

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY
A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

ÚSTAV TELEKOMUNIKACÍ

Ing. Petr Dejdar

Optické vláknové senzory

Optical-fiber sensors

Zkrácená verze PH.D. THESIS

Specializace: Teleinformatika

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

Oponenti:

Datum obhajoby:

KLÍČOVÁ SLOVA

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

KEYWORDS

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

MÍSTO ULOŽENÍ PRÁCE

Disertační práce je k dispozici na Vědeckém oddělení děkanátu FEKT VUT v Brně, Technická 10, Brno, 616 00

ARCHIVED IN

Dissertation is available at the Science Department of Dean's Office FEEC, Brno University of Technology, Technická 10, Brno, 616 00

© Petr Dejdar, 2023

ISBN 80-214-

ISSN 1213-4198

OBSAH

Úvod	5
1 Měření citlivosti optických vláken na akustické vibrace	6
1.1 Měření v ideálních podmínkách	6
1.2 Měření optických kabelů v lištách v běžné laboratoři	10
1.3 Venkovní měření pro testování citlivosti systémů	14
2 OVS využívající analýzu změny stavu polarizace	20
2.1 Optimalizace pracovního bodu	20
2.2 Srovnání citlivosti MZI a polarizačního senzoru	22
2.3 Měření citlivosti polarizačního analyzátoru v závislosti na konfiguraci systému	26
2.4 Detekce kolejových vozidel na základě polarizačních změn	28
3 Zabezpečení fyzické vrstvy proti nežádoucí manipulaci	37
4 Detekce vibrací pomocí Φ-OTDR	41
Závěr	45
Reference	48
Curriculum Vitæ	53
Abstrakt	53

ÚVOD

V posledním desetiletí optická vlákna dominují datovým přenosům, jak u páteřních sítí, tak i v sítích propojujících koncové uživatele. Jsou využívány 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 z pravidla připojeny pomocí optických kabelů k páteřní síti [1].

Využití optických sítí navíc přesahuje možnost datových přenosů tím, že jsou využívány pro další fotonické služby jako je přenos přesného času [11], kvantová distribuce klíčů [10] nebo právě využití jako senzorické systémy [14]. 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 [8].

Senzorické systémy byly v minulosti využívány ve velice omezeném počtu aplikací, kvůli své ceně a mnohdy větší prostorové konstrukci. V současné době dochází k množství výzkumů zabývajících se touto problematikou a tím dochází ke zvyšování citlivostí, snižování cen. Zároveň dochází k testování senzorických systémů pro velkou škálu aplikací od zabezpečení perimetru [21], inženýrských sítí [9], jaderných zařízení [22], přes biomedicínu [15] a mnoho dalších odvětví.

Práce popisuje implementaci systému na bázi optické reflektometrie a možnosti vylepšení v podobě využití algoritmů pro detekci hran a tím zvýšení odstupu signálu od šumu (Signal-to-Noise Ratio – SNR) celého systému. V kapitole 1 jsou pak popsána měření citlivosti optických vláken a kabelů na akustické vibrace, čímž je možné efektivně odposlouchávat nebo zabraňovat odposlechu událostí nebo řeči v okolí optického vlákna. Z tohoto měření byl vyvozen závěr, že detekce polarizace je díky nízké citlivosti vhodná pro zabezpečení fyzické vrstvy proti nežádoucí manipulaci, o které pojednává kapitola 3.

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 vysokých přesností u dat generovaných optickými senzorickými systémy, které ve většině případů odpovídají audio signálům. z tohoto důvodů 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 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 interferometrii a detekce polarizace byl testován také komerční systém pro distribuované akustické snímání (DAS).

1.1 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 1.1. K měření byl použit akustický analyzátor Audio Precision APx525, jehož jeden kanál byl řízen kompenzačním mikrofonom a druhý zvukovým signálem detekovaným interferometrem.

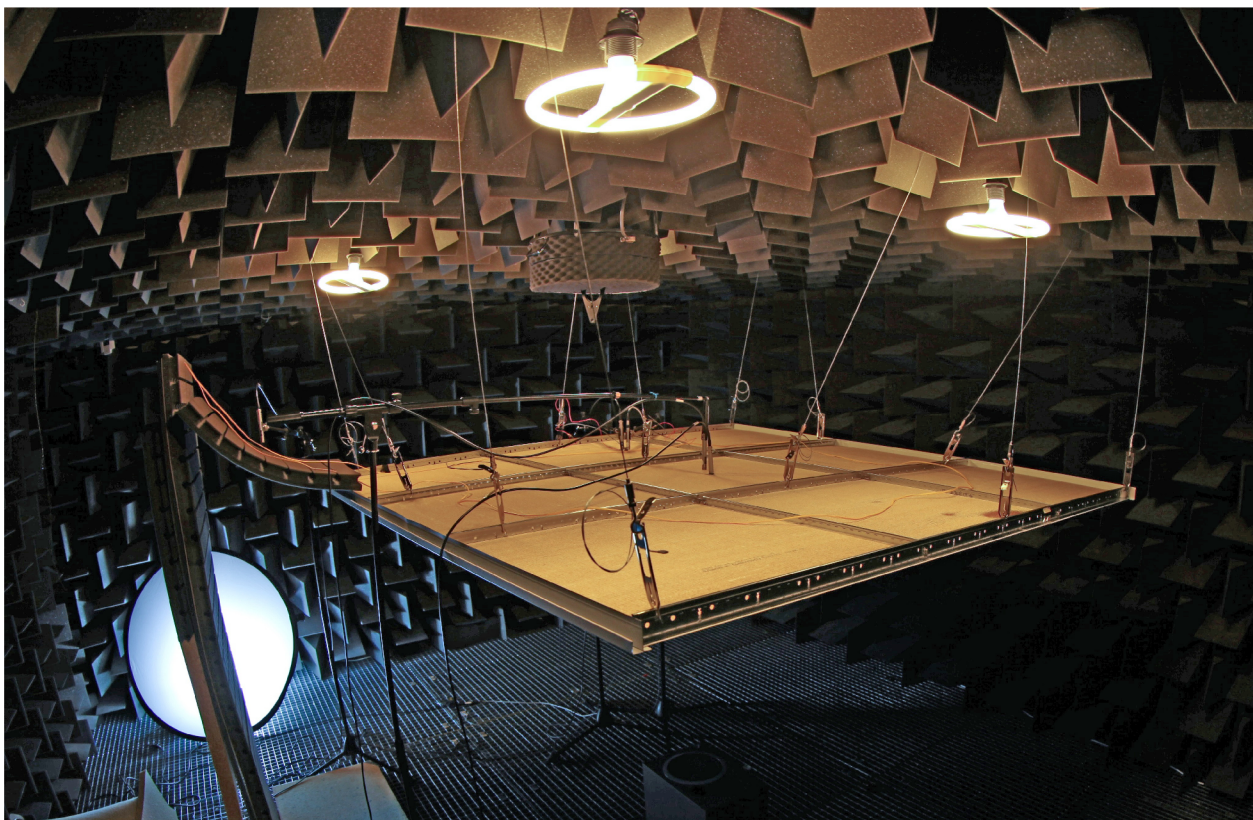
Určování kvality signálu probíhá pomocí výpočtu SNR ve frekvenční oblasti. Tento výpočet lze vyjádřit vztahem

$$\text{SNRf}(f) = 10 \log_{10} \frac{\sum_{m=1}^M |\hat{x}_m|^2}{\sum_{m=1}^M |x_m - \hat{x}_m|^2}, \quad (1.1)$$

kde \hat{x}_m je sinusový signál s danou frekvencí a x_m je získaný signál. Hodnota SNRf 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.
- 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 logaritmičtě rozložených od 50 Hz do 20 kHz. Na obrázku 1.2 je vidět porovnání



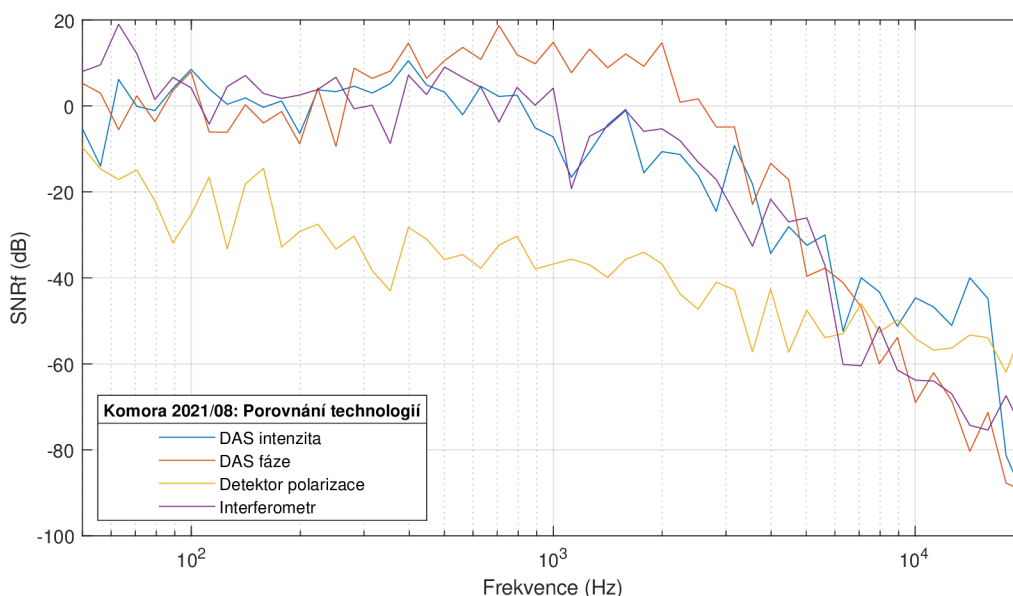
Obr. 1.1: Fotografie testovacího pracoviště v bezodrazové komoře.

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 [3].

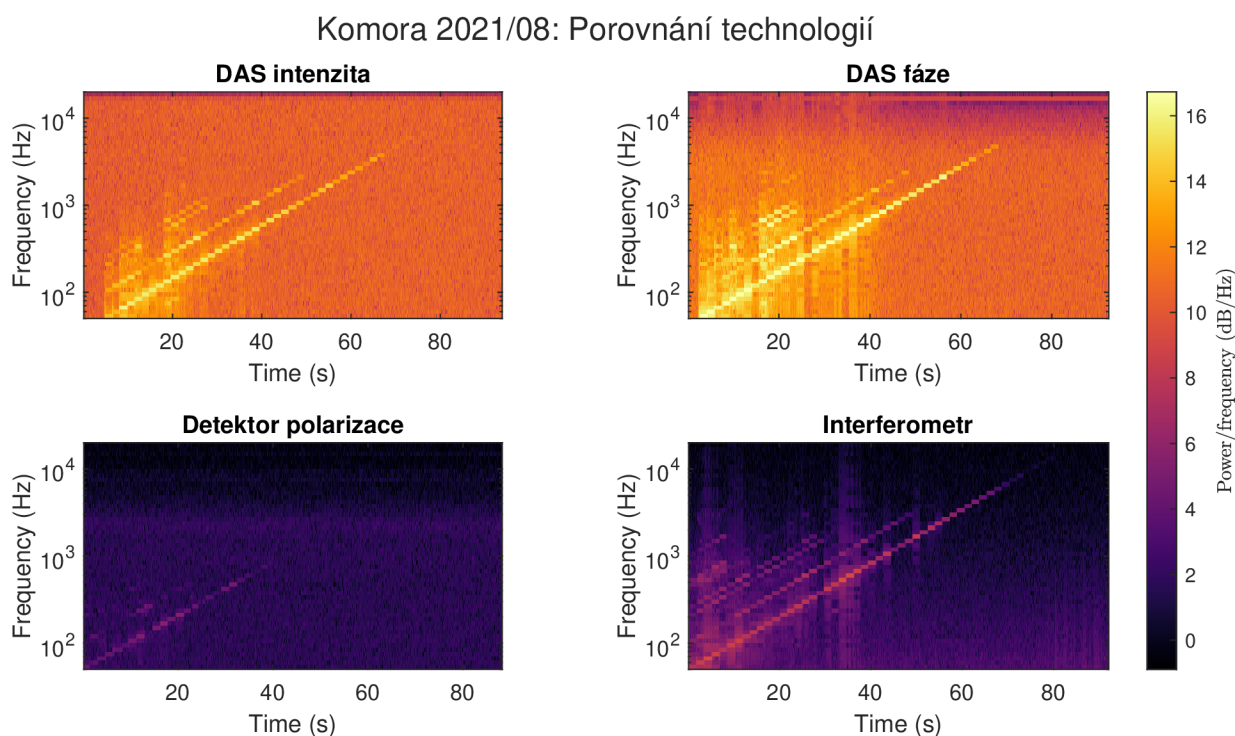
Na obrázku 1.3 je možné vidět vytvořený spektrogram z náměrů signálu s frekvenčními skoky. Je viditelné, jak detektor polarizace snímá pouze nízké frekvence a taktéž jsou zde viditelné jednotlivé frekvenční skoky.

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, 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. 1.2: Porovnání citlivosti jednotlivých technologií na akustické vibrace.

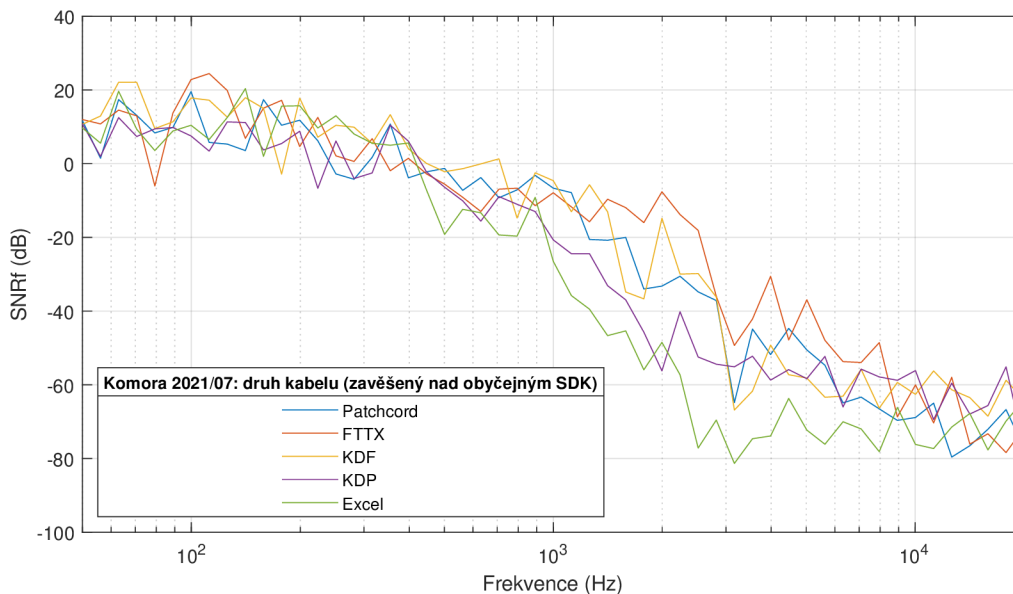


Obr. 1.3: Spektrogramy měření jednotlivými technologiemi.

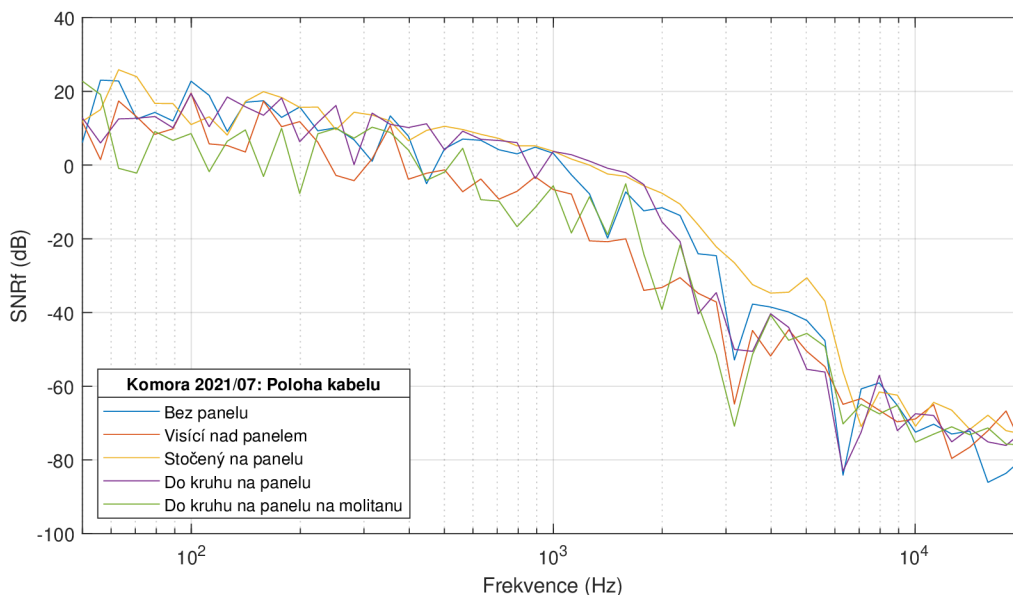
U jednotlivých typů kabelů bylo cílem změřit, jak ovlivňuje opláštění kabelu, nebo počet vláken přenos akustických vibrací. Všechny typy kabelů byly zavěšeny nad testovacím stropem se standardními panely, abychom eliminovali vliv stropnic a stylu uchycení. Jak je vidět na obrázku 1.4, v nižších frekvencích, 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 FFTX. 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 1.5, 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 1.6.



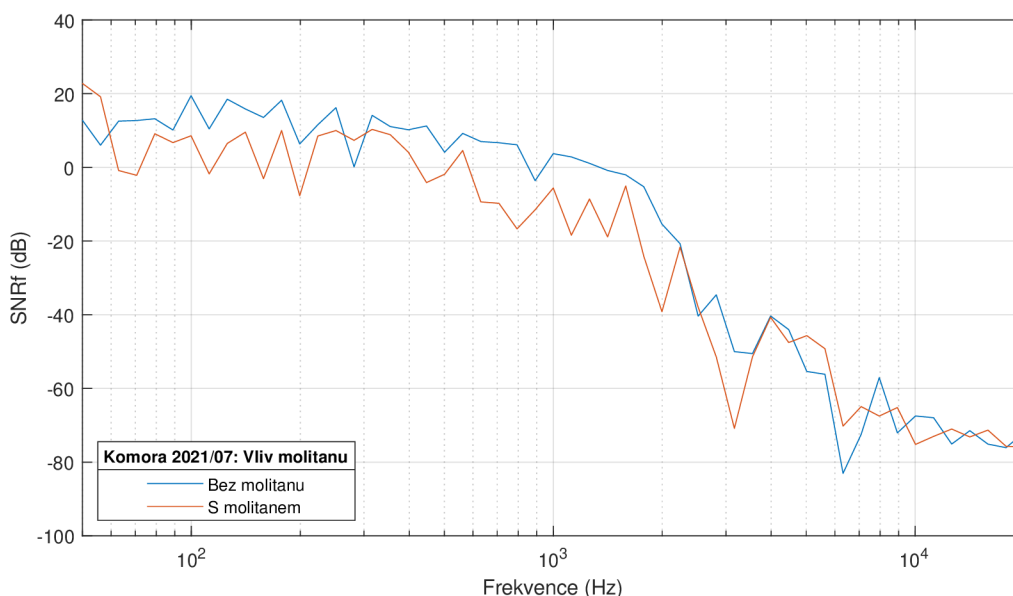
Obr. 1.4: Porovnání citlivosti 5 druhů kabelů.



Obr. 1.5: Porovnání citlivosti podle polohy kabelu.

Jako stropní panely byly testovány:

- žádný panel,
- standardní panel,



Obr. 1.6: Porovnání citlivosti při použití molitanové výplně.

- AMF ECOMIN Filigran akustický panel.

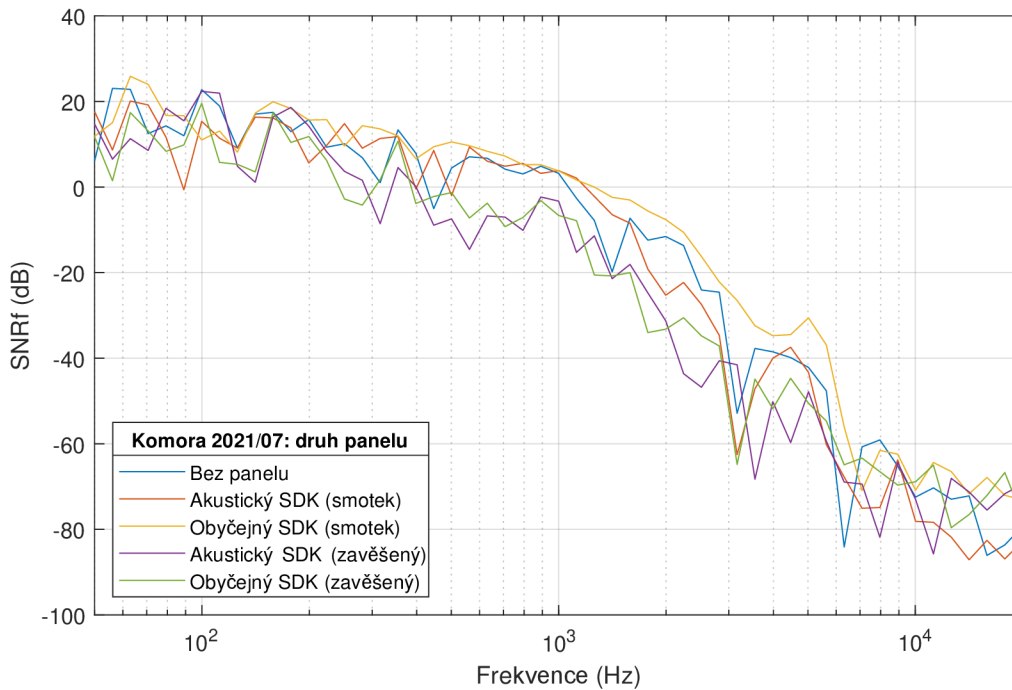
Z obrázku 1.7 je patrné, že konfigurace obsahující smotek kabelu je obecně citlivější na akustické vibrace, což je pravděpodobně způsobeno rozvibrováním celého stropu, a tím i lepším přenosu akustických vibrací na optické vlákno. Zavěšený kabel má potom nižší citlivost. Z grafu je také možné porovnat 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.

1.2 Měření optických kabelů v lištách v běžné laboratoři

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 1.8 je vidět schéma vytvořeného testovacího pracoviště. Jako optické kabely byly použity čtyřvláknový SM 09/125 G.657a LSZH a dvanactivláknový FTTx DROP G657a LSOH kabely. Místnost pro umístění reproduktoru generujícího signál 5.36 (CyberGrid) je spojena kabely s vedlejší místností 5.58 (serverovna) a s 5.30 (chodba). Z chodby je dále možné udělat propoj do místnosti 5.59 (měřicí), 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



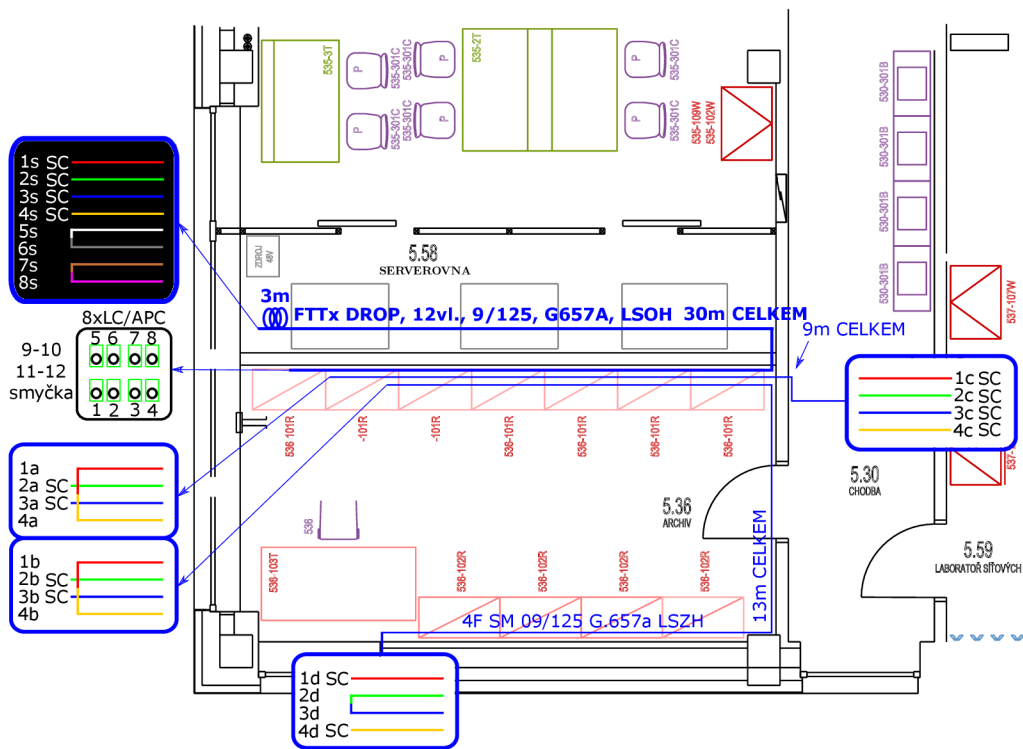
Obr. 1.7: Závislost typu panelu a způsobu uchycení na citlivosti.

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.

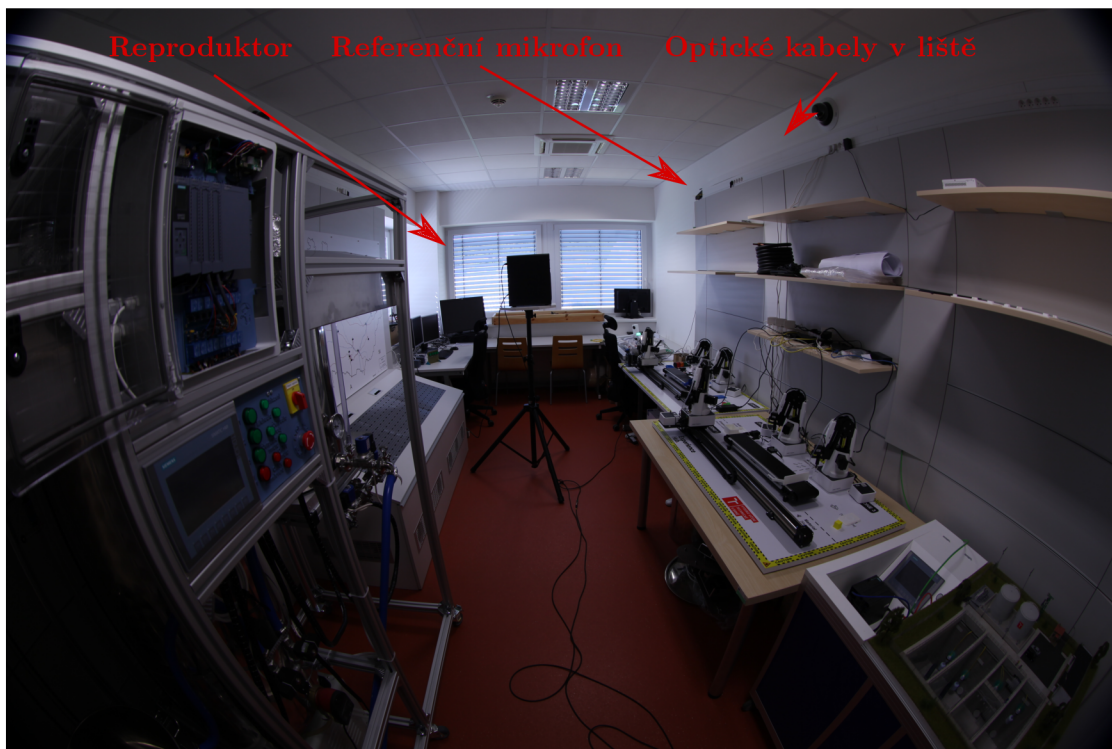
Tyto tři topologie byly zvoleny z důvodu různorodosti měření, u kterých posuzujeme kabel vedoucí jednou stěnou, na kterou působí reproduktor, kabel vedoucí třemi stěnami obklopujícími reproduktor a kabel, který prochází serverovnou, díky čemuž lze simulovat běžné rušení kabelu vzduchotechnikou a běžícími 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 vlákem a mikrofonom. Finální podobu zapojení můžeme vidět na obrázku 1.9.

Na obrázku 1.10 je vidět naznačení kabelů v lištách (modrou barvou) a také 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.

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 sig-

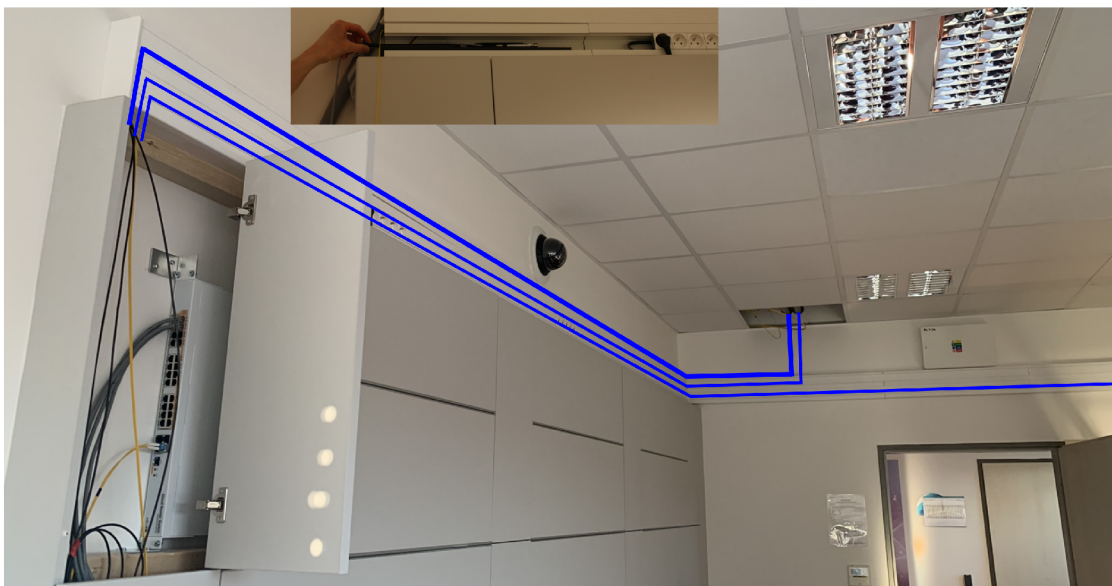


Obr. 1.8: Schematická podoba vytvořeného pracoviště pro měření citlivosti optických vláken na akustické vibrace.



Obr. 1.9: Finální podoba testovacího pracoviště.

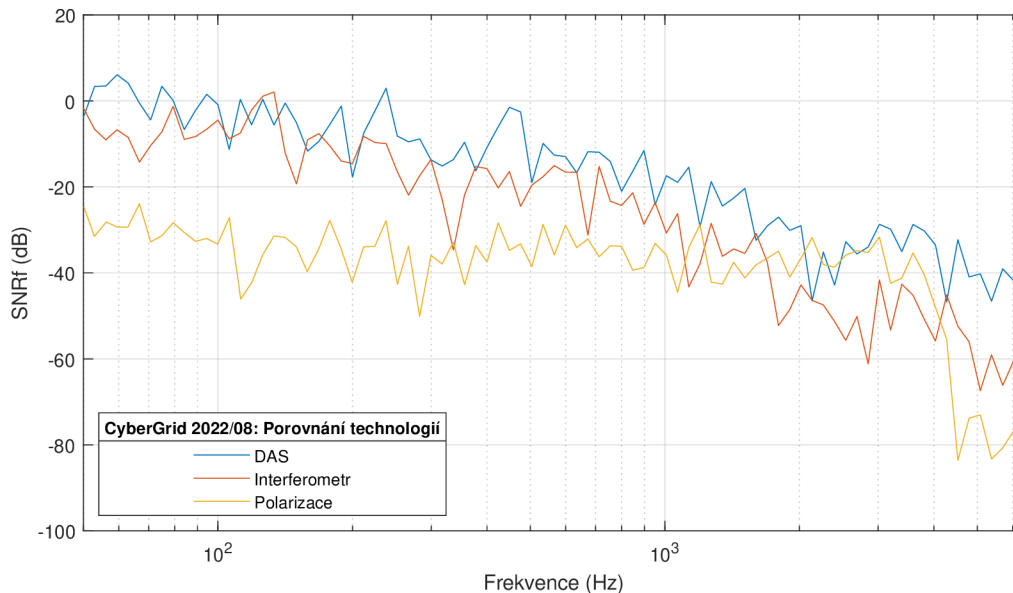
nál reprodukován ve třech různých úrovních hlasitostí, jež úrovní akustického tlaku odpovídají tiché mluvě 54dB(A) (relaxed), normální hlasitosti 60dB(A) (normal) a mluvení zvýšeným



Obr. 1.10: Naznačení optických kabelů umístěných v plastových lištách s mikrofonem.

hlasem 66 dB(A) (raised).

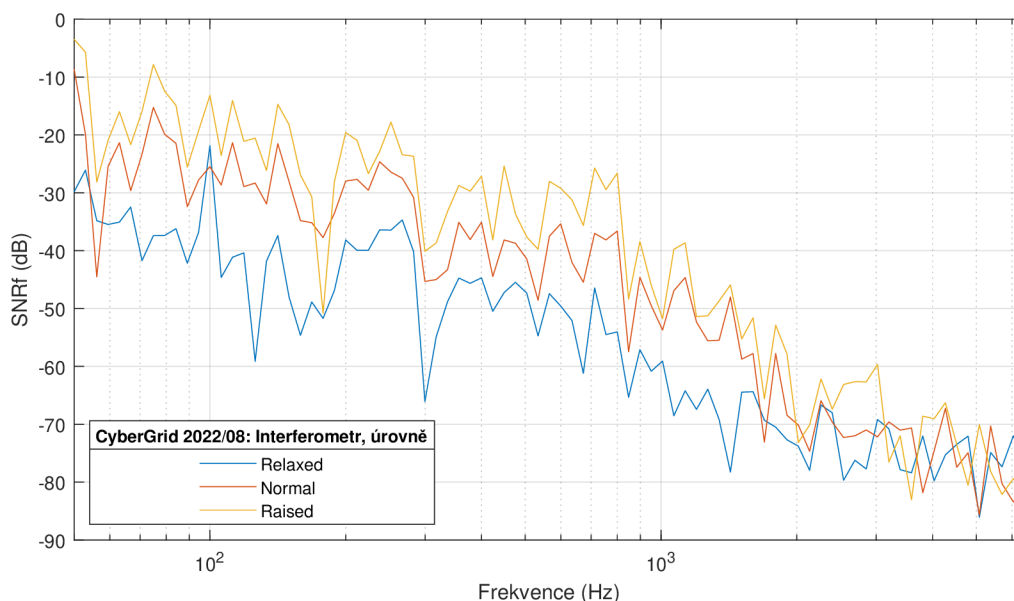
Porovnání citlivostí jednotlivých technologií je vidět na obrázku 1.11. Úroveň hlasitosti odpovídala hodnotě normal. Z grafu je patrné, že v reálných podmínkách je nejcitlivější systém DAS, který má mírně vyšší SNR než interferometr. Polarizační detektor má pak výrazně nižší citlivost.



Obr. 1.11: Porovnání citlivosti jednotlivých technologií v reálných podmínkách.

Při porovnávání jednotlivých úrovní hlasitostí 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 1.12. Je to logicky způsobeno nižším akustickým tlakem

vznikajícím nižší hlasitostí reproduktoru, čímž nedochází k tak silnému rozvibrování vlákna.



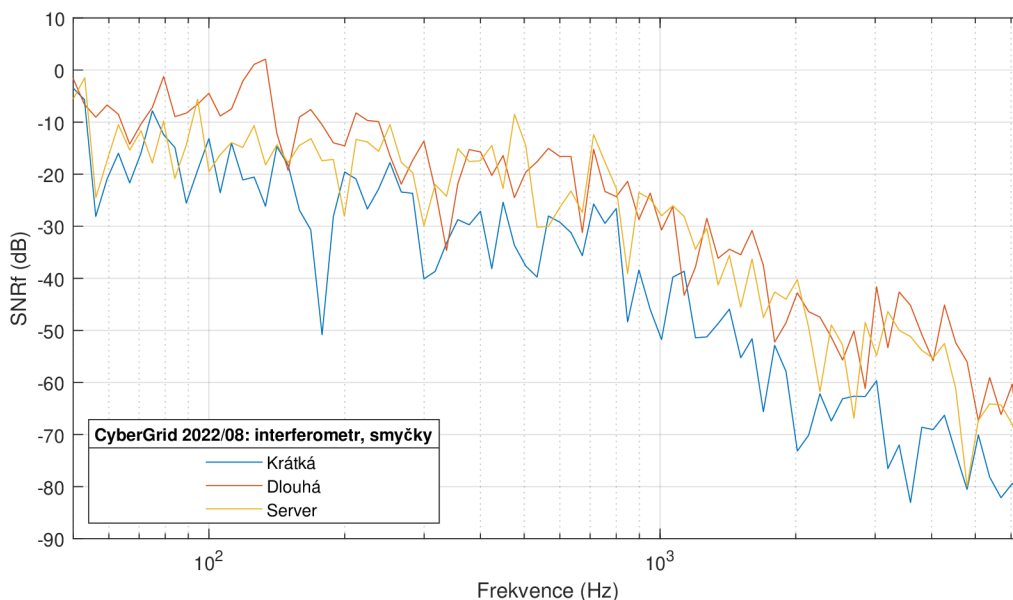
Obr. 1.12: Porovnání citlivosti jednotlivých úrovní hlasitostí při měření v reálných podmínkách.

Poněkud zajímavější výsledky nabízí porovnání měření jednotlivých topologií, jež se pro jednotlivé technologie liší. Zatímco u interferometru vychází jako nejcitlivější dlouhá smyčka, viz obrázek 1.14, u DAS je nejcitlivější smyčka server, viz obrázek 1.13, což platí pro všechny měřené hlasitosti. Důvod se pravděpodobně skrývá 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.

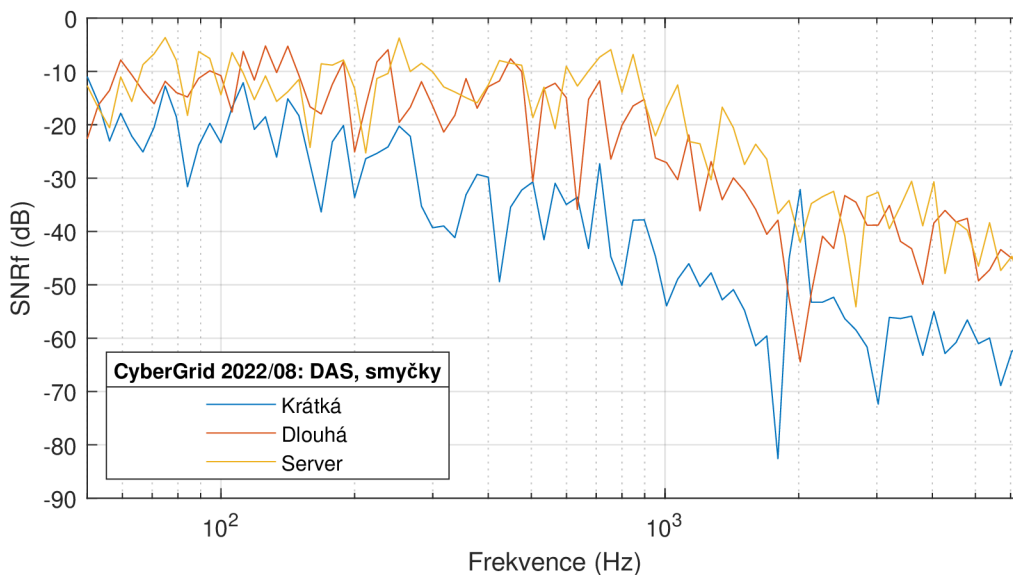
U detektoru polarizace je signál už na nejnižších frekvencích pod úrovní šumu, tím pádem jsou jeho výsledky irelevantní. Pokud by došlo ke zvýšení hlasitosti, tak by se vzhledem ke konstrukci choval pravděpodobně podobně jako interferometr.

1.3 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 1.15 a skládá se z vnitřní infrastruktury, která prochází budovou v podhledech, výtahovými šachtami, a je zakončena v serverovně, odkud probíhala



Obr. 1.13: Porovnání citlivosti konfigurace trasy v reálných podmínkách pro interferometr.



Obr. 1.14: Porovnání citlivosti konfigurace trasy v reálných podmínkách pro DAS.

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 nezámrazné hloubce a vede z šachty, jež je vidět na obrázku 1.16 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, jezdoucími 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 umístění 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.

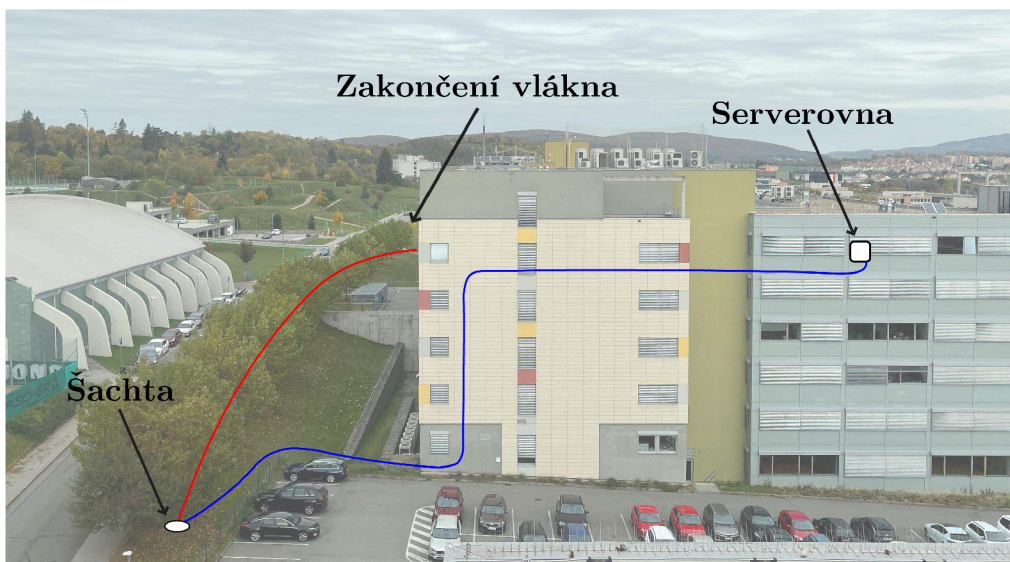
U DAS systému jsou výsledky o poznání lepší. Zde bylo možné data zobrazit v 2D grafu a pomocí FFT získat frekvenční charakteristiku. Jak je vidět na obrázku 1.17, z náměru jízdy vozidla po silnici je možné jasně určit, že se jedná o vozidlo, jelikož se jeho odezva objevuje na více kanálech současně, 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.

Oproti tomu chůze nezpůsobuje tak silné vibrace. Jak je vidět na obrázku 1.18, 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 1.19 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 1.20 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 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 4, konkrétně obrázek 4.5.

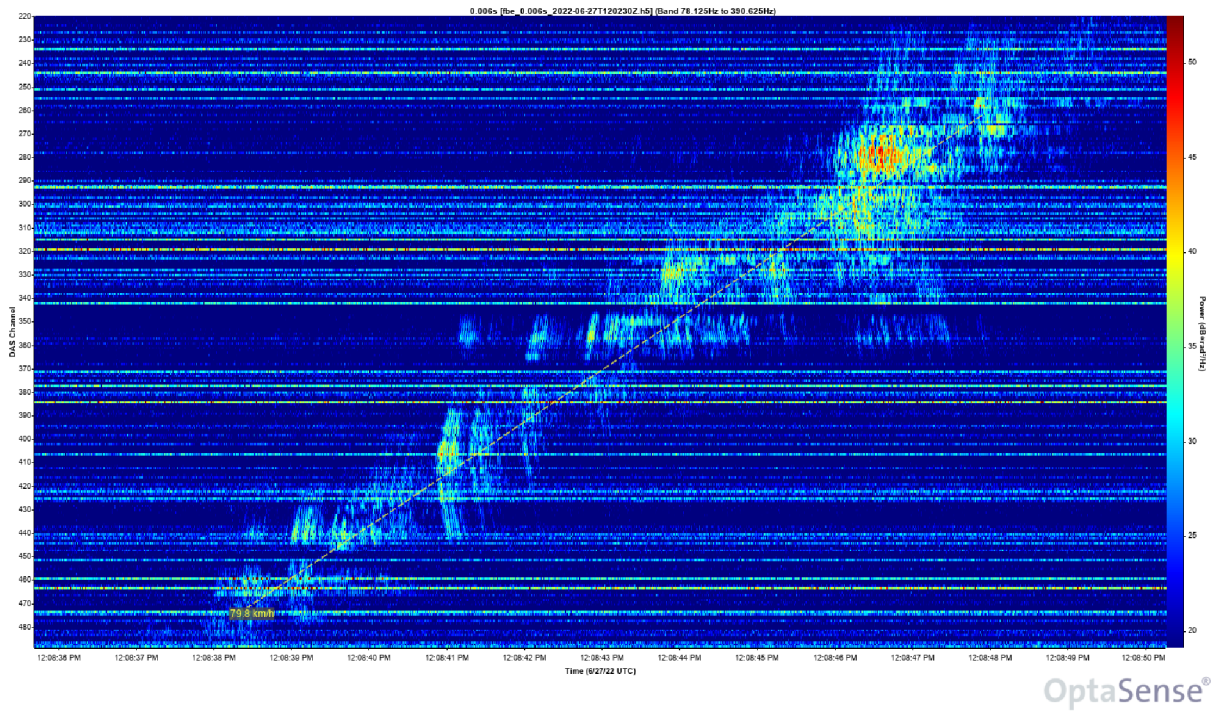
Polarizační detektor zachytil pouze klepání na víka šachty, jak je možné vidět na obrázku 1.21. Zde se nabízí zajímavá možnost využití tohoto cenově dostupného systému pro zabezpečení fyzické vrstvy. To je dáno právě tím, že není zatížen rušením okolních běžných vlivů a dokáže zaznamenat pouze anomálie v těsné blízkosti vláken a velice citlivě odhalit případnou nepovolenou manipulaci s vlákny nebo kabely.



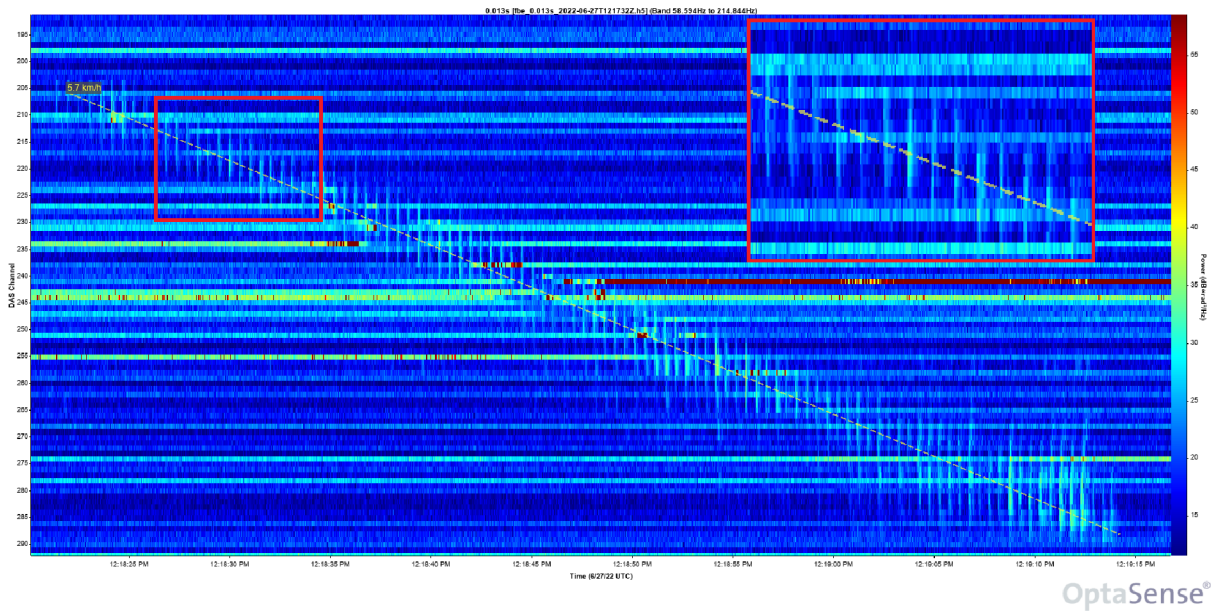
Obr. 1.15: Testovací polygon.



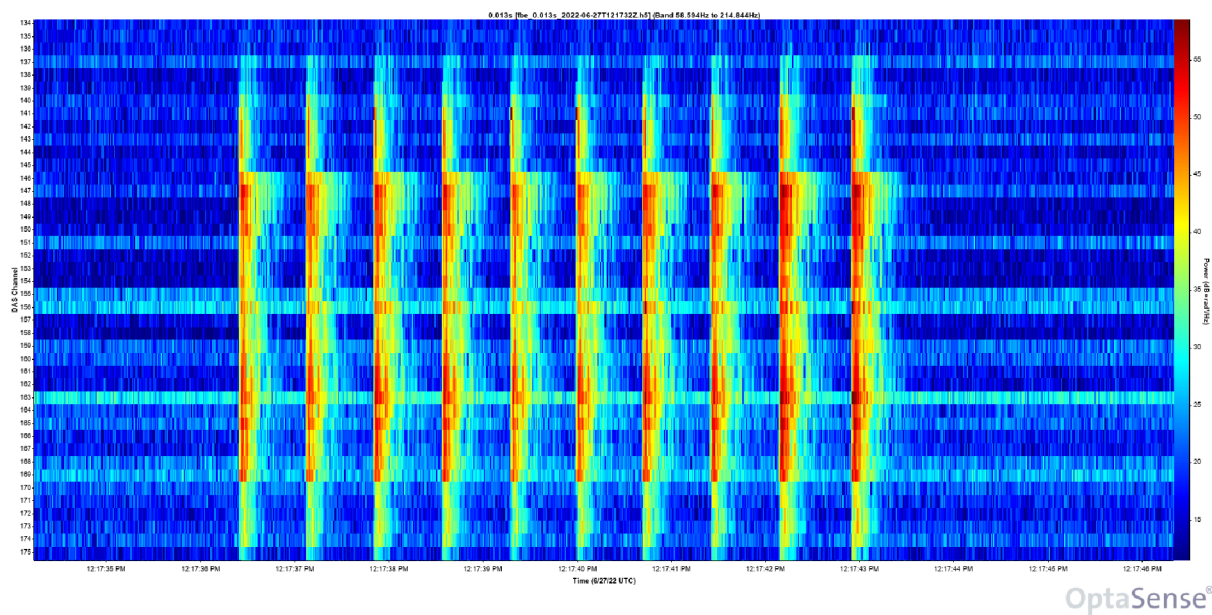
Obr. 1.16: Fotka venkovní šachty.



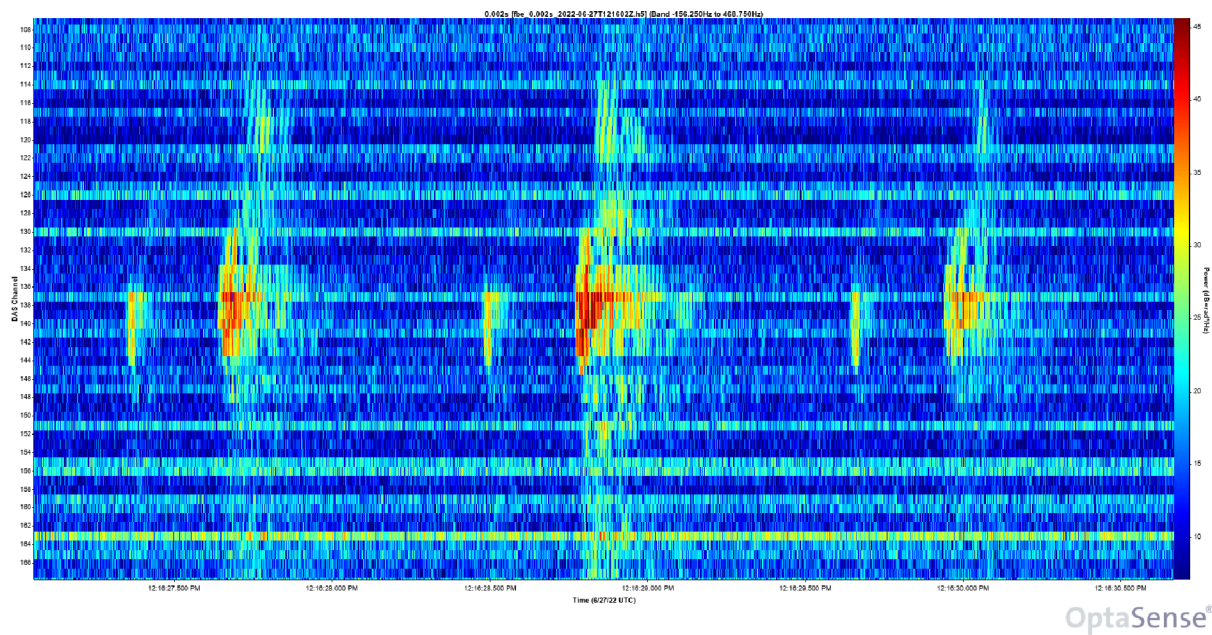
Obr. 1.17: Frekvenční zobrazení waterfall grafu z DAS systému průjezdu vozidla.



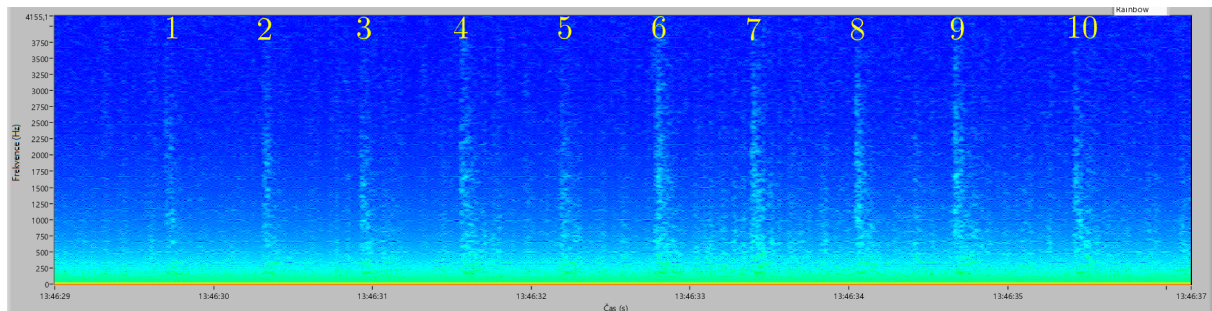
Obr. 1.18: Frekvenční zobrazení waterfall grafu z DAS systému chůze.



Obr. 1.19: Frekvenční zobrazení waterfall grafu z DAS systému poklepů na šachtu.



Obr. 1.20: Frekvenční zobrazení waterfall grafu z DAS systému skoků.



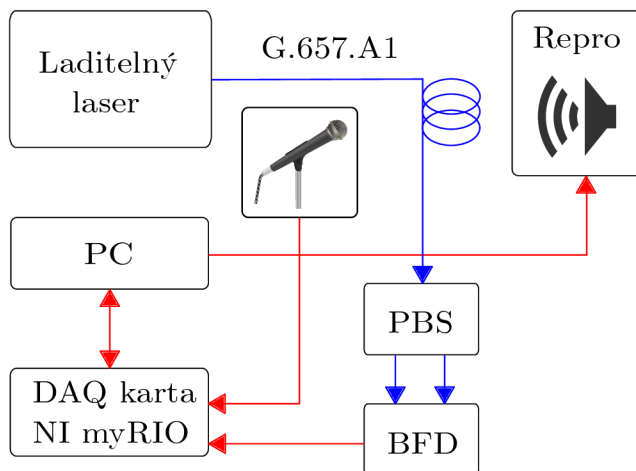
Obr. 1.21: Spektrogram pro 10 klepnutí rukou na víko šachty z detektoru změn polarizace.

2 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 2.4) a druhým je rozdělení polarizace podle polarizačních rovin a následné snímání pomocí balančního fotodetektoru (BFD).

2.1 Optimalizace pracovního bodu

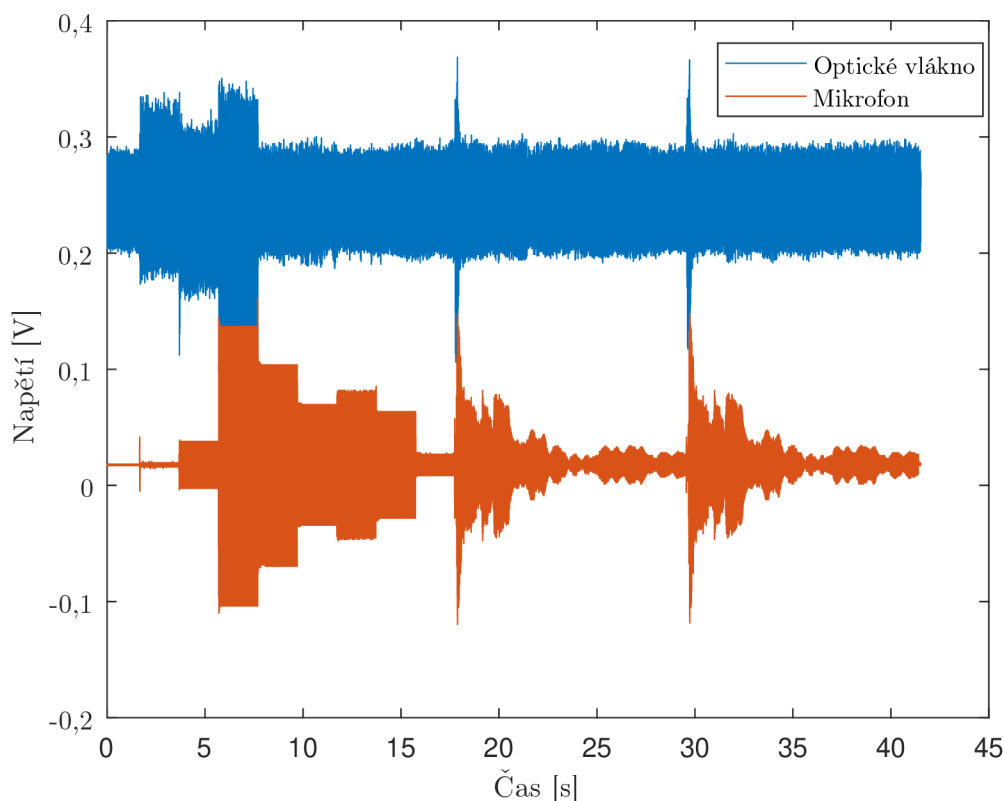
Vzhledem k tomu, že citlivost celkového měřicího systému je vždy závislá na vysílacím výkonu, bylo navrženo zapojení tak, aby mohl být nalezen optimální pracovní bod. Zapojení se skládá z laditelného laseru (ITLA), PBS, BFD a karty zaznamenávající data a je zobrazeno na obrázku 2.1. Pro generování vibrací byl použit reproduktor, v jehož blízkosti byl přichycen patchcord splňující specifikaci G.657.A1. Pro reálný záznam zvuku byl použit stolní mikrofon 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. 2.1: 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 2.2. 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.



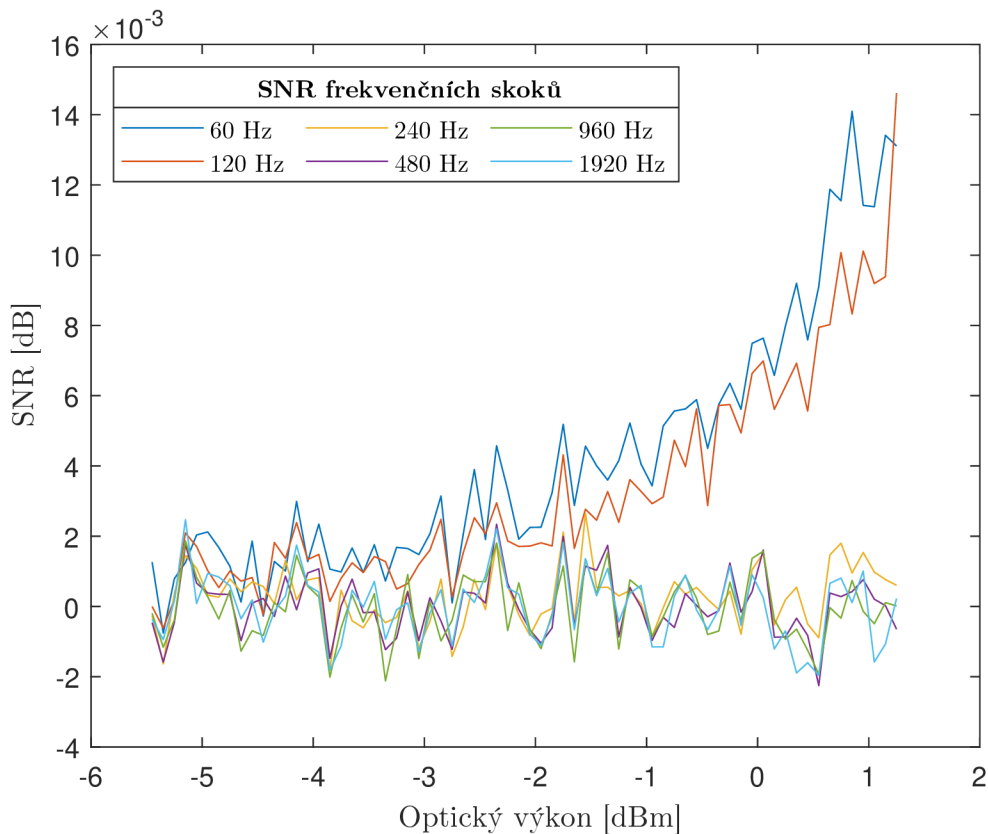
Obr. 2.2: Detekované signály z reproduktoru pomocí optického vlákna a mikrofonu.

Pro vyhodnocení je nutné kvantifikovat potřebný výkon pomocí výpočtu SNR a maximální hodnoty křížové korelace pro jednotlivé frekvence. Z obrázku 2.2 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 2.3. 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 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.

Z pohledu podobnosti signálu byl porovnán signál z mikrofonu se signálem z optického senzoru. Na obrázku 2.4 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

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



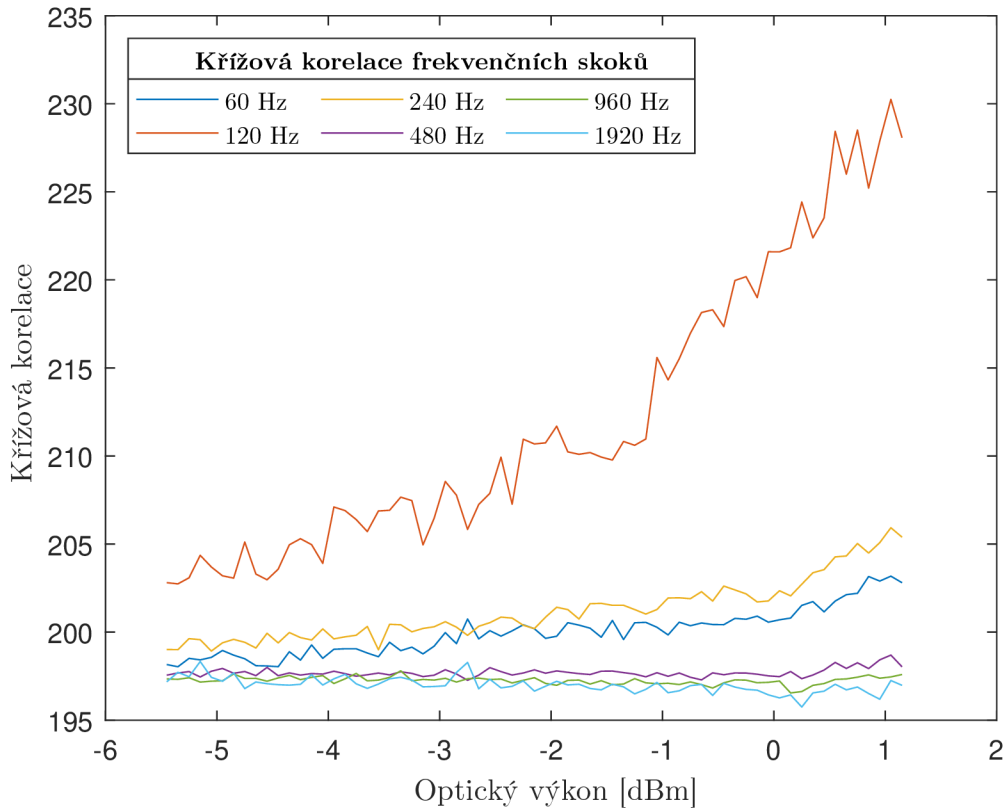
Obr. 2.3: Porovnání SNR na jednotlivých hodnotách výkonu.

z hodnot výkonu byla brána maximální hodnota křížové korelace v absolutní hodnotě ². 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 [16].

2.2 Srovnání citlivosti MZI a polarizačního senzoru

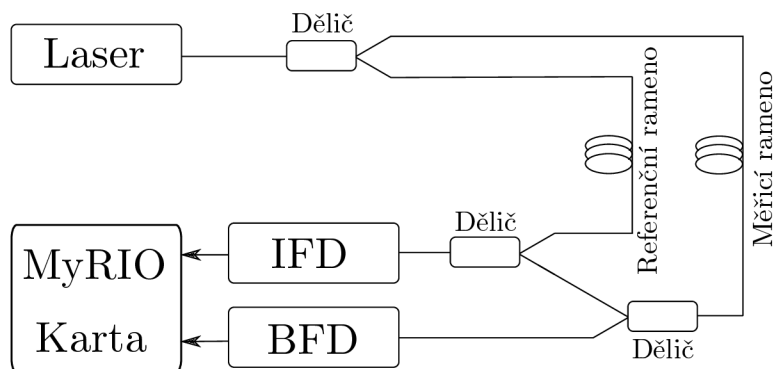
Porovnání citlivosti interferometru a polarizačního analyzátoru můžeme dosáhnout dvěma způsoby. Prvním z nich je vytvoření standardizovaných testů a následného proměření jednotlivých metod samostatně. Druhým, podstatně jednodušším způsobem je vytvoření konfigurace kombinující obě metody. Na obrázku 2.5 je možné vidět 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

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



Obr. 2.4: Porovnání podobnosti signálů pomocí křížové korelace.

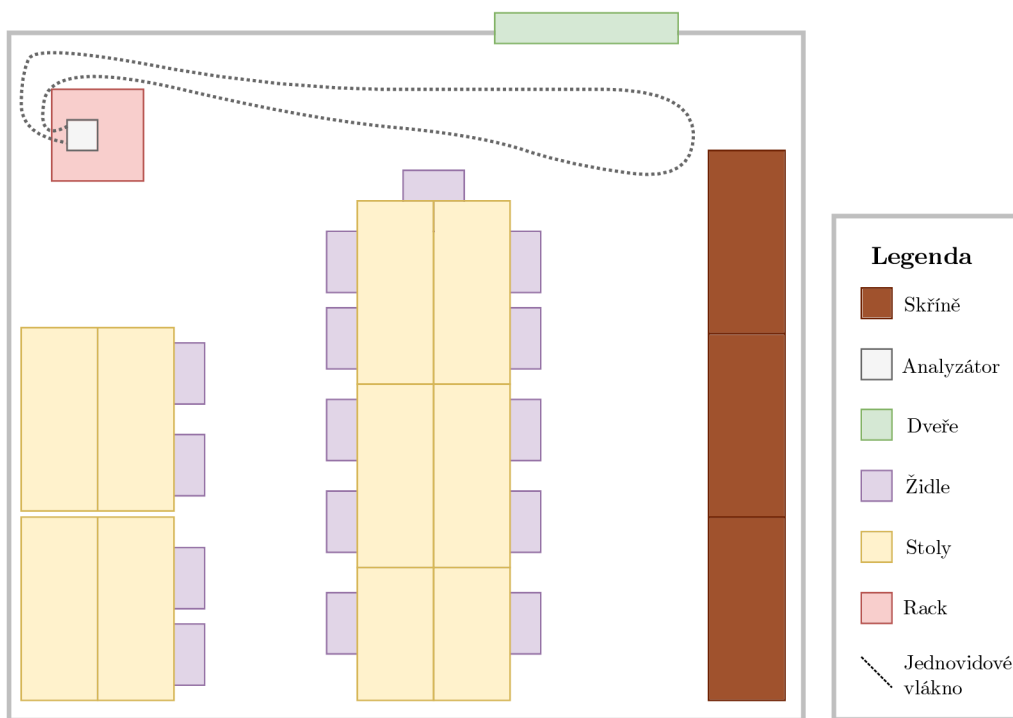
zvolen formát HDF5, který je vhodný pro velké datové soubory. MyRIO ve skutečnosti vzorkuje každý systém frekvencí sedmkrát vyšší, tj. 56 kS/s, a vzorky jsou poté přímo v myRIO průměrovány do výsledných 8 kS/s.



Obr. 2.5: Zapojení systému pro porovnání MZI a polarizačního detektoru.

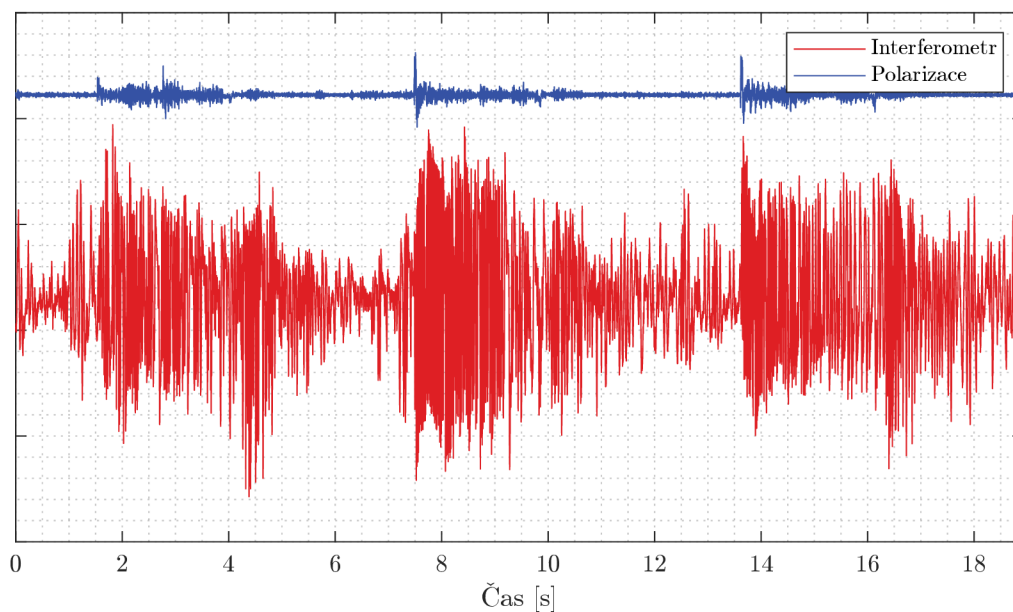
Měřené vlákno pro demonstraci bylo vyvedeno z racku do pohledu laboratoře viz, 2.6. Laboratoř je vybavena stoly, židlemi a skříní. Cílem měření bylo vyzkoušet možnou detekci vibrací způsobených otevřením vchodových dveří do místnosti a otevření rackových dveří.

Výsledky měření jsou vidět na obrázcích 2.7 a 2.8. Obrázek 2.7 znázorňuje průběhy naměřené při otvírání 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



Obr. 2.6: Schéma laboratoře, kde bylo testování realizováno.

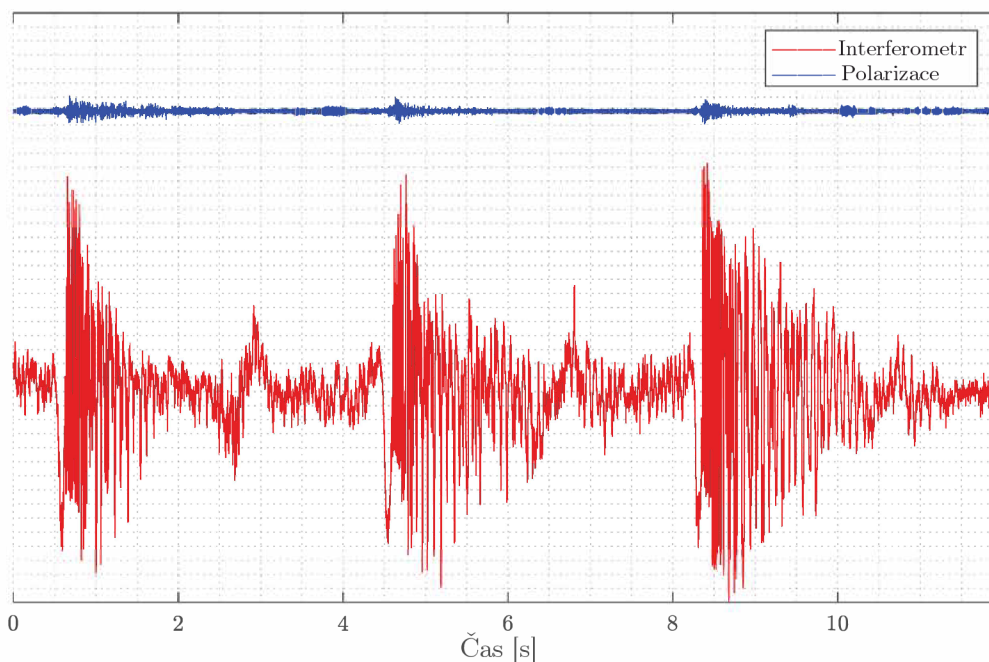
systemem založeným na PBS, tak interferometrem. Dále je možné si všimnout, že měření MZI je mnohem citlivější než měření pomocí PBS a balančního fotodetektoru. Co se týče rychlosti ustalování signálů do klidového stavu, v tomto případě je viditelné, že polarimetr se ustaluje rychleji, což je způsobeno právě jeho nižší citlivostí oproti interferometru a rozvibrováním racku způsobeným zavřením dveří.



Obr. 2.7: Srovnání metod pro vibrace způsobené otevíráním a zavíráním dveří racku.

Na obrázku 2.8 je zobrazeno otevření a zavření dveří do laboratoře (dveře jsou znázorněny

na obrázku 2.6 zelenou barvou). Výchytky amplitud jsou menší a ustalování do klidového stavu rychlejší. To je způsobeno daleko menší intenzitou vibrací, jelikož rackové dveře jsou v těsně 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.

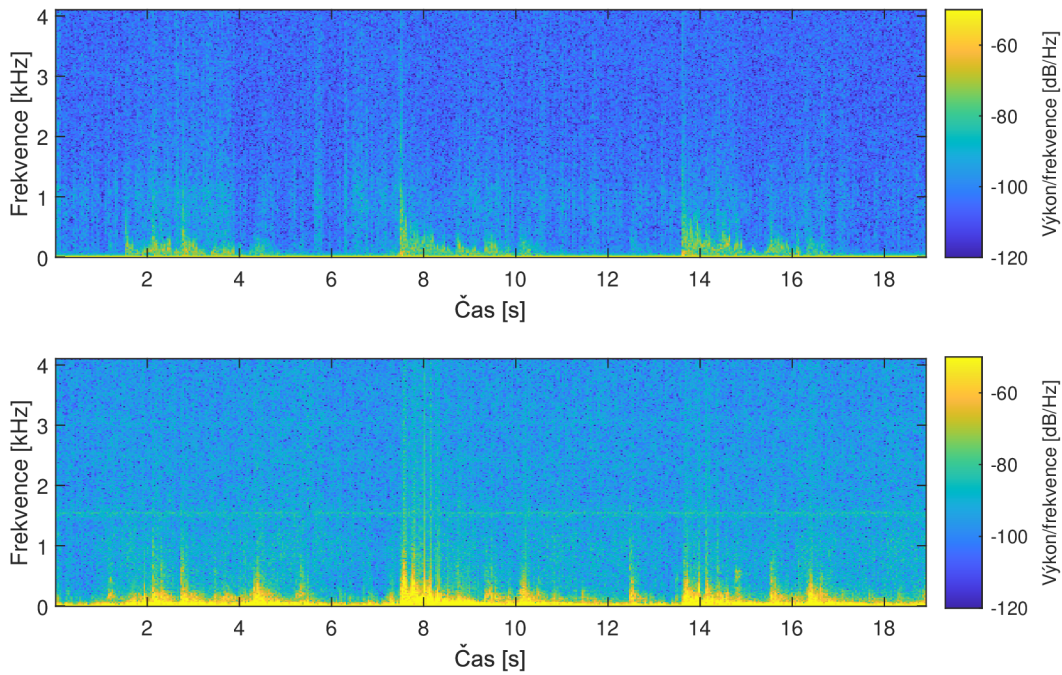


Obr. 2.8: Srovnání metod pro vibrace způsobené otevíráním a zavíráním vstupních dveří.

Na obrázku 2.9 jsou náměry z obrázku 2.7 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 vystaveny vibracím způsobeným normálním provozem v budovách, jako jsou například lidé pohybující se po chodbách [5].

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 přídatného referenčního ramene v klidovém stavu, což ve stávající infrastruktuře bývá problematické, nebo využití jiného vlákna ve stejném kabelu.



Obr. 2.9: Srovnání metod pro vibrace způsobené otevíráním a zavíráním rackových dveří ve spektrogramu.

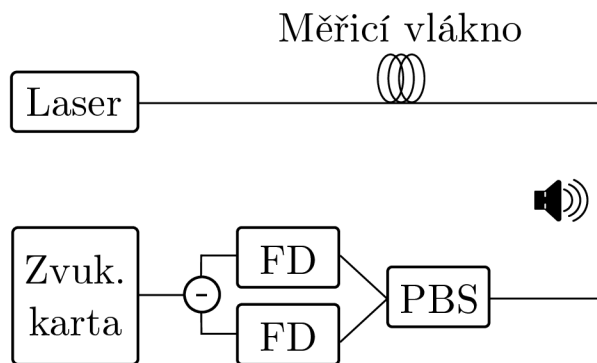
V případě plného využití stávající infrastruktury, je možné použít vlnový multiplex. To znamená, že je jedna vlnová délka nebo multiplex doplněn o další vlnovou délku pomocí multiplexoru. Tato vlnová délka je využita pouze pro snímání polarizačních změn. Uvedená možnost se volí pouze v případě nedostatečné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

2.3 Měření citlivosti polarizačního analyzátoru v závislosti na konfiguraci systému

V mnoha výzkumech byla 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 sensorického systému. Z tohoto důvodu bylo vytvořeno testovací pracoviště pro snímání akustických vibrací. Na tomto pracovišti bylo testováno několik konfigurací sensorického systému. Jednotlivé konfigurace jsou vidět na obrázcích 2.10, 2.11 a 2.12.

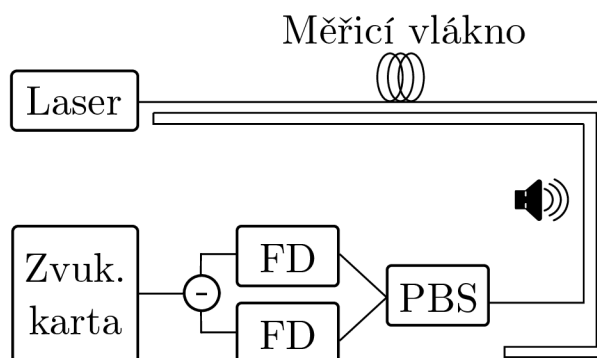
U konfigurace na obrázku 2.10 je vidět základní konfigurace přímé metody, kdy je na jedné straně vlákna laser a na druhé detektor polarizace složený z PBS a dvou FD. Jako zařízení pro sběr dat byla využita zvuková karta, jež má pro snímání akustických vibrací nejlepší předpoklady. Na testované vlákno 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. 2.10: Zapojení systému na detekci vibrací přímou metodou.

Druhé zapojení na obrázku 2.11 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 vláknem měl u PBS totožný výkon 3 dBm, abychom eliminovali vliv výkonu na citlivost.

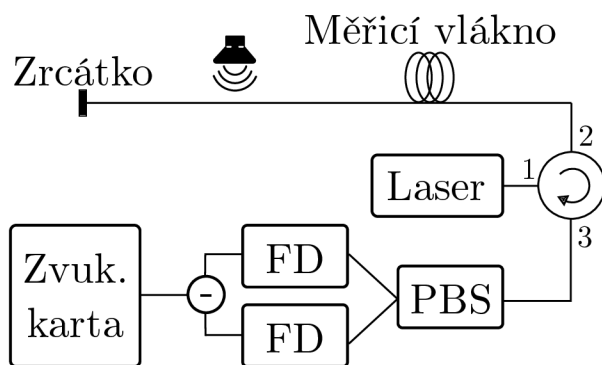


Obr. 2.11: Zapojení systému na detekci vibrací přímou metodou s trojitou smyčkou.

U třetího zapojení došlo ke změně konfigurace. Do systému byl zapojen cirkulátor, jak je vidět na obrázku 2.12, 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 porovnáována 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 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.



Obr. 2.12: Zapojení systému při použití cirkulátoru a Faradayova zrcátka.

Pro srovnání citlivostí byla opět použita metoda výpočtu SNR ve frekvenční oblasti ze vzorce 1.1. 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 2.13. 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 [17].

Dále je porovnáván vliv vlnové délky na SNR ve frekvenční oblasti, kde na obrázku 2.14 můžeme pozorovat, že vlnové délky od 1555 nm do 1565 nm dosahují 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 2.10. Výsledky z tohoto měření odpovídají předpokladům, jak je vidět na obrázku 2.15, nejlepšího SNR ve frekvenční oblasti dosahuje vlákno v primární ochraně, následované patchcordem a nejhorší výsledky má erbiové vlákno. Předpoklad tohoto měření počítal, že čím větší má vlákno opláštění, tím méně citlivé na vibrace bude, což se potvrdilo.

2.4 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 sensorického systému je komerční 4-diodový polarimetr, který je doplněn o hardwarové zesílení pomocí tranzistorové logiky poměrem $0,9\times$, $1\times$, $5\times$ a $10\times$ [2]. 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 nezámrné 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 2.16 a 2.17 jsou vidět signály z polarimetru pro průjezdy osobního vlaku a rychlíku snímaným úsekem v obou směrech. U obrázku 2.16 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 2.17, 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 2.17 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 určit typ vlaku.

To potvrzuje obrázek 2.18, kde je vidět porovnání dvou typů vlaků, a to dlouhého nákladního vlaku s cisternami a lokomotivy bez vagonů. U obou vlaků se jedná 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 2.19. 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

Tab. 2.1: Přehled velikosti jednotlivých datových souborů.

Data set Třída	Trénink	Validace	Testování
Klid	758	110	221
Vlak	2051	355	771

Tab. 2.2: Matice záměn s výsledky modelu na souboru testovacích dat

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

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 2.1 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 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 [20]. 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.

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 2.2. 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 [4].

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.

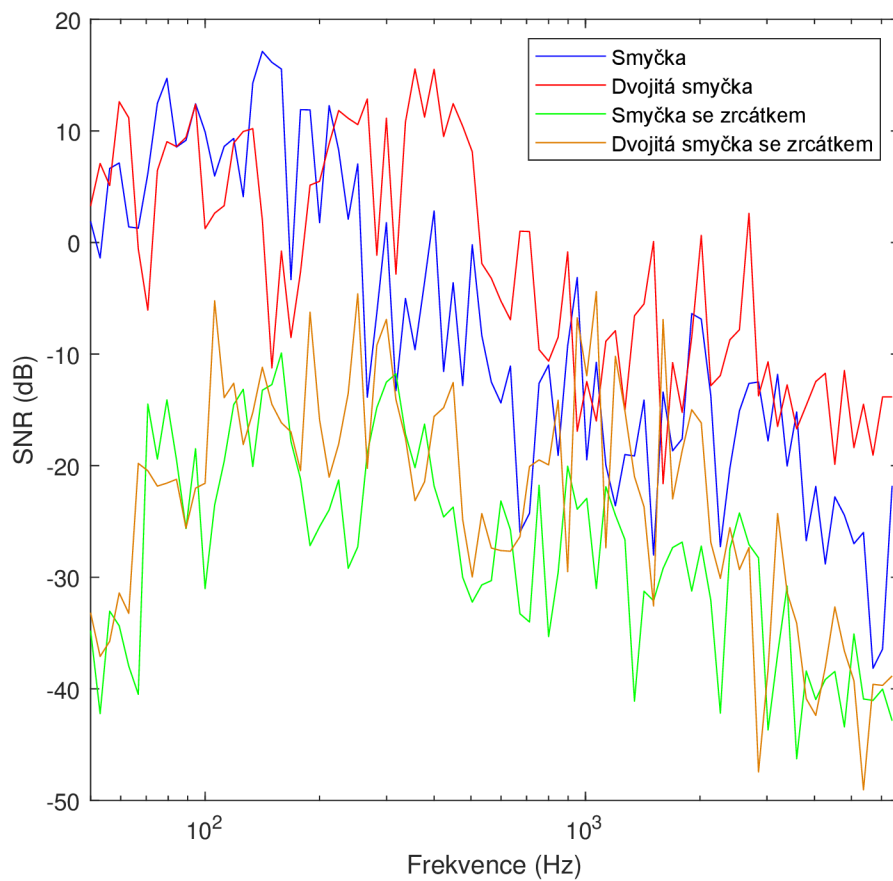
Pro záznam dat bylo využito zařízení se dvěma analogovými vstupy, rychlostí vzorkování 125 MS/s a rozlišením 14 bitů (Red Pitaya STEMLab 125-14). Zřízení bylo přeprogramováno, aby sloužilo jako server odesílající data do obslužného PC opatřeného TCP klientem v programu Matlab pro ukládání dat. Rychlost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

Ověřování funkčnosti zapojení probíhala původně jen několikaminutovými náměry, ale následně délka náměrů 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.

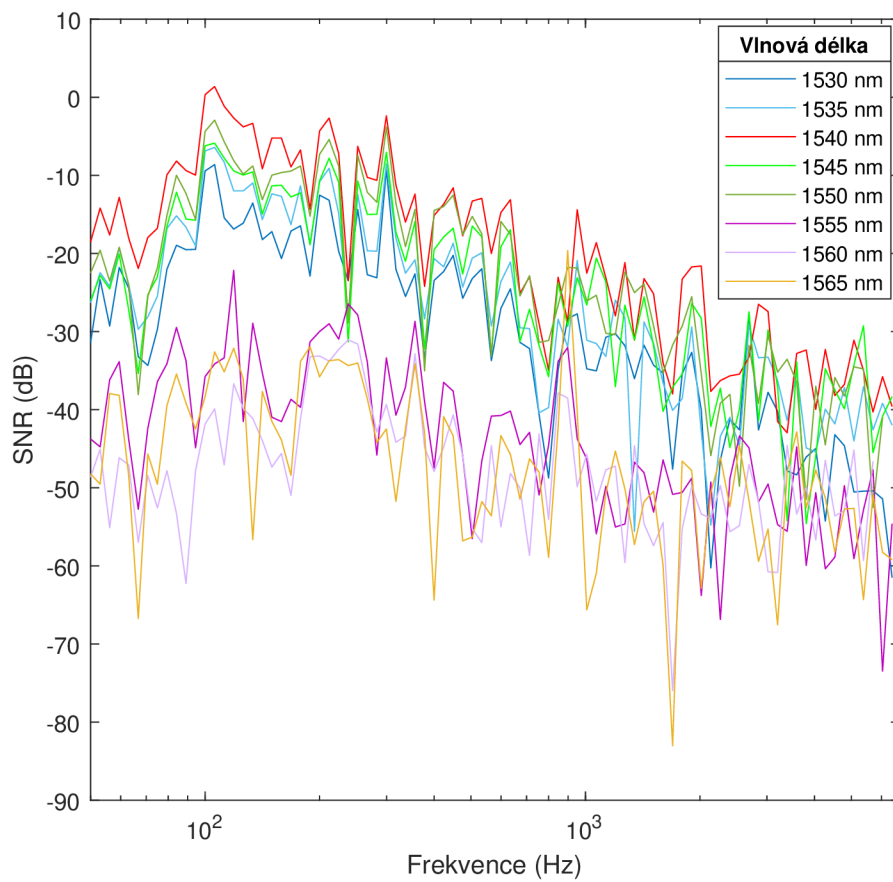
Signál je díky útlumu trasy a následnému dělení PBS relativně slabý, což způsobuje, že je amplituda signálu v časovém grafu malá nebo se nachází v šumu. Z tohoto hlediska tak není možné přesně určit, zda se ve sledované oblasti pohybuje vlak. Signál je tedy nutné převést do frekvenční oblasti a zobrazit 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 2.20.

Na obrázku 2.20 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.

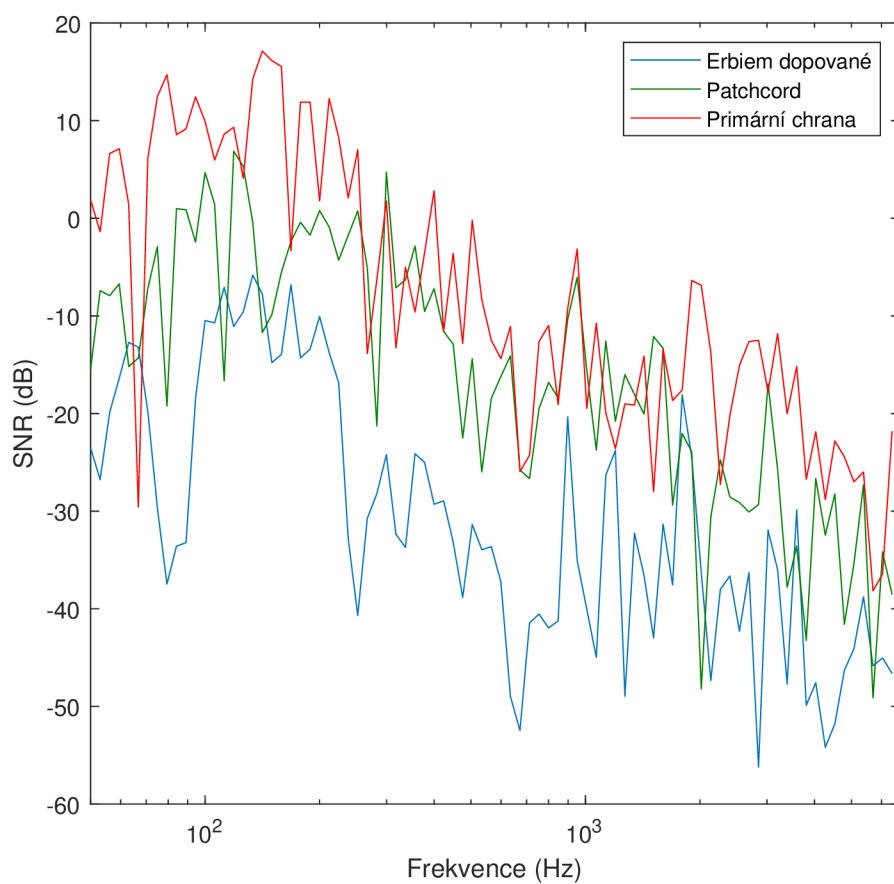
Jako důkaz porovnatelnosti jednotlivých typů vlaků slouží obrázek 2.21. Na tomto obrázku můžeme vidět průjezd nákladního vlaku, zvýšení intenzity vibrací, tak i zároveň zvýšení doby průjezdu, tudíž stejné fenomény, co byly vidět v předchozí detekci pomocí polarimetru. Na obrázku 2.20 je vidět průjezd lokomotivy trvající pouze 600 sekund zatímco na obrázku 2.21 nákladní vlak s časem 1000 sekund. Delší průjezd vysvětluje pomalejší rychlost nákladního vlaku. Větší intenzitu vibrací vysvětluje hmotnost naloženého nákladního vlaku [6].



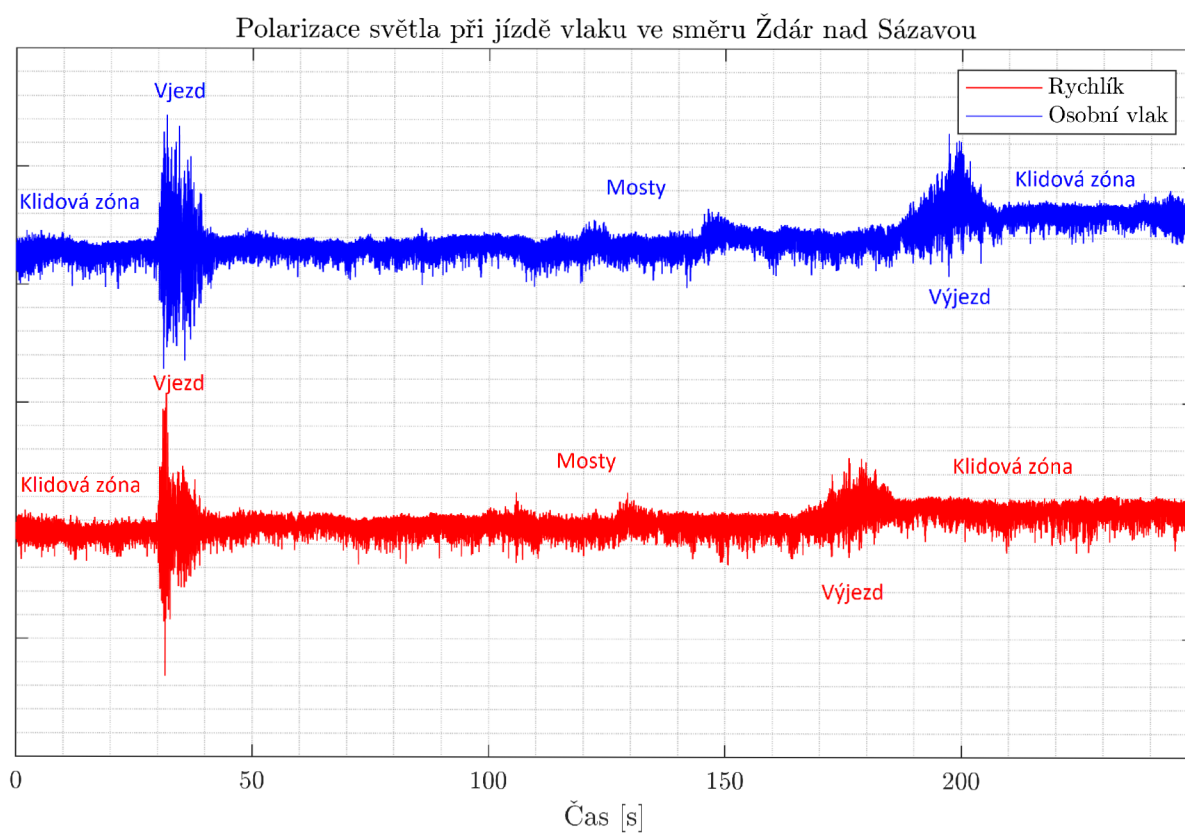
Obr. 2.13: Porovnání SNR ve frekvenční oblasti podle konfigurace.



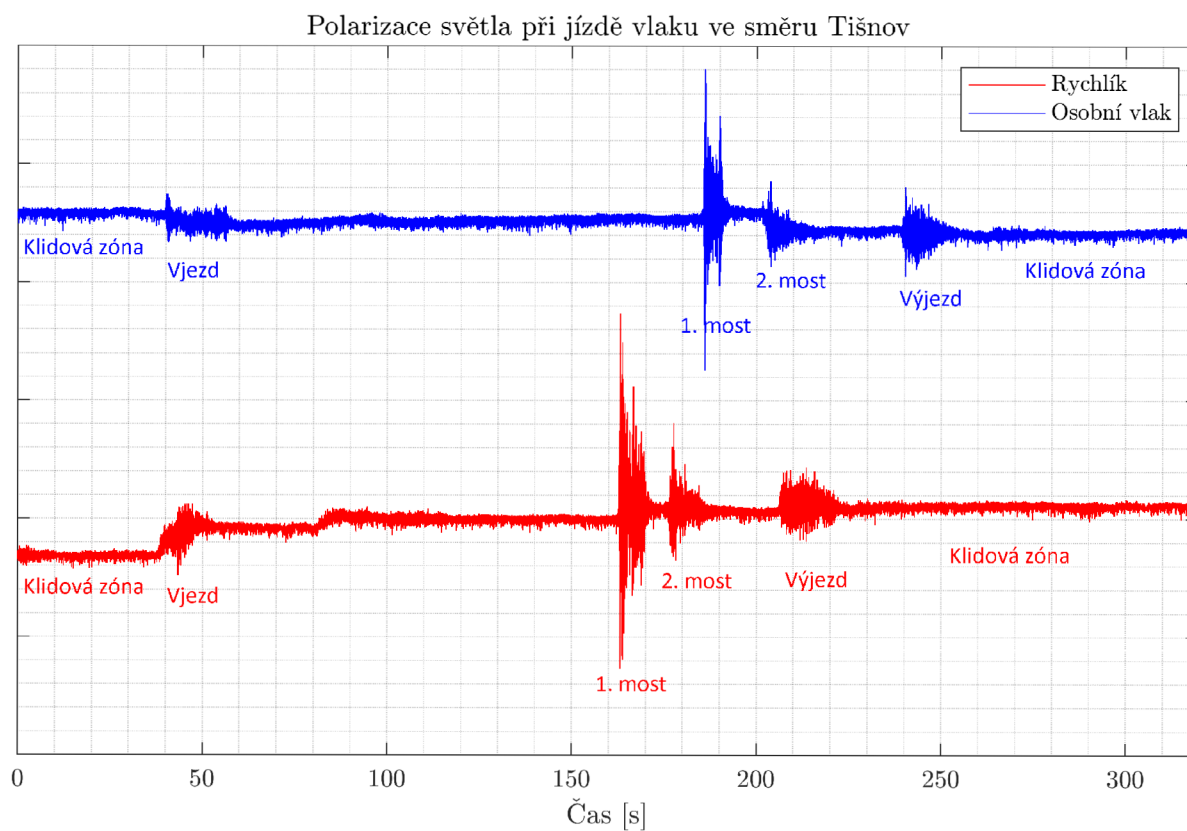
Obr. 2.14: Porovnání SNR ve frekvenční oblasti podle vlnové délky laseru.



Obr. 2.15: Porovnání SNR ve frekvenční oblasti podle typu vlákna.

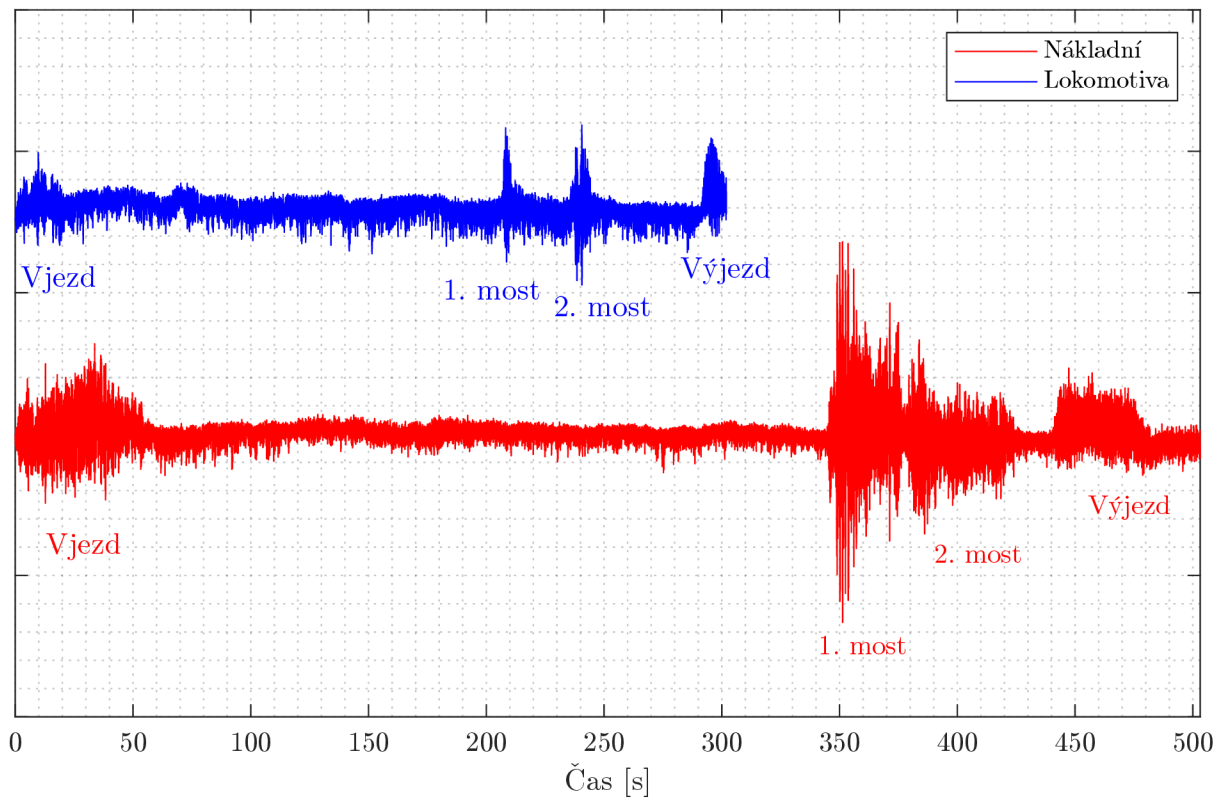


Obr. 2.16: Porovnání signálů z polarimetru pro směr Žďár nad Sázavou pro dva typy vlaků.

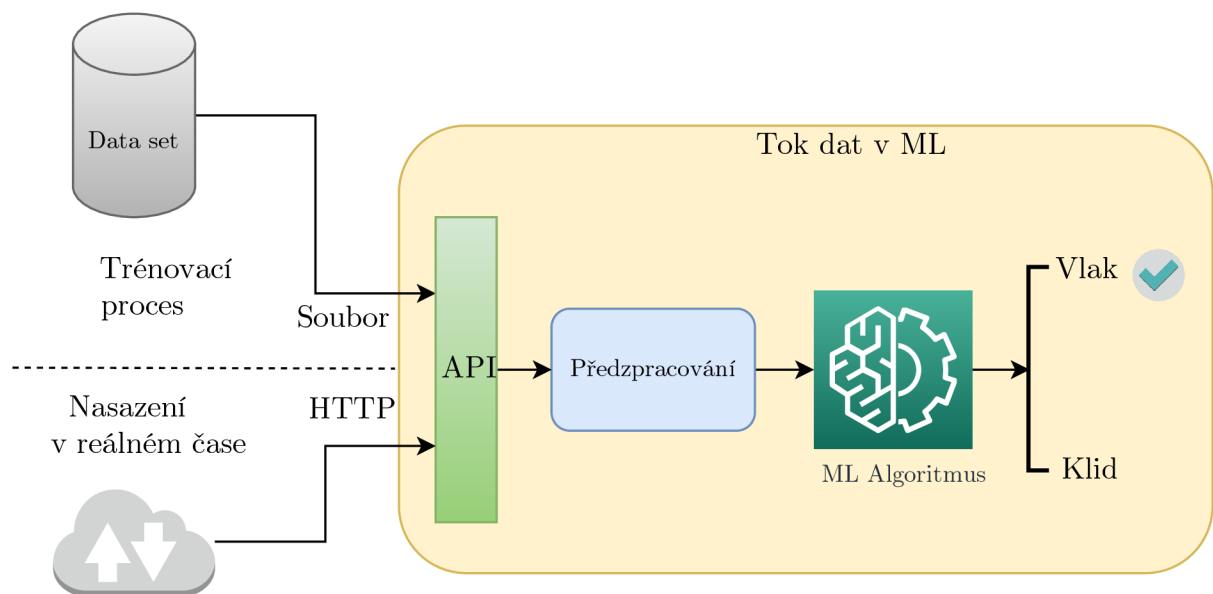


Obr. 2.17: Porovnání signálů z polarimetru pro směr Tišnov pro dva typy vlaků.

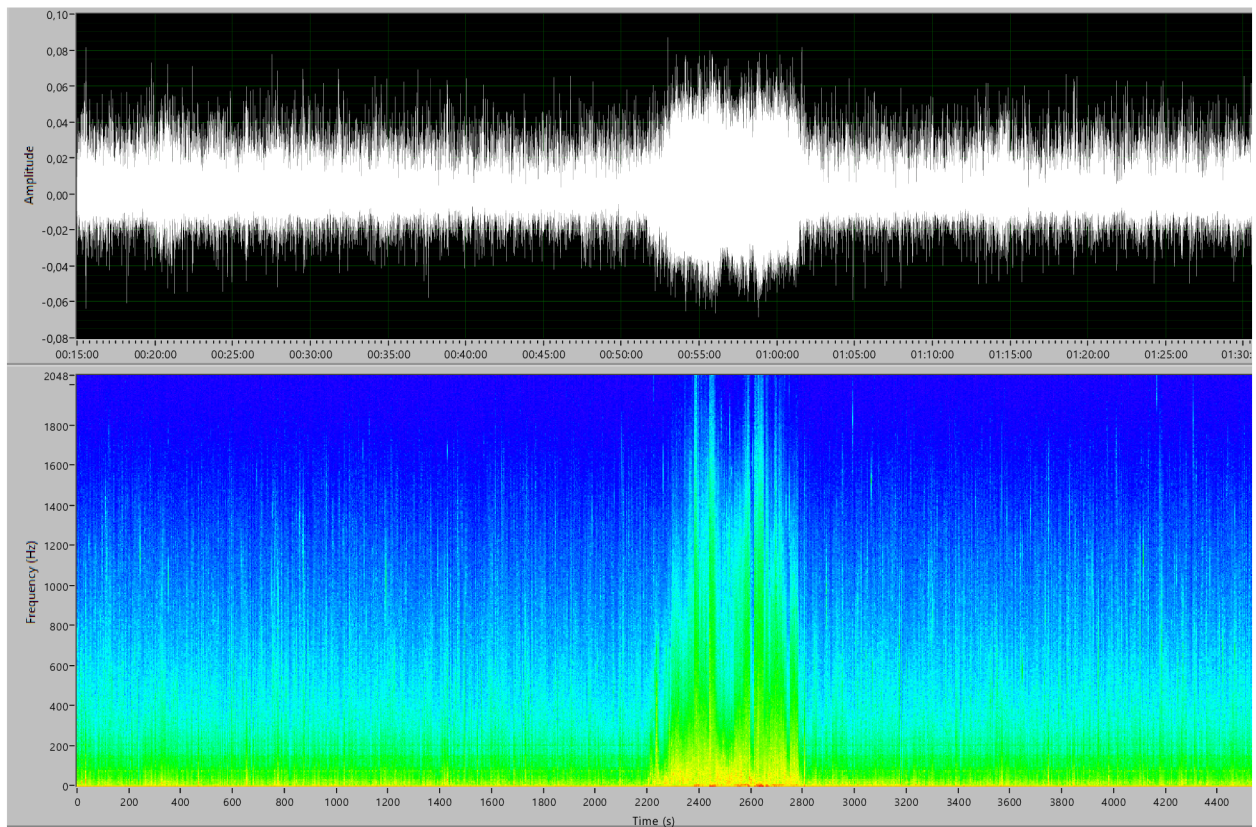
Polarizace světla při jízdě vlaku ve směru Tišnov



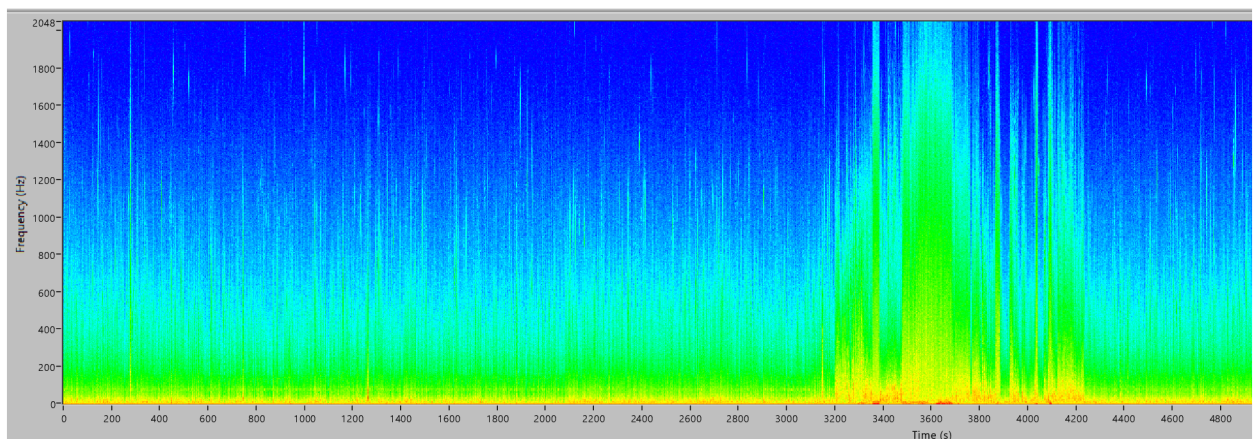
Obr. 2.18: Porovnání signálů z polarimetru pro směr Tišnov pro dlouhý nákladní vlak a lokomotivu bez vagonů.



Obr. 2.19: Přehled toku dat v systému detekce vlaků.



Obr. 2.20: Noční průjezd lokomotivy v klidovém stavu zobrazen ve spektrogramu.

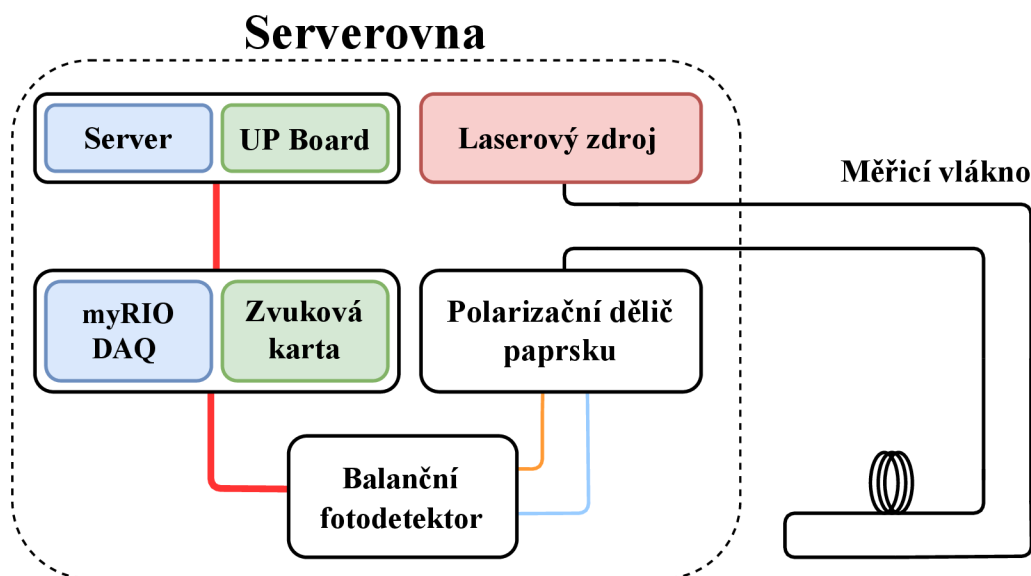


Obr. 2.21: Noční průjezd nákladního vlaku v klidovém stavu zobrazen ve spektrogramu.

3 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 [18].

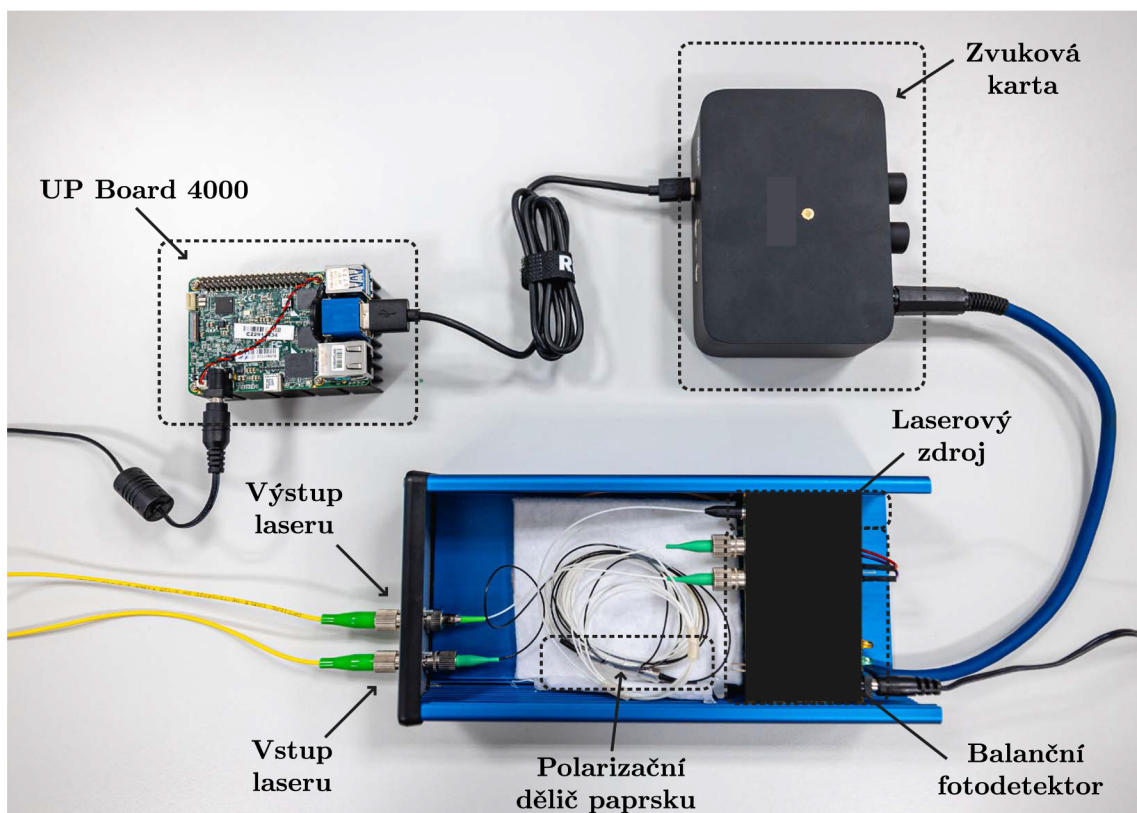
Experimentální sestava použitá k testování systému pro zabezpečení fyzické vrstvy se skládá ze dvou částí. První část slouží k výpočtům a skládá se z počítače a zařízení pro snímání zvukových signálů. Druhou část tvoří optický systém s laserovým zdrojem (nízkošumovým zpětnovazebním laserem s vlnovou délkou 1550 nm a typickou šířkou spektrální čáry 3 MHz), PBS a BFD (složeným z fotodiód 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 3.1, kde jsou optická spojení vyznačena černě, oranžově a modře. Signálové a napájecí spoje jsou vyznačeny červeně.



Obr. 3.1: 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 3.2.



Obr. 3.2: Finální verze senzorového systému se skutečným hardwarem.

V [19] 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 1.15. 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.

System 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 [13], kde byl gradient vypočítán pomocí křížové entropie [12].

Klasifikační výkonnost se odhaduje pomocí matice záměny vyhodnocené na souboru testovacích dat, která je znázorněna na obrázku 3.3. Navržená metoda je 100% přesná při rozhodování mezi vzorky v běžném stavu a ostatními vzorky odpovídajícími abnormální 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. Hlubková analýza ukazuje, že události Manipulace obsahují také události Klepání, zejména na začátku.

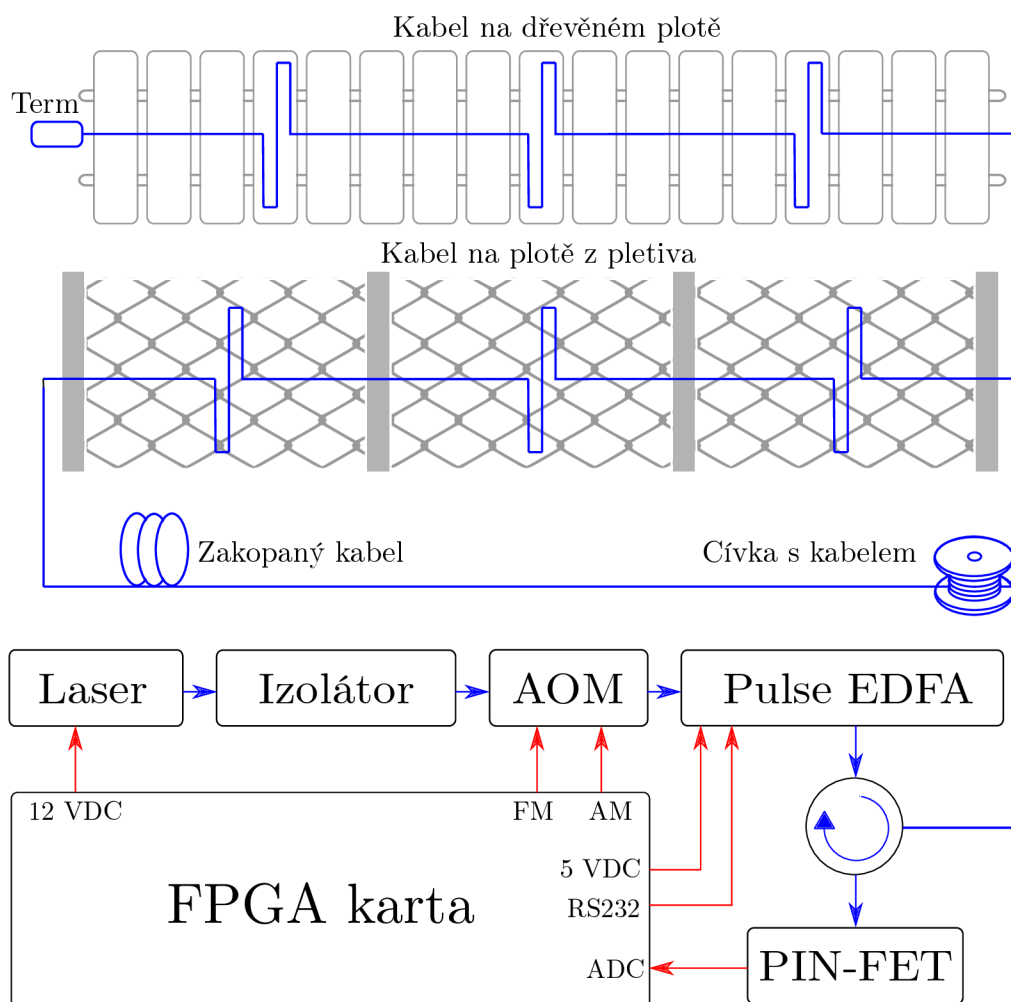
Navržený systém bohužel nedokáže přímo lokalizovat zdroj vibrací. Některé typy vibrací je možné lokalizovat nepřímo na základě znalosti trasy, po níž je vlákno vedeno. Příkladem je odpojení a případné opětovné připojení vlákna, ke kterému může v našem případě dojít pouze v serverovně s omezeným přístupem, 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. 3.3: Matice záměn vyhodnocená na testovacím souboru dat po učení, která ukazuje skutečný výkon navrhované metody klasifikace událostí.

4 DETEKCE VIBRACÍ POMOCÍ Φ -OTDR

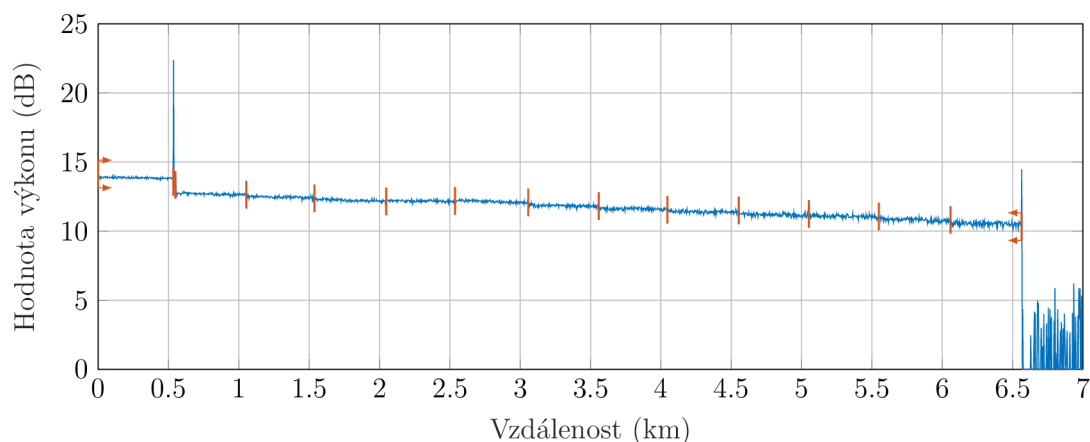
Měřicí systém s testovací trasou je znázorněn na obrázku 4.1. Elektrická část je označena červenou barvou a optická část je označena modrou barvou. Skládá se z laseru s úzkou šířkou čáry (menší než 1 kHz), který generuje optický signál, je následovaný izolátorem chránícím laser před poškozením při odrazu 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 4.1.



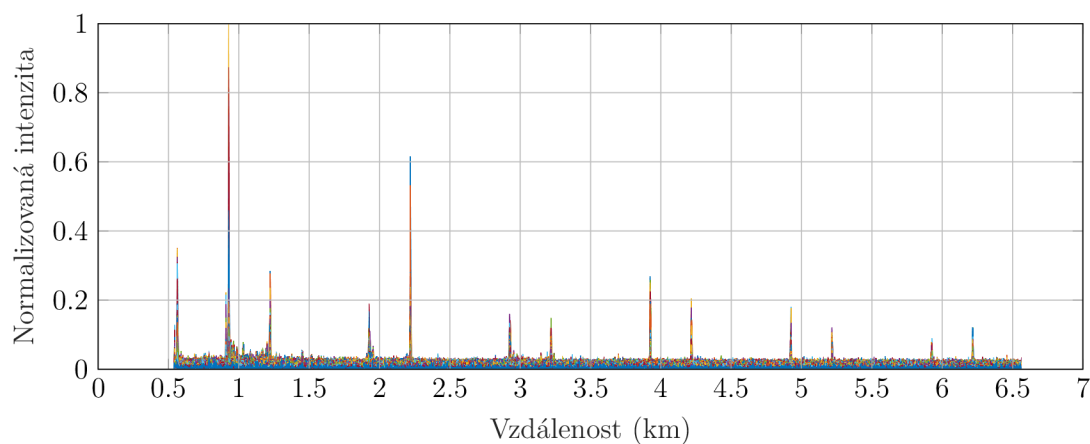
Obr. 4.1: Schéma systému založeného na Φ -OTDR se znázorněním trasy pro přípravu datasetu.

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 4.1, 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 4.1.



Obr. 4.2: OTDR náměr z testovací trasy.



Obr. 4.3: 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 z OTDR i s vyznačenými sváry je vidět na obrázku 4.2. Trasa se tedy dohromady skládá z předřadného 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.

Tab. 4.1: Parametry Φ -OTDR systému.

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

Obrázek 4.3 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 4.3 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.

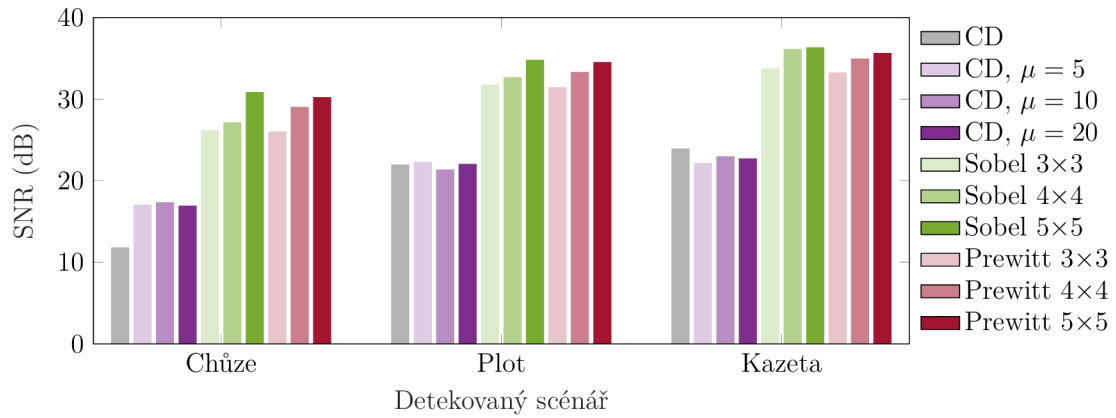
Ve druhém a třetím scénáři bylo simulováno narušení osobou, která mechanicky působila rukou na plot (poklep) a na plastovou skříň optických vláken, kde byla vlákna spojena. Tyto tři scénáře jsou dále označeny jako „chůze“, „plot“, a „kazeta“.

Pro identifikaci poruch na vlákne 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 4.3, 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).

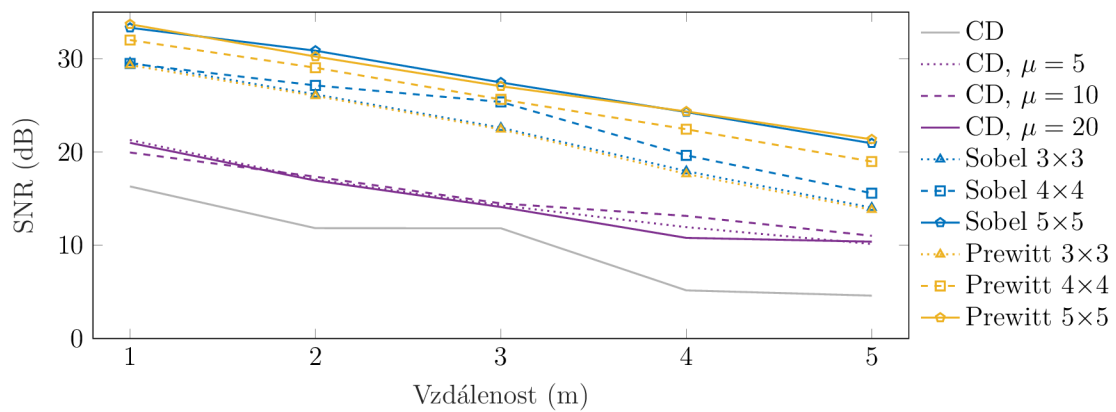
Výsledky SNR získané jednotlivými metodami jsou zobrazeny na obrázku 4.4. Výsledky ukazují, že všechny testovací metody dokázaly úspěšně detekovat vibrace ve všech třech scénářích, nicméně metoda CD dosáhla výrazně horšího SNR. Zdá se, že použití filtru klouzavého průměru na Rayleighovy odrazy před samotnou 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.

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 4.5 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



Obr. 4.4: Porovnání SNR pro jednotlivé metody a scénáře.

uvedeno v předchozím experimentu, průměrování pomohlo zlepšit SNR o cca 5 dB ve scénáři chůze. Metody 2D detekce hran s velikostí operátoru 5×5 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 [7].



Obr. 4.5: 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 2.16, 2.17 a 2.18. 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 4.4 a porovnání závislosti na vzdálenosti pohybující se osoby od vlákna na obrázku 4.5. 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 bezodrazové 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 infrastrukturních, 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 nezamrzlé 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 3.3 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 datasety jednotlivých událostí pro přesnější vyhodnocování dat. Pochopitelně je dalším krokem implementace systémů pro práci v reálných podmínkách s klasifikací událostí v reálném čase pro okamžité detekce narušení. Taktéž se nabízí měření cílicí 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.

REFERENCE

- [1] *Key internet statistics in 2023 (including mobile)*.
Dostupné z: <https://www.broadbandsearch.net/blog/internet-statistics>
- [2] 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.
- [3] 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>
- [4] DEJDAR, Petr, MYSKA, 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.
- [5] 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.
- [6] 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>
- [7] 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>
- [8] 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>
- [9] 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>

- [10] 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>
- [11] 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.
- [12] HUANG, Xiaowei, JIN, Gaojie, and RUAN, Wenjie. *Loss Function and Gradient Descent*. In *Machine Learning Safety*, pp. 103–107. Springer, 2012.
- [13] KINGMA, Diederik P and BA, Jimmy. *Adam: A method for stochastic optimization*. arXiv preprint arXiv:1412.6980, 2014.
- [14] KROHN, David A, MACDOUGALL, Trevor, and MENDEZ, Alexis. *Fiber optic sensors: fundamentals and applications*. Spie Press Bellingham, WA, 2014.
- [15] 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>
- [16] RUŽICKA, 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.
- [17] RUŽIČKA, Michal, DEJDAR, Petr, JUREK, Martin, MÜNSTER, Petr, and HORVÁTH, Tomáš. *Citlivost detekce vibrací v závislosti na důležitých parametrech zapojení polarizačního analyzátoru*. *Elektrorevue*, 24(3):102–107, 2022.
- [18] 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.
- [19] SPURNY, Vladimír, 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>
- [20] 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.
- [21] 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>

- [22] 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.

Curriculum Vitæ

Ing. Petr Dejdar

Osobní údaje

Datum narození: 18. 3. 1993
Místo narození: Moravská Třebová
Národnost: Česká
Stav: svobodný
Kontakt: +420 732 938 769, Petr.Dejdar@vut.cz

Vzdělání

2018–Současnost obor: Teleinformatika, Vysoké učení technické v Brně
Téma disertační práce: "Optické vláknové senzory"

2016–2018 obor: Telekomunikační a informační technika, Vysoké učení technické v Brně
Diplomová práce: "Grafické uživatelské rozhraní pro sensorické systémy"

2013–2016 obor: Teleinformatika, Vysoké učení technické v Brně
Bakalářská práce: "GUI pro automatizaci měření impedance na Agilent 4294A"

Studijní stáže

10/2019–01/2020 Faculty of Electrical Engineering, University of Ljubljana, Slovenia

Jazykové dovednosti

Český jazyk Mateřský
Anglický jazyk Úroveň B2

Profesní zkušenosti

2022–Současnost Jednatel, Spower s.r.o.

2019–2022 Zaměstnanec, Czech optical solutions s.r.o.

2018–Současnost Zaměstnanec, Ústav Telekomunikací, VUT v Brně.

2018–2022 Vědecko-výzkumný pracovník centra SIX, VUT v Brně.

2018–Současnost Spolumajitel, ASN Plus s.r.o.

2016–Současnost Zaměstnanec, DPMB a.s.

2013–2016 Zaměstnanec, Atek s.r.o.

Výzkumné aktivity

2023–současnost VK01030048: Detekce anomálií v kritických infrastrukturách s využitím strojového učení
Role v projektu: člen řešitelského týmu.

2023–současnost VK01030121: Distribuovaný optický-vláknový sensorický systém středního dosahu pro monitorování akustických vibrací a teploty na kritických infrastrukturách
Role v projektu: člen řešitelského týmu.

2023–současnost VK01030114: Výzkum citlivosti dutých optických vláken na vlnění v akustickém spektru
Role v projektu: člen řešitelského týmu.

2022–současnost TK04030168: Tolerantní jaderná paliva pro malé modulární reaktory a jejich bezpečnostní hodnocení
Role v projektu: člen řešitelského týmu.

2021–současnost VJ01010035: Bezpečnostní rizika fotonických komunikačních sítí
Role v projektu: člen řešitelského týmu.

2020–2023 FEKT-S-20-6312: Výzkum elektronických komunikačních a informačních a systémů a jejich využití pro zabezpečení kritických infrastruktur.
Role v projektu: člen řešitelského týmu.

- 2018–2020 FEKT-S-17-4184: Výzkum informačních a komunikačních systémů a jejich bezpečnost.
Role v projektu: člen řešitelského týmu.
- 2018–2020 VI20172020067: Inteligentní technické textilie pro zvýšení bezpečnosti kritických infrastruktur.
Role v projektu: člen řešitelského týmu.

Vyučované kurzy

Optické sítě, přenosová média, praktikum z informačních sítí, základy informačních a komunikačních technologií, transmission media.

Ocenění

2016 Cena děkana za bakalářskou práci

Absolvované kurzy

European Certification of Digital Literacy, základy kryptografie

Vybrané publikace

- 2023 DEJDAR, Petr, Ondrej MOKRY, Martin CIZEK, Pavel RAJMIC, Petr MUNSTER, Jiri SCHIMMEL, Lenka PRAVDOVA, Tomas HORVATH a Ondrej CIP. Characterization of sensitivity of optical fiber cables to acoustic vibrations *Nature: Scientific Reports* [online]. 2023, **13**, 7068. ISSN 2045-2322. Dostupné z: doi.org/10.1038/s41598-023-34097-9
- 2023 TOMASOV, Adrian, Petr DEJDAR, Petr MUNSTER, Tomas HORVATH, Peter BARCIK a Francesco DA ROS. Enhancing fiber security using a simple state of polarization analyzer and machine learning *Optics & Laser Technology* [online]. 2023, **167**. ISSN 1879-2545. Dostupné z: doi.org/10.1016/j.optlastec.2023.109668
- 2022 RUZICKA, Michal, Lukas JABLONCIK, Petr DEJDAR, Adrian TOMASOV, Vladimir SPURNY a Petr MUNSTER. Classification of Events Violating the Safety of Physical Layers in Fiber-Optic Network Infrastructures. *Sensors* [online]. 2022, **22**(23), 9515. ISSN 1424-8220. Dostupné z: [doi:10.3390/s22239515](https://doi.org/10.3390/s22239515)
- 2022 DEJDAR, Petr, Pavel ZÁVIŠKA, Soběslav VALACH, Petr MÜNSTER a Tomáš HORVÁTH. Image Edge Detection Methods in Perimeter Security Systems Using Distributed Fiber Optical Sensing. *Sensors* [online]. 2022, **22**(12), 4573. ISSN 1424-8220. Dostupné z: [doi:10.3390/s22124573](https://doi.org/10.3390/s22124573)
- 2022 DEJDAR, Petr, Adrian TOMASOV, Petr MUNSTER, Tomas HORVATH. Vibration caused by train detection using state-of-polarization changes measurement. In: *Proc. SPIE 12105, Fiber Optic Sensors and Applications XVIII*, 1210506 (2022-5-27). Dostupné z: <https://doi.org/10.1117/12.2618739>
- 2021 DEJDAR, Petr, Vojtech MYSKA, Petr MUNSTER a Radim BURGET. Trains Detection Using State of Polarization Changes Measurement and Convolutional Neural Networks. In: *2021 IEEE International Symposium on Inertial Sensors and Systems (INERTIAL)*. IEEE, 2021, 2021-3-22, s. 1-4. ISBN 978-1-7281-5099-4. Dostupné z: [doi:10.1109/INERTIAL51137.2021.9430469](https://doi.org/10.1109/INERTIAL51137.2021.9430469)

Reference

doc. Ing. Petr Münster, Ph.D.
munster@vut.cz
VUT v Brně
Technická 3058/10
616 00 Brno

Poslední aktualizace dne **27. 9. 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 sensorů vhodné (zvýšená vlhkost, radiace, nedostatek místa atd.). Tato práce se věnuje porovnání technologií hodnotících sensorické 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.