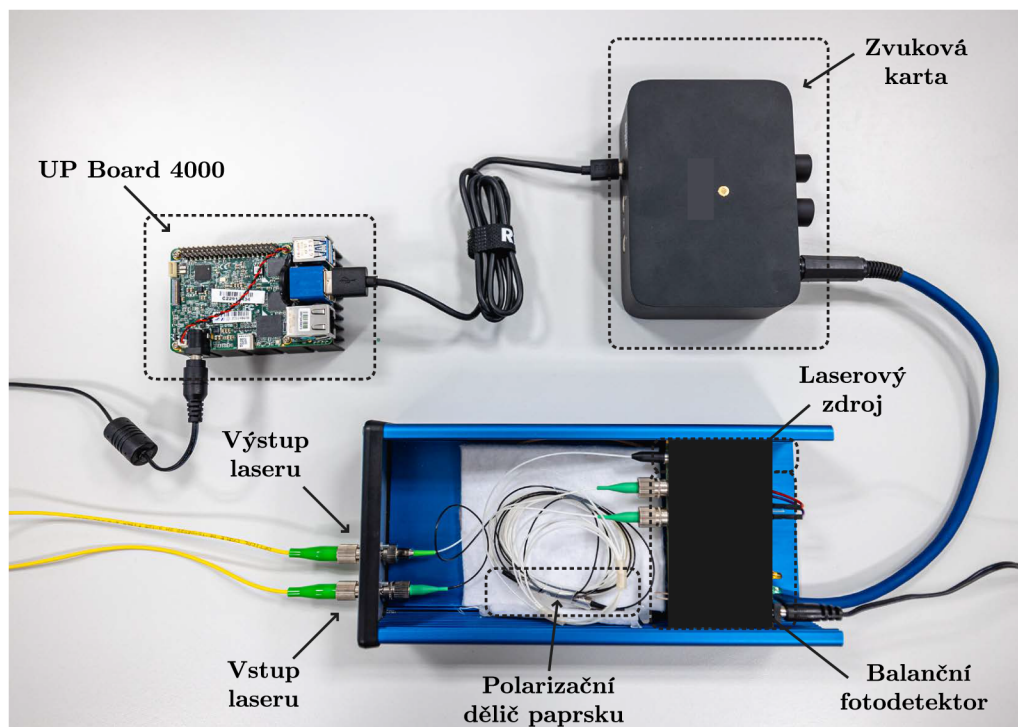


Obr. 6.1: Schéma navrhovaného systému pro ochranu fyzické vrstvy.

Výpočetní část (označená modře) se původně skládala ze serveru a desky NI myRIO. Nedostatečně nízká vzorkovací frekvence 8 bitů/20 kHz však měla za následek vnášení velkých chyb do měření. Pro optimalizaci výpočetního výkonu a velikosti zařízení byl server nahrazen mikropočítačem UP Board 4000 s procesorem Intel Pentium a 8 GB RAM. Deska myRIO byla rovněž nahrazena externí zvukovou kartou

se vzorkovací frekvencí až 24 bitů/192 kHz. Závěrečná výpočetní část je vyznačena zeleně. Upravené schéma zapojení zajišťuje, že celá sestava má téměř kapesní rozměry.

Pro měření byly použity celkem 3 ADC. V první verzi sestavy byla pro převod signálu použita deska myRIO ADC, která byla v druhé verzi nahrazena dvěma externími zvukovými kartami – kompaktní zvukovou kartou a stolní zvukovou kartou se vzorkovací frekvencí až 96 kHz, resp. 192 kHz. Nejnovější verze experimentální sestavy je zobrazena na obrázku 6.2.



Obr. 6.2: Finální verze sensorového systému se skutečným hardwarem.

V [183] se uvažuje o útocích na fyzickou vrstvu především prostřednictvím manipulace s optickým kabelem. Proto byly zkoumány scénáře měření založené na takových situacích. Měření byla provedena podle několika scénářů. Konkrétně byla provedena přímá manipulace s vláknem dotykem a klepáním, otevření a zavření poklopu šachty, odpojení vlákna (což je důležité pro identifikaci rozpojení trasy) a měření v klidu.

Měření se provádějí na optickém kabelu, jenž prochází celou budovou a poté vede kolem silnice, jak je znázorněno na obrázku 4.15. Délka optické trasy je přibližně 2 km. Na trase optického vlákna se nachází mnoho prvků, které způsobují rušení. Měřicí sestava je umístěna v serverovně s nepřetržitě fungující vzduchotechnikou. Trasa optického vlákna prochází nad stropem podél chodby s vysokou fluktuací osob a pokračuje do nižších pater budovy svislou stoupací šachtou. Poté vede do

venkovní šachty poblíž parkoviště. Šachta je přístupná operátorovi nebo útočníkovi a optické vlákno je přístupné i ze silnice podél trasy optického vlákna do serverovny. Navrhovaný systém se zaměřuje na přímou manipulaci v blízkosti kabelu/vlákna ze strany útočníka. Citlivost systému umožňuje monitorování i v silně rušivém prostředí, tedy v místech, kde by interferometr nebylo možné použít z důvodu vysoké citlivosti.

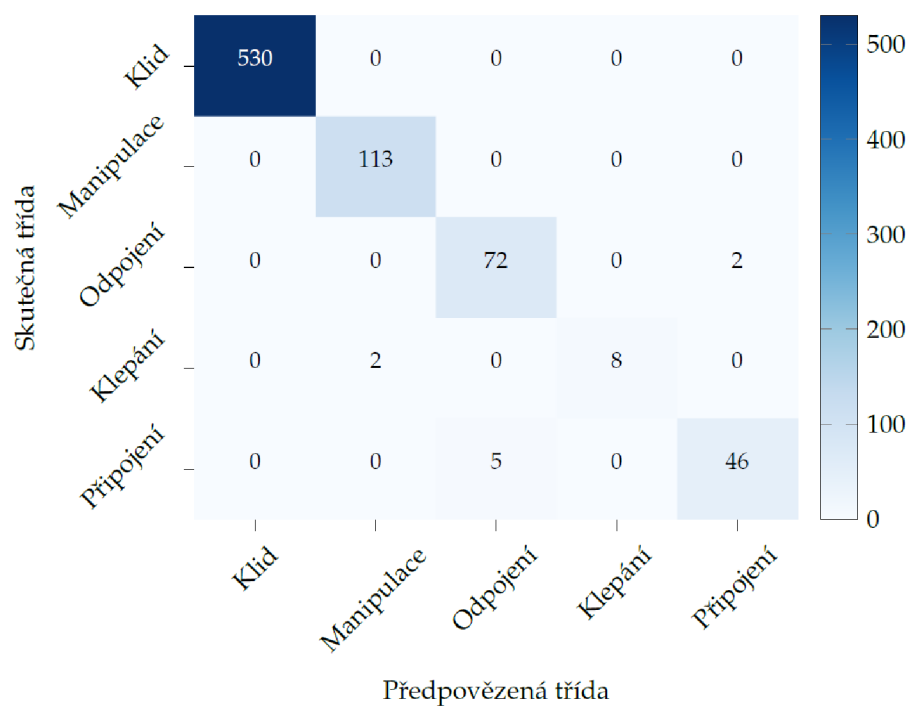
Systém poskytuje jednorozměrná data v časové oblasti se vzorkovací frekvencí 44,1 kS/s, která nejsou vhodná pro další analýzu. Proto jsou data převedena do frekvenční oblasti pomocí jednostranné FFT a normalizována odečtením střední hodnoty.

Každá abnormální událost v souboru dat je označena počátečním a koncovým bodem, čímž jsou pro události vytvořena pole různých délek. Datové pole pro FFT je generováno posuvným oknem o velikosti 8192 prvků, které je po každém vygenerovaném okně posunuto o 820 prvků. Pro každou označenou abnormální událost je tedy vytvořeno několik spektrálních vektorů.

Návrh neuronové sítě se skládá z jednoduché architektury založené na plně propojených vrstvách, jež lze snadno přenést do vestavěných systémů pro analýzu v reálném čase. Vstupní vrstva má 8192 neuronů, aby odpovídala velikosti okna generujícího spektrální vektory. Výstupní vrstva odpovídá počtu tříd, který je roven pěti. Jedinou optimalizovanou částí je střední vrstva. Na základě výsledků několika experimentů odpovídá optimální počet neuronů v této vrstvě 512. Aktivační funkce použitá mezi jednotlivými vrstvami je *sigmoid*, v poslední vrstvě je nahrazena *softmax* funkcí. Tato síť byla trénovaná pomocí algoritmu gradientního sestupu Adam [106], kde byl gradient vypočítaný pomocí křížové entropie [84].

Klasifikační výkonnost se odhaduje pomocí matice záměny vyhodnocené na souboru testovacích dat, která je znázorněna na obrázku 6.3. Navržená metoda je 100% přesná při rozhodování mezi vzorky v běžném stavu a ostatními vzorky odpovídajícími abnormálním událostem. Síť by proto neměla vytvářet žádné falešné popluchy. Uspokojivé přesnosti je dosaženo při určování zbývajících tříd, s výjimkou třídy Klepání, která je chybně klasifikována pomocí Manipulace. Hloubková analýza ukazuje, že události Manipulace obsahují také události Klepání, zejména na začátku.

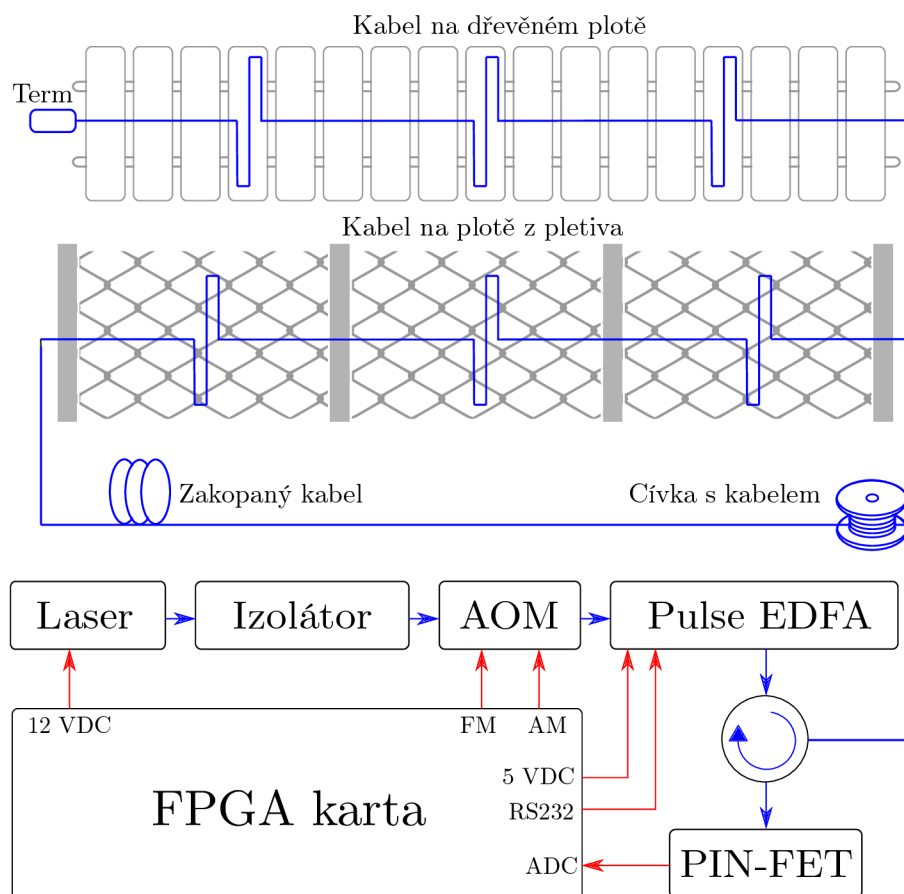
Navržený systém bohužel nedokáže přímo lokalizovat zdroj vibrací. Některé typy vibrací je možné lokalizovat nepřímo na základě znalosti trasy, po níž je vlákno vedeno. Příkladem je odpojení a případné opětovné připojení vlákna, ke kterému může v našem případě dojít pouze v serverovně s omezeným přístupem, protože jinde na trase vlákna nejsou žádné další konektory. Otevření dveří racku lze také určit pomocí rozšíření třídy (např. otevření dveří racku v serverovně 1 a otevření dveří v serverovně 2), protože serverovny mají často různé konstrukce (např. posuvné dveře vs. otevírací dveře).



Obr. 6.3: Matice záměn vyhodnocená na testovacím souboru dat po učení, která ukazuje skutečný výkon navrhované metody klasifikace událostí.

7 Detekce vibrací pomocí Φ -OTDR

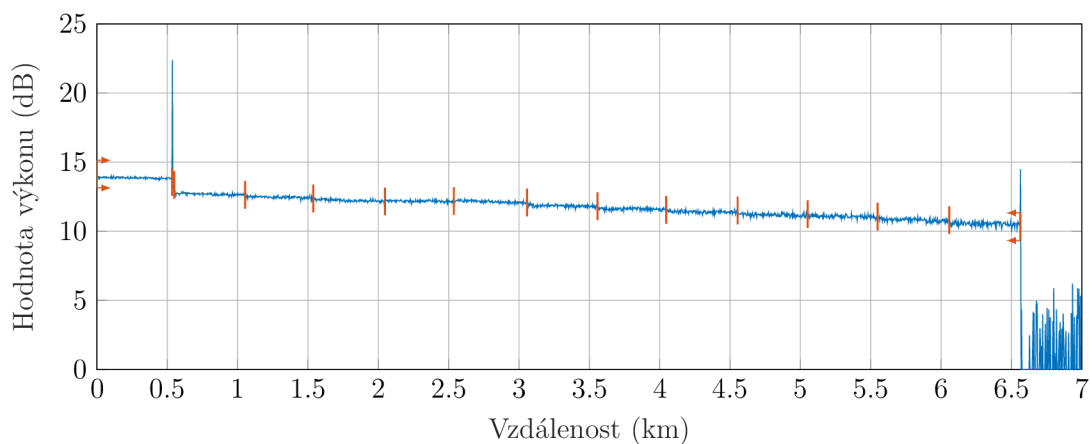
Měřicí systém s testovací trasou je znázorněn na obrázku 7.1. Elektrická část je označena červenou barvou a optická část je označena modrou barvou. Skládá se z laseru s úzkou šířkou čáry (menší než 1 kHz), který generuje optický signál, je následovaný izolátorem chránícím laser před poškozením při odrazu světla zpět ke zdroji. K modulaci signálu se používá akusticko-optický modulátor (AOM). Přes cirkulátor jsou impulsy přenášeny do testovaného vlákna. EDFA zesilovač se používá k zesílení výkonu pulsů před jejich vstupem do cirkulátoru, který směřuje optické pulsy do trasy a zpětné Rayleighovy odrazy z vlákna směřuje do diody PIN-FET ke zpracování signálu. Centrální prvek je FPGA karta, jež napájí laser, vysílá signály do AOM, napájí a komunikuje s EDFA prostřednictvím RS232 a obsahuje ADC, který převádí optický signál z PIN-FET diody na elektrický, jenž se dále zpracovává. Konkrétní nastavení systému pro vytváření dat je v tabulce 7.1.



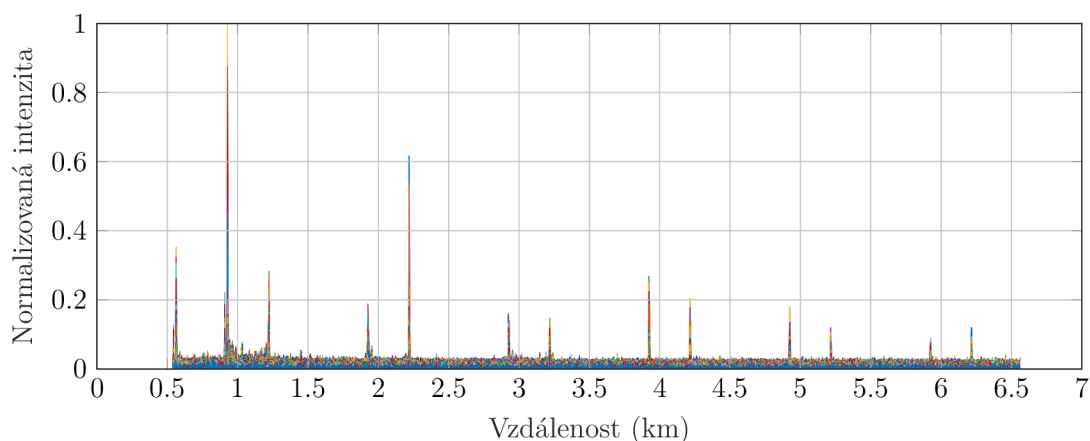
Obr. 7.1: Schéma systému založeného na Φ -OTDR se znázorněním trasy pro přípravu datasetu.

Pro účely testování Φ -OTDR pro zabezpečení perimetru byl instalován 12-vláknový venkovní optický kabel. Délka jedné testovací trasy je 500 m. Jak je vidět na obrázku

7.1, část kabelu je na cívce umístěna ve vnitřních prostorách. Kabel je vyveden do venkovních prostor, kde je zakopán v polyvinylchloridové trubce pod zemí v úseku 60 m. Dále kabel opět vystupuje na povrch a je přichycen na pletivovém plotě v délce 40 m a následně kabel přechází na dřevěný plot v délce opět 40 m. Na obou plotech se vždy mezi nosníky vytvořila smyčka pro zvýšení citlivosti, jak je vidět na obrázku 7.1.



Obr. 7.2: OTDR náměr z testovací trasy.



Obr. 7.3: Detekci chůze je možné vidět 12krát na celé délce 6 km.

Kabel je na obou koncích provařen, takže je složen ze šesti vláken orientovaných směrem k terminátoru a šesti vláken orientovaných ke špulce. Charakteristiku trasy

Tab. 7.1: Parametry Φ -OTDR systému.

šířka pulsu	100 ns
vzorkovací frekvence	250 MHz
opakovací frekvence pulsů	1000 Hz

z OTDR i s vyznačenými sváry je vidět na obrázku 7.2. Trasa se tedy dohromady skládá z předradného vlákna o délce 500 metrů a dvanácti snímacích vláken o délce rovněž 500 m. Celková délka trasy je 6,5 km a je ukončena optickým terminátorem pro eliminaci koncového odrazu. Celkový útlum testovací trasy je 2,853 dB. Měrný útlum je 0,436 dB/km. Průměrný útlum sváru je 0,153 dB, kde maximální hodnota dosahuje 0,210 dB.

Obrázek 7.3 ukazuje intenzitu vibrací po použití Sobelova operátoru o velikosti 5×5 . Je vidět, že intenzita vibrací, a tedy i SNR, klesá se vzdáleností, což je efekt související s klesající úrovní výkonu pulsů. Na obrázku 7.3 můžeme také vidět šest dvojic událostí, které se periodicky opakují.

Experimenty s detekčním systémem Φ -OTDR byly provedeny ve třech různých scénářích. První scénář byl navržen pro detekci venkovní chůze nad kabelem v PVC trubce zakopané zhruba 60 cm pod zemí. Experimenty byly prováděny osobou o hmotnosti přibližně 95 kg s rychlostí chůze 4,5 km/h. Chůze podél vlákna byla realizována dvěma způsoby. Prvním způsobem byla chůze osoby nad kabelem. Druhým způsobem byla chůze podél zakopaného kabelu. Pro porovnání jednotlivých metod detekce hran se používá vzdálenost 2 m od zakopaného kabelu.

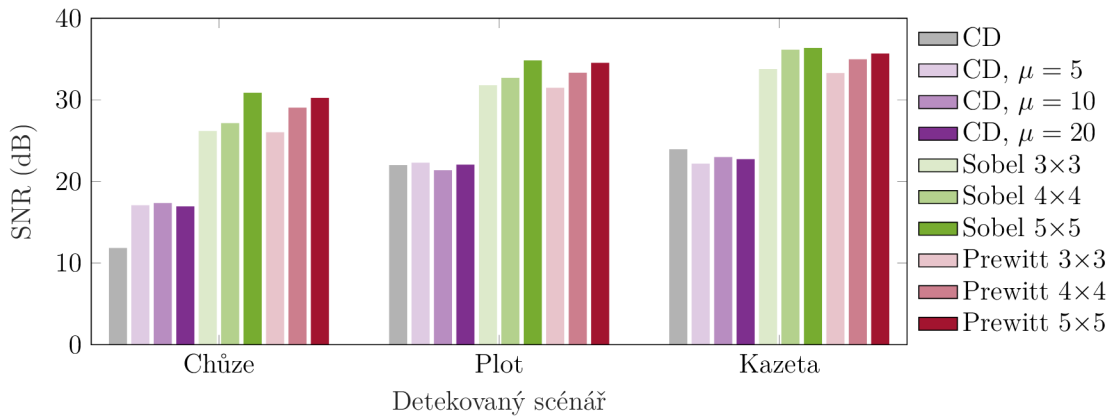
Ve druhém a třetím scénáři bylo simulováno narušení osobou, která mechanicky působila rukou na plot (poklep) a na plastovou skříň optických vláken, kde byla vlákna spojena. Tyto tři scénáře jsou dále označeny jako „chůze“, „plot“, a „kazeta“.

Pro identifikaci poruch na vláknech bylo porovnáno několik různých metod. Nejprve se vypočítala jednoduchá konvenčně diferenční (Conventional Difference – CD) metoda, která sloužila jako referenční. Tato metoda byla použita také společně s metodou klouzavého průměru se třemi různými délkami průměrovacího filtru ($\mu \in \{5, 10, 20\}$). Nakonec byly použity Sobelova a Prewittova metoda detekce hran se třemi různými velikostmi konvolučních jader (3×3 , 4×4 a 5×5).

Jak je znázorněno na obrázku 7.3, 12-vláknový venkovní optický kabel použitý pro snímání způsobuje 12 detekovaných špiček jedné události. Pro výpočet SNR byla použita pouze první špička, která má obvykle největší intenzitu díky vyšší úrovni výkonu pulsů. Úroveň šumu se pak vypočítá jako průměrná úroveň šumu křivky intenzity, která se chápe jako horní obálka jednotlivých intenzit (zpracovaných Rayleighových odrazů).

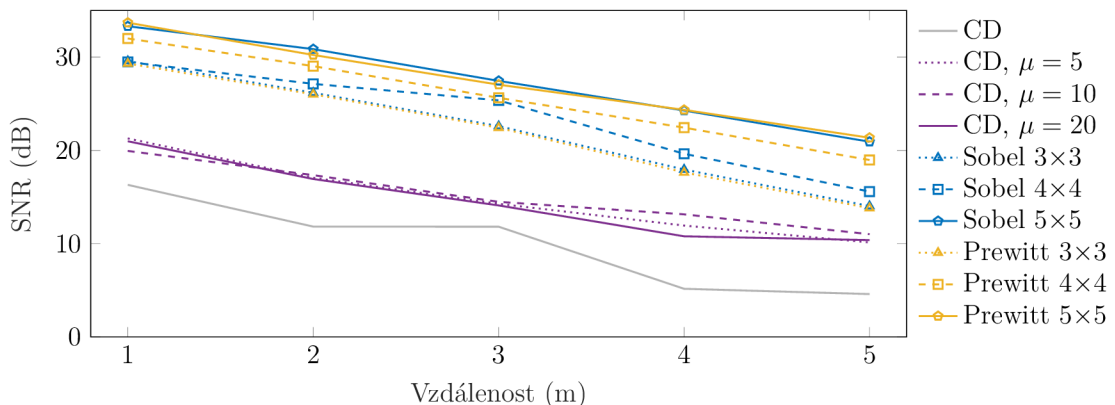
Výsledky SNR získané jednotlivými metodami jsou zobrazeny na obrázku 7.4. Výsledky ukazují, že všechny testovací metody dokázaly úspěšně detekovat vibrace ve všech třech scénářích, nicméně metoda CD dosáhla výrazně horšího SNR. Zdá se, že použití filtru klouzavého průměru na Rayleighovy odrazy před samotnou metodou CD mírně pomáhá v případech, kdy SNR získaná metodou CD není příliš vysoká (například ve scénáři chůze). V tomto případě bylo zlepšení SNR přibližně o 5 dB.

Zdá se však, že průměrování má zanedbatelný, nebo dokonce mírně negativní vliv na dosažený SNR ve scénářích, kde byly poruchy poměrně silné (například klepání na optickou kazetu). Zde průměrování zhoršilo dosažený SNR přibližně o 1 dB.



Obr. 7.4: Porovnání SNR pro jednotlivé metody a scénáře.

Kromě celkového SNR v různých scénářích byla také otestována citlivost navrženého detekčního systému v závislosti na chůzi kolmé k uložení vlákna. Výsledky získané při tomto experimentu jsou uvedeny na obrázku 7.5 a ukazují, že dosažená hodnota SNR klesá přibližně o 3 dB s každým metrem. Ukazuje se, že metoda CD je nedostatečná pro vzdálenosti větší než 3 metry s dosaženou hodnotou SNR přibližně 5 dB, protože hodnota SNR nižší než 6 dB je považována za nedostatečnou a může vést k falešně negativním detekcím. Jak bylo uvedeno v předchozím experimentu, průměrování pomohlo zlepšit SNR o cca 5 dB ve scénáři chůze. Metody 2D detekce hran s velikostí operátoru 5x5 však dosáhly průměrného SNR nad 21 dB ve vzdálenosti 5 metrů, což naznačuje, že tento systém je schopen spolehlivě detekovat narušitele i ve větší vzdálenosti od vlákna [16].



Obr. 7.5: Výsledky SNR lokalizace chůze v závislosti na vzdálenosti od vlákna.

Závěr

V rámci dizertační práce byly popsány a rozebrány možnosti využití optických vláken jako senzorů. Podrobně pak byly popsány interferometrické, reflektometrické, mřížkové a polarizační senzory vibrací. U jednotlivých technologií je popsán princip jejich funkčnosti, klíčové parametry a možnosti jejich využití. U každé kategorie senzorů je také proveden průzkum aktuálně vyvíjených sensorických systémů. Ve druhé polovině práce je popsán vlastní výzkum, kdy jsou vybrané systémy navrženy, otestovány a následně aplikovány do běžného provozu nebo prostředí simulujícího běžný provoz.

Polarizační detektory založené na PBS i polarimetru byly testovány pro detekci mechanických i akustických vibrací, kde se primárně projevila citlivost na nízké frekvence vibrací do 250 Hz. Oba detekční systémy byly implementovány pro měření vláken v těsné blízkosti železnice pro detekci kolejových vozidel. Oba systémy prokázaly možnost detekce vlaků jedoucích po železnici. Ze zaznamenaných signálů je možné určit typ vlaku a jeho směr, jak je vidět z obrázků 5.16, 5.17 a 5.18. Na základě této skutečnosti bylo následně použito strojové učení pro rozlišení klidových stavů od stavů, kdy se v měřeném úseku nachází vlak s přesností přes 98 %. Tento systém tedy může sloužit pro pomocné zabezpečení např. jednokolejných úseků železnic.

Následně byl také testován systém na principu Φ -OTDR pro detekci narušení perimetru. Tento systém je podstatně citlivější než detekce polarizace a byl testován na snímání osob v okolí zakopaného vlákna, nebo případného narušení prostoru přelézáním přes plot, na němž byl kabel v jednom úseku také uchycen. Jelikož většina výzkumů zabývajících se detekcí hran v obraze pracuje s teoretickými daty, rozhodli jsme se implementovat tyto algoritmy na námi sestavený systém a provést kvantifikaci citlivostí jednotlivých algoritmů pomocí výpočtu SNR dílčích událostí. Výsledky citlivostí každého z algoritmů je možné vidět na obrázku 7.4 a porovnání závislosti na vzdálenosti pohybující se osoby od vlákna na obrázku 7.5. Z výsledků vyplývá, že systém je možné implementovat pro zabezpečení perimetru.

Pro porovnání citlivosti optických vláken a kabelů na akustické vibrace bylo vytvořeno speciální testovací pracoviště v bezdrazové komoře, ve které bylo testováno několik různých optických kabelů, tři technologie snímání vibrací, možnosti tlumení vibrací a varianty různých uložení kabelů. Výsledky těchto měření byly porovnávány metodou výpočtu SNR ve frekvenční oblasti, což nám umožňuje zanedbat úroveň signálů a objektivně porovnat pouze tvary vysílaných signálů reproduktorem a zaznamenaných optickými sensorickými systémy. Výsledky těchto měření je možné následně využít pro měření citlivosti kabelů v reálných infrastrukturách, kde pro testování vzniklo několik propojů mezi laboratořemi VUT FEKT. Jednotlivé konfigurace byly navrženy tak, aby bylo možné testovat například vliv průchodu kabelu

serverovnou, která obecně generuje vibrace a tím částečně měření ruší. Následně byly systémy testovány také pro detekci vibrací kabelů ve venkovní zástavbě. Výsledky z těchto měření mohou být velice důležité pro stanovení bezpečnosti optických vláken vůči odposlechům, případně nabízejí možnosti, jak odposlechům částečně zabránit nebo je alespoň ztížit. Dále také ukazují, že detekce polarizace není pro akustické signály příliš vhodná, jelikož není tak citlivá jako interferometrické a reflektometrické systémy.

Právě nízká citlivost detekce polarizace je obrovskou výhodou pro zabezpečení fyzické vrstvy. Tato metoda je citlivá pouze na vibrace v bezprostřední blízkosti vláken, tím pádem je vhodná pro zabezpečení proti nepovolené manipulaci s kabely nebo konektory vláken. Dále také může sloužit pro zabezpečení koncových bodů (serveroven). Pro testování zabezpečení optických vláken byla vybrána trasa simulující reálné podmínky (trasa začínala v serverovně, procházela celou budovou v podhledech či šachtách a její venkovní část procházela v nezámrazné hloubce podél chodníku a silnice). Pro detekci narušení bylo zvoleno pět možných typů událostí, které v případě narušení reálných sítí hrozí. Následně byl vytvořen dataset, na němž byl trénován klasifikační algoritmus. Jak ukazuje obrázek 6.3 s maticí záměn, je možné klasifikovat jednotlivé události s přesností necelých 99 %. Při klasifikaci událostí narušení a klidového stavu je přesný dokonce na 100 %, tím pádem tento velice kompaktní systém může být využit k zabezpečení sítí proti nepovolené manipulaci.

U systémů, na kterých se testovaly algoritmy strojového učení, budou v budoucnu rozšiřovány datasey jednotlivých událostí pro přesnější vyhodnocování dat. Pocho-pitelně je dalším krokem implementace systémů pro práci v reálných podmínkách s klasifikací událostí v reálném čase pro okamžité detekce narušení. Taktéž se nabízí měření cílící na detekci polarizace datového signálu, jež už v omezené míře proběhlo a dokázalo o něco nižší citlivost na vibrace. Dalším zajímavým měřením může být porovnání citlivosti na stavu vstupní polarizace do optického vlákna. Dále se také nabízí klasifikace událostí naměřených systémem na bázi Φ -OTDR, jež by mohla upozorňovat na probíhající hrozby v reálném čase.

Autorova bibliografie

- [1] BARCIK, Peter, MUNSTER, Petr, DEJDAR, Petr, HORVATH, Tomas, and VOJTECH, Josef. *Measurement of Polarization Transient Effects Caused by Mechanical Stress on Optical Fiber*. In 2019 International Workshop on Fiber Optics in Access Networks (FOAN), pp. 26–28. 2019. DOI: 10.1109/FOAN.2019.8933658.
- [2] DEJDAR, Petr. *Universal Graphical User Interface for Multi Vendor EDFA Optical Modules Control*. In Proceedings of the 25th Conference STUDENT EEICT 2019, pp. 530–534. 2019.
- [3] DEJDAR, Petr. *Continuous Data Acquisition by MyRIO Used for Measurement of Polarization Transient Effects*. In Proceedings I of the 26th Conference STUDENT EEICT 2020, pp. 499–503. 2020.
- [4] DEJDAR, Petr. *Optical Fiber Infrastructure Protection Demonstration System Using Distributed Optical Sensing*. In Proceedings I of the 27th Conference STUDENT EEICT 2021, pp. 342–346. 2021.
- [5] DEJDAR, Petr, HANAK, Pavel, MUNSTER, Petr, and HORVATH, Tomas. *Polarization Monitor for High-speed State of Polarization Changes Detection*. International Journal of Advances in Telecommunications, Electrotechnics, Signals and Systems, 10(1-3):13–17, 2021. DOI: 10.11601/ijates.v10i1-3.296.
- [6] DEJDAR, Petr, HORSKY, Tomas, MUNSTER, Petr, HORVATH, Tomas, and OUJEZSKY, Vaclav. *Model of Fiber Optic Transmission System Based on the Red Pitaya*. In 2019 International Workshop on Fiber Optics in Access Networks (FOAN), pp. 83–85. 2019. DOI: 10.1109/FOAN.2019.8933694.
- [7] DEJDAR, Petr, MOKRY, Ondrej, CIZEK, Martin, RAJMIC, Pavel, MUNSTER, Petr, SCHIMMEL, Jiri, PRAVDOVA, Lenka, HORVATH, Tomas, and CIP, Ondrej. *Characterization of sensitivity of optical fiber cables to acoustic vibrations*. Scientific Reports, 13(1):7068, 2023. ISSN: 2045-2322. DOI: 10.1038/s41598-023-34097-9.
Dostupné z: <https://www.nature.com/articles/s41598-023-34097-9>
- [8] DEJDAR, Petr, MOKRY, Ondrej, MUNSTER, Petr, SPURNY, Vladimir, HORVATH, Tomas, TOMASOV, Adrian, JASIM, Ali A., PODRAZKY, Ondrej, BORODKIN, Andrei, and HONZATKO, Pavel. *Negative Curvature Hollow-Core Photonic Crystal Fibers Sensitivity to Acoustic Vibration in the Audible Spectrum*. In 2023 International Workshop on Fiber Optics on Access Networks (FOAN), pp. 8–11. 2023. DOI: 10.1109/FOAN59927.2023.10328118.
- [9] DEJDAR, Petr, MUNSTER, Petr, and HORVATH, Tomas. *High-speed Data Acquisition and Signal Processing Using Cost Effective ARM + FPGA Processors*. In 2019 42nd International Conference on Telecommunications and Signal Processing (TSP), pp. 593–596. 2019. DOI: 10.1109/TSP.2019.8769055.

- [10] DEJDAR, Petr, MYŠKA, Vojtech, MUNSTER, Petr, and BURGET, Radim. *Trains Detection Using State of Polarization Changes Measurement and Convolutional Neural Networks*. In 2021 IEEE International Symposium on Inertial Sensors and Systems (INERTIAL), pp. 1–4. 2021. DOI: 10.1109/INERTIAL51137.2021.9430469.
- [11] DEJDAR, Petr, MÜNSTER, Petr, and HOLÍK, Martin. *Návrh univerzálního řídicího software pro optické moduly EDFA komunikující přes sériovou linku*. *Elektrorevue*, 20(3):63–67, 2018.
- [12] DEJDAR, Petr, MÜNSTER, Petr, and HORVÁTH, Tomáš. *Využití detekce rychlých změn polarizace pro zabezpečení kritických infrastruktur*. In Sborník příspěvků multioborové konference LASER 61, pp. 1–2. Ústav přístrojové techniky AVČR, v.v.i. Královopolská 147, 612 64 Brno, 2021.
- [13] DEJDAR, Petr, MÜNSTER, Petr, TOMAŠOV, Adrián, JABLONČÍK, Lukáš, RUŽIČKA, Michal, and HORVÁTH, Tomáš. *Comparison of Methods for Vibration Detection Using Single-Mode Optical Fiber to Ensuring Information Security*. *Security & Future*, 4(5):142–144, 2021.
- [14] DEJDAR, Petr, TOMASOV, Adrian, MUNSTER, Petr, and HORVATH, Tomas. *Vibration caused by train detection using state-of-polarization changes measurement*. In *Fiber Optic Sensors and Applications XVIII*, vol. 12105, p. 1210506. International Society for Optics and Photonics, SPIE, 2022. DOI: 10.1117/12.2618739.
Dostupné z: <https://doi.org/10.1117/12.2618739>
- [15] DEJDAR, Petr, VALACH, Sobeslav, and MUNSTER, Petr. *Design and Development of FPGA-based Card for Data Acquisition and Processing for Use in Fiber Optics Perimeter Security Systems*. In 2021 13th International Congress on Ultra Modern Telecommunications and Control Systems and Workshops (ICUMT), pp. 259–262. 2021. DOI: 10.1109/ICUMT54235.2021.9631720.
- [16] DEJDAR, Petr, ZÁVIŠKA, Pavel, VALACH, Soběslav, MÜNSTER, Petr, and HORVÁTH, Tomáš. *Image Edge Detection Methods in Perimeter Security Systems Using Distributed Fiber Optical Sensing*. *Sensors*, 22(12), 2022. ISSN: 1424-8220. DOI: 10.3390/s22124573.
Dostupné z: <https://www.mdpi.com/1424-8220/22/12/4573>
- [17] HOLÍK, Martin, HORVÁTH, Tomáš, OUJEZSKÝ, Václav, and DEJDAR, Petr. *Návrh databáze pro ukládání GPON rámců*. *Elektrorevue*, 20(3):1–7, 2018.
- [18] HORVATH, Tomas, MUNSTER, Petr, OUJEZSKY, Vaclav, VOJTECH, Josef, HOLIK, Martin, DEJDAR, Petr, and LATAL, Michal. *GPON Network with Simulated Rogue ONU*. In 2019 International Conference on Software, Telecommunications and Computer Networks (SoftCOM), pp. 1–5. 2019. DOI: 10.23919/SOFTCOM.2019.8903811.

- [19] HORVATH, Tomas, MUNSTER, Petr, TOMASOV, Adrian, DEJDAR, Petr, OUJEZSKY, Vaclav, and VALACH, Sobeslav. *Transmission convergence layer analysis of passive optical networks with a novel FPGA card*. In Seventeenth Conference on Education and Training in Optics and Photonics: ETOP 2023, vol. 12723, p. 127230R. SPIE, 2023. DOI: 10.1117/12.2668427.
- [20] HORVATH, Tomas, TOMASOV, Adrian, MUNSTER, Petr, DEJDAR, Petr, and OUJEZSKY, Vaclav. *Unsupervised Anomaly Detection Using Bidirectional GRU Autoencoder Neural Network for PLOAM Message Sequence Analysis in GPON*. In 2022 International Conference on Electrical, Computer, Communications and Mechatronics Engineering (ICECCME), pp. 1–5. 2022. DOI: 10.1109/ICECCME55909.2022.9988508.
- [21] LÁTAL, Michal, DEJDAR, Petr, HORVÁTH, Tomáš, and MÜNSTER, Petr. *Simultaneous Transmission of Data and Sensory Signal with Gradual Increase in Channel Spacing*. In 2020 43rd International Conference on Telecommunications and Signal Processing (TSP), pp. 488–491. 2020. DOI: 10.1109/TSP49548.2020.9163554.
- [22] MUNSTER, Petr, HORVATH, Tomas, DEJDAR, Petr, and SKALJO, Edvin. *Remote Pumping in Point to Multi-point Networks*. Journal of Communications Software and Systems, 18(1):54–62, 2022. DOI: 10.24138/jcomss-2021-0188.
Dostupné z: <https://doi.org/10.24138/jcomss-2021-0188>
- [23] MUNSTER, Petr, TOMASOV, Adrian, DEJDAR, Petr, and HORVATH, Tomas. *Deploying Machine Learning in Distributed Sensing to Increase Resilience of Fiber Optic Infrastructure*. In CLEO 2023, p. JW2A.102. Optica Publishing Group, 2023.
Dostupné z: https://opg.optica.org/abstract.cfm?URI=CLEO_AT-2023-JW2A.102
- [24] RUZICKA, Michal, JABLONCIK, Lukas, DEJDAR, Petr, and MUNSTER, Petr. *Acoustic and Mechanical Vibration Sensor: New Approach for Monitoring of Fiber Optic Infrastructures*. In 2022 45th International Conference on Telecommunications and Signal Processing (TSP), pp. 276–279. 2022. DOI: 10.1109/TSP55681.2022.9851231.
- [25] RUZICKA, Michal, JABLONCIK, Lukas, DEJDAR, Petr, TOMASOV, Adrian, SPURNY, Vladimir, and MUNSTER, Petr. *Classification of Events Violating the Safety of Physical Layers in Fiber-Optic Network Infrastructures*. Sensors, 22(23), 2022. ISSN: 1424-8220. DOI: 10.3390/s22239515.
Dostupné z: <https://www.mdpi.com/1424-8220/22/23/9515>
- [26] RUŽIČKA, Michal, DEJDAR, Petr, JUREK, Martin, MÜNSTER, Petr, and HORVÁTH, Tomáš. *Citlivost detekce vibrací v závislosti na dílčích parametrech zapojení polarizačního analyzátoru*. Elektrovue, 24(3):102–107, 2022.
- [27] RUŽIČKA, Michal, DEJDAR, Petr, MÜNSTER, Petr, HORVÁTH, Tomáš, and TOMAŠOV, Adrián. *Ochrana optických kabelových tras pomocí detekce změny polarizace*. In

- Sborník příspěvků multioborové konference LASER 62, pp. 74–75. Ústav přístrojové techniky AVČR, v.v.i. Královopolská 147, 612 64 Brno, 2022.
- [28] RUŽIČKA, Michal, MÜNSTER, Petr, DEJDAR, Petr, and JABLONČÍK, Lukáš. *Distributed optical fiber acoustic sensing system for perimeter security*. *Security & Future*, 4(5):145–147, 2021.
- [29] SPURNY, Vladimír, DEJDAR, Petr, TOMASOV, Adrian, MUNSTER, Petr, and HORVATH, Tomas. *Eavesdropping Vulnerabilities in Optical Fiber Networks: Investigating Macro-Bending-Based Attacks Using Clip-on Couplers*. In 2023 International Workshop on Fiber Optics on Access Networks (FOAN), pp. 47–51. 2023. DOI: 10.1109/FOAN59927.2023.10328134.
- [30] SPURNY, Vladimír, TOMASOV, Adrian, ZÁVIŠKA, Pavel, DEJDAR, Petr, MUNSTER, Petr, and HORVATH, Tomas. *Effect of Macrobends on the Transmission Parameters of a High-Speed Coherent System*. In 2023 International Workshop on Fiber Optics on Access Networks (FOAN), pp. 57–60. 2023. DOI: 10.1109/FOAN59927.2023.10328100.
- [31] TOMASOV, Adrian, DEJDAR, Petr, CEM, Ali, MUNSTER, Petr, and HORVATH, Tomas. *Event classification from distributed interferometric sensor using neural network*. In 27th International Conference on Optical Fiber Sensors, p. Th4.58. Optica Publishing Group, 2022. DOI: 10.1364/OFS.2022.Th4.58.
Dostupné z: <https://opg.optica.org/abstract.cfm?URI=OFS-2022-Th4.58>
- [32] TOMASOV, Adrian, DEJDAR, Petr, HORVATH, Tomas, and MUNSTER, Petr. *Physical fiber security by the state of polarization change detection*. In *Fiber Optic Sensors and Applications XVIII*, vol. 12105, p. 1210507. International Society for Optics and Photonics, SPIE, 2022. DOI: 10.1117/12.2618490.
Dostupné z: <https://doi.org/10.1117/12.2618490>
- [33] TOMASOV, Adrian, DEJDAR, Petr, MUNSTER, Petr, HORVATH, Tomas, BARCIK, Peter, and DA ROS, Francesco. *Enhancing fiber security using a simple state of polarization analyzer and machine learning*. *Optics & Laser Technology*, 167:109668, 2023. ISSN: 0030-3992. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2023.109668>.
Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0030399223005613>
- [34] TOMAŠOV, Adrián, DEJDAR, Petr, HORVÁTH, Tomáš, and MÜNSTER, Petr. *Moderní techniky komunikace přes optické vláknové sítě a speciální využití optických vláken*. (1-2/2021):23–26, 2021.
- [35] ZÁVIŠKA, Pavel, DEJDAR, Petr, and MÜNSTER, Petr. *Comparison of image edge detection methods for intruder detection in a phase-sensitive OTDR system*. In 2021 13th International Congress on Ultra Modern Telecommunicati-

ons and Control Systems and Workshops (ICUMT), pp. 267–270. 2021. DOI: 10.1109/ICUMT54235.2021.9631677.

- [36] ZÁVIŠKA, Pavel, DEJDAR, Petr, MÜNSTER, Petr, and HORVÁTH, Tomáš. *Dvouroz-
měrná detekce hran pro distribuovaný optovláknový detekční systém*. *Elektrorevue*,
24(2):43–48, 2022.

Literatura

- [37] *Key internet statistics in 2023 (including mobile)*.
Dostupné z: <https://www.broadbandsearch.net/blog/internet-statistics>
- [38] AFSHAR, Behrad Habib and DIGONNET, Michel J. F. *Spring-Loaded Diaphragm-Based Fiber Acoustic Sensor*. *Journal of Lightwave Technology*, 37(18):4830–4837, 2019. DOI: 10.1109/JLT.2019.2923369.
- [39] AGRAWAL, Govind P. *Chapter 7 - Fiber-Optic Communications*. In *Applications of Nonlinear Fiber Optics*, pp. 319–366. San Diego: Academic Press, 2001. ISBN: 978-0-12-045144-9. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-012045144-9/50007-2>.
Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780120451449500072>
- [40] AGRAWAL, Govind P. *Fiber-optic communication systems*, Fifth Edition. John Wiley & Sons, 2021. ISBN: 978-1-119-73736-0.
- [41] AIME, Laura F.J., VERZELETTI, Alberto, JAMES, Stephen W., and TATAM, Ralph P. *Optical Fiber Bragg Grating Based Pressure Sensor Using a Composite Diaphragm For Pressure Measurements*. In *2019 IEEE SENSORS*, pp. 1–4. 2019. DOI: 10.1109/SENSORS43011.2019.8956846.
- [42] ALEKSEEV, Alexey E., GORSHKOV, Boris G., POTAPOV, Vladimir T., TARANOV, Mikhail A., and SIMIKIN, Denis E. *Dual-pulse phase-OTDR response to propagating longitudinal disturbance*. *Laser Physics*, 30(3):035107, 2020. DOI: 10.1088/1555-6611/ab70b0.
Dostupné z: <https://dx.doi.org/10.1088/1555-6611/ab70b0>
- [43] AOYAMA, Koch-ichi, NAKAGAWA, Kiyoshi, and ITOH, Takeshi. *Optical time domain reflectometry in a single-mode fiber*. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 17(6):862–868, 1981. DOI: 10.1109/JQE.1981.1071237.
- [44] BADAR, Mudabbir, LU, Ping, BURIC, Michael, and OHODNICKI, Paul R. *Self-correction of nonlinear sweep of tunable laser source in OFDR*. In *Fiber Optic Sensors and Applications XVI*, vol. 11000, p. 1100004. International Society for Optics and Photonics, SPIE, 2019. DOI: 10.1117/12.2518394.
Dostupné z: <https://doi.org/10.1117/12.2518394>
- [45] BARCIK, Peter and MUNSTER, Petr. *Measurement of slow and fast polarization transients on a fiber-optic testbed*. *Opt. Express*, 28(10):15250–15257, 2020. DOI: 10.1364/OE.390649.
Dostupné z: <https://opg.optica.org/oe/abstract.cfm?URI=oe-28-10-15250>
- [46] BARTELT, Hartmut, ELSMANN, Tino, HABISREUTHER, Tobias, SCHUSTER, Kay, and ROTHHARDT, Manfred. *Optical Bragg grating sensor fibers for ultra-high temperature applications*. In *Fifth Asia-Pacific Optical Sensors Conference*, vol. 9655,

- pp. 396 – 399. International Society for Optics and Photonics, SPIE, 2015. DOI: 10.1117/12.2185623.
Dostupné z: <https://doi.org/10.1117/12.2185623>
- [47] BRAUNFELDS, Janis, SPOLITIS, Sandis, GEGERE, Lilita, PIKULINS, Dmitrijs, STEPANOV, Vsevolods, and SUPE, Andis. *Demonstration of Polarization Optical-Time-Domain Reflectometer for Monitoring of Optical Fiber Lines*. In 2022 Workshop on Microwave Theory and Techniques in Wireless Communications (MTTW), pp. 9–12. 2022. DOI: 10.1109/MTTW56973.2022.9942583.
- [48] CHEN, Dian, LIU, Qingwen, WANG, Yifan, LI, He, and HE, Zuyuan. *Fiber-optic distributed acoustic sensor based on a chirped pulse and a non-matched filter*. Opt. Express, 27(20):29415–29424, 2019. DOI: 10.1364/OE.27.029415.
Dostupné z: <https://opg.optica.org/oe/abstract.cfm?URI=oe-27-20-29415>
- [49] CHEN, Dong, QIAN, Jiang, LIU, Jia, CHEN, Baojie, AN, Guowen, HONG, Yingping, JIA, Pinggang, and XIONG, Jijun. *An In-Line Fiber Optic Fabry–Perot Sensor for High-Temperature Vibration Measurement*. Micromachines, 11(3), 2020. ISSN: 2072-666X. DOI: 10.3390/mi11030252.
Dostupné z: <https://www.mdpi.com/2072-666X/11/3/252>
- [50] CHEN, Jijing, CHEN, Yao, WANG, Peiyuan, WANG, Jie, WAN, Hongdan, and ZHANG, Zuxing. *High sensitivity optical fiber temperature sensor based on active double-peanut fiber structure*. In Asia Communications and Photonics Conference (ACP) 2018, p. Su2A.266. Optica Publishing Group, 2018.
Dostupné z: <https://opg.optica.org/abstract.cfm?URI=ACPC-2018-Su2A.266>
- [51] CHEN, Jinjie, LIU, Bo, and ZHANG, Hao. *Review of fiber Bragg grating sensor technology*. Frontiers of Optoelectronics in China, 4(2):204–212, 2011. ISSN: 1674-4594. DOI: 10.1007/s12200-011-0130-4.
Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/s12200-011-0130-4>
- [52] CHEN, Yong, JIANG, Tao, LIU, Huanlin, LI, Yuhuan, and YU, Zihan. *Event Recognition System Based on Fiber Bragg Grating and mRMR-CWCs-SCN*. IEEE Sensors Journal, 21(22):26132–26139, 2021. DOI: 10.1109/JSEN.2021.3119993.
- [53] CHEN, Yu, LI, Jianfeng, YANG, Yi, CHEN, Ming, LI, Jing, and LUO, Hongyu. *Numerical modeling and design of mid-infrared FBG with high reflectivity*. Optik, 124(16):2565–2568, 2013. ISSN: 0030-4026. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2012.07.016>.
Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0030402612005918>
- [54] CHEN, Yun, MAO, Barerem-Melgueba, ZHOU, Bin, GUO, Changjian, and LIN, Ziqi. *Improving the SNR of the phase-OTDR by controlling the carrier*

- in the SOA*. Journal of Modern Optics, 67(14):1241–1246, 2020. DOI: 10.1080/09500340.2020.1827071.
Dostupné z: <https://doi.org/10.1080/09500340.2020.1827071>
- [55] CHENG, Haihao, WU, Shun, WANG, Qiang, WANG, Shun, and LU, Peixiang. *In-Line Hybrid Fiber Sensor for Curvature and Temperature Measurement*. IEEE Photonics Journal, 11(6):1–11, 2019. DOI: 10.1109/JPHOT.2019.2944988.
- [56] CHYAD, Radhi M., ALI, Alaa H., HAMMED, Ahmed A., MAHDI, Bushra R., KHALEF, Nhaya H., MAHMOUD, Aseel Ibrahim, and RASHEED, Hadeel M. *Acoustic Fiber Sensors by Fabry–Perot Interferometer technology*. Journal of Physics: Conference Series, 1660(1):012052, 2020. DOI: 10.1088/1742-6596/1660/1/012052.
Dostupné z: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1660/1/012052>
- [57] COSCETTA, Agnese, MINARDO, Aldo, and ZENI, Luigi. *Distributed Dynamic Strain Sensing Based on Brillouin Scattering in Optical Fibers*. Sensors, 20(19), 2020. ISSN: 1424-8220. DOI: 10.3390/s20195629.
Dostupné z: <https://www.mdpi.com/1424-8220/20/19/5629>
- [58] DANDU, Prasad, GUSAROV, Andrei, MOREAU, Philippe, LEYSEN, Willem, BOSTYN, Charlotte, MÉGRET, Patrice, and WUILPART, Marc. *Effect of optical fibre bending on plasma current measurement in ITER using a polarisation-OTDR setup*. Fusion Engineering and Design, 166:112279, 2021. ISSN: 0920-3796. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2021.112279>.
Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0920379621000557>
- [59] DI SANTE, Raffaella. *Fibre Optic Sensors for Structural Health Monitoring of Aircraft Composite Structures: Recent Advances and Applications*. Sensors, 15(8):18666–18713, 2015. ISSN: 1424-8220. DOI: 10.3390/s150818666.
Dostupné z: <https://www.mdpi.com/1424-8220/15/8/18666>
- [60] DONG, Yue, XIAO, Shiyong, WU, Beilei, XIAO, Han, and JIAN, Shuisheng. *Refractive Index and Temperature Sensor Based on D-Shaped Fiber Combined With a Fiber Bragg Grating*. IEEE Sensors Journal, 19(4):1362–1367, 2019. DOI: 10.1109/JSEN.2018.2880305.
- [61] DU, Yanliang, SUN, Baochen, LI, Jianzhi, and ZHANG, Wentao. *Optical fiber sensing and structural health monitoring technology*. Springer, 2019.
- [62] DUQUE, Welton Sthel, RODRÍGUEZ DÍAZ, Camilo Arturo, LEAL-JUNIOR, Arnaldo Gomes, and FRIZERA, Anselmo. *Fiber-Optic Hydrophone Based on Michelsons Interferometer with Active Stabilization for Liquid Volume Measurement*. Sensors, 22(12), 2022. ISSN: 1424-8220. DOI: 10.3390/s22124404.
Dostupné z: <https://www.mdpi.com/1424-8220/22/12/4404>

- [63] ESMAIL, Maged A., ALI, Jameel, ALMOHIMMAH, Esam, ALMAIMAN, Ahmed, RAGHEB, Amr M., and ALSHEBEILI, Saleh. *Sagnac Loop Based Sensing System for Intrusion Localization Using Machine Learning*. *Photonics*, 9(5), 2022. ISSN: 2304-6732. DOI: 10.3390/photonics9050275.
Dostupné z: <https://www.mdpi.com/2304-6732/9/5/275>
- [64] FENG, Cheng, BHATTA, Hari Datta, BOHBOT, Jonathan, DAVIDI, Roy, LU, Xin, SCHNEIDER, Thomas, and TUR, Moshe. *Gain Spectrum Engineering in Slope-Assisted Dynamic Brillouin Optical Time-Domain Analysis*. *Journal of Lightwave Technology*, 38(24):6967–6975, 2020. DOI: 10.1109/JLT.2020.3021796.
- [65] FERNÁNDEZ-RUIZ, María R., COSTA, Luis, and MARTINS, Hugo F. *Distributed Acoustic Sensing Using Chirped-Pulse Phase-Sensitive OTDR Technology*. *Sensors*, 19(20), 2019. ISSN: 1424-8220. DOI: 10.3390/s19204368.
Dostupné z: <https://www.mdpi.com/1424-8220/19/20/4368>
- [66] FILOGRANO, Massimo L. *A Low-Cost Phase-OTDR System for Structural Health Monitoring: Design and Instrumentation*. *Instruments*, 3(3):46, 2019.
Dostupné z: <https://www.proquest.com/scholarly-journals/low-cost-phase-otdr-system-structural-health/docview/2548545110/se-2>
- [67] FRANCISCANGELIS, Carolina, MARGULIS, Walter, KJELLBERG, Leif, SODERQUIST, Ingemar, and FRUETT, Fabiano. *Real-time distributed fiber microphone based on phase-OTDR*. *Opt. Express*, 24(26):29597–29602, 2016. DOI: 10.1364/OE.24.029597.
Dostupné z: <http://opg.optica.org/oe/abstract.cfm?URI=oe-24-26-29597>
- [68] FU, Yun, WANG, Zinan, ZHU, Richeng, XUE, Naitian, JIANG, Jialin, LU, Chongyu, ZHANG, Bin, YANG, Le, ATUBGA, David, and RAO, Yunjiang. *Ultra-Long-Distance Hybrid BOTDA/ Φ -OTDR*. *Sensors*, 18(4), 2018. ISSN: 1424-8220.
Dostupné z: <https://www.mdpi.com/1424-8220/18/4/976>
- [69] GAN, WeiBing, LIU, Nian, WANG, Yu, ZHANG, YiXuan, CHEN, XianFeng, TANG, JianGuan, and ZHANG, Cui. *Two-parameter method for identification and location of leaks based on weak FBG for steam pipelines*. *Optical Fiber Technology*, 74:103095, 2022. ISSN: 1068-5200. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.yofte.2022.103095>.
Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1068520022002784>
- [70] GENG, Jia-Qi, FAN-YUAN, Guan-Jie, WANG, Shuang, ZHANG, Qi-Fa, HU, Ying-Ying, CHEN, Wei, YIN, Zhen-Qiang, HE, De-Yong, GUO, Guang-Can, and HAN, Zheng-Fu. *Coexistence of quantum key distribution and optical transport network based on standard single-mode fiber at high launch power*. *Opt. Lett.*, 46(11):2573–2576, 2021. DOI: 10.1364/OL.426175.
Dostupné z: <https://opg.optica.org/ol/abstract.cfm?URI=ol-46-11-2573>

- [71] GUO, Jingjing, HAN, Yang, FENG, Xin, and SUN, Changsen. *A vibration monitoring system based on Sagnac interferometer with a novel algorithm*. In *Advanced Sensor Systems and Applications X*, vol. 11554, p. 115540Y. International Society for Optics and Photonics, SPIE, 2020. DOI: 10.1117/12.2572123.
Dostupné z: <https://doi.org/10.1117/12.2572123>
- [72] GUO, Zhen, GAO, Kan, YANG, Hui, DAI, Zhiguo, ZHANG, Jun, and WU, Bingyan. *Ultra-thin optical hydrophone array based on fiber Bragg gratings*. In *2019 18th International Conference on Optical Communications and Networks (ICOON)*, pp. 1–3. 2019. DOI: 10.1109/ICOON.2019.8934720.
- [73] HAN, Chunyang, DING, Hui, LI, Baojin, SHI, Lei, and XU, Haodong. *A miniature fiber-optic microphone based on plano-concave micro-interferometer*. *Review of Scientific Instruments*, 93(4):045001, 2022. DOI: 10.1063/5.0084559.
Dostupné z: <https://doi.org/10.1063/5.0084559>
- [74] HAYBER, Sekip Esat and KESER, Serkan. *3D sound source localization with fiber optic sensor array based on genetic algorithm*. *Optical Fiber Technology*, 57:102229, 2020. ISSN: 1068-5200. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.yofte.2020.102229>.
Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1068520020302194>
- [75] HAYBER, Sekip Esat, TABARU, Timucin Emre, KESER, Serkan, and SARACOGLU, Omer Galip. *A Simple, High Sensitive Fiber Optic Microphone Based on Cellulose Triacetate Diaphragm*. *Journal of Lightwave Technology*, 36(23):5650–5655, 2018. DOI: 10.1109/JLT.2018.2878345.
- [76] HE, Wanqi, LIANG, Cui, YANG, Jianhua, ZHOU, Yilan, ZHANG, Dengwei, HUANG, Tengchao, and CHE, Shuangliang. *Real-time performance improvement approach based on FPGA in OFDR system*. *Optical Fiber Technology*, 75:103212, 2023. ISSN: 1068-5200. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.yofte.2022.103212>.
Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1068520022003972>
- [77] HE, Wei, ZHU, Lianqing, ZHANG, Wen, LIU, Feng, and DONG, Mingli. *Point-by-Point Femtosecond-Laser Inscription of 2- μ m-Wavelength-Band FBG Through Fiber Coating*. *IEEE Photonics Journal*, 11(1):1–8, 2019. DOI: 10.1109/JPHOT.2018.2881437.
- [78] HU, Huanwu, WU, Guiling, DING, Xuan, and CHEN, Jianping. *SFSW Time Transfer Over Branching Fiber-Optic Networks With Synchronous TDMA*. *IEEE Communications Letters*, 22(9):1802–1805, 2018. DOI: 10.1109/LCOMM.2018.2828079.
- [79] HU, Yuhan, CHEN, Yongchao, SONG, Qiheng, ZHOU, Pengwei, SHEN, Limou, PENG, Hekuo, XIAO, Qian, and JIA, Bo. *An Asymmetrical Dual Sagnac Distributed Fiber Sensor for High Precision Localization Based on Time Delay Estimation*. *Journal of Lightwave Technology*, 39(21):6928–6933, 2021. DOI: 10.1109/JLT.2021.3105299.

- [80] HU, Yuhan, SONG, Qiuheng, PENG, Hekuo, and XIAO, Qian. *Improvement of Noise Stability of Michelson Optical Fiber Voice Monitoring System*. IEEE Access, 9:60482–60488, 2021. DOI: 10.1109/ACCESS.2021.3073953.
- [81] HUANG, Jincheng, MO, Jiaqing, ZHANG, Jiangwei, and MA, Xinrong. *A Fiber Vibration Signal Recognition Method Based on CNN-CBAM-LSTM*. Applied Sciences, 12(17), 2022. ISSN: 2076-3417. DOI: 10.3390/app12178478.
Dostupné z: <https://www.mdpi.com/2076-3417/12/17/8478>
- [82] HUANG, Jingwei, CHEN, Yongchao, PENG, Hekuo, ZHOU, Pengwei, SONG, Qiuheng, HUANG, Peng, XIAO, Qian, and JIA, Bo. *A 150 km distributed fiber-optic disturbance location sensor with no relay based on the dual-Sagnac interferometer employing time delay estimation*. Optics Communications, 479:126420, 2021. ISSN: 0030-4018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.optcom.2020.126420>.
Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0030401820308385>
- [83] HUANG, Jingwei, CHEN, Yongchao, SONG, Qiuheng, PENG, Hekuo, ZHOU, Pengwei, XIAO, Qian, and JIA, Bo. *Distributed fiber-optic sensor for location based on polarization-stabilized dual-Mach-Zehnder interferometer*. Opt. Express, 28(17):24820–24832, 2020. DOI: 10.1364/OE.399640.
Dostupné z: <https://opg.optica.org/oe/abstract.cfm?URI=oe-28-17-24820>
- [84] HUANG, Xiaowei, JIN, Gaojie, and RUAN, Wenjie. *Loss Function and Gradient Descent*. In Machine Learning Safety, pp. 103–107. Springer, 2012.
- [85] HUANG, Zejia, WU, Chongqing, WANG, Zhi, WANG, Jian, and LIU, Lanlan. *Distributed measurement of axes misaligned splicing and multi-stress in polarization-maintaining fiber based on polarization-OTDR*. Optics Communications, 423:96–99, 2018. ISSN: 0030-4018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.optcom.2018.04.027>.
Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0030401818303031>
- [86] HUANG, Zejia, WU, Chongqing, WANG, Zhi, WANG, Jian, and LIU, Lanlan. *Distributed measurement of polarization mode coupling in fiber ring based on P-OTDR complete polarization state detection*. Opt. Express, 26(4):4798–4806, 2018. DOI: 10.1364/OE.26.004798.
Dostupné z: <https://opg.optica.org/oe/abstract.cfm?URI=oe-26-4-4798>
- [87] HUBBARD, Peter G., XU, James, ZHANG, Shenghan, DEJONG, Matthew, LUO, Linqing, SOGA, Kenichi, PAPA, Carlo, ZULBERTI, Christian, MALARA, Demetrio, FUGAZZOTTO, Fabio, GARCIA LOPEZ, Francisco, and MINTO, Chris. *Dynamic structural health monitoring of a model wind turbine tower using distributed acoustic sensing (DAS)*. Journal of Civil Structural Health Monitoring, 11(3):833–849, 2021.

ISSN: 2190-5479. DOI: 10.1007/s13349-021-00483-y.

Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/s13349-021-00483-y>

- [88] HUI, Rongqing. *Chapter 2 - Optical fibers*. In Rongqing Hui, editor, Introduction to Fiber-Optic Communications, pp. 19–76. Academic Press, 2020. ISBN: 978-0-12-805345-4. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-805345-4.00002-0>.
Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780128053454000020>
- [89] HUI, Rongqing. *Chapter 3 - Light sources for optical communications*. In Rongqing Hui, editor, Introduction to Fiber-Optic Communications, pp. 77–124. Academic Press, 2020. ISBN: 978-0-12-805345-4. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-805345-4.00003-2>.
Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780128053454000032>
- [90] HUI, Rongqing. *Chapter 4 - Photodetectors*. In Rongqing Hui, editor, Introduction to Fiber-Optic Communications, pp. 125–154. Academic Press, 2020. ISBN: 978-0-12-805345-4. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-805345-4.00004-4>.
Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780128053454000044>
- [91] IIDA, Daisuke, HONDA, Nazuki, and OSHIDA, Hiroyuki. *Advances in distributed vibration sensing for optical communication fiber state visualization*. Optical Fiber Technology, 57:102263, 2020. ISSN: 1068-5200. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.yofte.2020.102263>.
Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1068520020302534>
- [92] IIDA, Daisuke, TOGE, Kunihiro, and MANABE, Tetsuya. *Distributed measurement of acoustic vibration location with frequency multiplexed phase-OTDR*. Optical Fiber Technology, 36:19–25, 2017. ISSN: 1068-5200. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.yofte.2017.02.005>.
Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1068520016301420>
- [93] JACKSON, David A., DANDRIDGE, Anthony D., and SHEEM, Sang K. *Measurement of small phase shifts using a single-mode optical-fiber interferometer*. Optics Letters, 5(4):139–141, 1980.
Dostupné z: www.scopus.com
- [94] JASON, Johan, POPOV, Sergei M., BUTOV, Oleg V., CHAMOROVSKIY, Yuri K., GOLANT, Konstantin M., FOTIADI, Andrei A., and WUILPART, Marc. *Sensitivity of high Rayleigh scattering fiber in acoustic/vibration sensing using phase-OTDR*. In Optical Sensing and Detection V, vol. 10680, pp. 276 – 285. International Society

- for Optics and Photonics, SPIE, 2018. DOI: 10.1117/12.2307569.
Dostupné z: <https://doi.org/10.1117/12.2307569>
- [95] JENA, James, WASSIN, Shukree, BEZUIDENHOUT, L., DOUCOURÉ, Moctar, and GIBBON, Tim. *Polarization-based optical fiber acoustic sensor for geological applications*. J. Opt. Soc. Am. B, 37(11):A147–A153, 2020. DOI: 10.1364/JOSAB.396565.
Dostupné z: <https://opg.optica.org/josab/abstract.cfm?URI=josab-37-11-A147>
- [96] JEONG, Jun Hyeok, KIM, Do Kyung, CHOI, Sungwook, LEE, Seul-Lee, KIM, Jihoon, and LEE, Yong Wook. *Polarimetric Polarization-Maintaining Photonic Crystal Fiber Vibration Sensor With Shortest Sensor Head*. IEEE Sensors Journal, 18(7):2768–2775, 2018. DOI: 10.1109/JSEN.2018.2792048.
- [97] JIA, Jingshan, JIANG, Yi, ZHANG, Liuchao, GAO, Hongchun, and JIANG, Lan. *Fiber Optic Dual-Ring Michelson Interferometer-Based Detection Scheme for the Measurement of Dynamic Signals*. Journal of Lightwave Technology, 37(15):3750–3755, 2019. DOI: 10.1109/JLT.2019.2919706.
- [98] JIA, Jingshan, JIANG, Yi, ZHANG, Liuchao, GAO, Hongchun, and JIANG, Lan. *Symbiosis-Michelson Interferometer-Based Detection Scheme for the Measurement of Dynamic Signals*. IEEE Sensors Journal, 19(18):7988–7992, 2019. DOI: 10.1109/JSEN.2019.2918570.
- [99] JIA, Zhen'an, ZHAO, Xianfeng, FAN, Wei, GAO, Hong, LIU, Qinpeng, YONG, Zhen, LIU, Yinggang, and YANG, Kaiqing. *A two-dimensional cantilever beam vibration sensor based on fiber Bragg Grating*. Optical Fiber Technology, 61:102447, 2021. ISSN: 1068-5200. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.yofte.2020.102447>.
Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1068520020304363>
- [100] JIANG, Fei, ZHANG, Zhenhai, LU, Zixiao, LI, Honglang, TIAN, Yahui, ZHANG, Yixin, and ZHANG, Xuping. *High-fidelity acoustic signal enhancement for phase-OTDR using supervised learning*. Opt. Express, 29(21):33467–33480, 2021. DOI: 10.1364/OE.439646.
Dostupné z: <https://opg.optica.org/oe/abstract.cfm?URI=oe-29-21-33467>
- [101] JIANG, Jinpeng, GAN, Weibing, HU, Yue, LI, Sheng, DENG, Jian, YUE, Lina, YANG, Yan, NAN, Qiuming, PAN, Jianjun, LIU, Fang, and WANG, Honghai. *Real-time monitoring method for unauthorized working activities above the subway tunnel based on ultra-weak fiber Bragg grating vibration sensing array*. Measurement, 182:109744, 2021. ISSN: 0263-2241. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2021.109744>.
Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0263224121007041>

- [102] JIANG, Ying, YU, Mingjin, ZHANG, Mengqi, and LU, Jiyun. *Influence of light source on the sensitivity of a Polarization Maintaining Fiber Loop Mirror vibration sensor*. Journal of Low Frequency Noise, Vibration and Active Control, 39(2):327–334, 2020. DOI: 10.1177/1461348419848886.
Dostupné z: <https://doi.org/10.1177/1461348419848886>
- [103] JING, Shuaiqi, HUANG, Lei, and RONG, Jian. *A New Design and Feedback Control of a Fiber Michelson Interferometer to Detect High Frequency Vibration with Style of Noncontact*. In 2019 IEEE 3rd Information Technology, Networking, Electronic and Automation Control Conference (ITNEC), pp. 1583–1586. 2019. DOI: 10.1109/ITNEC.2019.8729006.
- [104] KHAN, Sulaiman, LE CALVÉ, Stéphane, and NEWPORT, David. *A review of optical interferometry techniques for VOC detection*. Sensors and Actuators A: Physical, 302:111782, 2020. ISSN: 0924-4247.
Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0924424719300652>
- [105] KIM, SungMoon, DANDU, PrasadaRaju, GUSSAROV, Andrei, DANISI, Alessandro, VAYAKIS, George, and WUILPART, Marc. *Analysis of structural vibration effect on plasma current measurement using FOCS*. In Optical Sensing and Detection VII, vol. 12139, p. 121391F. International Society for Optics and Photonics, SPIE, 2022.
Dostupné z: <https://doi.org/10.1117/12.2621389>
- [106] KINGMA, Diederik P and BA, Jimmy. *Adam: A method for stochastic optimization*. arXiv preprint arXiv:1412.6980, 2014.
- [107] KROHN, David A, MACDOUGALL, Trevor, and MENDEZ, Alexis. *Fiber optic sensors: fundamentals and applications*. Spie Press Bellingham, WA, 2014.
- [108] KUMAR, Arun and GHATAK, Ajoy. *Basic Concepts of Polarization*, pp. 19–46. SPIE, 2011. DOI: 10.1117/3.861761.ch3.
Dostupné z: <https://lens.org/121-158-567-541-99X>
- [109] KUMAR, Arun and GHATAK, Ajoy. *Jones Vector Representation of Polarized Light*, pp. 75–97. SPIE, 2011. DOI: 10.1117/3.861761.ch5.
Dostupné z: <https://lens.org/048-246-305-316-56X>
- [110] KUMAR, Arun and GHATAK, Ajoy. *The Stokes Parameters Representation*, pp. 97–120. SPIE, 2011. DOI: 10.1117/3.861761.ch6.
Dostupné z: <https://lens.org/014-375-718-120-677>
- [111] LAGAKOS, Nicholas and BUCARO, Joseph A. *Phase-modulated fiber optic acoustic sensors*. ISA Transactions, 28(2):1–6, 1989. ISSN: 0019-0578. DOI: [https://doi.org/10.1016/0019-0578\(89\)90033-5](https://doi.org/10.1016/0019-0578(89)90033-5).

Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0019057889900335>

- [112] LEANDRO, Daniel and LOPEZ-AMO, Manuel. *Simultaneous temperature and vibration monitoring using an all-PM fiber loop mirror interferometer*. In 2017 25th Optical Fiber Sensors Conference (OFS), pp. 1–4. 2017. DOI: 10.1117/12.2263076.
- [113] LEANDRO, Daniel and LOPEZ-AMO, Manuel. *All-PM Fiber Loop Mirror Interferometer Analysis and Simultaneous Measurement of Temperature and Mechanical Vibration*. Journal of Lightwave Technology, 36(4):1105–1111, 2018. DOI: 10.1109/JLT.2017.2761121.
- [114] LI, Gang, ZENG, Kehong, ZHOU, Bin, YANG, Wenming, LIN, Xiaohui, WANG, Fei, CHEN, Yun, JI, Xutao, ZHENG, Dahai, and MAO, Barerem-Melgueba. *Vibration monitoring for the West-East Gas Pipeline Project of China by phase optical time domain reflectometry (phase-OTDR)*. Instrumentation Science & Technology, 49(1):65–80, 2021. DOI: 10.1080/10739149.2020.1780253.
Dostupné z: <https://doi.org/10.1080/10739149.2020.1780253>
- [115] LI, He, LIU, Qingwen, CHANG, Yanming, LUO, Yimin, QIU, Jinbo, and HE, Zuyuan. *Analysis and Compensation of Vibration Induced Beat Frequency Shift in OFDR Based Fiber-Optic Distributed Acoustic Sensor*. Journal of Lightwave Technology, 41(1):381–392, 2023. DOI: 10.1109/JLT.2022.3213931.
- [116] LI, Jiong, ZHANG, Zhitao, GAN, Jiulin, ZHANG, Zhishen, HENG, Xiaobao, ZHOU, Kaijun, ZHAO, Hua, XU, Shanhuai, and YANG, Zhongmin. *Influence of Laser Linewidth on Phase-OTDR System Based on Heterodyne Detection*. Journal of Lightwave Technology, 37(11):2641–2647, 2019. DOI: 10.1109/JLT.2018.2886461.
- [117] LI, Litong, LV, Dajuan, YANG, Minghong, XIONG, Liangming, and LUO, Jie. *A IR-Femtosecond Laser Hybrid Sensor to Measure the Thermal Expansion and Thermo-Optical Coefficient of Silica-Based FBG at High Temperatures*. Sensors, 18(2), 2018. ISSN: 1424-8220. DOI: 10.3390/s18020359.
Dostupné z: <https://www.mdpi.com/1424-8220/18/2/359>
- [118] LI, Sichen, LIU, Kun, JIANG, Junfeng, XU, Tianhua, DING, Zhenyang, SUN, Zhen-shi, HUANG, Yuelang, XUE, Kang, JIN, Xibo, and LIU, Tiegeng. *An Ameliorated Denoising Scheme Based on Deep Learning for Φ -OTDR System With 41-km Detection Range*. IEEE Sensors Journal, 22(20):19666–19674, 2022. DOI: 10.1109/JSEN.2022.3202963.
- [119] LI, Tianliang, GUO, Jinxiu, TAN, Yuegang, and ZHOU, Zude. *Recent Advances and Tendency in Fiber Bragg Grating-Based Vibration Sensor: A Review*. IEEE Sensors Journal, 20(20):12074–12087, 2020. DOI: 10.1109/JSEN.2020.3000257.

- [120] LIANG, Changshuo, BAI, Qing, YAN, Min, WANG, Yu, ZHANG, Hongjuan, and JIN, Baoquan. *A Comprehensive Study of Optical Frequency Domain Reflectometry*. IEEE Access, 9:41647–41668, 2021. DOI: 10.1109/ACCESS.2021.3061250.
- [121] LIU, Fang, ZHANG, Haiwen, LI, Xiaorui, LI, Zhengying, and WANG, Honghai. *Intrusion identification using GMM-HMM for perimeter monitoring based on ultra-weak FBG arrays*. Opt. Express, 30(10):17307–17320, 2022. DOI: 10.1364/OE.452418. Dostupné z: <https://opg.optica.org/oe/abstract.cfm?URI=oe-30-10-17307>
- [122] LIU, Xin, JIN, Baoquan, BAI, Qing, WANG, Yu, WANG, Dong, and WANG, Yuncai. *Distributed Fiber-Optic Sensors for Vibration Detection*. Sensors, 16(8), 2016. ISSN: 1424-8220. DOI: 10.3390/s16081164. Dostupné z: <https://www.mdpi.com/1424-8220/16/8/1164>
- [123] LIU, Yanchao, FANG, Jin, JIA, Dongyu, and LI, Wenlong. *Temperature characteristics of FBG sensors with different coatings for High Temperature Superconductor Application*. In 2019 IEEE 3rd International Electrical and Energy Conference (CIEEC), pp. 1546–1550. 2019. DOI: 10.1109/CIEEC47146.2019.CIEEC-2019551.
- [124] LORENZO, Simón, WONG, Yu-Po, and SOLGAARD, Olav. *Optical Fiber-Tip Monolithic Silicon Pressure Sensors*. IEEE Sensors Journal, 20(5):2476–2484, 2020. DOI: 10.1109/JSEN.2019.2952546.
- [125] LU, Ping, LIU, Deming, and LIAO, Hao. *High-sensitivity fiber optic acoustic sensors*. In Advanced Sensor Systems and Applications VII, vol. 10025, pp. 202 – 209. International Society for Optics and Photonics, SPIE, 2016. DOI: 10.1117/12.2247890. Dostupné z: <https://doi.org/10.1117/12.2247890>
- [126] LUCH, Ilaria Di, BOFFI, Pierpaolo, FERRARIO, Maddalena, RIZZELLI, Giuseppe, GAUDINO, Roberto, and MARTINELLI, Mario. *Vibration Sensing for Deployed Metropolitan Fiber Infrastructure*. Journal of Lightwave Technology, 39(4):1204–1211, 2021. DOI: 10.1109/JLT.2021.3051732.
- [127] LUO, Yanhua, YAN, Binbin, ZHANG, Qijin, PENG, Gang-Ding, WEN, Jianxiang, and ZHANG, Jianzhong. *Fabrication of Polymer Optical Fibre (POF) Gratings*. Sensors, 17(3), 2017. ISSN: 1424-8220. DOI: 10.3390/s17030511. Dostupné z: <https://www.mdpi.com/1424-8220/17/3/511>
- [128] LV, Anqiang and LI, Jing. *On-line monitoring system of 35 kV 3-core submarine power cable based on Φ -OTDR*. Sensors and Actuators A: Physical, 273:134–139, 2018. ISSN: 0924-4247. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.sna.2018.02.033>. Dostupné z: www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0924424717319258
- [129] MA, Chunyu, LIU, Tiegen, LIU, Kun, JIANG, Junfeng, DING, Zhenyang, PAN, Liang, and TIAN, Miao. *Long-Range Distributed Fiber Vibration Sensor Using an*

- Asymmetric Dual Mach–Zehnder Interferometers*. Journal of Lightwave Technology, 34(9):2235–2239, 2016. DOI: 10.1109/JLT.2016.2532877.
- [130] MA, Pengfei, SUN, Zhenshi, LIU, Kun, JIANG, Junfeng, WANG, Shuang, ZHANG, Liwang, WENG, Lingfeng, XU, Zhongyuan, and LIU, Tiegeng. *Distributed fiber optic vibration sensing with wide dynamic range, high frequency response, and multi-points accurate location*. Optics & Laser Technology, 124:105966, 2020. ISSN: 0030-3992. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2019.105966>.
Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0030399219313891>
- [131] MA, Teng, ZHAO, Liguang, GAO, Hong, FU, Zhipeng, and QIAO, Xueguang. *An improved PGC demodulation algorithm for optical fiber interferometers with insensitive to carrier phase delay and modulation depth*. Optical Fiber Technology, 74:103121, 2022. ISSN: 1068-5200. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.yofte.2022.103121>.
Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1068520022003042>
- [132] MADAN, Aayush, LIU, Ouyang, JIANG, Wenyu, WANG, Yixin, SHUM, Perry Ping, and HAO, Jianzhong. *Carbon-steel tube surface mounted FBG sensors under high-temperature environment, part I: Polyimide coated and femtosecond laser written*. In 2020 IEEE 5th Optoelectronics Global Conference (OGC), pp. 125–129. 2020. DOI: 10.1109/OGC50007.2020.9260462.
- [133] MADAN, Aayush, LIU, Ouyang, LIM, Jun Long, JIANG, Wenyu, WANG, Yixin, SHUM, Perry Ping, and HAO, Jianzhong. *Carbon-steel tube surface mounted FBG sensors under high-temperature environment, part II: Gold coated and femtosecond laser written*. In 2020 IEEE 5th Optoelectronics Global Conference (OGC), pp. 130–133. 2020. DOI: 10.1109/OGC50007.2020.9260465.
- [134] MANSOR, Nur Farraliza and IBRAHIM, Raja Kamarulzaman Raja. *Temperature sensitivity of FBG coating with zinc oxide and silicon carbide*. Journal of Physics: Conference Series, 1892(1):012033, 2021. DOI: 10.1088/1742-6596/1892/1/012033.
Dostupné z: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1892/1/012033>
- [135] MARRA, Giuseppe, CLIVATI, Cecilia, LUCKETT, Richard, TAMPELLINI, Anna, KRONJÄGER, Jochen, WRIGHT, Louise, MURA, Alberto, LEVI, Filippo, ROBINSON, Stephen, XUEREB, André, BAPTIE, Brian, and CALONICO, Davide. *Ultrastable laser interferometry for earthquake detection with terrestrial and submarine cables*. Science, 361(6401):486–490, 2018. DOI: 10.1126/science.aat4458.
Dostupné z: <https://www.science.org/doi/abs/10.1126/science.aat4458>
- [136] MEMON, Sanobar F., LEWIS, Elfed, PEMBROKE, J. Tony, and CHOWDHRY, Bhawani S. *A novel inter-fibre light coupling sensor probe using plastic optical fibre for*

- ethanol concentration monitoring at initial production rate.* In 2017 25th Optical Fiber Sensors Conference (OFS), pp. 1–4. 2017. DOI: 10.1117/12.2265377.
- [137] MENG, Dejun, MIAO, Changyun, LI, Xianguo, LI, Jianshe, SHI, Jia, XU, Wei, YANG, Xianchao, XU, Degang, LIU, Tiegeng, and YAO, Jianquan. *A vibration sensor based on Sagnac interferometer and fiber ring laser for fault diagnosis of bearing.* Optical Fiber Technology, 64:102554, 2021. ISSN: 1068-5200. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.yofte.2021.102554>.
Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1068520021001036>
- [138] MENG, He, WANG, Shulun, GAO, Changxia, and LIU, Feng. *Research on Recognition Method of Railway Perimeter Intrusions Based on Φ -OTDR Optical Fiber Sensing Technology.* IEEE Sensors Journal, 21(8):9852–9859, 2021. DOI: 10.1109/JSEN.2020.3043193.
- [139] MORTENSEN, Niels Asger, FOLKENBERG, Jacob Riis, NIELSEN, Martin D., and HANSEN, Kim P. *Modal cutoff and the V parameter in photonic crystal fibers.* Opt. Lett., 28(20):1879–1881, 2003. DOI: 10.1364/OL.28.001879.
Dostupné z: <https://opg.optica.org/ol/abstract.cfm?URI=ol-28-20-1879>
- [140] MOTIL, Avi, BERGMAN, Arik, and TUR, Moshe. *[INVITED] State of the art of Brillouin fiber-optic distributed sensing.* Optics & Laser Technology, 78:81–103, 2016. ISSN: 0030-3992. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2015.09.013>.
Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0030399215002571>
- [141] MUANENDA, Yonas, FARALLI, Stefano, OTON, Claudio J., and PASQUALE, Fabrizio Di. *Dynamic phase extraction in a modulated double-pulse \mathcal{E} -OTDR sensor using a stable homodyne demodulation in direct detection.* Opt. Express, 26(2):687–701, 2018. DOI: 10.1364/OE.26.000687.
Dostupné z: <https://opg.optica.org/oe/abstract.cfm?URI=oe-26-2-687>
- [142] NAN, Qiuming, LI, Sheng, YAO, Yiqiang, LI, Zhengying, WANG, Honghai, WANG, Lixing, and SUN, Lizhi. *A Novel Monitoring Approach for Train Tracking and Intrusion Detection in Underground Structures Based on Ultra-Weak FBG Sensing Array.* Sensors, 19(12), 2019. ISSN: 1424-8220. DOI: 10.3390/s19122666.
Dostupné z: <https://www.mdpi.com/1424-8220/19/12/2666>
- [143] NEDOMA, Jan, STOLARIK, Martin, FAJKUS, Marcel, PINKA, Miroslav, and HEJDUK, Stanislav. *Use of Fiber-Optic Sensors for the Detection of the Rail Vehicles and Monitoring of the Rock Mass Dynamic Response Due to Railway Rolling Stock for the Civil Engineering Needs.* Applied Sciences, 9(1), 2019. ISSN: 2076-3417. DOI: 10.3390/app9010134.
Dostupné z: <https://www.mdpi.com/2076-3417/9/1/134>

- [144] NELSON, Melvin A., DAVIES, Terence J., LYONS, Peter B., GOLOB, Edward J., and LOONEY, Larry D. *A Fiber Optic Time Domain Reflectometer*. Optical Engineering, 18(1):5 – 8, 1979. DOI: 10.1117/12.7972311.
Dostupné z: <https://doi.org/10.1117/12.7972311>
- [145] NIE, Mingchao, XU, Jian, YU, Jiekui, LIU, Jiasheng, ZHANG, Xiaojiao, WU, Jianjun, LIU, Wenjun, LI, Wencui, ZHAO, Jinglong, XIE, Kai, XIA, Xiaowen, LIU, Hongkai, LI, Guoxiang, XU, Ziya, CHEN, Xingyun, TAO, Hongyue, and YU, Shizhan. *Ultra long single span distributed sensing distance over 200km based on the phase-sensitive OTDR with bidirectional high-order Raman amplification*. In 2021 19th International Conference on Optical Communications and Networks (ICOCN), pp. 01–03. 2021. DOI: 10.1109/ICOCN53177.2021.9563754.
- [146] NISHIMURA, Akihiko, SHIMADA, Yukihiro, and SUZUKI, Hirokazu. *Development of femtosecond laser processed FBG sensors for high temperature piping system*. In 2013 Conference on Lasers and Electro-Optics Pacific Rim (CLEOPR), pp. 1–2. 2013. DOI: 10.1109/CLEOPR.2013.6600557.
- [147] OKAMOTO, Katsunari. *Chapter 1 - Wave Theory of Optical Waveguides*. In Katsunari Okamoto, editor, *Fundamentals of Optical Waveguides (Third Edition)*, pp. 1–12. Academic Press, 2022, third edition ed. ISBN: 978-0-12-815601-8. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-815601-8.50001-X>.
Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B978012815601850001X>
- [148] OKAMOTO, Tatsuya, IIDA, Daisuke, KOSHIKIYA, Yusuke, and HONDA, Nazuki. *Deployment Condition Visualization of Aerial Optical Fiber Cable By Distributed Vibration Sensing Based On Optical Frequency Domain Reflectometry*. Journal of Lightwave Technology, 39(21):6942–6951, 2021. DOI: 10.1109/JLT.2021.3107855.
- [149] OKAMOTO, Tatsuya, IIDA, Daisuke, KOSHIKIYA, Yusuke, and HONDA, Nazuki. *Distributed Vibration Sensing of Seismic Event by Optical Frequency Domain Reflectometry*. In 2021 European Conference on Optical Communication (ECOC), pp. 1–4. 2021. DOI: 10.1109/ECOC52684.2021.9605954.
- [150] OKAMOTO, Tatsuya, IIDA, Daisuke, and OSHIDA, Hiroyuki. *Vibration-Induced Beat Frequency Offset Compensation in Distributed Acoustic Sensing Based on Optical Frequency Domain Reflectometry*. Journal of Lightwave Technology, 37(18):4896–4901, 2019. DOI: 10.1109/JLT.2019.2933643.
- [151] OKAMOTO, Tatsuya, IIDA, Daisuke, and OSHIDA, Hiroyuki. *Investigation of Tolerance of OFDR-Based DAS to Vibration-Induced Beat Frequency Offset*. In 2020 Optical Fiber Communications Conference and Exhibition (OFC), pp. 1–3. 2020.
- [152] PADGETT, Miles J. and COURTIAL, Johannes. *Poincaré-sphere equivalent for light beams containing orbital angular momentum*. Opt. Lett., 24(7):430–432, 1999. DOI:

10.1364/OL.24.000430.

Dostupné z: <https://opg.optica.org/ol/abstract.cfm?URI=ol-24-7-430>

- [153] PENG, Zhaoqiang, JIAN, Jianan, WEN, Hongqiao, GRIBOK, Andrei, WANG, Mohan, LIU, Hu, HUANG, Sheng, MAO, Zhi-Hong, and CHEN, Kevin P. *Distributed fiber sensor and machine learning data analytics for pipeline protection against extrinsic intrusions and intrinsic corruptions*. Opt. Express, 28(19):27277–27292, 2020. DOI: 10.1364/OE.397509.
Dostupné z: <https://opg.optica.org/oe/abstract.cfm?URI=oe-28-19-27277>
- [154] PERSONICK, Stewart D. *Photon probe — an optical-fiber time-domain reflectometer*. The Bell System Technical Journal, 56(3):355–366, 1977. DOI: 10.1002/j.1538-7305.1977.tb00513.x.
- [155] PRISUTOVA, Jevgenija, KRYNKIN, Anton, TAIT, Simon, and HOROSHENKOV, Kirill. *Use of Fibre-Optic Sensors for Pipe Condition and Hydraulics Measurements: A Review*. CivilEng, 3(1):85–113, 2022. ISSN: 2673-4109. DOI: 10.3390/civileng3010006.
Dostupné z: <https://www.mdpi.com/2673-4109/3/1/6>
- [156] QIN, Zujun, HU, Yiwei, YUE, Yaoli, and TAN, Chao. *A dual-ended 400 km OFDR for vibration detection*. Measurement Science and Technology, 33(4):045203, 2022. DOI: 10.1088/1361-6501/ac4ac1.
Dostupné z: <https://dx.doi.org/10.1088/1361-6501/ac4ac1>
- [157] QU, Junrong, LIU, Yongsheng, ZHANG, Jian, and CHENG, Yang. *A Method to Monitor Railway Tracks' Foreign Body Invasion Based on Phase Sensitive Optical Fiber Sensing Technology*. In 2017 International Conference on Smart Grid and Electrical Automation (ICSGEA), pp. 315–319. 2017. DOI: 10.1109/ICSGEA.2017.151.
- [158] RAHMAN, Saifur, ALI, Farman, MUHAMMAD, Fazal, IRFAN, Muhammad, GLOWACZ, Adam, SHAHED AKOND, Mohammed, ARMGHAN, Ammar, FARAJ MURSAL, Salim Nasar, ALI, Amjad, and ALKAHTANI, Fahad Salem. *Analyzing Distributed Vibrating Sensing Technologies in Optical Meshes*. Micromachines, 13(1), 2022. ISSN: 2072-666X. DOI: 10.3390/mi13010085.
Dostupné z: <https://www.mdpi.com/2072-666X/13/1/85>
- [159] RAJAN, Ginu and INIEWSKI, Krzysztof. *Optical fiber sensors: Advanced techniques and applications*, pp. 1–559. Optical Fiber Sensors: Advanced Techniques and Applications. CRC Press, 2017.
Dostupné z: <https://doi.org/10.1201/b18074>
- [160] RAO, Yun-Jiang. *In-fibre Bragg grating sensors*. Measurement Science and Technology, 8(4):355, 1997. DOI: 10.1088/0957-0233/8/4/002.
Dostupné z: <https://dx.doi.org/10.1088/0957-0233/8/4/002>

- [161] RAO, Yun-Jiang. *In-fibre Bragg grating sensors*. Measurement Science and Technology, 8(4):355 – 375, 1997. DOI: 10.1088/0957-0233/8/4/002.
- [162] RAO, Yunjiang, WANG, Zinan, WU, Huijuan, RAN, Zengling, and HAN, Bing. *Recent Advances in Phase-Sensitive Optical Time Domain Reflectometry (Φ -OTDR)*. Photonic Sensors, 11(1):1–30, 2021. ISSN: 2190-7439. DOI: 10.1007/s13320-021-0619-4. Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/s13320-021-0619-4>
- [163] RINAUDO, Paula, PAYA-ZAFORTEZA, Ignacio, CALDERÓN, Pedro, and SALES, Salvador. *Experimental and analytical evaluation of the response time of high temperature fiber optic sensors*. Sensors and Actuators A: Physical, 243:167–174, 2016. ISSN: 0924-4247. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.sna.2016.03.022>. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0924424716301212>
- [164] RORIZ, Paulo, SILVA, Susana, FRAZÃO, Orlando, and NOVAIS, Susana. *Optical Fiber Temperature Sensors and Their Biomedical Applications*. Sensors, 20(7), 2020. ISSN: 1424-8220. DOI: 10.3390/s20072113. Dostupné z: <https://www.mdpi.com/1424-8220/20/7/2113>
- [165] SAHIDAN, Nur Syahirah, SALIM, Muhammad Aizi Mat, OSMAN, Siti Sarah, BAKHTIAR, Hazri, BIDIN, Noriah, KRISHNAN, Ganesan, OTHMAN, Mohd Hafiz Dzarfan, RAHMAN, Mukhlis Abdul, ISMAIL, Ahmad Fauzi, and YAHYA, Noorhana. *The effect of fbg grating lengths for temperature sensing*. Journal of Physics: Conference Series, 1484(1):012015, 2020. DOI: 10.1088/1742-6596/1484/1/012015. Dostupné z: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1484/1/012015>
- [166] SAIDIN, Norazlina, KAMARUZAMAN, Nurul Farhana Husna, ROSLAN, Farah Sakii-nah, RALIB, Aliza Aini Md, and SING, Lim Kok. *Graphene-oxide Coated on Fiber Bragg Grating for Temperature Sensor*. In 2021 8th International Conference on Computer and Communication Engineering (ICCCE), pp. 269–273. 2021. DOI: 10.1109/ICCCE50029.2021.9467205.
- [167] SALEH, Bahaa E. A. and TEICH, Malvin Carl. Fiber Optics, chap. 8, pp. 272–309. John Wiley & Sons, Ltd, 1991. ISBN: 9780471213741. DOI: <https://doi.org/10.1002/0471213748.ch8>.
- [168] SALEH, Bahaa E. A. and TEICH, Malvin Carl. Fundamentals of Photonics, vol. 2. John Wiley & Sons, 2019. ISBN: 9781119506874.
- [169] SALEHIOMRAN, Ali and JIANG, Zhiping. *Golay-Coded Incomplete Polarization Optical Time Domain Reflectometry for Enhanced Monitoring in Optical Telecommunication Networks*. In 2019 Asia Communications and Photonics Conference (ACP), pp. 1–3. 2019.

- [170] SANTIAGO-HERNÁNDEZ, Héctor, BELTRÁN-GONZÁLEZ, Anuar Benjamín, MORA-NUÑEZ, Azael, BRAVO-MEDINA, Beethoven, and POTTIEZ, Olivier. *Sagnac with Double-Sense Twisted Low-Birefringence Standard Fiber as Vibration Sensor*. *Sensors*, 22(21), 2022. ISSN: 1424-8220. DOI: 10.3390/s22218557.
Dostupné z: <https://www.mdpi.com/1424-8220/22/21/8557>
- [171] SHA, Zhou, FENG, Hao, SHI, Yi, and ZENG, Zhoumo. *Polarization Control for Dual Mach-Zehnder Fiber Vibration Sensor Using Simulated Annealing*. In 2019 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC), pp. 1–6. 2019. DOI: 10.1109/I2MTC.2019.8827069.
- [172] SHAN, Yuanyuan, JI, Wenbin, WANG, Qing, CAO, Lu, WANG, Feng, ZHANG, Yixin, and ZHANG, Xuping. *Performance Optimization for Phase-Sensitive OTDR Sensing System Based on Multi-Spatial Resolution Analysis*. *Sensors*, 19(1), 2019. ISSN: 1424-8220. DOI: 10.3390/s19010083.
Dostupné z: <https://www.mdpi.com/1424-8220/19/1/83>
- [173] SHANG, Ying, WANG, Chen, HUI LIU, Xiao, WANG, Chang, and DING PENG, Gang. *Phase-OTDR based on space difference of Rayleigh backscattering*. In 2016 15th International Conference on Optical Communications and Networks (ICOON), pp. 1–3. 2016. DOI: 10.1109/ICOON.2016.7875707.
- [174] SHAO, Yuying, LIU, Huanhuan, PENG, Peng, PANG, Fufei, YU, Guoqin, CHEN, Zhen, CHEN, Na, and WANG, Tingyun. *Distributed Vibration Sensor With Laser Phase-Noise Immunity by Phase-Extraction ϕ -OTDR*. *Photonic Sensors*, 9(3):223–229, 2019. ISSN: 2190-7439. DOI: 10.1007/s13320-019-0540-2.
Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/s13320-019-0540-2>
- [175] SHI, Yi, WANG, Yuanye, ZHAO, Lei, and FAN, Zhun. *An Event Recognition Method for Φ -OTDR Sensing System Based on Deep Learning*. *Sensors*, 19(15), 2019. ISSN: 1424-8220. DOI: 10.3390/s19153421.
Dostupné z: <https://www.mdpi.com/1424-8220/19/15/3421>
- [176] SINGH, Anamika. *Stokes vector-based polarization management in optical communication system: a review*. *Optical Engineering*, 59(09):090901–1–13, 2020. DOI: 10.1117/1.oe.59.9.090901.
Dostupné z: <https://lens.org/006-124-083-005-758>
- [177] SMITH, R. G. *Optical Power Handling Capacity of Low Loss Optical Fibers as Determined by Stimulated Raman and Brillouin Scattering*. *Appl. Opt.*, 11(11):2489–2494, 1972. DOI: 10.1364/AO.11.002489.
Dostupné z: <https://opg.optica.org/ao/abstract.cfm?URI=ao-11-11-2489>

- [178] SOMER, Jakub, URBAN, František, SZENDIUCH, Ivan, and URBAN, František. *Optical pressure sensors for harsh environment*. In 2017 21st European Microelectronics and Packaging Conference (EMPC) & Exhibition, pp. 1–5. 2017. DOI: 10.23919/EMPC.2017.8346868.
- [179] SONG, Han, SONG, Enzhong, PENG, Wang, WANG, Boyi, LIU, Yi, ZHAO, Guangyao, and LIU, Mingyao. *Miniature Structure Optimization of Small-Diameter FBG-Based One-Dimensional Optical Fiber Vibration Sensor*. IEEE Sensors Journal, 21(23):26763–26771, 2021. DOI: 10.1109/JSEN.2021.3120139.
- [180] SONG, Qiheng, PENG, Hekuo, ZHOU, Shufang, ZHOU, Pengwei, XIAO, Qian, and JIA, Bo. *A Novel Weak-Scattering Michelson Interferometer Based on PBS for Long-Distance Disturbance Localization*. Journal of Lightwave Technology, 38(6):1543–1549, 2020. DOI: 10.1109/JLT.2019.2953134.
- [181] SOTO, Marcelo A. and THÉVENAZ, Luc. *Modeling and evaluating the performance of Brillouin distributed optical fiber sensors*. Opt. Express, 21(25):31347–31366, 2013. DOI: 10.1364/OE.21.031347.
Dostupné z: <https://opg.optica.org/oe/abstract.cfm?URI=oe-21-25-31347>
- [182] SPIRIN, Vasily V., LÓPEZ-MERCADO, Cesar Alberto, JASON, Johan, BUENO-ESCOBEDO, José L., MÉGRET, Patrice, WULPART, Marc, KOROBKO, Dmitry A., ZOLOTOVSKII, Igor, SOKOLOVSKII, Sergei, and FOTIADI, Andrei A. *Cost-effective solution for phase-OTDR distributed acoustic/vibration sensing*. In Real-time Measurements, Rogue Phenomena, and Single-Shot Applications IV, vol. 10903, p. 109030Q. International Society for Optics and Photonics, SPIE, 2019.
Dostupné z: <https://doi.org/10.1117/12.2509767>
- [183] SPURNY, Vladimir, MUNSTER, Petr, TOMASOV, Adrian, HORVATH, Tomas, and SKALJO, Edvin. *Physical Layer Components Security Risks in Optical Fiber Infrastructures*. Sensors, 22(2), 2022. ISSN: 1424-8220. DOI: 10.3390/s22020588.
Dostupné z: <https://www.mdpi.com/1424-8220/22/2/588>
- [184] STOLARIK, Martin, NEDOMA, Jan, MARTINEK, Radek, KEPAK, Stanislav, HRUBESOVA, Eva, PINKA, Miroslav, and KOLARIK, Jakub. *New Methods to Seismic Monitoring: Laboratory Comparative Study of Michelson Fiber-Optic Interferometer and Pneumatic Measurement Systems*. Photonics, 8(5), 2021. ISSN: 2304-6732. DOI: 10.3390/photonics8050147.
Dostupné z: <https://www.mdpi.com/2304-6732/8/5/147>
- [185] SU, Yang, ZHANG, Chao, XU, Zhiyong, and WANG, Yimin. *The Pressure Sensing Method Based on Polarization Properties in Fiber*. In 2021 13th International Conference on Advanced Infocomm Technology (ICAIT), pp. 9–15. 2021. DOI: 10.1109/ICAIT52638.2021.9702021.

- [186] SUN, An, WU, Zhishen, WAN, Chunfeng, and YANG, Caiqian. *All-fiber optic acoustic sensor based on multimode-single mode-multimode structure*. *Optik*, 123(13):1138–1139, 2012. ISSN: 0030-4026. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2011.07.040>.
Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0030402611004098>
- [187] SUN, Zhenshi, LIU, Kun, JIANG, Junfeng, MA, Pengfei, WANG, Shuang, XU, Zhongyuan, GUO, Hairuo, ZHOU, Zichun, XU, Tianhua, and LIU, Tiegeng. *Distributed vibration sensing with high frequency response by using WDM based integrated scheme*. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 53(15):155106, 2020. DOI: 10.1088/1361-6463/ab6bee.
Dostupné z: <https://dx.doi.org/10.1088/1361-6463/ab6bee>
- [188] SUN, Zhenshi, LIU, Kun, JIANG, Junfeng, XU, Tianhua, WANG, Shuang, GUO, Hairuo, and LIU, Tiegeng. *High Accuracy and Real-Time Positioning Using MODWT for Long Range Asymmetric Interferometer Vibration Sensors*. *Journal of Lightwave Technology*, 39(7):2205–2214, 2021. DOI: 10.1109/JLT.2020.3047478.
- [189] SUN, Zhenshi, XU, Yingzhao, and FANG, Weiwei. *Distributed multiple vibrations detection with high frequency response assisted by dual NLL sources*. *Optical Fiber Technology*, 73:103074, 2022. ISSN: 1068-5200. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.yofte.2022.103074>.
Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1068520022002577>
- [190] SUN, Zhihui, WANG, Meng, LI, Shujuan, MIN, Li, YANG, Yuanyuan, NI, Jiasheng, and WANG, Chang. *A high sensitivity fiber Bragg grating seismic sensor system for intrusion detection*. In *Photonics and Education in Measurement Science 2019*, vol. 11144, p. 111440I. International Society for Optics and Photonics, SPIE, 2019. DOI: 10.1117/12.2532728.
Dostupné z: <https://doi.org/10.1117/12.2532728>
- [191] SURESH, Vishnu, JANIK, Przemyslaw, REZMER, Jacek, and LEONOWICZ, Zbigniew. *Forecasting solar PV output using convolutional neural networks with a sliding window algorithm*. *Energies*, 13(3):723, 2020.
- [192] TAYLOR, Henry F. and LEE, Chung E. *APPARATUS AND METHOD FOR FIBER OPTIC INTRUSION SENSING*, 1993.
- [193] TENG, Fei, YI, Duo, HONG, Xueming, and LI, Xuejin. *Optimized localization algorithm of dual-Sagnac structure-based fiber optic distributed vibration sensing system*. *Opt. Express*, 29(9):13696–13705, 2021. DOI: 10.1364/OE.421569.
Dostupné z: <https://opg.optica.org/oe/abstract.cfm?URI=oe-29-9-13696>

- [194] TOMBOZA, Wendy, GUERRIER, Sterenn, AWWAD, Elie, and DORIZE, Christian. *High Sensitivity Differential Phase OTDR for Acoustic Signals Detection*. IEEE Photonics Technology Letters, 33(13):645–648, 2021. DOI: 10.1109/LPT.2021.3084557.
- [195] VIPHAVAKIT, Charusluk, DURAIBABU, DineshBabu, O’KEEFFE, Sinead, and LEWIS, Elfed. *Fabry-Pérot based refractive index optical fiber sensor for measurement of oxygen concentration levels in hypoxic tumors during radiotherapy treatment*. In 2017 25th Optical Fiber Sensors Conference (OFS), pp. 1–4. 2017. DOI: 10.1117/12.2265084.
- [196] WANG, Benzhang, HUA, Zijie, PANG, Chao, ZHOU, Dengwang, BA, Dexin, LIN, Dianyong, and DONG, Yongkang. *Fast Brillouin Optical Time-Domain Reflectometry Based on the Frequency-Agile Technique*. Journal of Lightwave Technology, 38(4):946–952, 2020. DOI: 10.1109/JLT.2019.2950451.
- [197] WANG, Feng, ZHANG, Yuancheng, WANG, Wei, DOU, Rongrong, LU, Jianlun, XU, Weihong, and ZHANG, Xuping. *Development of a Multiperimeter Sensing System Based on POTDR*. IEEE Photonics Journal, 10(3):1–7, 2018. DOI: 10.1109/JPHOT.2018.2832186.
- [198] WANG, Jiao, HU, Yanzhu, and SHAO, Yanchao. *The Digging Signal Identification by the Random Forest Algorithm in the Phase-OTDR Technology*. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 394(3):032005, 2018. DOI: 10.1088/1757-899X/394/3/032005.
Dostupné z: <https://dx.doi.org/10.1088/1757-899X/394/3/032005>
- [199] WANG, Mu-Chun, CHAO, Shou-Yen, LIN, Chun-Yeon, CHANG, Cheng-Hsun-Tony, and LAN, Wen-How. *Low-Frequency Vibration Sensor with Dual-Fiber Fabry-Perot Interferometer Using a Low-Coherence LED*. Crystals, 12(8), 2022. ISSN: 2073-4352. DOI: 10.3390/cryst12081079.
Dostupné z: <https://www.mdpi.com/2073-4352/12/8/1079>
- [200] WANG, Xiangchuan, HU, Jintao, WANG, Feng, YONG, Yingqiong, ZHANG, Yixin, XUE, Min, ZHANG, Xuping, and PAN, Shilong. *Multi-vibration detection by probe pulses with ergodic SOPs in a POTDR system*. Opt. Express, 26(22):28349–28362, 2018. DOI: 10.1364/OE.26.028349.
Dostupné z: <https://opg.optica.org/oe/abstract.cfm?URI=oe-26-22-28349>
- [201] WANG, Yong, HUANG, Qing, ZHU, Wenjie, and YANG, Minghong. *Simultaneous Measurement of Temperature and Relative Humidity Based on FBG and FP Interferometer*. IEEE Photonics Technology Letters, 30(9):833–836, 2018. DOI: 10.1109/LPT.2018.2818744.
- [202] WANG, Yu, LI, Peihong, ZHANG, Jianguo, LIU, Xin, BAI, Qing, WANG, Dong, ZHANG, Mingjiang, and JIN, Baoquan. *Distributed optical fiber vibration sensor*

- using generalized cross-correlation algorithm*. Measurement, 144:58–66, 2019. ISSN: 0263-2241. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2019.04.092>.
Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0263224119304579>
- [203] WANG, Zinan, JIA, Xinhong, WU, Huijuan, PENG, Fei, FU, Yun, and RAO, Yunjiang. *Towards ultra-long-distance distributed fiber-optic sensing*. In 2017 25th Optical Fiber Sensors Conference (OFS), pp. 1–4. 2017. DOI: 10.1117/12.2272473.
- [204] WEI, Li, JIANG, Dazhou, YU, Lingling, LI, Hengchun, and LIU, Zhuang. *A Novel Miniaturized Fiber Bragg Grating Vibration Sensor*. IEEE Sensors Journal, 19(24):11932–11940, 2019. DOI: 10.1109/JSEN.2019.2936596.
- [205] WEI, Li, YU, Lingling, WANG, Jingjing, JIANG, Dazhou, LIU, Qin, and LIU, Zhuang. *An FBG-Sensing Two-Dimensional Vibration Sensor Based on Multi-Axis Flexure Hinge*. IEEE Sensors Journal, 19(10):3698–3710, 2019. DOI: 10.1109/JSEN.2019.2895232.
- [206] WITAS, Karel, STOLARIK, Martin, PINKA, Miroslav, ZABKA, Stanislav, JALOWICZOR, Jakub, NOVAK, Martin, and JAROS, Rene. *Perimetric monitoring: A comparison of a classical seismic sensor and fiber-optic interferometric sensor*. In Optical Sensors 2019, vol. 11028, p. 110282K. International Society for Optics and Photonics, SPIE, 2019. DOI: 10.1117/12.2522309.
Dostupné z: <https://doi.org/10.1117/12.2522309>
- [207] WU, Jingyu, WANG, Mohan, ZHAO, Kehao, HUANG, Sheng, ZAGHLOUL, Mohamed A. S., CAO, Rongtao, CARPENTER, David, ZHENG, Guiqiu, ROUNTREE, Steven Derek, and CHEN, Kevin P. *Distributed Fiber Sensors With High Spatial Resolution in Extreme Radiation Environments in Nuclear Reactor Cores*. Journal of Lightwave Technology, 39(14):4873–4883, 2021. DOI: 10.1109/JLT.2021.3075630.
- [208] WU, Jinyi, ZHUO, Rusheng, WAN, Shengpeng, XIONG, Xinzhong, XU, Xinliang, LIU, Bin, LIU, Juan, SHI, Jiulin, SUN, Jizhou, HE, Xingdao, and WU, Qiang. *Intrusion Location Technology of Sagnac Distributed Fiber Optical Sensing System Based on Deep Learning*. IEEE Sensors Journal, 21(12):13327–13334, 2021. DOI: 10.1109/JSEN.2021.3070721.
- [209] WU, Liyun, ZHENG, Yongqiu, XUE, Chenyang, BAI, Jiandong, and CHEN, Jiamin. *An Optical Acoustic Detection System Based on Fabry Pérot Etalon Stability Structure*. Micromachines, 12(12), 2021. ISSN: 2072-666X. DOI: 10.3390/mi12121564.
Dostupné z: <https://www.mdpi.com/2072-666X/12/12/1564>
- [210] WU, Wei and LIU, Xin. *Investigation on high temperature characteristics of FBG sensors*. Optik, 126(20):2411–2413, 2015. ISSN: 0030-4026. DOI:

<https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2015.06.009>.

Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0030402615004817>

- [211] XIAO, Lin, WANG, Yu, LI, Yan, BAI, Qing, LIU, Xin, and JIN, Baoquan. *Polarization Fading Suppression for Optical Fiber Sensing: A Review*. IEEE Sensors Journal, 22(9):8295–8312, 2022. DOI: 10.1109/JSEN.2022.3161075.
- [212] XIE, Lang, YE, Lu, WANG, Yajie, DENG, Ou, ZHAO, Mingfu, WU, Decao, MA, Zhizhen, JIANG, Shanghai, SHI, Shenghui, WU, Taojiang, ZOU, Xue, and LUO, Binbin. *Vibration Sensor Based On Graphene-coated Excessively Tilted Fiber Grating*. In 2019 18th International Conference on Optical Communications and Networks (ICO CN), pp. 1–3. 2019. DOI: 10.1109/ICO CN.2019.8934689.
- [213] XIN, Liping, LI, Zhengying, GUI, Xin, FU, Xuelei, FAN, Minlang, WANG, Jiaqi, and WANG, Honghai. *Surface intrusion event identification for subway tunnels using ultra-weak FBG array based fiber sensing*. Opt. Express, 28(5):6794–6805, 2020. DOI: 10.1364/OE.387317.
Dostupné z: <https://opg.optica.org/oe/abstract.cfm?URI=oe-28-5-6794>
- [214] XU, Chengjin, GUAN, Junjun, BAO, Ming, LU, Jiangang, and YE, Wei. *Pattern recognition based on time-frequency analysis and convolutional neural networks for vibrational events in Φ -OTDR*. Optical Engineering, 57(1):016103, 2018.
Dostupné z: <https://doi.org/10.1117/1.OE.57.1.016103>
- [215] XU, Weijie, YU, Feihong, LIU, Shuaiqi, XIAO, Dongrui, HU, Jie, ZHAO, Fang, LIN, Weihao, WANG, Guoqing, SHEN, Xingliang, WANG, Weizhi, WANG, Feng, LIU, Huanhuan, SHUM, Perry Ping, and SHAO, Liyang. *Real-Time Multi-Class Disturbance Detection for Φ -OTDR Based on YOLO Algorithm*. Sensors, 22(5), 2022. ISSN: 1424-8220. DOI: 10.3390/s22051994.
Dostupné z: <https://www.mdpi.com/1424-8220/22/5/1994>
- [216] YABLOCHKIN, Konstantin A. and DASHKOV, Michael V. *Study of the vibration detection using few-mode optical fiber*. In Optical Technologies for Telecommunications 2019, vol. 11516, p. 115160Y. International Society for Optics and Photonics, SPIE, 2020. DOI: 10.1117/12.2566518.
Dostupné z: <https://doi.org/10.1117/12.2566518>
- [217] YAN, Aibo, WAN, Lijun, and WU, Mengshi. *Event Identification for Phase-sensitive OTDR based on Boosting Ensemble Learning*. In 2021 IEEE Region 10 Symposium (TENSYP), pp. 1–5. 2021. DOI: 10.1109/TENSYP52854.2021.9550964.
- [218] YAN, Yaxi, ZHENG, Hua, ZHAO, Zhiyong, GUO, Changjian, WU, Xiong, HU, Junhui, LAU, Alan Pak Tao, and LU, Chao. *Distributed Optical Fiber Sensing Assisted by Optical Communication Techniques*. Journal of Lightwave Technology, 39(12):3654–3670, 2021. DOI: 10.1109/JLT.2021.3057670.

- [219] YANG, Yang, WANG, Mohan, YU, Zhihao, YU, Qingxu, and CHEN, Kevin P. *Multiplexable intrinsic Fabry-Pérot interferometers inscribed by femtosecond laser for vibration measurement in high temperature environments*. Sensors and Actuators A: Physical, 321:112562, 2021. ISSN: 0924-4247.
Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0924424721000236>
- [220] YANG, Yang, WANG, Ya, and CHEN, Ke. *Wideband fiber-optic Fabry-Perot acoustic sensing scheme using high-speed absolute cavity length demodulation*. Opt. Express, 29(5):6768–6779, 2021. DOI: 10.1364/OE.415750.
Dostupné z: <http://opg.optica.org/oe/abstract.cfm?URI=oe-29-5-6768>
- [221] YANG, Yubang, WANG, Dongning, and XU, Ben. *Optical Fiber Pressure Sensor Based on SMF-Capillary Structure*. In Asia Communications and Photonics Conference (ACP) 2018, p. Su2A.14. Optica Publishing Group, 2018.
Dostupné z: <https://opg.optica.org/abstract.cfm?URI=ACPC-2018-Su2A.14>
- [222] YIN, Shizhuo, RUFFIN, Paul B., and YU, Francis T.S. *Fiber optic sensors: Second edition*, pp. 1–477. Fiber Optic Sensors, Second Edition. CRC press, 2017.
Dostupné z: <https://www.taylorfrancis.com/books/edit/10.1201/9781420053661/fiber-optic-sensors-shizhuo-yin-paul-ruffin-francis-yu>
- [223] YU, Feihong, SHAO, Liyang, LIU, Shuaiqi, XU, Weijie, XIAO, Dongrui, LIU, Huanhuan, and SHUM, Perry Ping. *Data Reduction in Phase-Sensitive OTDR with Ultra-Low Sampling Resolution and Undersampling Techniques*. Sensors, 22(17), 2022. ISSN: 1424-8220. DOI: 10.3390/s22176386.
Dostupné z: <https://www.mdpi.com/1424-8220/22/17/6386>
- [224] YU, Zhihua, DAHIR, Abdi Karim A., DAI, Haolong, LUO, Yuansheng, QI, Guang, and LI, Zhihua. *Distributed optical fiber vibration sensors based on unbalanced Michelson interferometer and PGC demodulation*. Journal of Optics, 50(1):1–6, 2021. ISSN: 0974-6900. DOI: 10.1007/s12596-020-00622-6.
Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/s12596-020-00622-6>
- [225] YUAN, Hongyu, WANG, Yu, ZHAO, Rui, LIU, Xin, BAI, Qing, ZHANG, Hongjuan, GAO, Yan, and JIN, Baoquan. *An anti-noise composite optical fiber vibration sensing System*. Optics and Lasers in Engineering, 139:106483, 2021. ISSN: 0143-8166. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.optlaseng.2020.106483>.
Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0143816620319217>
- [226] YUSRI, Majeed S., FAISAL, Bahaa, ISMAIL, Mohammad Faizal, NORDIN, Nur Dalilla, SALEH, Nur Luqman, ISMAIL, Aiman, ABDULLAH, Fairuz, JAMALUDIN, Md Zaini, and SULAIMAN, Abdul Hadi. *Improving ϕ -OTDR Signal-to-Noise Ratio to Reduce*

- Ambiguity in Intrusion Detection*. In TENCON 2021 - 2021 IEEE Region 10 Conference (TENCON), pp. 363–368. 2021. DOI: 10.1109/TENCON54134.2021.9707380.
- [227] ZAHID, Muhammad Noaman, JIANG, Jianliang, and RIZVI, Saad. *Reflectometric and interferometric fiber optic sensor's principles and applications*. *Frontiers of Optoelectronics*, 12(2):215–226, 2019. ISSN: 2095-2767. DOI: 10.1007/s12200-019-0824-6.
Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/s12200-019-0824-6>
- [228] ZHAN, Yage, SONG, Zhongkang, SUN, Zeyu, YU, Muhuo, GUO, Aijin, FENG, Changheng, and ZHONG, Jiaxin. *A distributed optical fiber sensor system for intrusion detection and location based on the phase-sensitive OTDR with remote pump EDFA*. *Optik*, 225:165020, 2021. ISSN: 0030-4026. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2020.165020>.
Dostupné z: www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0030402620308561
- [229] ZHANG, Bowei and KAHRIZI, Mojtaba. *High-Temperature Resistance Fiber Bragg Grating Temperature Sensor Fabrication*. *IEEE Sensors Journal*, 7(4):586–591, 2007. DOI: 10.1109/JSEN.2007.891941.
- [230] ZHANG, Liuchao, JIANG, Yi, JIA, Jingshan, WANG, Peng, WANG, Sumei, and JIANG, Lan. *Fiber-optic micro vibration sensors fabricated by a femtosecond laser*. *Optics and Lasers in Engineering*, 110:207–210, 2018. ISSN: 0143-8166.
Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0143816618303592>
- [231] ZHANG, Peng, WANG, Shuang, JIANG, Junfeng, LI, Zhiyuan, YANG, Haokun, and LIU, Tiegen. *A Fiber-Optic Accelerometer Based on Extrinsic Fabry-Perot Interference for Low Frequency Micro-Vibration Measurement*. *IEEE Photonics Journal*, 14(4):1–6, 2022. DOI: 10.1109/JPHOT.2022.3183438.
- [232] ZHANG, Pengfei, XIANG, Ziyang, WANG, Fangjun, TANG, Yaqi, WANG, Chao, CHAN, Chi Chiu, and QIN, ZiXiong. *Fiber optic acoustic sensor based on Fiber Bragg grating Fabry-Perot(FBG-FP)cavity*. In 2021 19th International Conference on Optical Communications and Networks (ICOON), pp. 1–3. 2021. DOI: 10.1109/ICOON53177.2021.9563894.
- [233] ZHANG, Wen, ZHUANG, Wei, DONG, Mingli, ZHU, Lianqing, and MENG, Fanyong. *Dual-Parameter Optical Fiber Sensor for Temperature and Pressure Discrimination Featuring Cascaded Tapered-FBG and Ball-EFPI*. *IEEE Sensors Journal*, 19(14):5645–5652, 2019. DOI: 10.1109/JSEN.2019.2905635.
- [234] ZHAO, Jieru, ZHAO, Kehao, LI, Yuqi, WANG, Qirui, and CHEN, Kevin P. *Long-Term Stabilities Fiber Bragg Grating (FBG) Arrays Inscribed by Femtosecond Lasers at 910oC*. In 2021 Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO), pp. 1–2. 2021.

- [235] ZHAO, Xiaoting, SUN, Hongbin, LIN, Bo, ZHAO, Hongmin, NIU, Yingli, ZHONG, Xiang, WANG, Yidan, ZHAO, Yiming, MENG, Fanchao, DING, Jinmin, ZHANG, Xinghua, DONG, Liang, and LIANG, Sheng. *Markov Transition Fields and Deep Learning-Based Event-Classification and Vibration-Frequency Measurement for Φ -OTDR*. IEEE Sensors Journal, 22(4):3348–3357, 2022. DOI: 10.1109/JSEN.2021.3137006.
- [236] ZHENG, Hua, YAN, Yaxi, WANG, Yuyao, SHEN, Xingliang, and LU, Chao. *Deep Learning Enhanced Long-Range Fast BOTDA for Vibration Measurement*. Journal of Lightwave Technology, 40(1):262–268, 2022. DOI: 10.1109/JLT.2021.3117284.
- [237] ZHENG, Hua, ZHANG, Jingdong, GUO, Nan, and ZHU, Tao. *Distributed Optical Fiber Sensor for Dynamic Measurement*. Journal of Lightwave Technology, 39(12):3801–3811, 2021. DOI: 10.1109/JLT.2020.3039812.
- [238] ZHENG, Hua, ZHANG, Jingdong, ZHU, Tao, YIN, Guolu, BAI, Yongzhong, QU, Dingrong, HUANG, Xianbin, and QIU, Feng. *Fast distributed Brillouin optical fiber sensing based on pump frequency modulation*. Applied Physics Express, 11(7):072502, 2018. DOI: 10.7567/APEX.11.072502.
- [239] ZHENG, Hua, ZHANG, Jingdong, ZHU, Tao, YIN, Guolu, BAI, Yongzhong, QU, Dingrong, HUANG, Xianbin, and QIU, Feng. *Polarization independent fast BOTDA based on pump frequency modulation and cyclic coding*. Opt. Express, 26(14):18270–18278, 2018. DOI: 10.1364/OE.26.018270.
Dostupné z: <https://opg.optica.org/oe/abstract.cfm?URI=oe-26-14-18270>
- [240] ZHIRNOV, Andrey A., STEPANOV, Konstantin V., SAZONKIN, Stanislav G., CHOBAN, Tatyana V., KOSHELEV, Kirill I., CHERNUTSKY, Anton O., PNEV, Alexey B., NOVIKOV, Alexey O., and YAGODNIKOV, Dmitriy A. *Study of Intra-Chamber Processes in Solid Rocket Motors by Fiber Optic Sensors*. Sensors, 21(23), 2021. ISSN: 1424-8220. DOI: 10.3390/s21237836.
Dostupné z: <https://www.mdpi.com/1424-8220/21/23/7836>
- [241] ZHOU, Dengwang, DONG, Yongkang, WANG, Benzhang, PANG, Chao, BA, Dexin, ZHANG, Hongying, LU, Zhiwei, LI, Hui, and BAO, Xiaoyi. *Single-shot BOTDA based on an optical chirp chain probe wave for distributed ultrafast measurement*. Light: Science & Applications, 7(1):32, 2018. ISSN: 2047-7538. DOI: 10.1038/s41377-018-0030-0.
Dostupné z: <https://doi.org/10.1038/s41377-018-0030-0>
- [242] ZHOU, Hong-yang, ZHANG, Meng, MA, Guo-ming, LI, Cheng-rong, CUI, Bo-yuan, YIN, Yu, and WU, Yu-yi. *The Anti-Interference Method of Michelson Optical Fiber Interferometer for GIS Partial Discharge Ultrasonic Detection*. In 2019 IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena (CEIDP), pp. 283–286. 2019. DOI: 10.1109/CEIDP47102.2019.9009739.

- [243] ZHOU, Yanru, LIU, Xiaoxiang, FAN, Lifan, LIU, Wenyao, XING, Enbo, TANG, Jun, and LIU, Jun. *Temperature and vibration insensitive fiber optic vector magnetic field sensor*. Optics Communications, 530:129178, 2023. ISSN: 0030-4018.
Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0030401822008252>
- [244] ZHOU, Yin, YAN, Lianshan, HE, Haijun, LI, Zonglei, QIAN, Heng, ZHANG, Xinpu, LUO, Bin, and PAN, Wei. *DWI-Assisted BOTDA for Dynamic Sensing*. Journal of Lightwave Technology, 39(11):3599–3606, 2021. DOI: 10.1109/JLT.2021.3068071.
- [245] ZHOU, Zhengxian, YUAN, Yangsheng, YANG, Xinyan, GAN, Lu, DU, Youwu, YU, Ruilan, WANG, Lin, QU, Jun, ZHENG, Xianfeng, and CUI, Zhifeng. *Speech detection enhancement in optical fiber acoustic sensor via adaptive threshold function*. Optical Fiber Technology, 47:1–6, 2019. ISSN: 1068-5200.
Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1068520018304620>
- [246] ZHU, Weirun, LI, Min, LU, Haifei, WEN, Xiaoyan, DENG, Shuo, and JIANG, Chunhua. *Fast distributed dynamic strain sensing using a modified gain-profile tracing technique*. Opt. Express, 27(2):816–826, 2019. DOI: 10.1364/OE.27.000816.
Dostupné z: <https://opg.optica.org/oe/abstract.cfm?URI=oe-27-2-816>
- [247] ZINSOU, Romain, LIU, Xin, WANG, Yu, ZHANG, Jianguo, WANG, Yuncai, and JIN, Baoquan. *Recent Progress in the Performance Enhancement of Phase-Sensitive OTDR Vibration Sensing Systems*. Sensors, 19(7), 2019. ISSN: 1424-8220. DOI: 10.3390/s19071709.

Seznam symbolů, veličin a zkratk

ADC	(Analog-to-Digital Converter) Analogově digitální převodník
AOM	Akusticko-optický modulátor
kulovitá-EFPI	Vnější Fabryho-Pérotův Interferometr s kulovitým tvarem
BFD	Balanční fotodetektor
BOTDA	(Brillouin Optical Time-Domain Analysis) Brillouinova optická analýza v časové oblasti
CD	(Conventional Difference) Konvenční rozdíl
CSV	(Comma-Separated Values) Čárkou oddělené hodnoty
CW	(Continuous Wave) Spojitá vlna
DAS	Distribuované akustické snímání
DVI-BOTDA	BOTDA využívající dvojnásobného interferometru
EDFA	(Erbium-Doped Fiber Amplifier) Zesilovač s erbiovým vláknem
FBG	(Fiber Bragg Gratings) Braggovy vláknové mřížky
FD	Fotodetektor
FFT	(Fast Fourier Transform) Rychlá Fourierova transformace
FPGA	(Field Programmable Gate Array) Programovatelné hradlové pole
FPI	Fabryho-Pérotův interferometr
FRM	(Faraday Rotator Mirror) Faradayovo zrcátko
FS	Femtosekundový
FS	(Frequency Shift) Frekvenční posun
HiBi FLM	(Highly Birefringent Fiber Loop Mirror) Vysoce dvojlomná vláknová zrcadlová smyčka
IFD	Interferenční fotodetektor
ITLA	(Integrated Tunable Laser Assembly) Integrovaný laditelný laser
MGPT	(Modified Gain-Profile Tracing) Modifikované sledování profilu zisku
MI	Michelsonův interferometr
MZI	Machův-Zehnderův interferometr

OFDR	(Optical Frequency Domain Reflectometry) Optická reflektometrie ve frekvenční oblasti
OM	Optický modulátor
OTDR	(Optical Time-Domain Reflectometry) Optická reflektometrie v časové oblasti
OVS	Optické vláknové senzory
PBS	(Polarization Beam Splitter) Polarizační dělič paprsku
PN-BOTDA	Polarizačně nezávislá BOTDA
POTDR	Polarizační OTDR
SI	Sagnacův interferometr
SNR	(Signal to Noise Ratio) Odstup signálu od šumu
SOA	(Semiconductor Optical Amplifier) Polovodičový optický zesilovač
SR	(Spatial Resolution) Prostorové rozlišení
TMDS	(Technical Data Management System) Systém správy technických dat
ϕ-OTDR	(Phase-Sensitive Optical Time-Domain Reflectometry) Fázově citlivá optická reflektometrie v časové oblasti
a	počáteční amplituda
A	útlum
A_{eff}	nelineární efektivní plocha vedeného vidu
B	rozdíl indexu lomu mezi rychlou a pomalou osou dvojlomného vlákna
c	rychlost světla ve vakuu
E	dopadající světelná vlna
E_x	světelná vlna podél osy x
E_y	světelná vlna podél osy y
E_R	elektrická vlna z každého místa
E_0	amplituda vyslaného pulsu
f_{max}	maximální měřitelná frekvence
f_0	intermediální frekvence

$f_{s,ac}$	maximální opakovací frekvence
$g_B(z)$	lokální Brillouinův koeficient zesílení
I	výstupní intenzita světla
I_H	intenzita přeneseného paprsku procházejícího lineárním horizontálním polarizátorem
I_V	intenzita přeneseného paprsku procházejícího lineárním vertikálním polarizátorem
I_o	konstantní intenzita světla
l	vzdálenost
L	délka dvojlomého vlákna
L_r	délka referenčního vlákna
L_s	délka snímaného vlákna
n	index lomu
n_r	index lomu referenčního vlákna
n_s	index lomu snímaného vlákna
P	výkon vysílaného impulsu
P_1	vstupní výkon
P_2	výstupní výkon
P_1	dopadající výkon v dutině
P_P	perioda pulsu
P_T	odražený výkon v dutině
P_R	odražený výkon
P_t	přenášený výkon v dutině
$\hat{r}(z)$	vliv poměru a fáze Rayleighova zpětného rozptylu v různých prostorových podmínkách
SNRf(f)	odstup signálu od šumu ve frekvenční oblasti
SR	prostorové rozlišení
t	perioda

T	teplota
v	rychlost světla ve vlákne
v_g	skupinová rychlost pulsu
W	šířka impulsu
x	vzdálenost působení vibrace
x_m	získaný signál
\hat{x}_m	sinusový signál s danou frekvencí
z	prostorová poloha vráceného objektu
z	směr šíření
α_f	termooptický koeficient
α_s	ztráta způsobená Rayleigho rozptylem
β	konstanta šíření
γ	rychlost změny kmitočtu
δ_0	počáteční fáze
Δ	změna hodnoty dané veličiny
Δz	délka interakce
ΔF	frekvenční rozsah laseru
ε	změna podélné deformace
λ	vlnová délka
λ_B	Braggova vlnová délka
Λ	perioda vláknové mřížky
ρ_e	elasto-optický koeficient
τ_p	doba trvání impulsu
ξ_f	koeficient tepelné roztažnosti vlákna
ω_s	úhlový kmitočet dopadajícího světla