



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV TELEKOMUNIKACÍ

DEPARTMENT OF MICROELECTRONICS

OPTOVLÁKNOVÉ DISTRIBUOVANÉ SYSTÉMY

FIBER OPTICS DISTRIBUTED SYSTEMS

ZKRÁCENÁ VERZE DIZERTAČNÍ PRÁCE

SHORT VERSION OF DOCTORAL THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Ing. Milan Čučka

ŠKOLITEL

SUPERVISOR

prof. Ing. Zdeněk Smékal, CSc.

BRNO 2023

ABSTRAKT

Disertační práce je zaměřena na výzkum optovláknových senzorů, které jsou založeny převážně na interferometrických metodách. Princip fungování jednotlivých typů senzorů je rozebrán v rámci simulačních modelů, při použití více simulačních nástrojů. Dále jsou popsány možnosti koexistence senzorického systému v rámci plánovaných nebo stávajících přenosových sítí. Je rozebrána možnost přesného měření vibrací, lokalizace zdroje vibrací a případně měření teploty. Měření jsou převážně založena na interferometrických metodách.

KLÍČOVÁ SLOVA

Michelsonův interferometr, Machův-Zehnderův interferometr, Matlab, Simulink, FBG

ABSTRACT

The dissertation is focused on the research of optical fiber sensors, which are based mainly on interferometric methods. The principle of operation of individual types of sensors is analyzed in the framework of simulation models, using several simulation tools. Furthermore, the possibilities of the coexistence of the sensor system within the planned or existing transmission networks are described. The possibility of accurate vibration measurement, localization of the vibration source and possibly temperature measurement is discussed. The measurements are mainly based on interferometric methods.

KEYWORDS

Michelson interferometer, Mach-Zehnder interferometer, Matlab, Simulink, FBG

Místo uložení práce

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií,
Vědecké oddělení děkanátu, Technická 3058/10, 616 00 Brno

OBSAH

Úvod	15
1. Cíle disertační práce	17
2. Postup řešení	18
2.1 Simulace možných řešení	20
2.1.1 Vliv fázového optického senzoru na DWDM přenos	20
2.1.2 Přenos vysokovýkonového sensorického systému a DWDM systému na jednom optickém vlákně	22
2.1.3 Simulace a měření Machova-Zehnderova interferometru	25
3. Kombinace Michelsonova interferometru s využitím vláknové mřížky	27
3.1.1 Měření a výpočet koherentních délek diod	27
3.1.2 Ověření koherentní délky diody	28
3.1.3 Testování využití vláknových mřížek v interferometru	29
3.1.4 Michelsonův interferometr s kompenzací délky ramen pro použití se zdrojem světla s nízkou koherencí	31
3.1.5 Ověření navrženého principu při měření vibrací v zapojení s Michelsonovým interferometrem	32
Shrnutí dosažených výsledků	36
Závěr	39

ÚVOD

Optovláknové senzory jsou velmi rychle se rozvíjející oblastí v kategorii snímacích zařízení fyzikálních a chemických veličin. S klesající cenou optických komponent vzniká nepřehledné množství jednotlivých typů senzorů. Senzorické systémy využívají mnoho jedinečných vlastností optického vlákna ať už samotného či různých struktur vepsaných pomocí různých laserů či sestav.

Pokud srovnáváme optovláknové senzory s konvenčními typy čidel zjistíme, že mají řadu výhod. Jednou z nejdůležitějších vlastností je možnost konstrukce z čistě dielektrických materiálů. Tyto vlastnosti umožňují jejich využití například v místech s výbušným prostředím při použití budícího signálu o dostatečně nízkém výkonu. Dále umožňují instalaci do oblastí s vysokým elektrickým napětím. Optické vláknové senzory dokáží také pracovat v širokém rozsahu provozních teplot. Nespornou výhodou je možnost umístění vyhodnocovací elektroniky mimo měřenou oblast.

Další výhodou optovláknových senzorů je materiál, ze kterého jsou vyrobeny. Jedná se především o křemenné sklo, to znamená, že jsou chemicky pasivní a tím pádem nepodléhají korozi a nekontaminují měřené prostředí. Tato vlastnost také předurčuje optovláknové senzory pro využití v medicínském průmyslu. Jedná se o biosenzory, které jsou schopny sledovat mnoho dějů v lidském těle.

V současné době je komerčně nasazeno a vyráběno mnoho typů senzorů s rozdílnými vlastnostmi. Například senzor pracující na principu Sagnacova interferometru je možné použít jako optický gyroskop. Pro detekci akustických vibrací je možno použít zapojení využívající Machova-Zehnderova interferometru. V současné době probíhá výzkum mnoha oblastí využití optovláknových senzorů po celém světě. Příkladem může být detekce akustického signálu pomocí Machova-Zehnderova interferometru, která je možná na vzdálenost až 90 km s přesností několika metrů případně naopak je možné detekovat signál ve vzdálenosti několika metrů s přesností několika centimetrů. Již v roce 2008 se publikace zabývaly interferometrickými senzory na bázi Machova-Zehnderova interferometru [11]. Tento článek popisuje funkci Machova-Zehnderova interferometru, který snímá akustické vibrace na vzdálenost 1,01 km s přesností 38 m.

Autoři v článku [12] se zabývají návrhem senzoru s ultradlouhým dosahem pro snímání vibrací, který využívá Machův-Zehnderův interferometr. Ke snímání vibrací je využito sledování změn chromatické disperze. Pro měření jsou použity dva DFB lasery které pracují na rozdílných vlnových délkách, díky nimž je možné lokalizovat místo vibrace. Je možné detekovat vibrační signály s frekvencí až 9 MHz s prostorovým rozlišením až 31 m v délce více než 320 km na standardním jednovidovém optickém vlákně. Je možné sledovat také více zdrojů vibrací, ale s omezením vzdálenosti na 240

km s přesností 100 m.

Další oblastí senzorických systémů mohou být bodové senzory využívající Braggových mřížek. Tyto senzory nachází široké uplatnění při sledování mechanických dějů a při snímání teploty. Jedná se o vepsanou periodickou mikrostrukturu pomocí ultrafialového laseru přes fázovou masku do optického vlákna.

Motivací pro výzkum optovláknových senzorů bylo sledování dějů v oblasti seismických aktivit a statiky stavebních konstrukcí. Příkladem mohou být nedávné události v zahraničí, kde došlo ke zřícení mostní konstrukce, která byla narušena. Obecně sledování stavebních konstrukcí patří do oblasti velmi složité aplikace pro všechny druhy jak konvenčních, tak optických senzorů. Složitost je dána umístěním senzoru do místa, které je nejvíce namáháno případnými mechanickými vlivy a zároveň je toto místo dobře přístupné a není ovlivněno povětrnostními jevy. Nejlepší možností, jak sledovat stavební konstrukce, je instalace senzoru již při stavbě, například zalitím do betonu nebo pevným přichycením na jiné konstrukční prvky [1].

Další oblastí využití optických senzorů je v ochraně perimetru, či inženýrských sítí, ropovodů, vodovodů či sledování teploty zařízení které dosahují tisíce stupňů celsia, kde nelze využít konvenční měření. V neposlední řadě je možné senzorické systémy využít také ke sledování dlouhodobých jevů a to například, ke sledování seismických aktivit či dalším dlouhodobým jevům. Montáž ve všech uvedených případech je velmi jednoduchá. Spočívá převážně v instalaci optického vlákna co nejbližší sledovanému ději ať už je to teplota, tlak, vibrace a další. Výhoda optických senzorů oproti konvenčním elektrickým, je možnost sledování více druhů děju v jednom okamžiku za cenu složitějšího zpracování.

1. CÍLE DISERTAČNÍ PRÁCE

Při studiu problematiky v odborné literatuře [1], [2], [22] a vhodnosti různých druhů optických senzorů a jejich dosavadního využití padla volba na interferometrické senzory. Této volbě ovšem předcházely různé simulační modely, které ověřovaly možnosti využití jiných druhů senzorů. [16], [18]. Jednalo se především o senzory na principu fázového OTDR nebo Braggových mřížek.

Senzory na principu fázového OTDR vyžadují ke správné funkci klíčovou komponentu. Jedná se o vysokovýkonové, úzkopásmové, teplotně stabilizované laserové diody. Jejich cena je v řádech stovek tisíc korun [18]. Využití samotných Braggových mřížek nám nedává možnost sledovat děje v okolí celé trasy, případně sledovat perimetr střežené budovy. Dalším důležitým faktem je přenos sledovaného děje do vyhodnocovací jednotky, kdy je možné data z optických senzorů přenášet po již instalovaných optických trasách. Hlavní cíle disertační práce je návrh interferometrického senzoru z běžně dostupných a levných komponent. Senzor bude využit převážně pro sledování vibrací a teploty v okolí optického vlákna případně sledování dalších mechanických jevů.

Dalším cílem je měření vibrací na již instalovaných optických trasách a využití možné součinnosti datového a senzorického systému. Při měření na těchto trasách často nemáme přesné parametry trasy, proto by se mělo jednat o senzor na principu Michelsonova či Machova-Zehnderova interferometru. V neposlední řadě je motivace sledování lokální teploty a možné kombinace interferometrické metody měření společně s využitím Braggovy vláknové mřížky.

Dále mezi hlavní cíle disertační práce patří rozbor následující problematiky:

- studium optických senzorických systémů,
 - založených na rozptylových jevech,
 - interferometrických systémů využívající koherentní zdroje,
 - interferometrických systémů využívající nekoherentní zdroje,
 - studium kvazidistribuovaných senzorů pro distribuované snímání,
 - kombinace interferometrických senzorů a Braggových mřížek,
- simulace a modelování distribuovaných senzorů,
 - založených na rozptylových jevech,
 - senzor na principu ϕ – OTDR,
 - založených na interferometrii,
 - Machův-Zehnderův interferometr,
 - Michelsonův interferometr.

2. POSTUP ŘEŠENÍ

První kroky vedly k výběru metody dle teoretických poznatků z odborné literatury [1], [2], [3]. Po studiu literatury bylo vytvořeno několik studijních materiálů zabývajících se optovláknovými senzory. Jednou z důležitých činností je doplnění kapitoly do knihy Optoelektronika pro telekomunikace a informatiku o kapitolu zabývající se optickými senzory [17], [21]. Jednalo se o doplnění ucelených faktů, které byly publikovány v zahraničních periodikách. Ze všech dosažených teoretických poznatků, byla cílem tvorba principiálně jednoduchého a levného sensorického systému k detekci a případné lokalizaci vibrací v rozsahu od 1 Hz do 5 Hz a případně vyšší. Vibrace v rozsahu uvedených frekvencí jsou generovány během seismických aktivit. Metod vhodných pro tuto detekci přicházelo v úvahu několik. Jednalo se převážně o metodu na principu fázového OTDR a dále o využití některé interferometrické metody. Oba druhy zapojení splnily námi stanovené požadavky a to detekci, jako distribuovaný systém. V obou případech se jedná o ne příliš prozkoumanou oblast a aplikace těchto senzorů za využití levných komponent je velmi malá.

Dalším požadavkem byla možnost teoretické součinnosti s datovými systémy a tím pádem nasazení do již stávajících optických tras. Problematika součinnosti datového a sensorického systému není velmi známa a implementována či její prosazování je až trendem posledních let. Součinnost systémů bylo třeba otestovat v několika simulačních modelech [2], [17] [19], [20]. Simulační modely byly založeny na principu fázového OTDR se speciálním generátorem signálu a i případnou úpravu tvaru a délky pulsů. Další částí simulačních modelů byl dělicí prvek v interferometru, který rozdělí signál na jednotlivá ramena. Nově zjištěným faktem u simulačních programů je ten, že jsou převážně vytvořeny pro simulace datových přenosových sítí. Při hlubší analýze a ve srovnání s reálnými zapojeními je tento fakt vidět na výstupech simulace, kdy příliš nekoresponduje s experimentálními výsledky měření.

V programu Optsim v5.2 bylo vytvořeno schéma součinnosti sensorického systému pracující na principu Φ – OTDR společně s přenosovým systémem využívající DWDM. Výsledky těchto simulací bohužel nebyly uspokojivé, protože generátor signálu v programu Optsim v5.2 vytvářel posloupnost dat, která byla stejná pro generátor signálu sensorického systému a také přenosového systému. V praxi tyto systémy pracují s rozdílnými signály. Výsledky těchto simulací byly prezentovány na konferenci Student EEICT 2015 [16].

Během dalšího studia sensorických systémů byla proto vytvořena simulace generátoru signálu pro sensorické systémy založené na principu Φ – OTDR. Tyto systémy využívají vysokého výkonu laseru a velmi krátkých pulsů s danou opakovací frekvencí. Generátor signálu vytvořený v simulačním programu VPIphotonics proto dovoluje vytvořit pulsy s libovolnou šířkou a opakovací frekvencí. Simulace vytvořené v

programu VPIphotonics byly představeny na konferenci Student EEICT 2016 [18].

Z důvodu dosažení nepřesných výsledků simulace v programu Optsim v5.2 byla proto simulace součinnosti přenosového systému a sensorického systému vytvořena také v programu VPIphotonics. Program VPIphotonics již ve své simulaci využívá dříve vytvořený generátor signálu pro sensorické systémy. Tím pádem je dosaženo odlišných signálů pro přenosový a sensorický systém. Článek obsahující teoretické poznatky a výsledky simulací je publikován v časopise JCOMSS (Journal of Communications Software and Systems) [19].

Nevýhodou systémů využívajících zpětného rozptylu vyslaného paprsku je vysoká cena jednotlivých komponent a náročnost na zpracování signálu. Z tohoto důvodu bylo studium distribuovaných sensorických systémů dále zaměřeno na systémy využívající interferometrické metody, kde existují varianty konstrukcí, s méně náročnými komponenty na tvorbu optovláknového senzoru. Interferometrické systémy využívají porovnání fáze a amplitudy vyslaného a přijatého signálu. Během stáže na Slovenské technické univerzitě v Bratislavě byla teoreticky prostudována funkce Machova-Zehnderova interferometru. Byly vytvořeny simulace těchto systému v simulačních programech [20].

V literatuře jsou dobře popsány jednotlivé dílčí principy používané v optovláknových senzorech. Dosud je však malá pozornost věnována kombinaci více principů v jednom sensorickém systému. A sdílení optického vlákna pro sensorické účely a datové komunikace. Jako perspektivní se jeví použití následujících metod, které dosud nebyly dobře odsimulovány a popsány:

- Michelsonův a Machův-Zehnderův interferometr v kombinaci s datovým přenosem.
- Michelsonův interferometr v kombinaci s vláknovou mřížkou.
- Michelsonův interferometr s kompenzací délky ramen pro použití se zdrojem světla s nízkou koherencí.

Klíčové komponenty výše uvedených sensorických systémů a sensorické systémy samotné byly analyzovány pomocí simulačních modelů a perspektivní z nich následně testovány v laboratorních i reálných podmínkách.

Výsledky simulačních testů jsou uvedeny v kapitole 2.1, laboratorní měření v kapitole 3 a měření v reálných podmínkách pak v kapitolách 3.1.2, 3.1.3, 3.1.4, 3.1.5.

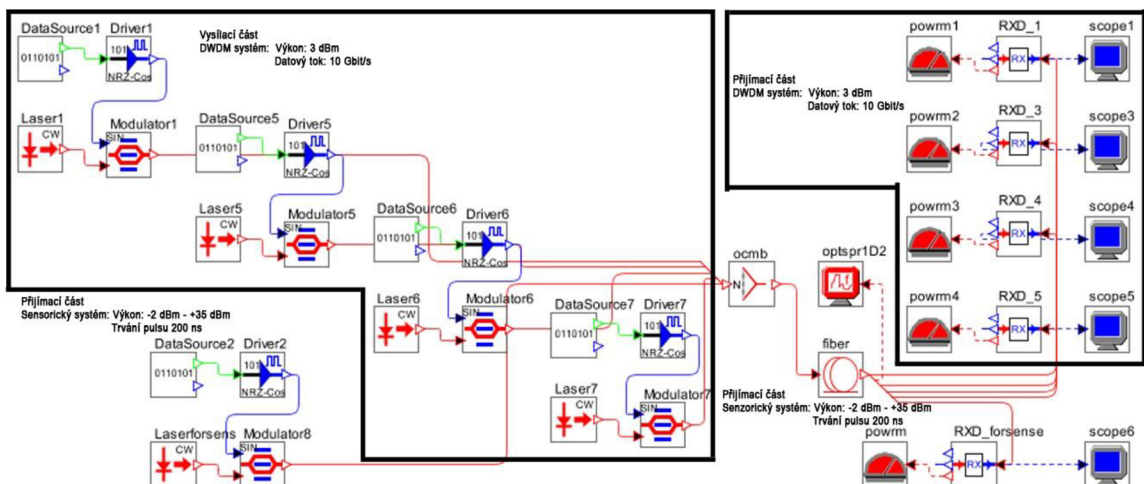
2.1 Simulace možných řešení

Následující simulace měly docílit možného systému pro snímání vibrací pomocí různých technologií a jejich kombinací a díky nim přistoupit k testování zapojení možných komponent.

2.1.1 Vliv fázového optického senzoru na DWDM přenos

První ze simulací popisuje společnou součinnost přenosového systému pracujícího na hustém vlnovém multiplexu a optického senzoru využívajícího Φ – OTDR. Přenosový systém využívá čtyř DFB laserů s vlnovými délkami 1550 nm, 1550,8 nm, 1551,6 nm, 1552,4 nm a výkonem 3 dBm. Tento systém je nasazen na optické trase délky 50 km bez zesilovačů. Systém pracuje s danou přenosovou rychlostí 10 Gbit/s a chybovostí BER $4,91 \cdot 10^{-13}$ (-). Pro přenos je využita náhodná posloupnost dat ve formátu NRZ. Sensorický systém je tvořen jedním DFB laserem pracujícím s proměnným výkonem. Dále je ve vysílací části použit Machův-Zehnderův modulátor a multiplexer pro sloučení signálu z vysílačů. Pro přenos je využito běžné telekomunikační vlákno G.652.D které má útlum 0,2 dB na km [22].

Přijímací část tvoří optické a elektrické filtry, které filtrují nastavenou vlnovou délku. Tyto simulace jsou zaměřeny na sledování bitové chybovosti DWDM systému při rozdílných výkonech sensorického laseru. Optický sensor využívá laser pracující na vlnové délce 1600 nm s proměnným výkonem. Simulační schéma v programu Optisim v5.2 je znázorněno na obrázku Obr. 2.1.



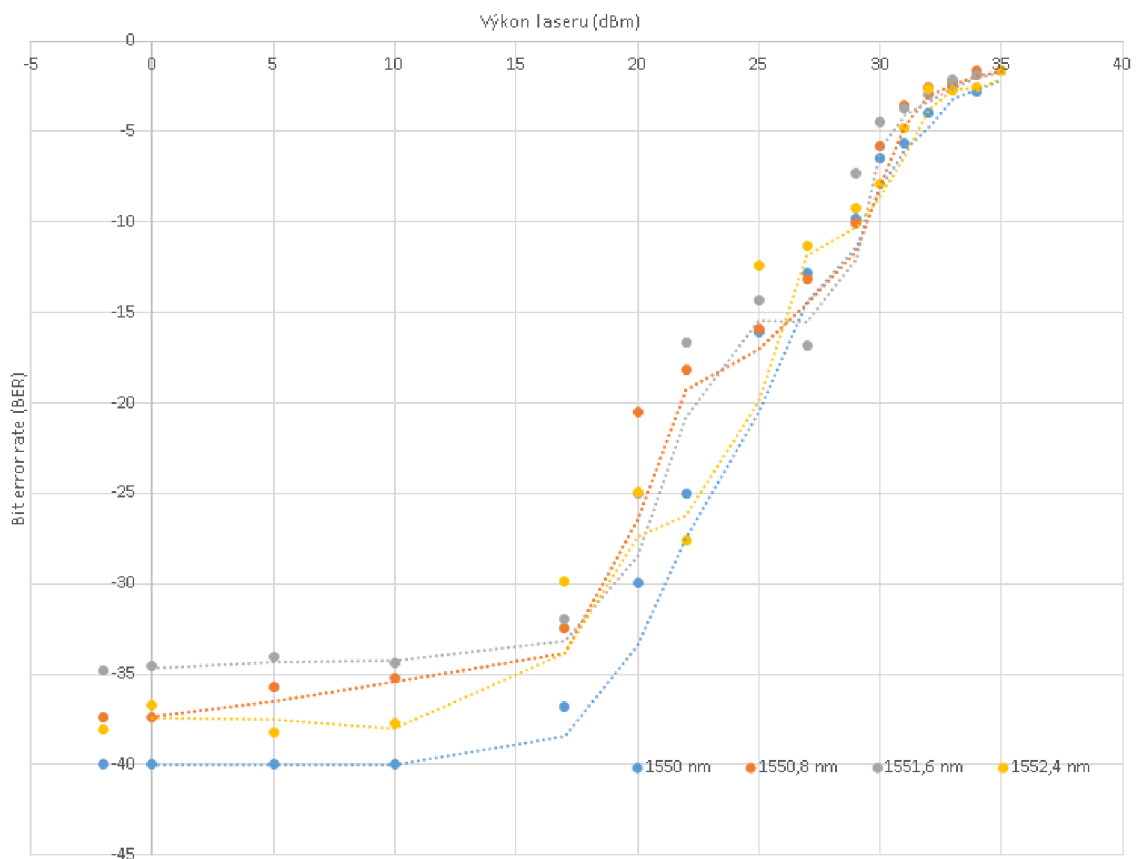
Obr. 2.1: Schéma simulace Senzoru a DWDM systému v programu Optisim

Výsledky simulace

Senzorický systém vyžaduje vysoký výkon laseru z důvodu, nízkého výkonu zpětně

odraženého signálu. Simulace začínají od výkonu sensorického systému -2 dBm, kdy je DWDM systém stabilní a má BER $1 \cdot 10^{-40}$ (-) a oko rozhodnutí je bez chyb u všech vlnových délek. Pokud je postupně zvyšován výkon sensorického laseru dochází k degradaci signálu přenosového DWDM systému. Bitová chybovost roste a při dosažení výkonu sensorického systému 29 dBm dosáhne $1,65 \cdot 10^{-10}$ (-). Výkon 29 dBm odpovídá 800 mW. To je dostačující pro mnoho dalších sensorických systémů založených například na Ramanově či Brillouinově odrazu. To znamená, že přenos dat je již neúspěšný [16]. Graf závislosti výkonu sensorického systému na chybovosti přenosového systému je zobrazen na obrázku Obr. 2.2.

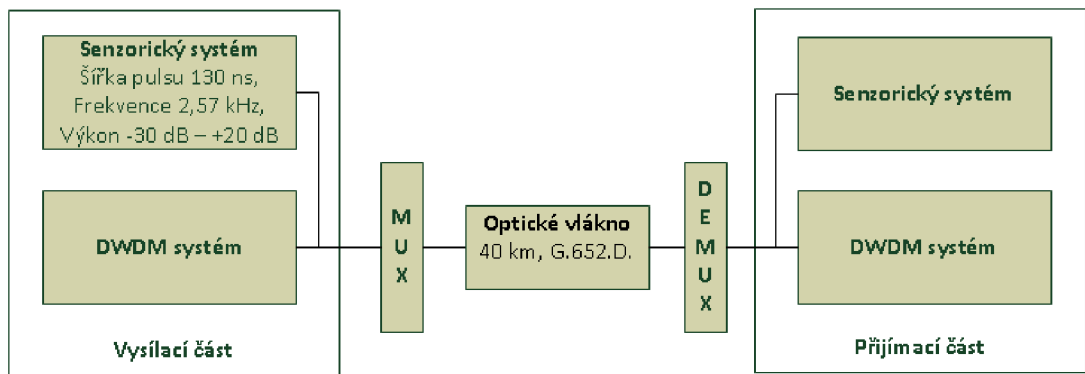
Výsledky simulace dokazují, že je možné využít jedno optické vlákno pro přenosový systém DWDM a také pro optický sensor. Nevýhodou této součinnosti je omezení ve výkonu sensorického systému. Nevýhodou provedených simulací je generace a přenos stejné sekvence dat jak pro sensorický systém, tak pro přenosový systém. Z tohoto důvodu byl vytvořen generátor pulsního signálu v programu VPIphotonics. Program Optsim nedovoloval vytvoření proměnné sekvence dat [16].



Obr. 2.2: Závislost výkonu sensorického systému na chybovosti přenosového systému

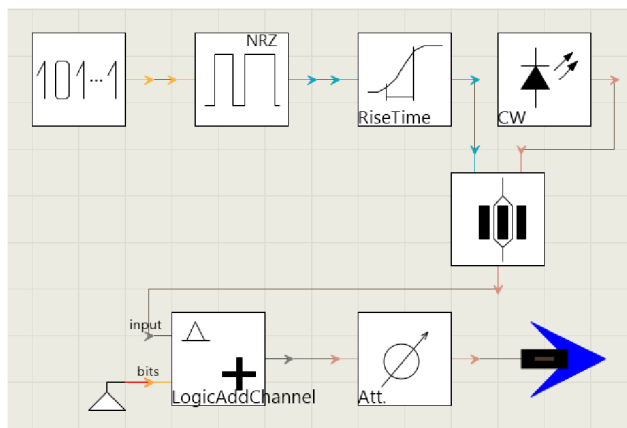
2.1.2 Přenos vysokovýkonového senzorického systému a DWDM systému na jednom optickém vlákně

Simulace v programu VPIphotonics navazují na předchozích výsledky, které byly provedeny v programu Optsim v5.2. Dále je zapojen pulsní generátor signálu pro senzorické systémy. Simulační model popisuje funkci senzorického systému a přenosového systému na jednom optickém vlákně. DWDM systém má přenosovou rychlost 10 Gbit/s s bitovou chybovostí $10 \cdot 10^{-40}$ (-). Je využito standardní optické telekomunikační vlákno G.652.D, které simuluje lineární a nelineární jevy. Na stejném optickém vlákně také pracuje senzorický systém. Při tvorbě simulací bylo nejdříve nutné nastudovat funkci DWDM multiplexu a jeho standardu ITU-T G.694.1, který popisuje přenosové kanály a jejich spektrální šířku [25]. Dále je proveden rozbor signálu, který vysílá senzorický systém. Jedná se o požadovanou šířku pulsu a opakovací frekvenci vzhledem k optické trase a rozlišovací schopnosti senzorického systému. Vztahy pro určení těchto hodnot byly již rozebrány v kapitole zabývající se pulsním generátorem. Blokový diagram simulačního modelu je zobrazen na obrázku Obr. 2.3.



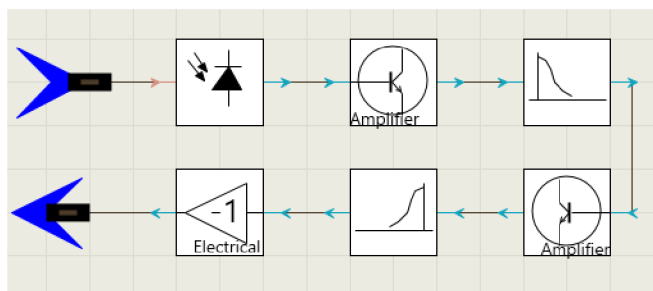
Obr. 2.3: Blokový diagram simulačního modelu v programu VPIphotonics

Vysílací část DWDM systému obsahuje blok označený na schématu z obrázku jako "101.1", který generuje pseudonáhodnou posloupnost jedniček a nul, dále blok NRZ, který slouží ke kódování signálu. Signál je upraven Gausovským filtrem označeným jako blok RiseTime. Signál dále vstupuje do Machova-Zehnderova modulátoru. V simulaci je využit blok s názvem CW, ten obsahuje DFB laser. Další bloky ve vysílací části DWDM systému jsou použity pro správnou funkci simulace. Vysílací část DWDM systému je zobrazena na obrázku Obr. 2.4.



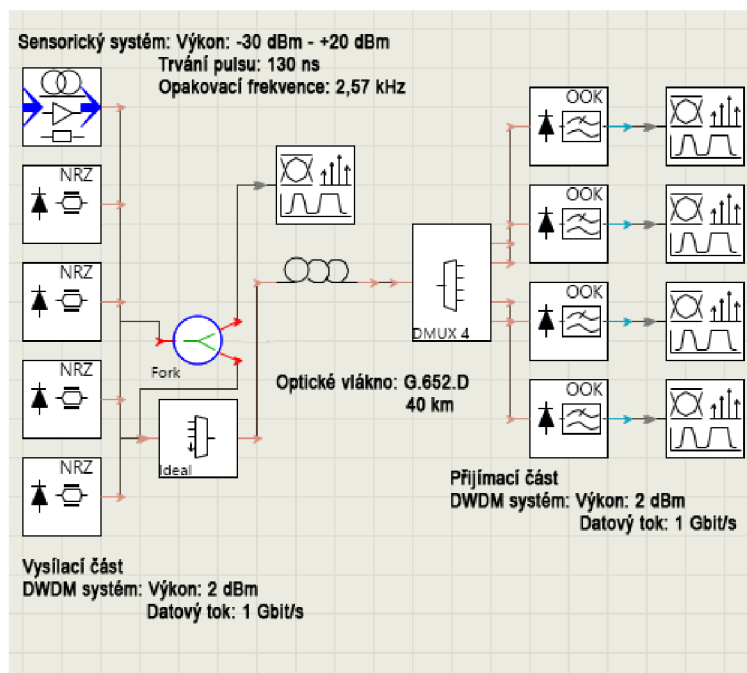
Obr. 2.4: Vysílací část DWDM systému v programu VPIphotonics

Přijímací část DWDM systému tvoří fotodioda, zesilovač a filtry pro úpravu přijatého signálu, které jsou konfigurovány dle vlnové délky pro jednotlivé kanály. Simulace přijímací části DWDM systému je na obrázku Obr. 2.5.



Obr. 2.5: Přijímací část DWDM systému v programu VPIphotonics

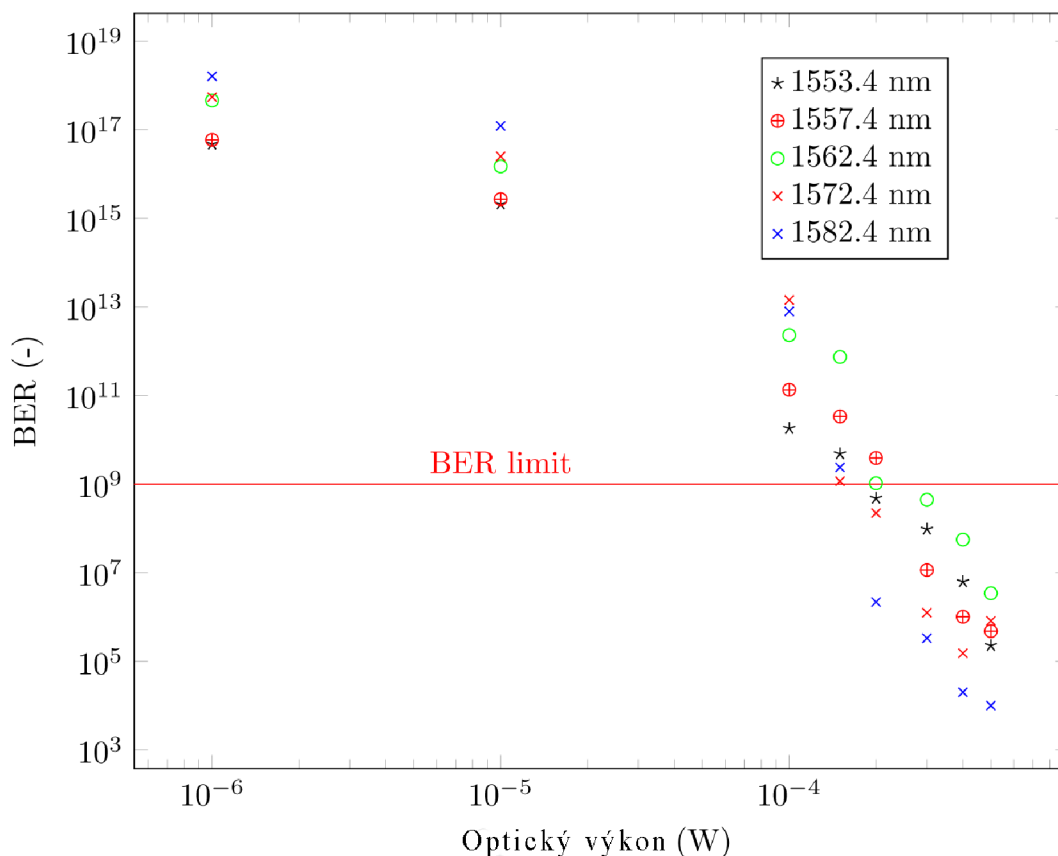
Simulační model využívá čtyři DFB lasery pro DWDM systém a jeden DFB laser pro optický senzor. Laser pro optický senzor má proměnnou vlnovou délku začínající na 1553,4 nm a proměnný výkon. Sensorický systém je posunut od DWDM systému o 1 nm a vzdálenost posunutí roste. Lasery pro DWDM systém pracují ve standardní mřížce definované normou ITU-T [25] a mají vlnovou délku 1550 nm, 1550,8 nm, 1551,6 nm a 1552,4 nm s výkonem 3 dBm. Systém pracuje na rychlosti 10 Gbit/s s bitovou chybovostí $10 \cdot 10^{-40}$ (-). Optická trasa obsahuje 40 km optického vlákna G.652.D. Simulační schéma v programu VPIphotonics je zobrazeno na obrázku Obr. 2.6.



Obr. 2.6: Simulační model senzorkého a přenosového systému ve VPIphotonics

Výsledky simulace

Základní nastavení simulačního modelu zaručuje bezchybný přenos DWDM systému, bitová chybovost je $10 \cdot 10^{-40}$ (-) na všech vlnových délkách DWDM multiplexu. Při postupném zvyšování výkonu senzorkého laseru dochází k degradaci dat. Z dosud neznámých důvodů dochází k rychlému nástupu degradace datového signálu už při nízkém výkonu senzorkého systému a při dostatečném odstupu vlnových délek obou systémů. Graf závislosti chybovosti DWDM systému na výkonu senzorkého systému je na obrázku Obr. 2.7. Z grafu je možné vidět vysoký nárůst chybovosti již při nízkých výkonech a dostatečném odstupu senzorkého systému. Výsledky simulací v programu VPIphotonics by měly v budoucnu dosahovat vyšší přesnosti, než v programu Optsim v5.2. Dalším dílčím cílem bude určení minimální vzdálenosti vlnových délek senzorkého a přenosového systému. Simulace v programu Optsim dokazují, že přenos dat je limitován maximálním optickým výkonem senzorkého systému. Výsledky simulací dokazují, že pro správnou funkci $\Phi - \text{OTDR}$ je třeba úzkopásmových a teplotně stabilizovaných laserů. Z tohoto důvodu byla studie senzorů založených na zpětně odraženém signálu přesunuta na využití senzorů na bázi interferometrických metod a nekoherentních systémů za cenu složitějšího zpracování dat.

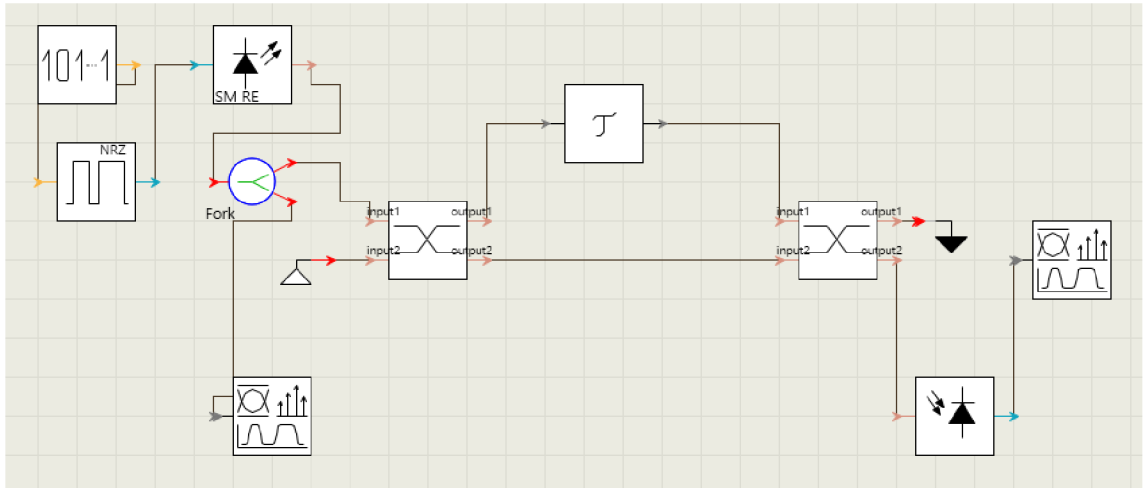


Obr. 2.7: Graf závislosti výkonu sensorického systému na chybovosti DWDM systému, který je zatížen chybou

2.1.3 Simulace a měření Machova-Zehnderova interferometru

Senzorické systémy na bázi Machova-Zehnderova interferometru dosahují vyšší přesnosti v porovnání se senzory využívajícími zpětného odrazu. Nevýhodou těchto senzorů je možnost měření relativních změn, které jsou vždy vztažené k referenčnímu stavu. Z toho plyne také nevýhoda složité lokalizace. Tento problém nastává při sledování vibrací na optickém vlákně, kdy je výhodou real-time monitoring, kdy je ihned viditelná změna, ale je třeba mít referenční měření [12], [24]. Dále je zobrazena ukázka simulačního modelu Machova-Zehnderova interferometru obrázku Obr. 2.8.

Simulační model je tvořen generátorem signálu pomocí náhodné posloupnosti a kódování do signálu NRZ. Dále laser, který pracuje s výkonem 1 mW a svítí pomocí coupleru do obou ramen interferometru. Coupler použitý v simulaci, má dělicí poměr 50 : 50 a útlum 3 dB v ideálním případě. Na jednom z ramen interferometru je vložen prvek, který je schopen upravit signál procházející daným ramenem interferometru ve fázové nebo amplitudové oblasti. Tento prvek simuluje vliv vibrace nebo teploty na optické vlákno. Část přijímače MZI je tvořena fotodetektorem na jednom rameni a na druhém je ukončena slepou větví. Pro měření je využito dvou analyzátorů signálu, pomocí kterých sledujeme vstupní a výstupní signál.



Obr. 2.8: Simulace Machova-Zehnderova interferometru v programu VPIphotonics

Výsledky simulací:

Nevýhodou MZI je omezená možnost vyhodnocování změn signálu. Je možné vyhodnocovat signál jen vůči referenčnímu měření, které program VPIphotonics nedokáže zobrazit. Z tohoto důvodu bude simulace Machova-Zehnderova interferometru vytvořena pomocí programu Simulink a Matlab, kde budou matematicky vyhodnoceny a porovnány výstupní signály. Tyto simulační modely popisují pouze fyzikální model Machova-Zehnderova interferometru. Výsledky měření a simulací přijatého výkonu na ramenech interferometru v závislosti na posunu fáze signálu v jednom z ramen interferometru se liší. Další postup se bude zabývat úpravou jednotlivých prvků simulace tak, aby se přiblížila co nejvíce reálným prvkům.

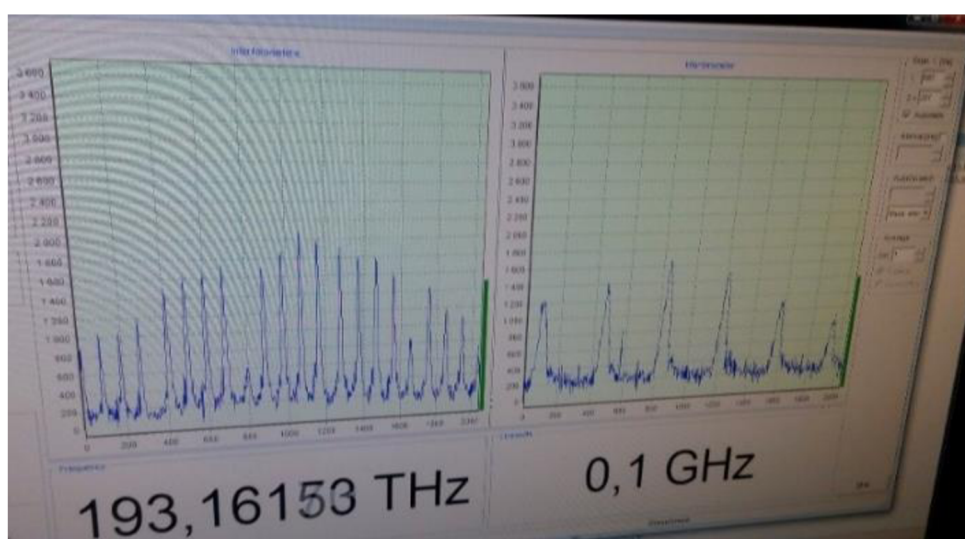
3. KOMBINACE MICHELSONOVA INTERFEROMETRU S VYUŽITÍM VLÁKNOVÉ MŘÍŽKY

Tvorba jednoduchého optovláknového senzoru byla dále zaměřena krom detekce a možné lokalizace vibrace také na měření teploty a balancování interferometru pomocí vláknových mřížek. Pro zdroj interferometru se běžně používá dioda DFB (Distributed Feedback). V našem případě se v měřeních využila dioda DFB SLT5412-CA. Tato dioda s výkonem 5 mW emituje v rozmezí vlnových délek 1506 nm až 1509 nm. Její koherentní délka je v řádu několika desítek metrů tzn. při rozvážení ramen interferometru je možné stále pomocí interferometru měřit, jak bylo uvedeno již dříve. Další část výzkumu byla zaměřena právě na běžně dostupné diody a jejich využití pro interferometry.

3.1.1 Měření a výpočet koherentních délek diod

Klíčový parametr pro využití diod v interferometrech je jejich koherentní délka. Tu deklaruje výrobce ve svých technických listech s velkou rezervou. K další práci proto bylo nutné ověřit parametry využívaných diod. V rámci spolupráce s Ústavem přístrojové techniky došlo k měření vybraných DFB diod. Ústav přístrojové techniky v Brně disponuje vlnoměrem, který je schopen měřit a vyhodnotit světelný svazek vystupující z diody. Námi testované diody měly různé parametry deklarované výrobcem, v rozmezí od běžně dostupných 1 MHz až do 6 MHz. Jednalo se například o tyto modely.

- NEC OSC-LDPM-C-6300 1 MHz
- NEC OSC-LDPM-C.023E 2MHz



Obr. 3.1: Ukázka pracovního prostředí softwaru vlnoměru

Měřicí zařízení mělo rozlišení šířky vlnové čáry do 100 MHz to bylo jistým omezením přesnosti. Všechny námi testované a využívané diody pro tvorbu interferometrů tento fakt splnily. Víme tedy že, jejich koherentní délka nebude nikdy menší než cca 954 mm. Čím budeme mít kratší koherentní délku, tím bude nutné mít menší rozdíl délek měřících ramen.

Výpočet koherentní délky provádíme dle vzorce:

$$L_{coh} = c\tau_{coh} = \frac{c}{\pi\Delta\nu} \quad 3.1$$

kde $\Delta\nu$ optická šířka spektra (Hz), τ_{coh} koherentní čas maximálního časového zpoždění, kdy záření ještě interferuje samo se sebou, c rychlost světla

Tab. 3.1: Tabulka teoretických výpočtů koherentní délky

Šířka spektra fotodiody (MHz)	1	2	3	4	5	6	100
Koherentní délka (m)	95,4	47,7	31,8	23,9	19,1	15,9	0,95

Z tabulky jasně plyne, že námi změřená koherentní délka je maximálně 1 m, což by znamenalo maximální rozdíl délek ramen do 1 m. Z měření vyplývá, že i při rozdílu ramen desítky metrů interferometr stále funguje a námi testované modely diod mají šířku spektra hluboko pod 100 MHz

3.1.2 Ověření koherentní délky diody

Pro možnost dalšího využití byla testována a ověřována koherentní délka diody SLT5412-CA/SY-S850. Koherentní délka deklarovaná výrobcem je 47,7 m. Byl sestaven testovací interferometr, který měl délky ramen v hraniční koherentní délce použité diody tj. 47 m. K přesnému změření a odladění délky bylo využito reflektometru firmy Luciol Instruments LOR 220. K možnosti doplnění a rozvážení referenčního a měřícího ramene byl využit motorizovaný lineární stůl od firmy NEWPORT a 2 kusy kolimátorů firmy Thorlabs PAF-X18-C. Ty umožnily vyvázání optického svazku z vlákna a optický stůl v délce 1 m změnu délky a rozvážení ramen. Při testech bylo velmi problematické vyvázat kolimátorem signál z vlákna, aby měl dostatečný výkon a bylo možné jej zase navázat zpět do vlákna. I při hraničních délkách koherence ale interferometr stále pracoval. To je důkazem, že výrobce své parametry v technických listech deklaruje s rezervou.

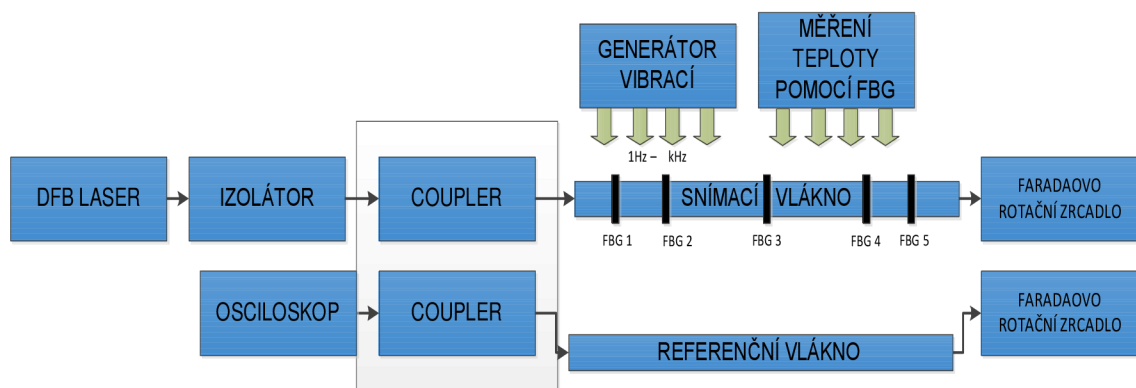
3.1.3 Testování využití vláknových mřížek v interferometru

Pro test bylo vybráno cca 5 kusů vláknových mřížek v rozsahu přeladění DFB laseru s těmito parametry a také pořadí v testovací trase. V tabulce je také uvedena teplota diody pro naladění na danou mřížku.

Tab. 3.2: Tabulka parametrů využitých vláknových mřížek

Pořadí v testovací trase	Teplota DFB diody [°]	Hodnota proudu DFB diody [mA]	CWL [nm]	FWHM [pm]	REF [%]	OSNR [dB]
1	25	10	1506,114	320	85	8,3
2	32	13	1506,927	314	76	9,2
3	36	16	1507,352	389	82	9,5
4	38	19	1508,134	362	84	11,2
5	45	25	1508,923	345	52	10,5

Pro měření byla svařena testovací trasa, která měla délku cca 6 m. První metr byl zakončen první mřížkou na vlnové délce 1506,114 nm druhý metr následující mřížkou a tak dále. Tato testovací trasa byla zapojena do ramene Michelsonova interferometru společně s referenčním ramenem stejné délky. Funkce interferometru byla ověřena na několika testovacích měřeních.



Obr. 3.2: Blokové schéma zapojení testovacího měření

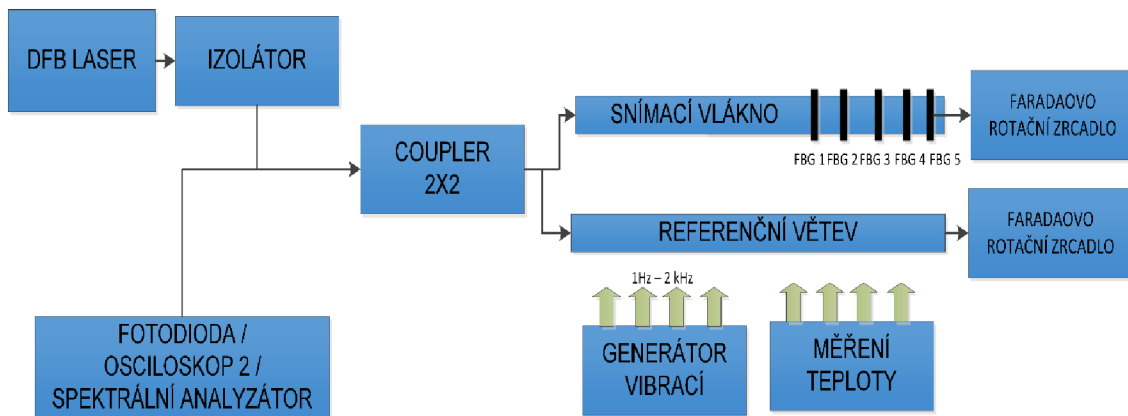
Dále došlo k přeladování DFB diody SLT5412-CA. Tato dioda byla přeladována pomocí teploty peltierova článku, který udržoval na čipu diody danou teplotu a díky tomu

se dioda přelad'ovala ve vlnové oblasti.

Nejdříve byla využita typická a doporučená hodnota teploty 25 °C, kdy dioda svítila na vlnové délce 1506,114 nm dále se dioda hodnotou teploty přeladila na další mřížku a tak následovně se proces opakoval. Každá mřížka byla podrobena procesu testování v daném rozmezí teplot od 0 °C do 40 °C. Posun centrální vlnové délky vláknové mřížky je obecně cca 10 pm/ °C.

Toto měření nám umožňuje zobrazit pouze část odraženého spektra od mřížky, a tím pádem určit případnou změnu teploty v daném okamžiku, jak se změnila vůči předchozí. Měření by vyžadovalo dodatečnou kalibraci vysílacího proudu diody na daných vlnových délkách, vůči odražené vlnové délce mřížky a její teplotě. K přesnému sledování vlnové délky vysílací diody a vláknových mřížek nám může sloužit spektrální analyzátor. Další možností je využití dat od výrobce diody, kdy udává teplotu diody vzhledem k její vlnové délce. V našem případě jsme použili diodu a vláknové mřížky nejdříve proměřili spektrálním analyzátozem, abychom si ověřili parametry dané výrobcem, jak diody tak mřížek. Výsledky měření se lišily jen v rámci jednotek pikometrů. Měření probíhalo na stejných teplotách, jak deklaruje výrobce ve svých technických listech. Odchyłka při měření může být způsobena rozdílnou kalibrací spektrálního analyzátozu.

Možné zapojení sestavy pro měření vlnové délky vláknových mřížek a vlnové délky DFB diody je uvedeno na obrázku Obr. 3.3.

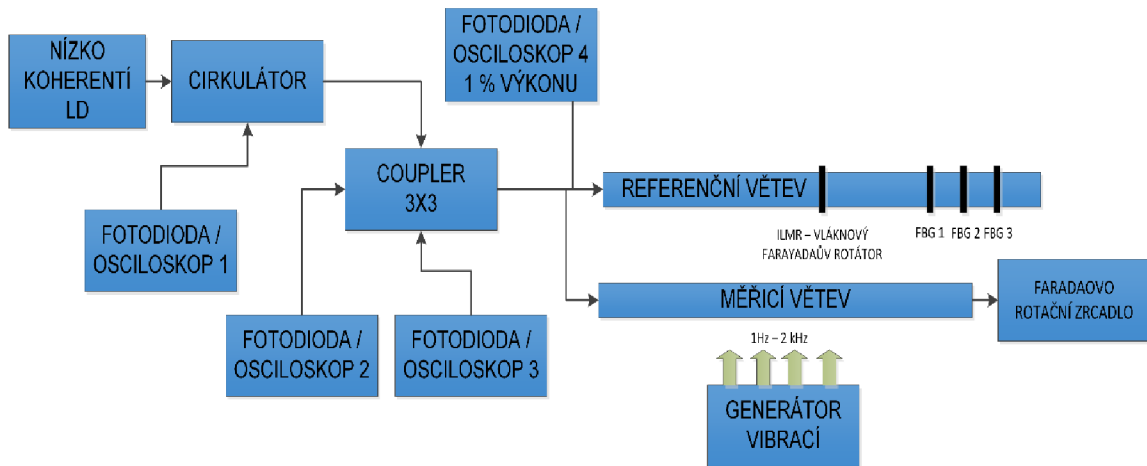


Obr. 3.3: Možná variace měření se spektrálním analyzátozem

Tímto bylo potvrzeno, že je možné využít vláknové mřížky v kooperaci s interferometrickými metodami, a to současně k měření vibrací a dále k měření teploty v okolí vlákna. Nevýhodou tohoto zapojení je zobrazení jen velmi malého úseku spektra a neustálý posun ve vlnové oblasti. Dále riziko toho, že může nastávat interference mezi zrcátkem a vláknovou mřížkou a způsobovat chyby nebo znehodnotit měření. Při využití spektrálního analyzátozu docílíme přesnější sledování vlnové délky diody a vláknových mřížek.

3.1.4 Michelsonův interferometr s kompenzací délky ramen pro použití se zdrojem světla s nízkou koherencí

Jak již bylo zmíněno v předchozích kapitolách, použití sensorických systémů využívající interferometry vyžadují lasery s vysokou koherencí, a to především z důvodu, že v praktických aplikacích není přesně možné vyvážit délku měřicího a referenčního ramene. V případě vysoce koherentních zdrojů je možné nevyvážení větví odpovídající až polovině koherenční délky laseru. V případě levných systémů s DBF lasery se může koherenční délka pohybovat v řádu jednotek metrů. V takovém případě je pak v praxi velmi složité sladit délku referenčního ramene s měřeným. Z tohoto důvodu byl navržen systém využívající principu Michelsonova interferometru s couplerem 3x3, jak již bylo zmíněno v kapitole 5, ale referenční rameno bylo doplněno sadou FBG s různou vlnovou délkou a rozestupy blízcími se koherenční délce použitého polovodičového DFB laseru. Schéma zapojení je znázorněno na obrázku Obr. 3.4.



Obr. 3.4: Blokové schéma zapojení pro kompenzaci délek ramen.

Jak je z obrázku Obr. 3.4 patrné, Faradayovo rotační zrcadlo na konci referenční větve je nahrazeno in-line Faradayovým rotátorem následovaným sadou FBG s různou rezonanční vlnovou délkou. V tomto případě FBG představují sadu koncových zrcadel, které jsou v různé vzdálenosti na referenční větvi. V závislosti na vlnové délce zdroje záření je potom zvolena fyzická vzdálenost místa odrazu. Před sadou FBG je umístěn Faradayův rotátor, aby docházelo k otočení polarizace odraženého svazku o 90°. Na začátku referenční větve je umístěn coupler s malým odbočením části odraženého signálu (řádově jednotky %). Důvodem je měření aktuálního odraženého výkonu od FBG, aby bylo možné naladění laseru na maximum odrazu FBG. Ladění vlnové délky DFB je uvažováno teplotou, dle dosavadních zkušeností je prakticky možné přeladění v rozsahu cca 7 nm. Při uvažované spektrální separaci FBG na referenční větvi s odstupy 0,5 nm je tak možná kompenzace rozvážení ramen až o 14násobek koherenční délky použitého laseru.

3.1.5 Ověření navrženého principu při měření vibrací v zapojení s Michelsonovým interferometrem

Pro další práci bylo využito laboratoří firmy NETWORK GROUP s.r.o..

Použitá laserová dioda

Jako zdroj laserového záření byla využita laserová diody DML TOSA YDT YDT2CI1-A62 běžně využívaná v přenosových systémech. Dioda měla koherentní délku 0,8 m kdy byla koherence ověřena na několika testech jako u diody SLT5412-CA. Ve srovnání má dioda DML daleko menší koherenci jak SLT. Pro realizaci laboratorních měření postačuje výstupní výkon diody 1 mW.

Cirkulátor

Zajišťuje jednak to, že se nám do laserového zdroje nevrátí žádné odražené záření a tím pádem jej nemůžeme poškodit a dále je propojen s fotodetektořem.

Coupler 3x3 a Faradayův průchozí rotátor

Coupler rozděluje vyslaný signál do referenčního a měřicího ramene a také fotodiod. Referenční rameno tvoří sestava vláknových mřížek navařených v délkách odpovídající koherenci laserového zdroje a nahrazují vlastně Faradayovo rotační zrcadlo bez otáčení polarizace signálu. Tuto funkci zastává průchozí Faradayův rotátor, který otáčí rovinu polarizace o 90° .

Fotodetektory / Osciloskop

Detekce a zpracování signálu ve více místech nám umožňuje sledovat průběh signálu vstupujícího a vystupujícího a porovnávat mezi sebou. Výhodou tohoto zapojení je využití vyvážení 1 % výkonu před vstupem do trasy, aby bylo možné najít maximum při přeladování DFB a dle výkonu zpětné vazby udržovat vlnovou délku laserové diody na vrcholu dané mřížky. Hrubé přeladění vlnové délky vysílací diody na FBG se nastavuje teplotou DFB, na přesnou pozici se pak DFB přeladí podle výkonu.

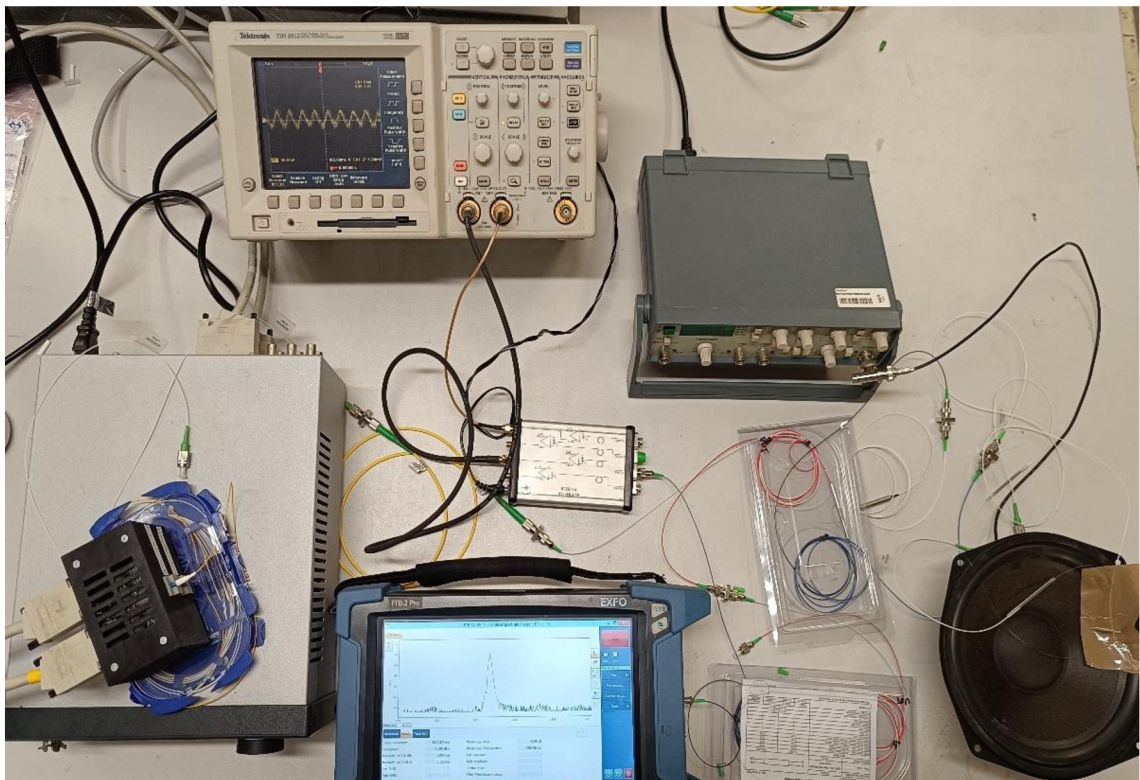
Princip měření

Pro testování byl svařen měřicí řetízek FBG. Tyto vláknové FBG mřížky byly vyrobeny v rozsahu vlnových délek vysílacího zdroje, pokud bude se bude měnit emitovaná vlnová délka záření.

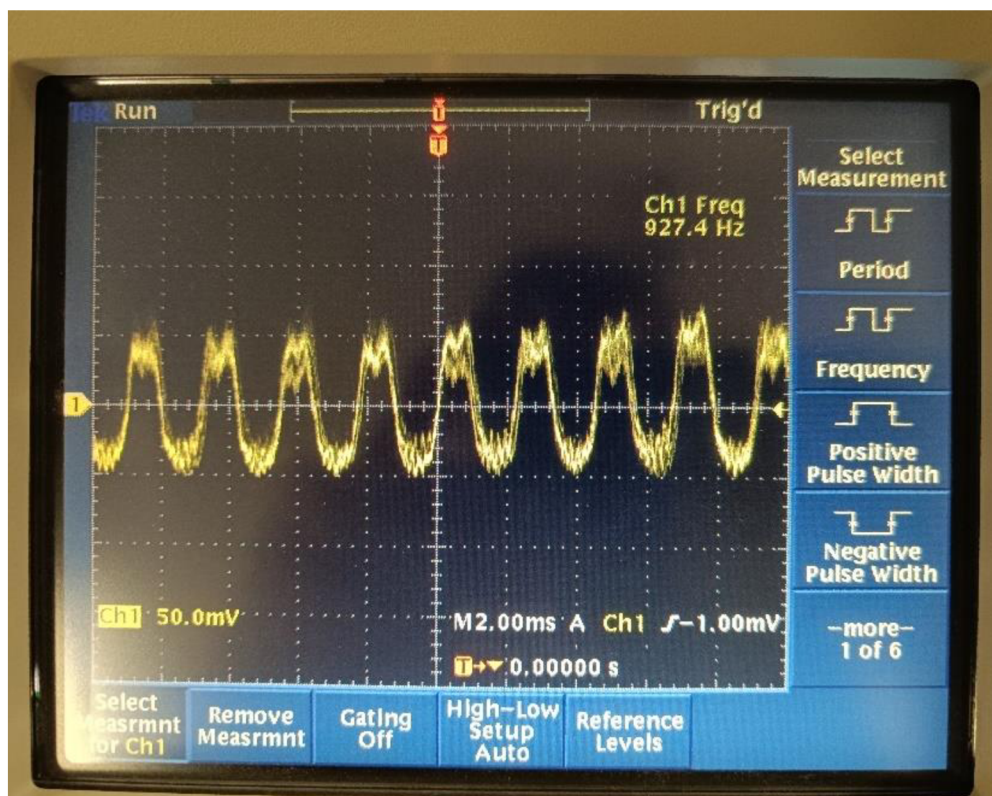
Tab. 3.3: Tabulka s parametry vláknových mřížek:

Pořadí v testovací trase	Teplota DFB diody [°]	CWL [nm]	FWHM [pm]	REF [%]	OSNR [dB]
1	25	1528,207	258	85	6,5
2	32	1529,513	241	76	7,4
3	36	1530,252	268	82	8,5
4	38	1531,134	230	84	9,2
5	45	1532,623	220	80	10,1

Při spuštění laserového zdroje se naladíme na první vláknovou mřížku, která odpovídá vlnové délce zdroje a to 1528,207 nm. Po spuštění generátoru vibrací otestujeme funkci Michelsonova interferometru, kdy detekujeme předem známou frekvenci nastavenou na generátoru. A DFB diodu přeladíme tak, aby se nám od mřížky vracel co možná největší výkon. Ten sledujeme na vláknové odbočce 1 %. Dále také vidíme že interferometr pracuje a detekuje generovaný signál. Optické vlákno je fixováno na reproduktoru, aby nedocházelo k záznějům a detekce nebyla ovlivněna.



Obr. 3.5: Zapojení Michelsonova interferometru v laboratoři

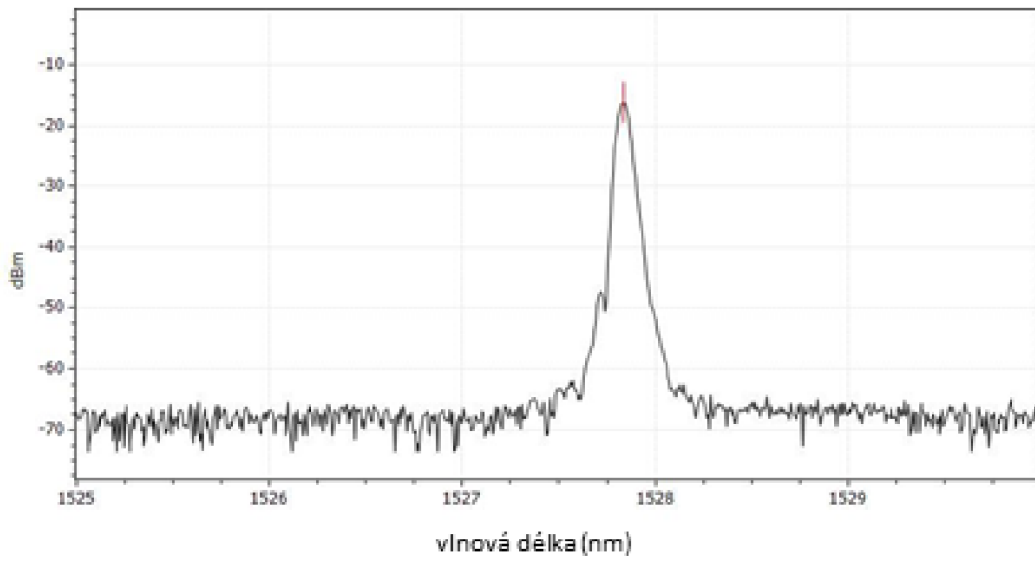


Obr. 3.6: Detekovaný signál na osciloskopu

Hlavním principem je to, že nám vláknová mřížka nahrazuje Faradayovo rotační zrcadlo s nevýhodou, že mřížka neobrací fázi. K otočení fáze na rameni nám slouží průchozí Faradayův rotátor, který je umístěn na referenčním rameni s mřížkami.

Frekvence na generátoru se podařila úspěšně detekovat na osciloskopu a tím pádem víme, že interferometr pracuje spolehlivě. Tento princip funguje i pro další mřížky v řetízku, tzn. jsme schopni pokrýt oblast až cca 5 m v našem testovacím zapojení. Pro ověření měření je možné využít i spektrální analyzátor, zda je mřížka dobře naladěna.

Výhodou zapojení je možnost měřit vibrace na neznámých trasách, kdy si mřížky navaříme v délkových rozestupech dle koherence využitého zdroje a poté testujeme na které mřížky se dokážeme přeladit. Nutností navrženého zapojení je na měřicí trasu instalovat průchozí Faradayovo rotační zrcadlo. Další výhodou navrženého zapojení je jeho jednoduchost a výhoda, že nepotřebujeme spektrální analyzátor. Pro přeladění využijeme převodní tabulku, která odpovídá teplotě DFB diody a vlnové délce mřížky v naší referenční trase. Dle toho jsme schopni přibližně určit délku trasy a sledovat vibrace v daném úseku trasy.



Obr. 3.7: Spektrum naladěné vláknové mřížky na analyzátoru

SHRnutí DOSAŽENÝCH VÝSLEDKŮ

Disertační práce se věnuje optickým distribuovaným senzorickým systémům. V rámci dosavadního studia bylo prostudováno několik zahraničních publikací (převážně knižních a odborných periodik), které se zabývají distribuovanými optickými senzorickými systémy [1], [2], [22]. Jednalo se převážně o hlubší teoretický popis principu funkce Φ – OTDR senzorického systému a systémů využívající interferometrické metody. Dále byla provedena celá řada simulací a měření distribuovaných systémů. Simulace využívaly převážně programy Optsim v5.2, dále program VPIphotonics a v neposlední řadě také modul Simulink v programu Matlab. Programy, ve kterých byly simulace provedeny jsou určeny převážně pro modelování přenosových systémů a síťových aplikací. Z tohoto důvodu musí být vytvořeny dílčí bloky pro správnou funkci simulací senzorických systémů.

Dalším důležitým simulačním modelem který byl vytvořen a publikován, je koexistence s přenosovým systémem na jedné optické trase. Jedná se o optovláknový senzor o maximálním výkonu 3 mW a datový systém CWDM a DWDM o výkonu 1 mW. Hodnoty výkonu byly zvoleny na základě standardních a reálných hodnot potřebných pro správnou funkci. U datového systému se jednalo o hraniční chybovost BER na kterých je možné systém provozovat to je 10^{-13} (-). Poté již nastávají chyby v přenosu. Výkon senzorického systému 3 mW byl zvolen z důvodu možného využití fázového OTDR které pro svou funkci vyžaduje vysoko výkonový úzkopásmový zdroj záření. Sensory na principu interferometru takový výkon nepotřebují, pracují v minimálních hodnotách stovek mikrowatt. U tohoto typu senzoru se převážně jedná o útlum na optické trase. V rámci simulací bylo provedeno také několik měření na optických trasách. Výsledky tohoto výzkumu byly publikovány v odborných periodikách a na zahraničních konferencích [2], [10]. V oblasti simulací byl tedy vytvořen model generátoru signálu pro VPIphotonics, dále simulace koexistence datového DWDM systému a senzorického systému a v neposlední řadě také dělicí prvek využívaný pro interferometry. Důležitými simulačními modely jsou také Machův-Zehnderův a Michelsonův interferometr vytvořené jak v simulačním programu VPIphotonics tak Matlab.

Dalším důležitým pracovním bodem bylo rozhodnutí o využití metodiky interferometrie z důvodu ceny komponent. Fázová OTDR jsou svou funkcí pro detekci akustických vibrací velmi dobrým řešením pro krátké i dlouhé trasy. Cena klíčových komponent pro tento druh senzoru je ale příliš vysoká. Levné komponenty pro tato zapojení nelze využít. Například cena za laserovou diodu použitelnou v zapojení fázového OTDR se pohybuje v desítkách tisíc korun. Proto se výzkum zaměřil jen na interferometrické metody. V této oblasti, a hlavně při stavbě interferometru, bylo využito základních a levných komponent. Cena diody použitelné v zapojení interferometru se pohybuje v řádu jednotek tisíc korun. V této oblasti zatím neexistoval dostatek publikací

a metodik pro měření.

Návrh vždy obsahoval tvorbu simulačního modelu a reálného zapojení. Došlo také k porovnání jednotlivých metod zapojení interferometru mezi sebou v rámci detekce jednotlivých frekvencí, dále ve výkonu použitého zdroje a v neposlední řadě principu funkce v rámci rozvážení jednotlivých ramen při nasazení do reálných optických tras. Jednalo se převážně o ověření známých faktů.

Velmi důležitým bodem u všech senzorických systémů je použitá laserová dioda, především její koherentní délka. Přínosem práce je využití základních a levných laserových diod, u kterých je známa jejich koherentní délka. U námi využitých diod nejdříve došlo k ověření jejich koherentní délky a zjištění faktu, že výrobci deklarují parametry diod s obrovskou rezervou. Při měření byla zkoumána široká oblast detekce vibrací a kvalita snímání jednotlivých zapojení s různými diodami. Další oblastí byla lokalizace vibrace a testování více druhů zapojení na kvalitu lokalizace. V této oblasti bylo jen velmi málo publikací, kdy je využit interferometr s levnou diodou. Důležitým a také známým faktem je využití Michelsonova interferometru do tras kde nemáme možnost mít přístupné oba konce. To dávalo jasnou volbu na tento interferometr. Protože je lepší mít vždy měřící stanoviště na jedné straně.

Po testování a rozvažování délky ramen interferometru a závislosti koherenci diod došlo také k využití Braggovy mřížky která mohla být umístění jak na referenčním rameni tak i na měřícím. Na měřícím rameni byl ověřen fakt, že mřížka funkci interferometru nijak neovlivňuje a je možné ji využít k detekci teploty. Tento fakt má jistá omezení, která nebyla doposud publikována. Při využití vláknové mřížky na referenčním rameni byl navržen a otestován nový druh zapojení, kdy je mřížka využita jako částečná náhrada Faradayova rotačního zrcadla a je možné ji využít pro teplotní přeladění laseru, a tak měřit na trasách neznámé délky za pomoci obyčejného jednoduchého analyzátoru. Tím získáváme možnost mít referenční a měřící rameno interferometru libovolně dlouhé a rozdíl si kompenzujeme přeladěním na danou vláknovou mřížku která musí být navařena vždy do minimální vzdálenosti která odpovídá koherenci laserového zdroje. V našem zapojení nevyužíváme spektrální analyzátor který by tento návrh velmi prodražil. V oblasti návrhu bylo vytvořeno a proměřeno několik druhů zapojení interferometru, ověřena kvalita detekce vibrací, otestovány různé výkony laserové diody pro měření vibrací. Otestována koherentní délka diody a její závislost na rozvážení délky ramen. A v neposlední řadě navržen nový druh zapojení Michelsonova interferometru s vláknovou mřížkou. Tento návrh byl otestován také na několika měřících trasách. A detekce předem známých vibrací fungovala s velkou rezervou.

Hlavním technickým řešením disertační práce je návrh a praktická realizace senzorického systému, který je založen na principech Michelsonova interferometru s kompenzací délky ramen pro použití se zdrojem světla s nízkou koherencí. Takový systém nebyl dosud využíván či dokumentován v literatuře. Jeho vlastnosti se jeví jako

perspektivní pro využití pro seismografická měření a detekci poruch stavebních konstrukcí.

ZÁVĚR

Optické senzorické systémy se v posledních letech velmi rychle rozvíjí, převážně díky klesání ceny optických komponent. Na počátku řešení disertační práce bylo proto třeba nastudovat řadu již známých postupů a principů, které jsou dokumentovány v první kapitole disertační práce.

Teoretické znalosti především v oblasti interferometrických metod byly rozšířeny na odborné stáži na Slovenské technické univerzitě v Bratislavě. V neposlední řadě byl vytvořen doplňkový studijní materiál pro předmět Optické sítě, který obsahuje stručný teoretický rozbor distribuovaných, bodových, ale i kvazidistribuovaných systémů.

V rámci studia optických sítí jsem byl roce 2016 autorem doplnění publikace Optické sítě pro telekomunikace a informatiku prof. Miloslava Filky o část zabývající se optickými senzory.

Po studiu teoretické problematiky bylo provedeno několik simulací senzorických systémů s rozdílnými vlastnostmi. Převážně bylo využito komerčně dostupných simulačních softwarů, Optsim v5.2, VPIphotonics a také Matlab a jeho nádstavbu Simulink.

První část simulací je vytvořena v prostředí Optsim a popisuje senzory využívající zpětně odraženého paprsku - Φ - OTDR společně v součinnosti s DWDM systémem. Tyto simulace rozebírají možnost nasazení senzorických systémů do již pracujících přenosových systémů. Výsledky simulace byly prezentovány na konferenci Student EEICT2015. Graf závislosti bitové chybovosti na výkonu senzorického systému dokazuje, že společná koexistence těchto systémů je možná při dodržení odstavu vlnových délek.

Další část simulací byla provedena v programu VPIphotonics. Simulační programy jsou převážně určeny k simulaci datových sítí a síťových aplikací, proto bylo nutné vytvořit některé prvky, které budou potřebné pro senzorické systémy. Jednalo se o generátor signálu Φ - OTDR. Tento systém využívá pulsů s přesně danou šířkou a opakovací frekvencí, z těchto znalostí vychází rozlišovací schopnost a možnost nasazení na trasy určitých délek. Výsledky funkce pulsního generátoru byly prezentovány na konferenci Student EEICT2016.

Simulace pokračovaly vytvořením modelu koexistence DWDM systému a senzorického systému v programu VPIphotonics, kde bylo využito vytvořeného pulsního generátoru. Bylo provedeno několik měření zabývajících se výkonem senzorického systému a odstupem vlnových délek. Výsledky těchto simulací byly prezentovány v odborném zahraničním časopise Journal of Communications Software and Systems, jenž je indexován v databázi Scopus [19] a několika příspěvcích na konferencích [16], [18], [20].

Z výsledku simulací a teoretickým studiem prvků potřebných pro vytvoření měřicího modelu bylo zřejmé, že senzory využívající $\Phi - OTDR$ potřebují přesně stabilizované zdroje signálu. Proto se studium dále zaměřovalo na senzory využívající interferometrické metody pracující s nekoherentními zdroji. Bylo provedeno několik simulací zabývajících se Machovým-Zehnderovým interferometrem.

Na základě výsledků simulací byl sestaven interferometrický systém využívající nekoherentní a koherentní zdroje a způsoby zpracování přijatého signálu. Pro porovnání funkce simulačních programů bylo využito prostředí Matlab Simulink a byly vytvořeny modely interferometrů, které byly poté využity pro potvrzení funkce a principů jednotlivých zapojení. Důležitými modely práce jsou tedy Michelsonův interferometr sestavený v programu VPIphotonics a Matlab. Dále Machův-Zehnderův interferometr a duální Machův-Zehnderův interferometr sestavený ve stejných simulačních prostředích.

Dalšími kroky bylo nalezení vhodných komponentů pro sestavení testovacích senzorů a ověření jejich funkčnosti v reálném prostředí. V rámci zdrojů a detektorů byly ověřeny metodiky, jak pracovat s koherentní délkou zdroje, jak pracovat s přeladěním diody v rámci teploty a další.

Bylo ověřeno několik zapojení senzorů využívajících interferometrických metod a byly porovnány jejich vlastnosti z pohledu přesnosti měření vibrace a možného využití v reálných trasách.

Při měření byl kladen důraz na tvorbu jednoduchého a levného senzoru pro měření vibrací v rozmezí jednotek až stovek Hz v optických trasách maximálních délek do 3 km. U optických tras těchto délek je možné vibrace v optické trase lokalizovat s přesností jednotek cm. Pro delší trasy je možné tento senzor rovněž použít, ale už dochází ke zhoršení přesnosti měření a lokalizace zdroje vibrací vzhledem k hraničním hodnotám využitých DFB diod a detektorů.

Pro měření dat byl využit obyčejný osciloskop s rozlišovací schopností 8 bitů a vzorkovací rychlostí až 2 GSa/s a později zařízení Analog Discovery tedy vlastně digitální osciloskop připojený k PC. Ten umožnil zaznamenat delší úsek měřených dat pro lepší vyhodnocení s větším rozlišením. Finální zpracování a vyhodnocení dat probíhalo vždy v programu Matlab.

V rámci zdokonalení sensorického systému byla ověřena možnost využití vláknových mřížek pro monitorování teploty v okolí optického vlákna a navržena metodika přeladování laserové diody pomocí teploty.

Poznatky a zkušenosti získané v rámci disertační práce jsou využívány pro řešení výzkumných a vývojových projektů MEMSIG, DOBI a DNOP a jsou dále rozvíjeny v rámci mé účasti na každodenním výzkumu střediska speciální vláknové optiky firmy NETWORK GROUP s.r.o..

Seznam literatury

- [1] UDD, Eric. a William B. SPILLMAN, 2011. *Fiber optic sensors: an introduction for engineers and scientists*. 2nd ed. Hoboken, N.J.: John Wiley, xiii, 498 p. ISBN 978-047-0126-844.
- [2] YU, Francis T a Shizhuo YIN, 2002. *Fiber optic sensors*. New York: Marcel Dekker, x, 494 p. Optical engineering (Marcel Dekker, Inc.), v. 76. ISBN 08-247-0732-X.
- [3] HAUS, Jörg. *Optical sensors: basics and applications*. Weinheim: Wiley-VCH Verlag, 2010, xii, 177 s. ISBN 978-3-527-40860-3.
- [4] KERSEY, Alan a Anthony DANDRIDGE, 1990. Applications of Fiber-optic Sensors. *IEEE TRANSACTIONS ON COMPONENTS, HYBRIDS. AND MANUFACTURING TECHNOLOGY* [online]. 13(1) [cit. 2015-02-25]. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=52861>
- [5] YANPING, Xu, 2013. *Multi-parameter sensing based on in-line Mach-Zehnder interferometer*. Ottawa, Canada. Master degree thesis. Ottawa-Carleton Institute for Physics University of Ottawa Ottawa. Vedoucí práce Prof. Xiaoyi Bao and Prof. Ping Lu.
- [6] RAJAN, Ginu, 2015. *Optical fiber sensors: advanced techniques and applications*. Boca Raton: CRC Press, Taylor, xvi, 559 pages. ISBN 978-148-2228-250.
- [7] TACKMANN, Gunnar, Peter BERG, Sven ABEND, Christian SCHUBERT, Wolfgang ERTMER a Ernst Maria RASEL, 2014. Large-area Sagnac atom interferometer with robust phase read out. *Comptes Rendus Physique*. 15(10), 884-897. ISSN 16310705. Dostupné z: doi:10.1016/j.crhy.2014.10.001.
- [8] NOVOTNÝ, Vít, Petr SYSEL, Radim ŠIFTA, Petr MÜNSTER, Tomáš HORVÁTH a Miloslav FILKA, 2014. Distributed fiber-optic sensor system based on phase-sensitive OTDR. In: *Optical Communications 2014*. Praha: Agentura Action M, s. 20 - 23. ISBN 978-80-86742-39- 7.
- [9] ŠIFTA, Radim, Petr MÜNSTER, Petr SYSEL, Tomas HORVATH, Vít NOVOTNY, Ondrej KRAJSA a Miloslav FILKA, 2015. Distributed Fiber-Optic Sensor for Detection and Localization of Acoustic Vibrations. *Metrology and Measurement Systems* [online]. 22(1), - [cit. 2015-09-21]. ISSN 2300-1941. Dostupné z: doi:10.1515/mms-2015-0009.
- [10] HANÁČEK, F., J. LÁTAL a P. KOUDELKA, 2009. Nový způsob měření pomocí vláknově optických senzorů s frekvenční změnou na výstupu. *Elektrorevue* [online]. 2009(19) [cit. 2015-02-25]. Dostupné z: <http://www.elektrorevue.cz/file.php?id=200000301-6ddca6ed6a>.
- [11] SUN, Qizhen, Deming LIU, Jian WANG a Hairong LIU, 2008. Distributed fiber-optic vibration sensor using a ring Mach-Zehnder interferometer. *Optics Communications*. 281(6), 1538-1544. ISSN 00304018. Dostupné z: doi:10.1016/j.optcom.2007.11.055.
- [12] CHEN, Qingming, Chao JIN, Yuan BAO, Zhaohui LI, Jianping LI, Chao LU, Liang YANG a Guifang LI, 2014. A distributed fiber vibration sensor utilizing dispersion induced walk-off effect in a unidirectional Mach-Zehnder interferometer. *Optics Express*. 22(3), 2167-. ISSN 1094-4087. Dostupné z: doi:10.1364/OE.22.002167.

- [13] MUANENDA, Yonas, Claudio J. OTON, Stefano FARALLI a Fabrizio DI PASQUALE, 2016. A Cost-Effective Distributed Acoustic Sensor Using a Commercial Off-the-Shelf DFB Laser and Direct Detection Phase-OTDR. *IEEE Photonics Journal*. 8(1), 1-10. ISSN 1943-0655. Dostupné z: doi:10.1109/JPHOT.2015.2508427
- [14] FILKA, Miloslav, 2017. *Optoelektronika pro telekomunikace a informatiku*. Druhé, rozšířené vydání. Brno: Prof. Ing. Miloslav Filka, Csc. a kol. ISBN isbn978-80-86785-14-1. Low Temperature Co-Fired Ceramic Systems: A6M-E High Frequency LTCC Tape System. 2015. Available at: <https://www.ferro.com/-/media/files/resources/electronic-materials/ferro-electronic-materials-a6m-e-ltcc-tape-system.pdf>
- [15] RSoft: OptSim Models Reference. 2014
- [16] ČUČKA, Milan. Influence of phase optic sensor to the DWDM network. In Proceedings of the 21st Conference STUDENT EEICT 2015. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních, 2015. s. 552-556. ISBN: 978-80-214-5148- 3.
- [17] ČUČKA, M. Úvod do optických senzorických systémů. 2015. s. 1-58..
- [18] ČUČKA, Milan, Pavol ŠALÍK, Rastislav RÓKA, Petr MÜNSTER a Miloslav FILKA, 2018. Simulation Models of Pulse Generator for OTDR in Matlab and VPIphotonics.: In The 2018 41st International Conference on Telecommunications and Signal Processing (TSP). Greece, Athens. ISBN 978-1-5386-4695-3.
- [19] ČUČKA, M.; MÜNSTER, P.; KOČÍ, L.; HORVÁTH, T.; FILKA, M.; VOJTĚCH, J. Transmission of high power sensor system and DWDM data system in one optical fiber. *Journal of Communications Software and Systems*, 2016, roč. 12, č. 4, s. 190-194. ISSN: 1845-6421.
- [20] ČUČKA, M.; ŠALÍK, P.; RÓKA, R.; MÜNSTER, P.; FILKA, M. Simulation Models of Pulse Generator for OTDR in Matlab and VPIphotonics. In *The 2018 41st International Conference on Telecommunications and Signal Processing (TSP)*. 2018. s. 179-182. ISBN: 978-1-5386-4695-3.
- [21] ČUČKA, M. Úvod do optických senzorických systémů. In *Optoelektronika pro telekomunikace a informatiku*. Brno: M. Filka, 2017. s. 401-415. ISBN: 978-80-86785-29-5.
- [22] FORESTIERI, edited by Enrico, 2005. *Optical communication theory and techniques*. Online-Ausg. New York: Springer. ISBN 978-038-7231-365..
- [23] MÜNSTER, Petr, Josef VOJTECH, Petr SYSEL, Radim SIFTA, Vit NOVOTNY, Tomas HORVATH, Stanislav SIMA a Miloslav FILKA, 2015. Φ -OTDR signal amplification. *Optical Sensors* [online]. 2015-5-5, 2015(9506), 950606-1 [cit. 2017-01-03]. Dostupné z: doi:10.1117/12.2179026.
- [24] HER, Shih-Chuan a Chih-Min YANG, 2012. Dynamic Strain Measured by Mach-Zehnder Interferometric Optical Fiber Sensors. *Sensors*. 12(12), 3314-3326. ISSN 1424-8220. Dostupné z: doi:10.3390/s120303314.
- [25] ITU-T G.694.1. Spectral grids for WDM applications: DWDM frequency grid

- [26] PHOENIX PHOTONICS LIMITED. MONOLITHIC 3X3 OPTICAL FIBER COUPLERS. 3X3_COUPLER_V1_0603., 2016. *U6 Vulcan House, Restmor Way, Wallington, SM6 7AH, UK: Phoenix Photonics Limited*, [online]. [cit. 2023-12-05].
- [27] REID, Gregory John, 1993. *A technique for multiplexing 3x3-coupler terminated interferometric fiber-optic sensors* [online]. Monterey, California [cit. 2023-12-05]. Diplomová práce. Naval Postgraduate School.
- [28] SCHMITT, G., W. WENZEL a K. DOLDE. Integrated optical 3x3-coupler on LiNbO₃: comparison between theory and experiment [online]. [cit. 2018-12-11]. Dostupné z:
- [29] PUSTAKHOD, D., X. JIANG, E.M. VAN VLIET, K.A. WILLIAMS a X.J.M. LEIJTENS. Characterization of 3x3 and 4x4 multimode interference couplers in InP generic photonic integration technology. Proceedings of the 20th Annual Symposium of the IEEE Photonics Benelux Chapter [online]. Belgie: OPERA-photonics, Brussels School of Engineering, 2015, s. 35-38 [cit. 2018-12-11]. ISBN 978-2-8052-0288-9. Dostupné z: <https://pure.tue.nl/ws/files/>
- [30] Go4fiber. SINGLEMODE COUPLER / TAP. Go4fiber. Dostupné také z: http://spec.go4fiber.com/coupler_wdm/Single_Coupler_Tap_2017v1
- [31] OPLINK. Single Window Single Mode Wideband Fiber Coupler. OPLINK. Dostupné také z: <http://www.oplink.com/uploads/files/>
- [32] THORLABS. Wideband Fiber Optic Coupler. THORLABS. Dostupné také z: <https://www.thorlabs.com/drawings/79b3b8e64c2c5190-2BC5008F-9F62-1B11-6824DF03A6B560E0/TW1550R5F2-SpecSheet.pdf>
- [33] Microlab. 3x3 Hybrid Coupler, CM-81 series. Microlab. Dostupné také z: <http://www.admiral-microwaves.co.uk/pdf/microlab/CM-81.pdf>
- [34] LIU, Xin, Baoquan JIN, Quing BAI, Yu WANG, Dong WANG a Yuncai WANG, 2016. Distributed Fiber-Optic Sensors for Vibration Detection. Sensors (Basel, Switzerland) [online]. 16(8), 1164-1195 [cit. 2017-11-18]. Dostupné z: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC5017330/>
- [35] KIZLIK, Bogdan, 2002. Fibre optic distributed sensor in Mach-Zehnder interferometer configuration. Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science [online]. 2(1), 128-130 [cit. 2017-11-18]. Dostupné z: <https://ieeexplore.ieee.org/document/1015886>
- [36] HONG, Xiaobin, Jian WU, Chao ZUO, Fangsen LIU, Hongxiang GUO a Kun XU, 2011. Dual Michelson interferometers for distributed vibration detection. Optical Society of America [online]. 50(22), 4333-4338 [cit. 2017-11-18]. Dostupné z: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/%28SICI%291098-2760%2819980220%2917%3A3%3C170%3A%3AAID-MOP6%3E3.0.CO%3B2-G>
- [37] SPAMMER, Stephanus, Pieter SWART a Anatoli CHTCHERBAKOV, 1998. Distributed dual-wavelength Sagnac impact sensor. Microwave and optical technology letters [online]. 17(3), 170-173 [cit. 2017-11-18]. Dostupné z: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/%28SICI%291098->

- [2760%2819980220%2917%3A3%3C170%3A%3AAID-MOP6%3E3.0.CO%3B2-G](https://doi.org/10.1002/9781119990105.ch34)
- [38] CHTCHERBAKOV, Anatoli, Pieter SWART, Stephanus SPAMMER a Beatrys LACQUET, 1998. Modified Sagnac/Mach-Zehnder interferometer for distributed disturbance sensing. *Microwave and optical technology letters* [online]. 20(1), 34-36 [cit. 2017-11-18]. Dostupné z: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/9781119990105.ch34> [cit. 2017-11-18]. Dostupné z: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/9781119990105.ch34>
- [39] HE, Quian, Tao ZHU, Xianghui XIAO, Baomei ZHANG, Dongmei DIAO a Xiaoyi BAO, 2013. All Fiber Distributed Vibration Sensing Using Modulated Time-Difference Pulses. *IEEE Photonics Technology Letters* [online]. 25(20), 1955-1957 [cit. 2017-11-08]. Dostupné z: <https://ieeexplore.ieee.org/document/6582659>
- [40] FANG, Gaosheng, Tuanwei XU, Shengwen FENG a Fang LI, 2015. Phase-Sensitive Optical Time Domain Reflectometer Based on Phase-Generated Carrier Algorithm. *Journal of Lightwave Technology* [online]. 33(13), 2811-2816 [cit. 2017-11-08]. Dostupné z: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7063256>
- [41] FBT vs. PLC Fiber Optic Splitters - What's The Difference? [online], 2017. 1076 Florida Central Parkway Longwood, FL 32750: Multicom [cit. 2017-12-04]. Dostupné z: <https://www.multicominc.com/training/technical-resources/fbt-vs-plc-fiber-optic-splitters-whats-the-difference/>
- [42] DORAZIN, David. *Lokalizace vibrace v okolí optického vlákna pomocí interferometrického senzoru*. Online, Diplomová práce, vedoucí Milan Čučka. Brno: Vysoké učení technické v Brně. Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Ústav telekomunikací, 2018. Dostupné z: <http://hdl.handle.net/11012/80777>. [cit. 2023-12-11].
- [43] ROZSYPAL, Filip. *Senzor na bázi optovláknového interferometru*. Online, Diplomová práce, vedoucí Milan Čučka. Brno: Vysoké učení technické v Brně. Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Ústav telekomunikací, 2019. Dostupné z: <http://hdl.handle.net/11012/177593>. [cit. 2023-12-11].

Seznam publikací autora

Hlavní autor

- 1) ČUČKA, M.; FILKA, M. *Vyhledávání optických kabelů za pomoci elektronických značek a GPS systému*. International Workshop wRTT 2014. 2014. s. 17-23. ISBN: 978-80-01-05539- 7. Podíl 99 %.
- 2) ČUČKA, M. Influence of phase optic sensor to the DWDM network. In *Proceedings of the 21st Conference STUDENT EEICT 2015*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních, 2015. s. 552-556. ISBN: 978-80-214-5148- 3. Podíl 100 %.
- 3) ČUČKA, M. *Úvod do optických senzorických systémů*. 2015. s. 1-58. Podíl 100 %.
- 4) ČUČKA, M.; MÜNSTER, P.; KOČÍ, L.; HORVÁTH, T.; FILKA, M.; VOJTĚCH, J. Transmission of high power sensor system and DWDM data system in one optical fiber. *Journal of Communications Software and Systems*, 2016, roč. 12, č. 4, s. 190-194. ISSN: 1845-6421. Podíl 62 %.
- 5) ČUČKA, M. Pulse generator for Φ - OTDR in VPIphotonics. In *Proceedings of the 22st Conference STUDENT EEICT 2016*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních, 2016. s. 591-595. ISBN: 978-80-214-5350- 0. Podíl 100 %.
- 6) ČUČKA, M. Úvod do optických senzorických systémů. In *Optoelektronika pro telekomunikace a informatiku*. Brno: M. Filka, 2017. s. 401-415. ISBN: 978-80-86785-29-5. Podíl 10 %.
- 7) ČUČKA, M.; ŠALÍK, P. Simulation and measurement of Mach-Zehnder interferometer. In *Proceedings of the 23st Conference STUDENT EEICT 2017*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních, 2017. s. 385-390. ISBN: 978-80-214-5496-5. Podíl 99 %.
- 8) ČUČKA, M.; ŠALÍK, P.; RÓKA, R.; MÜNSTER, P.; FILKA, M. Simulation Models of Pulse Generator for OTDR in Matlab and VPIphotonics. In *The 2018 41st International Conference on Telecommunications and Signal Processing (TSP)*. 2018. s. 179-182. ISBN: 978-1-5386-4695-3. Podíl 58 %.
- 9) ČUČKA, M.; HELÁN, R.; URBAN, F.; SOMER, J.; MÜNSTER, P. Návrh konektorového spoje pro inteligentní textilie. In *LA59. 1. Ústav přístrojové techniky AV ČR, v.v.i Královopolská 147, 612 64 Brno: Ústav přístrojové techniky AV ČR, v.v.i Královopolská 147, 612 64 Brno, 2019. s. 9-10. ISBN: 978-80-87441-26-8. Podíl 39 %.*

- 10) ČUČKA, M.; GREAR, D.; FROLKA, J.; VÁVRA, J.; SLAVÍČEK, K.; KYSELÁK, M. Simulation and Measurement of Optical Networks 10 and 100 Gb/s. In *New Trends in Signal Processing 2022*. 2022. Hotel Chopok, Demanovska dolina, Slovakia: NTSP, 2022. s. 1-4. ISBN: 978-80-8040-610-3. Podíl 10 %.

Další autor

- 1) SOMER, J.; URBAN, F.; ČUČKA, M.; URBAN, F.; SZENDIUCH, I. Sensors based on longitudinal fiber Bragg gratings. In *39th International Spring Seminar on Electronics Technology (ISSE). IEEE Conference proceedings*. 2016. s. 472-475. ISBN: 978-1-5090-1389-0. ISSN: 2161-2064. Podíl 10 %.
- 2) MÜNSTER, P.; VOJTĚCH, J.; HORVÁTH, T.; HAVLIŠ, O.; HANÁK, P.; ČUČKA, M.; FILKA, M. Simultaneous transmission of distributed sensors and data signals. In *39th International Conference on Telecommunications and Signal Processing*. 2016. s. 761-764. ISBN: 978-1-5090-1287-9. Podíl 7 %.
- 3) HORVÁTH, T.; FUJDIAK, R.; ČUČKA, M.; MIŠUREC, J.; DAŇKOVÁ, M. Comparison of Bit Error Rate of Line Codes in NG- PON2. *International Journal of Advances in Telecommunications, Electrotechnics, Signals and Systems*, 2016, roč. 5, č. 2, s. 95-100. ISSN: 1805-5443. Podíl 30 %.
- 4) KOČÍ, L.; MÜNSTER, P.; HORVÁTH, T.; ČUČKA, M.; FILKA, M. The influence of digital modulations on 320 Gbit/ s OTDM. *Journal of Communications Software and Systems*, 2016, roč. 11, č. 4, s. 187-191. ISSN: 1845-6421. Podíl 8 %.
- 5) KYSELÁK, M.; FILKA, M.; GREAR, D.; SLAVÍČEK, K.; VLČEK, Č.; ČUČKA, M.; VÁVRA, J. Defensive perimeter detection by polarization change of the fibre optic signal. In *SPIE Remote Sensing Technologies and Applications in Urban Environments IV. 2019*. 2019. Strasbourg, France: SPIE, 2019. s. 1-6. ISBN: 9781510630178. Podíl 10 %.
- 6) KYSELÁK, M.; PANASCI, M.; MASCHKE, J.; GREAR, D.; SLAVÍČEK, K.; DOSTÁL, O.; ČUČKA, M.; FILKA, M. Birefringence influence on polarization changes and frequency on optical fiber. In *SPIE - The International Society for Optical Engineering*. 2020. online: SPIE, 2020. s. 1-13. ISBN: 9781510638891. Podíl 10 %.
- 7) GREAR, D.; ČUČKA, M.; FILKA, M.; SLAVÍČEK, K.; VÁVRA, J.; KYSELÁK, M. Optical sensor based on birefringent fiber type PANDA used for tensile detection. In *2022 IEEE International Conference on Internet of Things and Intelligence Systems (IoT&IS)*. Indonesia: IEEE, 2022. s. 57-63. ISBN: 979-8-3503-9645-4. Podíl 20 %.

Curriculum Vitae

Osobní údaje:

Jméno a příjmení: Milan Čučka
Datum narození: 20.01.1989
Národnost: Česká
Stav: Ženatý
Adresa: Purkyňova 259/65 Vyškov 68201
Telefon: +420724163960
Email: xcucka@vutbr.cz, mcuc@seznam.cz

Vzdělání:

2014 – současnost Doktorské studium, VUT v Brně
2012 – 2014 Magisterské studium, VUT v Brně (titul Ing.)
2009 – 2012 Bakalářské studium, VUT v Brně (titul Bc.)
2005 – 2019 Gymnázium Vyškov, Komenského nám. 17, Vyškov 68201

Ocenění:

2016 Třetí místo ve studentské konferenci Student EEICT 2016.
Článek: Pulse Generator for Φ -OTDR in VPIphotonics.

Pracovní zkušenosti

2015 – dosud Vědecko-výzkumná činnost. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav telekomunikací.
2018 – dosud Vědecko-výzkumný pracovník NETWORK GROUP, s.r.o..

Člen řešitelského týmu na projektech:

[VI20152020045](#) - Detekce Ohrožení Bezpečnosti infrastruktur (DOBI)

- Bezpečnostní výzkum České republiky 2015-2022
- Vývoj senzorického systému založený na interferometrických metodách

[VI20192022140](#) - Detekce narušení obranného perimetru pomocí okamžité změny polarizace optického signálu (DNOP)

- Bezpečnostní výzkum České republiky 2015-2022
- Hlavním cílem projektu je vývoj optovláknového senzoru založeného na polarizačních vlastnostech speciálních typů optických vláken (PM vláken) a konstrukce systému detekce narušení obranného perimetru, který bude na tomto typu senzorů postaven.

[VK01030060](#) - Okamžité zpracování signálů pomocí hybridních systémů v obranné infrastruktuře (MEMSIG)

- Program OPSEC-1VS – 2023 – 2026
- Vývoj vysoce citlivého, dálkově napájeného optovláknového senzoru využitelného v prostředích s nebezpečím výbuchu (vojenské a petrochemické prostředí), který je zcela neelektrický a nemůže způsobit požár ani výbuch.