



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV TELEKOMUNIKACÍ

DEPARTMENT OF TELECOMMUNICATIONS

OPTOVLÁKNOVÉ DISTRIBUOVANÉ SYSTÉMY

FIBER OPTICS DISTRIBUTED SYSTEMS

DIZERTAČNÍ PRÁCE

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

Bibliografická citace

ČUČKA, M. *Optovláknové distribuované systémy*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav telekomunikací, 2023. 131 s. Disertační práce. Vedoucí práce: prof. Ing. Zdeněk Smékal, CSc.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svou disertační práci na téma Optovláknové distribuované systémy jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího disertační práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

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

V Brně dne

.....

(podpis autora)

Poděkování

Děkuji vedoucímu disertační práce prof. Ing. Zdenku Smékalovi, CSc. za účinnou metodickou a pedagogickou pomoc při zpracování mé disertační práce.

Chtěl bych poděkovat také kolegům Ing. Radku Helánovi, Ph.D., Ing. Jakubu Somerovi, Ph.D. za odbornou a metodickou pomoc při řešení vzniklých problémů při řešení práce.

Rád bych také poděkoval své rodině za neustálou podporu, důvěru, a především trpělivost v průběhu mého doktorského studia.

V Brně dne: 15. prosince 2023

.....

(podpis autora)

OBSAH

Seznam symbolů a zkratek	ix
Seznam obrázků	xii
Seznam tabulek	xvii
Úvod	15
1. Současný stav problematiky	17
1.1 Rozdělení optovláknových senzorů	18
1.2 Optické vláknové senzory s amplitudovou modulací	20
1.2.1 Senzory využívající změnu intenzity světla.....	21
1.2.2 Senzory pracující na principu změn okrajových podmínek.....	21
1.2.3 Senzory sledující vazby světlovodů.....	21
1.2.4 Senzory s generací záření	22
1.3 Optické vláknové senzory s fázovou modulací	22
1.3.1 Machův-Zehnderův interferometr.....	23
1.3.2 Michelsonův interferometr	25
1.3.3 Sagnacův interferometr.....	26
1.3.4 Fabry-Perotův interferometr	27
1.4 Distribuované optické vláknové senzory	27
1.4.1 Distribuovaný teplotní senzor – DTS	28
1.4.2 Stokesův posun	29
1.4.3 Distribuovaný teplotní a strukturní senzor – DTSS.....	30
1.4.4 Distribuovaný akustický senzor.....	30
1.4.5 Polarizační OTDR (POTDR).....	33
2. Cíle disertační práce	34
3. Postup řešení	35
3.1 Simulace možných řešení	37
3.1.1 Vliv fázového optického senzoru na DWDM přenos.....	37
3.1.2 Pulsní generátor pro Φ -OTDR systémy v programu VPIphotonics	39

3.1.3	Přenos vysokovýkonového senzorického systému a DWDM systému na jednom optickém vlákně	41
3.1.4	Simulace a měření Machova-Zehnderova interferometru	44
3.1.5	Simulace duálního Machova-Zehnderova interferometru	45
3.1.5.1	Aplikace Matlab	46
3.1.5.2	Simulace DMZI v prostředí Simulink	47
3.1.5.3	Teoretický výpočet polohy vibrace	50
3.1.5.4	Aplikace pro simulaci DMZI	51
3.2	Měření systémů využívající Braggovy mřížky	53
3.3	Zdroj s detektorem záření pro senzorické systémy	53
3.4	Interferometry pro lokalizaci vibrace	58
3.4.1	Duální Machův-Zehnderův interferometr (DMZI)	58
3.4.2	Kruhový Machův-Zehnderův interferometr	59
3.4.3	Duální Michelsonův interferometr (DMI)	60
3.4.4	Sagnacův interferometr pracující na dvou vlnových délkách	61
3.4.5	Sagnacův-Machův-Zehnderův interferometr	62
3.4.6	Kombinovaný Sagnacův-Michelsonův interferometr	63
3.5	Lokalizace vibrace senzory kombinující interferometrii a Φ -OTDR	64
3.5.1	Machův-Zehnderův interferometr a Φ -OTDR	64
3.5.2	Michelsonův interferometr a Φ -OTDR	65
4.	Klíčové stavební prvky interferometrů	66
4.1	Couplery 2x2	66
4.2	Coupler 3x3	68
4.2.1	Výpočty a přesnosti couplerů 3x3	69
4.2.2	Přesnost u měření couplerů 3x3	70
4.2.3	Srovnání couplerů 3x3 a 2x2	70
5.	Měření Duálního Machova-Zehnderova interferometru	71
5.1	Zpracování dat z měření - aplikace v programovacím prostředí Matlab	76
5.1.1	Popis aplikace a grafického uživatelského rozhraní	76
5.1.2	Popis jednotlivých komponent aplikace	77

5.2	Výsledky měření duálního Machova-Zehnderova interferometru.....	82
5.3	Měření vláken krátkých délek.....	83
5.3.1	Měření frekvence vibrací	83
5.4	Měření dlouhých úseků optických vláken	85
5.4.1	Lokalizace vibrace	85
5.4.2	Měření frekvence vibrací	85
5.4.3	Určení pozice zdroje vibrací	86
5.4.4	Vyhodnocení měření	87
6.	Měření Michelsonova interferometru	88
6.1	Simulace Michelsonova interferometru.....	89
6.2	Měření Michelsonova interferometru v laboratoři.....	90
6.2.1	Výsledky měření pomocí přístroje Analog Discovery	93
6.2.2	Výsledky měření pomocí osciloskopu.....	96
6.3	Lokalizace vibrace pomocí Michelsonova interferometru	99
6.3.1	Lokalizace vibrace pomocí osciloskopu	101
6.3.2	Lokalizace vibrace pomocí přístroje Analog Discovery.....	101
6.3.3	Lokalizace vibrace pomocí Machova-Zehnderova interferometru.....	104
6.3.4	Porovnávací měření pomocí duálního Machova-Zehnderova interferometru	107
6.3.5	Porovnání jednotlivých metodik měření pomocí interferometrů.....	108
7.	Kombinace Michelsonova interferometru s využitím vláknové mřížky	110
7.1.1	Měření a výpočet koherentních délek diod.....	110
7.1.2	Ověření koherentní délky diody	111
7.1.3	Testování využití vláknových mřížek v interferometru.....	112
7.1.4	Michelsonův interferometr s kompenzací délky ramen pro použití se zdrojem světla s nízkou koherencí	114
7.1.5	Ověření navrženého principu při měření vibrací v zapojení s Michelsonovým interferometrem.....	115
	Shrnutí dosažených výsledků	119

SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

α_o	Absorbance optické vrstvy
BNC	Bajonetový konektor
NRZ	Bez návratu k nule
λ_B	Braggova vlnová délka
E_T	Celkové množství dodané energie
DAS	Distribuovaný Akustický Senzor
DTSS	Distribuovaný teplotní a strukturní senzor
DTS	Distribuovaný Teplotní Senzor
DMZI	Duální Machův-Zehnderův Interferometr
DMI	Duální Michelsonův Interferometr
n_{eff}	Efektivní index lomu
p_e	Elasto-optický koeficient pro převod změny vlnové délky
LED	Elektroluminiscenční dioda
EMC	Elektromagnetická kompatibilita
E_p	Energie laserového pulsu
EDFA	Erbium dopovaný vláknový zesilovač
FPI	Fabry Perotův Interferometr
FP	Fabry-Pérotův rezonátor
FRM	Faradayovo rotační zrcadlo
Φ –OTDR	Fázové OTDR
PD	Fotodetektor
DWDM	Hustý vlnový multiplex
n	Index lomu prostředí
DFB	Laser s distribuovanou zpětnou vazbou
LD	Laserová dioda
MZI	Machův-Zehnderův Interferometr

MZM	Machův-Zehnderův Modulátor
MI	Michelsonův Interferometr
LPG	Mřížky s dlouhou periodou
OTDR	Optická časová reflektometrie
SFP	Optický datový modul - Small Form-factor Pluggable
SOFO	Optický vláknový senzor monitorující deformaci stavebních konstrukcí
LVDS	Pár na single-ended
PIR	Pasivní infračervené čidlo
p_{ij}	Pockelovi tenzory opto-mechanického působení
N_{FBG}	Počet FBG mřížek na jednom fyzickém kanálu
n_{puls}	Počet pulsů na jednotku délky
POTDR	Polarizační OTDR
ω	Poloměr vidového pole
R	Poměr odraženého optického výkonu
BER	Poměr počtu chybně přijatých bitů k celkovému počtu přijatých bitů, určuje kvalitu telekomunikačního kanálu.
T	Poměr průchozího optického výkonu
F_{th}	Prahová hustota energie pulzu
A	Prostorová perioda vláknové mřížky
R_a	Průměrná drsnost povrchu
z_R	Rayleighova délka
FFT	Rychlá Fourierova Transformace
DC	Stejnoseměrný proud
$\delta\nu$	Šířka pásma optického spektra
FWHM	Šířka spektra při poklesu o 3 dB
θ	Úhlová odchylka optických vláken
GND	Uzemnění
FBG	Vláknová mřížka
λ	Vlnová délka zdroje optického záření

k	Vlnové číslo
FSR	Volný spektrální rozsah
$\Delta\nu$	Volný spektrální rozsah
S	Vzdálenost konců optických vláken
L_R	Vzdálenost mezi zrcadly – délka rezonátoru
WDM	Wavelength Division Multiplex
V	Ztrátový faktor

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1.1 Vliv ceny optických komponent na vývoji optických senzorů [1]	17
Obr. 1.2: Princip bodového senzoru	19
Obr. 1.3: Princip distribuovaného senzoru	19
Obr. 1.4: Princip polo-rozprostřeného senzoru.....	19
Obr. 1.5: Blokové zapojení Machova-Zehnderova interferometru.....	24
Obr. 1.6: Blokové zapojení Michelsonova interferometru	26
Obr. 1.7: Blokové zapojení Sagnacova interferometru.....	26
Obr. 1.8: a) Schéma vnějšího Fabry-Perotova interferometru, b) Schéma vnitřního Fabry-Perotova interferometru.....	27
Obr. 1.9: Princip distribuovaného senzoru	28
Obr. 1.10: Schéma senzoru teploty na principu Ramanovského OTDR.	28
Obr. 1.11: DTS (Stokesův posun) – Ramanovské OTDR.....	29
Obr. 1.12: Rozptyly v optickém vlákne.....	30
Obr. 1.13: Schéma distribuovaného akustického senzoru	31
Obr. 1.14: Schéma měřicího systému	32
Obr. 1.15: Schéma zapojení POTDR.....	33
Obr. 3.1: Schéma simulace Senzoru a DWDM systému v programu Optsim.....	37
Obr. 3.2: Závislost výkonu sensorického systému na chybovosti přenosového systému	38
Obr. 3.3: Schéma simulace pulsního generátoru signálu.....	40
Obr. 3.4: Zobrazení pulsu o frekvenci 10 kHz a délce trvání 250 ns v programu VPIphotonics.	41
Obr. 3.5: Blokový diagram simulačního modelu v programu VPIphotonics	42
Obr. 3.6: Vysílací část DWDM systému v programu VPIphotonics.....	42
Obr. 3.7: Přijímací část DWDM systému v programu VPIphotonics	42
Obr. 3.8: Simulační model sensorického a přenosového systému ve VPIphotonics.....	43
Obr. 3.9: Graf závislosti výkonu sensorického systému na chybovosti DWDM systému, který je zatížen chybou	44
Obr. 3.10: Simulace Machova-Zehnderova interferometru v programu VPIphotonics	45

Obr. 3.11 Výstup simulace DMZI	48
Obr. 3.12 Simulační model DMZI	49
Obr. 3.13: Aplikační software DMZI	51
Obr. 3.14: Část určena fotodetektoru v softwaru DMZI	52
Obr. 3.15: Část, kde je proveden výpočet simulace DMZI	53
Obr. 3.16: SFP modul Linktel.....	54
Obr. 3.17: Schéma vysílací části. Horní je vysílací část pro externí vysílač a spodní část obsahuje interní vysílač desky.	55
Obr. 3.18: Schéma přijímací části.	56
Obr. 3.19: Modrý průběh: Generovaný testovací signál $f = 500$ kHz, Červený průběh: Přijatý signál modulem, Oranžový signál: Přijatý signál fotodetektorem ThorLabs APD130C.....	56
Obr. 3.20: Funkční vzorek zdroje s detektorem.....	57
Obr. 3.21: Schéma vlivu vibrací na testované vlákno.....	58
Obr. 3.22: Duální Machův-Zehnderův interferometr.....	58
Obr. 3.23: Kruhový Machův-Zehnderův interferometr	60
Obr. 3.24: Duální Michelsonův interferometr.	61
Obr. 3.25: Sagnacův interferometr pro lokalizaci vibrace pracující na dvou vlnových délkách	62
Obr. 3.26 Kombinovaný Sagnacův-Machův-Zehnderův interferometr.....	63
Obr. 3.27: Schéma kombinovaného Sagnacova-Michelsonova interferometru	63
Obr. 3.28: Zapojení kombinovaného senzoru MZI s ϕ -OTDR [1]	64
Obr. 3.29: Zapojení nebalancovaného Michelsonova interferometru.....	65
Obr. 4.1: Coupler 1x3 ze dvou coulerů 2x2.....	68
Obr. 4.2: Jádra coupler 3x3.....	69
Obr. 5.1: Blokové schéma zapojení DMZI.....	71
Obr. 5.2: Řídící jednotka laserové diody	72
Obr. 5.3: Optický izolátor	73
Obr. 5.4: Coupler.....	73
Obr. 5.5: Fotodetektor PT-5330.....	74
Obr. 5.6: Digitální USB osciloskop Analog Discovery 2.....	75

Obr. 5.7: Grafické rozhraní programu Waveforms.	75
Obr. 5.8: Aplikační software sloužící ke zpracování dat z DMZI	77
Obr. 5.9: Načtení souboru a výpis jména souboru.	77
Obr. 5.10: Vykreslení výstupních signálů	78
Obr. 5.11: Vykreslení nefiltrovaných signálů na obou fotodetektorech.....	78
Obr. 5.12: Filtrace výstupních signálů.....	78
Obr. 5.13: Vykreslení filtrovaných signálů na obou fotodetektorech.	79
Obr. 5.14: Určení frekvence signálu	79
Obr. 5.15: Vyhodnocení frekvence výstupního signálu.	80
Obr. 5.16: Výpočet pozice zdroje vibrací	80
Obr. 5.17: Výpočet pozice zdroje vibrací.	81
Obr. 5.18: Výpočet časového rozdílu	81
Obr. 5.19: Výpočet coupleru.....	82
Obr. 5.20: Výpočet pozice vibrace	82
Obr. 5.21: Vlevo signál 100 Hz působící na jedno rameno, vpravo signál působící na obě ramena.....	83
Obr. 5.22: Vlevo signál 200 Hz působící na jedno rameno, vpravo signál působící na obě ramena.....	84
Obr. 5.23: Měření vlevo 100 Hz a 200 Hz vpravo na vláknu 5 m	84
Obr. 5.24: Výstup aplikace pro 100 Hz a 3km vlákna.	86
Obr. 5.25: Výstup aplikace 300 Hz a 6 km vlákna.	87
Obr. 6.1: Zapojení Michelsonova interferometru s couplerem 3x3	88
Obr. 6.2: Blokový model simulace v programu Matlab.....	89
Obr. 6.3: Výstup na osciloskopu z programu Matlab.....	90
Obr. 6.4: Výstup na osciloskopu z programu Matlab.....	90
Obr. 6.5: Blokové schéma zapojení Michelsonova interferometru	91
Obr. 6.6: Výstupní graf/signál zobrazený Analog Discovery - výstup cirkulátoru..	92
Obr. 6.7: Výstupní graf/signál zobrazený Analog Discovery - výstup ramen	92
Obr. 6.8: Výstupní graf/signál zobrazený osciloskopem	92
Obr. 6.9: Výstupní graf pro ramena interferometru při 1 Hz a proudu 15 mA pomocí AD	

.....	93
Obr. 6.10: FFT graf výstupu cirkulátoru při 1 Hz a proudu 15 mA pomocí AD.....	93
Obr. 6.11: Graf ramen interferometru při 100 Hz a proudu 15 mA pomocí AD.....	93
Obr. 6.12: FFT graf výstupu cirkulátoru při 100 Hz a proudu 15 mA pomocí AD.....	93
Obr. 6.13: Graf ramen interferometru při 1000 Hz a proudu 15 mA pomocí AD.....	94
Obr. 6.14: FFT graf výstupu cirkulátoru při 1000 Hz a proudu 15 mA pomocí AD.....	94
Obr. 6.15: FFT graf výstupu ramen při 10 Hz a proudu 25 mA pomocí AD	94
Obr. 6.16: FFT graf výstupu cirkulátoru při 10 Hz a proudu 25 mA pomocí AD.....	94
Obr. 6.17: FFT graf výstupu ramen při 1000 Hz a proudu 25 mA pomocí AD	94
Obr. 6.18: FFT graf výstupu cirkulátoru při 1000 Hz a proudu 25 mA pomocí AD.....	95
Obr. 6.19: FFT graf výstupu ramen při 10 Hz a proudu 25 mA pomocí AD a coupleru 2x2	95
Obr. 6.20: FFT graf výstupu ramen při 1000 Hz a proudu 25 mA pomocí AD a coupleru 2x2	95
Obr. 6.21: GUI v Matlabu pro frekvenci 10 Hz a vstupní proud diody 15 mA.....	96
Obr. 6.22: Výstupní GUI v Matlabu pro frekvenci 100 Hz a vstupní proud diody 15 mA	97
Obr. 6.23: Výstupní GUI v Matlabu pro frekvenci 1000 Hz a vstupní proud diody 15 mA	97
Obr. 6.24: Výstupní GUI v Matlabu pro frekvenci 10 Hz a vstupní proud diody 25 mA	97
Obr. 6.25: Výstupní GUI v Matlabu pro frekvenci 100 Hz a proud diody 25 mA.....	98
Obr. 6.26: Výstupní GUI v Matlabu pro frekvenci 1000 Hz a proud diody 25 mA.....	98
Obr. 6.27: Zaznamenaný průběh měření pro rázy do vlákna s frekvencí 10 Hz.	99
Obr. 6.28: Metodiky hledání vibrace v záznamu dat z osciloskopu či Analog Discovery.	100
Obr. 6.29: Záznam měření z osciloskopu	101
Obr. 6.30: Výstup z Analog Discovery při zapojení MI na vzdálenost 2 m.....	102
Obr. 6.31: Výstup z Analog Discovery při zapojení MI na vzdálenost 106 m.....	102
Obr. 6.32: Výstup z Analog Discovery při zapojení MI na vzdálenost 3 km.....	103
Obr. 6.33: Blokové schéma zapojení Machova-Zehnderova interferometru v laboratoři	104

Obr. 6.34: Ukázka zapojení Machova-Zehnderova interferometru v laboratoři	105
Obr. 6.35: Výstup z AD a zapojení MZI s rameny délky 2 m	105
Obr. 6.36: Výstup z AD a zapojení trasy 3 km	106
Obr. 6.37: Výstup z AD a zapojení trasy 106 m	106
Obr. 6.38: Zapojení duálního Machova-Zehnderova interferometru	107
Obr. 7.1: Ukázka pracovního prostředí softwaru vlnoměru	110
Obr. 7.2: Blokové schéma zapojení testovacího měření	112
Obr. 7.3: Možná variace měření se spektrálním analyzátozem	113
Obr. 7.4: Blokové schéma zapojení pro kompenzaci délek ramen	114
Obr. 7.5: Zapojení Michelsonova interferometru v laboratoři	116
Obr. 7.6: Detekovaný signál na osciloskopu	117
Obr. 7.7: Spektrum naladěné vláknové mřížky na analyzátozem	118

SEZNAM TABULEK

Tab. 3.1: Tabulka teoretických výpočtů polohy vibrace na vlákne 50	50
Tab. 3.2: Technický list použitého SFP modulu Linktel elektrické parametry 54	54
Tab. 3.3: Technický list použitého SFP modulu Linktel optické parametry 54	54
Tab. 4.1: Tabulka parametrů couplerů Go4fiber. [7]..... 67	67
Tab. 4.2: Tabulka parametrů couplerů ThorLabs [7]..... 67	67
Tab. 4.3: Tabulka přesností 2x2 couplerů..... 68	68
Tab. 4.4: Tabulka přesností coupleru 3x3 od společnosti Phoenix Photonics..... 70	70
Tab. 5.1: Výkonová charakteristika použitého laseru. 83	83
Tab. 6.1: Tabulka nastavované frekvence na generátoru a výstup interferometru. 96	96
Tab. 6.2 Tabulka pro porovnání změřených a generovaných frekvencí..... 98	98
Tab. 6.3: Přehledová tabulka výpočet umístění vibrace 104	104
Tab. 6.4: Přehledová tabulka jednotlivých měření s výpočty 107	107
Tab. 6.5: Tabulka výsledků měření s DMZI:..... 108	108
Tab. 7.1: Tabulka teoretických výpočtů koherentní délky 111	111
Tab. 7.2: Tabulka parametrů využitých vláknových mřížek 112	112
Tab. 7.3: Tabulka s parametry vláknových mřížek: 116	116

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.

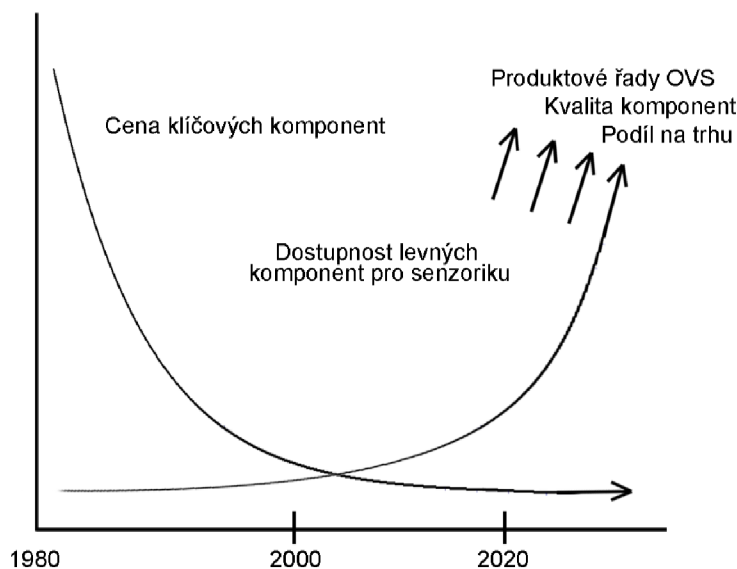
Další oblastí senzorických systémů mohou být bodové senzory využívající Braggových mřížek. Tyto senzory nachází široké uplatnění při sledování mechanických dějů a při snímání teploty. Jedná se o vepsanou periodickou mikrostrukturu pomocí ultrafialového laseru přes fázovou masku do optického vlákna.

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. SOUČASNÝ STAV PROBLEMATIKY

Vývoj optovláknových senzorů nastal díky dvěma významným vědeckým objevům z konce 60. let. Nástup senzorů byl velice rychlý a očekávalo se, že bude jejich vývoj pokračovat, ale bohužel se tak nestalo. Postupem času zájem o senzory opadl, ale k opětovné renesanci senzorů dochází v posledních letech. Za nezáměrem o senzory mohla v tehdejší době finanční stránka věci, kdy se jednalo o velice konzervativní přístup uživatelů měřicí techniky a zejména také to, že je vývoj senzorů podmíněn výrobou a technologickým rozvojem vláknové optické technologie. V dnešní době se dá říci, že optovláknové senzory dokáží změřit většinu fyzikálních veličin. Použití optovláknových senzorů je v mnoha aplikacích nenahraditelné, jedná se například o hydrofony či optovláknové gyroskopy. Výsledky měření s těmito senzory jsou nesrovnatelné oproti konvenčním technologiím bez optiky. Postupem času se očekává nástup biologických senzorů. Následující obrázek popisuje finanční náročnost klíčových komponent pro stavbu senzorických systémů a postup klesání ceny viz. obrázek Obr. 1.1 [1].



Obr. 1.1 Vliv ceny optických komponent na vývoji optických senzorů [1]

Optické vláknové senzory jsou využity v mnoha oblastech. Jedná se především o sledování teploty v místech, kde není možné využít konvenční způsoby. Vinutí transformátorů, elektrická vedení vysokého napětí a místa, kde je využito dielektrických vlastností optického vlákna. Další hojně využívané optické vláknové senzory jsou senzory mechanických vibrací. Ty je možné využít v dopravě, při sledování provozu, nebo ve stavebnictví k monitorování kvality materiálu. Například se může jednat o sledování stavů dálničních mostů, či přehrad. Dalším odvětvím může být ochrana perimetru s možností lokalizace narušitele [1].

Výhody:

- velmi malé rozměry,
- nízká hmotnost,
- pasivní provedení
- vysoká citlivost,
- linearita,
- široké spektrum využití,
- odolnost vůči elektromagnetickému rušení,
- možnost snímání až 200 km.

Nevýhody:

- vyšší cena u určitých aplikací oproti konvenčním snímačům,
- složitější zpracování signálu.

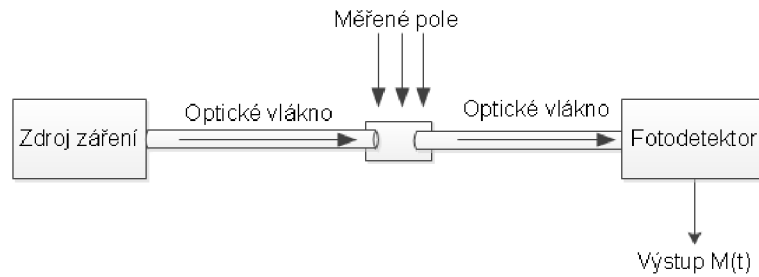
1.1 Rozdělení optovláknových senzorů

Při rozdělování optických senzorů je možné využít mnoho kategorizací, ty nejzákladnější jsou tyto [1]:

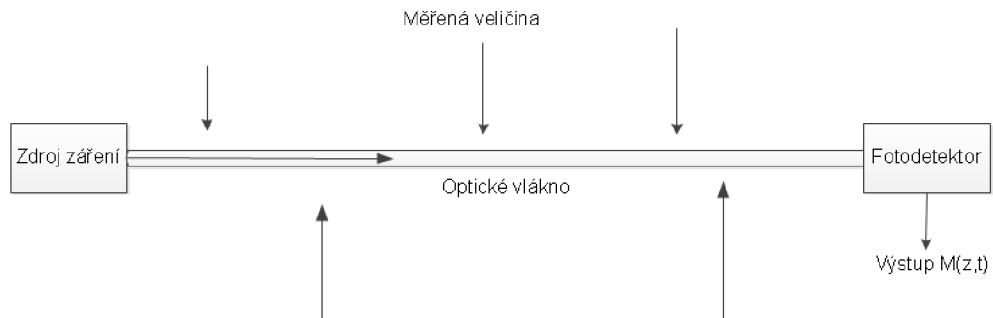
- první kategorie jsou senzory, které využívají optické vlákno k přenosu informace – to znamená, že zjištěná veličina je přenášena po vlákne do jednotky, která informaci vyhodnotí – senzory extrinsické,
- druhá kategorie jsou senzory, kde je optické vlákno využito jako senzor – získaná informace může být přenášena po jiném médiu, ať už po metalickém vedení, či bezdrátovým spojem – senzory intrinsické,
- senzory smíšené – jedná se například o čidla polohy kde je vytvořena vazba mezi dvěma vlákny. Dále se může jednat o biochemický senzor, kdy je využita k detekci rezonanční excitace povrchových plazmonů.

Z hlediska prostorového uspořádání je možné optické vláknové senzory dělit na: [1].

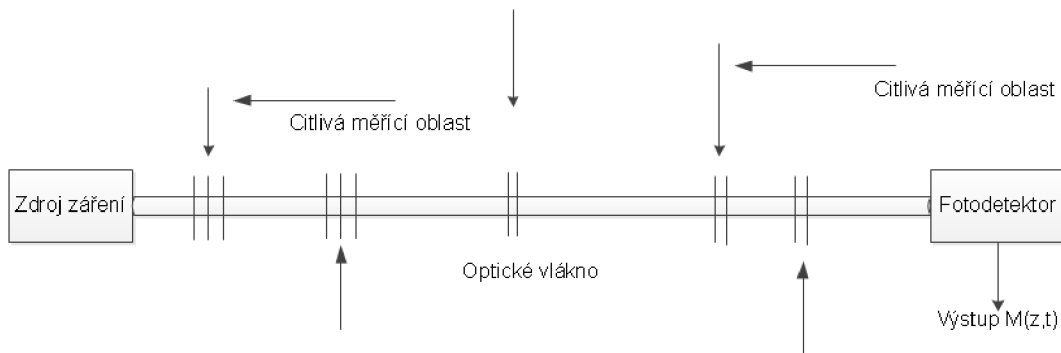
- bodové senzory viz. obrázek Obr. 1.2,
- rozprostřené senzory (distribuované systémy) obrázek Obr. 1.3,
- polo-rozprostřené senzory (kvazi-distribuované), obrázek Obr. 1.4.



Obr. 1.2: Princip bodového senzoru



Obr. 1.3: Princip distribuovaného senzoru



Obr. 1.4: Princip polo-rozprostřeného senzoru

Optické vláknové senzory je také možné rozdělit podle toho, jak snímaná veličina mění stav v optickém vlákně prostřednictvím:

- indexu lomu optického vlákna,
- absorpce,
- emise případně fluorescence.

Dle způsobu modulace optického signálu je možné tyto snímače dělit následovně:

- amplitudové,
- fázové,
- polarizační,

- s modulací vlnové délky,
- s modulací časového rozšíření impulsu.

Další možností rozdělení optických senzorů je dle technologie, která je využita. Jedná se o princip činnosti a aplikace senzoru [2] :

- mechanické napětí, - FBG,
- deformace - FBG, SOFO (optický vláknový senzor monitorující deformaci stavebních konstrukcí),
- teplota - FBG, PIR detector, distribuovaný senzor teploty,
- tlak - FBG, optický mikrofon,
- vlhkost,
- viskozita,
- posuv - FBG, vláknový gyroskop,
- vibrace - FBG, vláknový gyroskop, optický mikrofon,
- elektrické pole,
- elektromagnetické pole,
- zvuk - DAS, Optický mikrofon,
- rotace,
- zrychlení.

Dále se může jednat o použité technologie v senzorech:

- FBG senzory,
- Rayleighovo OTDR,
- Ramanovo OTDR,
- Brillouinovo OTDR,
- interferometrické senzory,
- další principy.

1.2 Optické vláknové senzory s amplitudovou modulací

Tato skupina sensorických systémů využívá pro detekci snímaných veličin změnu indexu lomu případně změnu koeficientu útlumu optického vlákna. Tyto změny, které nastávají, využívají vlastní optické vláknové snímače. Detekci změn je možné měřit mikrodeformace vlákna, tím pádem také rozptyl vidů. Nevlastní snímače využívají vzájemný pohyb konců vláken. Dále je možné využít mechanického modulátoru, který způsobuje změnu odrazivosti, či proměnnou emisivitou [2].

1.2.1 Senzory využívající změnu intenzity světla

Při přerušení optického vlákna a změnách vazby dochází ke změně intenzity světelného signálu. Této změny lze dosáhnout přeměnou vlastností homogenního materiálu vlákna a také vzájemným pohybem konců optického vlákna nebo přidáním clony případně optických mřížek. Těchto konstrukcí využívají přenosové i odrazové senzory. Pro měření je nejvíce využito konstrukce s jedním vysílacím a dvěma přijímacími vlákny. Vlákna se upraví tak, že se šikmě zbrousí, tím se využije nejen vzájemného pohybu, ale i úplného odrazu na rozhraní, vstupu do vlákna z venkovního prostředí. Nevýhoda těchto senzorů nastává ve výrobě. Je důležitá vysoká přesnost mechanických prvků, a to uchycení vlákna vstupního a výstupního v tělese senzoru. Modulace světla nastává při pohybu dvou absorpčních mřížek [1], [2].

1.2.2 Senzory pracující na principu změn okrajových podmínek

Jedná se o senzory, které využívají porušení okrajových podmínek šíření paprsku v optickém vlákne vlivem snímané veličiny. Tato skupina senzorů patří do řady intenzitních optovláknových senzorů. Tento druh senzorů využívá porušení podmínky úplného vnitřního odrazu. Příkladem může být úplný vnitřní odraz od rozhraní mezi jádrem a pláštěm optického vlákna. Tuto podmínku můžeme porušit změnou zakřivení optického vlákna nebo změnou poměru indexu lomu. Pokud je vlákno ohnuto pod kritický poloměr dojde k průniku světla do pláště optického vlákna. Nebo se světlo může vyvázat ven z vlákna a tím pádem se snižuje intenzita světelného paprsku, který putuje jádrem vlákna. Další možností je zvýšení intenzity, kdy světlo proniká z okolního prostředí do vlákna.

Velkou výhodou je citlivost a dynamický rozsah tohoto senzoru. Další výhodou je kompaktní provedení a není nutné optické vlákno přerušit. Senzor využívá elastooptické vlastnosti optického vlákna a vstupní signál je modulován v závislosti na působící síle. Další možností využití tohoto senzoru je například měření tlaku [1], [2], [3].

1.2.3 Senzory sledující vazby světlovodů

Při porušení synchronizace módů se moduluje světlo v těchto senzorech. Modulaci světla je také možné upravit pomocí přenosu části energie do sousedního vlákna, tohoto přenosu je možné docílit pomocí kontaktu s anizotropním materiálem. Změnu modulace u porušení synchronizace vyvolají změny vlastností elektrooptického materiálu, ze kterého je vyrobeno optické vlákno, nebo podložka. Konstrukce toho senzoru je složena ze dvou vláken, mezi kterými nastává tunelový jev. Jedná se o úsek několika centimetrů, kde jsou jádra obou vláken spojena. Přiblížení těchto jader musí být v řádech mikrometrů. Měří se intenzita světla, které projde ze vstupu na výstup vlákna. Této konstrukce lze dosáhnout pomocí jednovídných i mnohavidových vláken. Výhodou tohoto typu senzoru je vysoká

citlivost. Nevýhodou jsou vysoké požadavky na konstrukci a optimalizaci tohoto řešení, kdy je nutné mechanické prvky vyrobit s mikrometrovou přesností [1], [2], [3].

1.2.4 Senzory s generací záření

Jedná se o skupinu optovláknových senzorů, které pro svou činnost využívají záření, které je indukované v optickém materiálu při působení radiačních a tepelných vlivů. Tyto senzory jsou primárně využity k měření teploty. Vznik je umožněn díky ohřevu určitého úseku optického vlákna, případně vhodným materiálem, který je umístěn na konci vlákna. Výhodou těchto senzorů je, že nepotřebují zdroj světelného paprsku a teplotu určujeme nezávisle na místě ohřivaného bodu. Při zvyšování teploty rychle narůstá výkon.

Standardní optické vlákno lze využít pro teploty od 135 °C do 300 °C. Teploty nižší až do 100 K jsou měřeny pomocí optických vláken, která jsou vyrobena z fluoridových a chalkogenních skel. Materiál má tu vlastnost, že je schopen docílit dostatečně malého útlumu i v oblasti 3 μm až 10 μm což je infračervená oblast [1], [3].

1.3 Optické vláknové senzory s fázovou modulací

Jedná se o optickou metodu, která sleduje rozdíly mezi dvěma optickými svazky, které prošly stejné dráhy. Technika interferometrie je schopna měřit tři veličiny optického paprsku podél jeho dráhy [2]:

- změnu délky trasy,
- změnu vlnové délky,
- změnu rychlosti šíření.

Změna některé z těchto veličin se projeví změnou fáze vlny, která je podle rovnice závislá na délce dráhy L , indexu lomu n a na vlnové délce λ [2]:

$$\Phi = 2\pi L \frac{n}{\lambda} \quad 1.1$$

Nejcitlivější optické vláknové senzory jsou založené právě na principu fázové modulace světelné vlny, šířící se optickým vláknem. Změny fáze světelných vln se měří interferometrickými metodami a je možné měřit změny fáze řádově o 10^{-8} (–). Vlnová délka světla v optickém vlákně je kolem 1 μm. Takto je možné měřit extrémně malé změny dráhy světla signálu v optickém vlákně. Pro fázi monochromatické světelné vlny, která se šíří optickým vláknem s délkou L platí vztah [2]:

$$\Phi = nkL + \Phi_0, \quad 1.2$$

kde n je index lomu jádra optického vlákna, k je vlnové číslo a Φ_0 je počáteční fáze.

Snímaná fyzikální veličina x způsobí změnu fáze světelné vlny prostřednictvím změny

indexu lomu, délky a průřezu optického vlákna. V důsledku toho, že vliv změny průřezu optického vlákna na fázovou modulaci je pro většinu případů zanedbatelný můžeme změnu fáze světelné vlny šířící se optickým vláknem, vyvolanou změnou snímané fyzikální veličiny Δx všeobecně zapsat takto [2]:

$$\Delta\Phi = n\left(k\frac{dL}{dx} + kL\frac{dn}{dx}\right)\Delta x. \quad 1.3$$

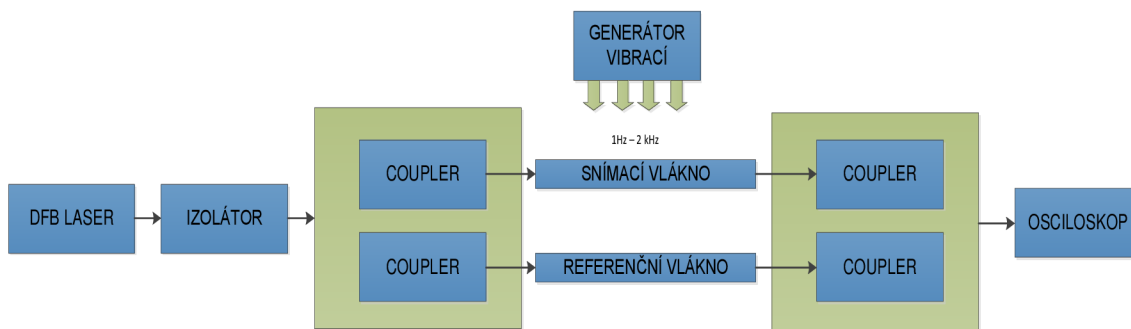
Předpokládáme, že se charakter profilu indexu lomu optického vlákna při změně snímané veličiny nezmění.

Základem konstrukce senzorů, které pracují se změnami fáze, jsou optické vláknové interferometry. Ty dělíme do tří základních skupin [4]:

- Machův-Zehnderův a Michelsonův jednomódový dvouramenný interferometr – tyto interferometry využívají porovnání fáze světelné vlny. Vlna se přenáší pomocí optického vlákna. Využívá se homodynních nebo heterodynních způsobů detekce vlny.
- Sagnacův interferometr – jednovláknový interferometr s oboustrannou optickou vazbou, kdy se porovnávají fáze dvou optických vln, které jdou proti sobě v optickém vlákně.
- Mezimódový interferometr – využívá interferenci dvou případně více vidů optické vlny která prochází optickým vláknem. Tento způsob detekce může využívat i vícevidová vlákna. Nevýhodou je vyhodnocování interferenčních obrazů.

1.3.1 Machův-Zehnderův interferometr

Tento typ interferometru využívá dvě ramena z optických vláken. Zdrojem optického záření je laser. Fotodetektor interferometru zaznamenává signál, vznikající interferencí dvou optických paprsků, které vycházejí z referenčního a sensorového ramene. Z principu funkce je nutné, aby referenční rameno bylo izolováno od okolních vlivů a aby nedocházelo k rušení. Modulování fáze signálu vzniká v sensorovém optickém vlákně díky působení snímané veličiny na délku, případně na průřez či index lomu jádra, optického vlákna. Sensorické optické vlákno je spojeno s citlivou částí senzoru, a proto v něm vzniká fázová modulace světla. Blokové schéma zapojení Machova-Zehnderova interferometru je na obrázku Obr. 1.5.



Obr. 1.5: Blokové zapojení Machova-Zehnderova interferometru

V případě, kdy snímaná veličina zachovává válcovou symetrii vlákna, tenzor deformace v jádře vlákna e_{ij} má jen 3 nenulové složky, a to e_{11} , e_{22} , e_{33} . To znamená že platí $e_{22} = e_{33}$. Deformace jádra způsobí díky fotoelastickému jevu změnu indexu lomu a ten můžeme popsat jako [5]:

$$\Delta\left[\frac{1}{n^2}\right]_{ij} = p_{ijkl}e_{ij} \quad 1.4$$

kde p_{ijkl} jsou takzvané Pokelsovy koeficienty, tedy složky fotoelastického tenzoru 4 řádu, dále potom $\left[\frac{1}{n^2}n\right]_{ij}$ jsou konstanty elipsoidu indexů lomu.

Fotoelastický tenzor má jen 2 nezávislé složky, ty jsou označovány jako p_{11} a p_{12} . Dále potom e_{33} vyjadřuje relativní prodloužení optického vlákna, a proto můžeme vypočítat i relativní změnu indexu lomu pro transversálně polarizované vidy [5]:

$$\Delta\Phi = knL e_{33} \frac{n^2}{2} \{(p_{11} + p_{12})e_{11} + p_{12}e_{33}\} \quad 1.5$$

Citlivost optického vlákna na působení určitého tlaku vyjadřujeme podle vztahu [4]:

$$\frac{\Delta\Phi}{L \Delta p} = \frac{k_0 n}{Y} (1 - 2\sigma) \left[1 - \frac{n^2(p_{11} - 2p_{12})}{2}\right], \quad 1.6$$

kde Y vyjadřuje Youngův modul pružnosti, 2σ vyjadřuje Poissonův koeficient, p_{IJ} vyjadřuje materiálové koeficienty optického vlákna.

Citlivost optického vlákna na působení určité teploty vyjadřujeme podle vztahu [5]:

$$\frac{\Delta\Phi}{L \Delta p} = k_0 n \alpha_\tau + k_0 \left(\frac{\partial n}{\partial T}\right)_P, \quad 1.7$$

kde α_τ je lineárním teplotním koeficientem roztažnosti materiálu, ze kterého je vyrobeno optické vlákno.

Nevýhody fázových optických senzorů s dvouramenným jednovidovým interferometrem:

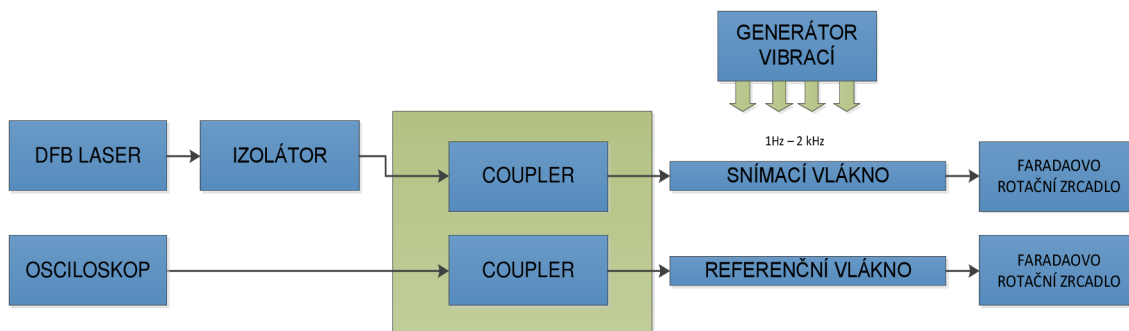
- složitost optické konstrukce,
- jen pro jednovidová optická vlákna,
- odstranění interference různých fyzikálních veličin (tlaku, teploty, magnetického pole),
- složitost zpracování přijatého signálu.

Konvenční optické vlákno G.652 je možné využít pro senzorické snímání teploty, tlaku, případně akustických signálů bez zásadnějších úprav. Zvýšení senzorické citlivosti optického vlákna lze dosáhnout pomocí pokrytí povrchu vlákna například silikonovým kaučukem. Naopak snížení citlivosti lze dosáhnout pokrytím kovem například niklem. Ten se využívá ke stínění referenčního vlákna u dvouramenných interferometrů. Pro snímání akustických vibrací se využívá gumový válec, kolem kterého je optické vlákno namotané. Principem je radiální deformace válce, na kterém je namotáno senzorické vlákno. Vlákno je navinuté na pružný gumový válec, který je umístěn mezi pevnou podložkou a pohyblivým závažím. Stabilizace interferometru probíhá pomocí fázového piezoelektrického modulátoru [4], [5].

1.3.2 Michelsonův interferometr

Tento interferometr byl sestaven v roce 1881. Postupem času jeho zdokonalená verze dokázala odrazit vícenásobné paprsky. Na tomto principu byl postaven Michelson-Morleyho pokus v roce 1887. Tím měla být dokázána existence světelného éteru. Bohužel bylo dosaženo negativních výsledků. Proč nedocházelo k posunu interferenčních proužků, bylo dokázáno až o pět let později v kontrakční hypotéze. Dnes je princip této interferometrické metody využit i u optovláknových senzorů.

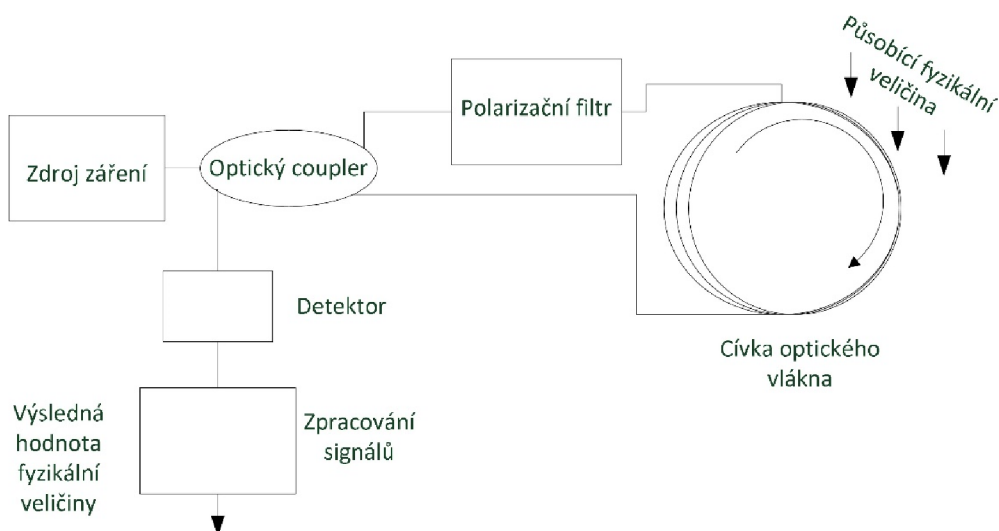
Princip funkce je také velmi podobný MZI. Dochází k interferenci dvou paprsků, které prochází dvěma rameny interferometru, na konci každého ramene je světlo odražené zpět. Michelsonův interferometr tedy navíc obsahuje reflexní plochy. Je možné také využít mřížek s dlouhou periodou a provést konfiguraci pouze s jedním ramenem. Michelsonův vláknový interferometr není schopen měřit absolutní hodnoty jako teplotu nebo vzdálenost, ale je velmi přesný při měření malých změn těchto veličin. Na obrázku Obr. 1.6 je zobrazeno blokové schéma zapojení Michelsonova interferometru [1], [2], [3].



Obr. 1.6: Blokové zapojení Michelsonova interferometru

1.3.3 Sagnacův interferometr

Sagnacův interferometr využívá Sagnacova jevu, k tomu dochází, pokud se dvě vlny v rozdílných polarizačních stavech šíří proti sobě v optickém vlákne. Paprsek je ze zdroje záření navázán do vlákna a pomocí optického coupleru je signál rozdělen, po průchodu měřeným úsekem je opět spojen zpět a detekován fotodetektorem. Následně je tento signál vyhodnocen. Ke zlepšení snímání vlastností jsou využívána speciálně upravená vlákna se závislostí polarizace, kde je vyčleněna snímací část vlákna. Signál vystupující z interferometru je řízen interferencí mezi paprsky polarizovanými na základě pomalejší a rychlejší osy otáčení [1], [7].



Obr. 1.7: Blokové zapojení Sagnacova interferometru

Změna fáze na základě interference je dána [7]:

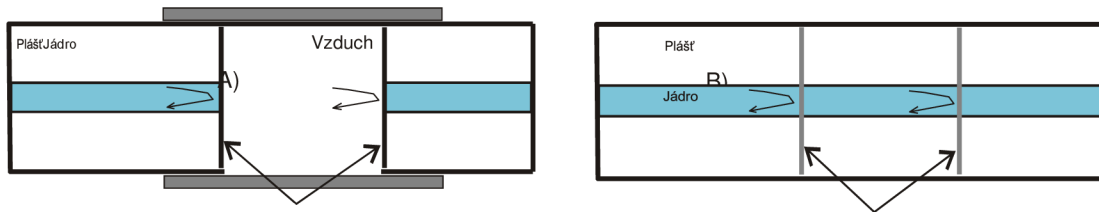
$$\delta_{SI} = \frac{2\pi}{\lambda}, BL = |n_r - n_s|, \quad 1.8$$

kde B - koeficient dvojlomu (závislost polarizace) snímaného vlákna, L - délka vlákna, n_r, n_s indexy lomu rychlejšího a pomalejšího lomu.

Optický senzor postavený na základech Sagnacova interferometru se dnes výhradně používá k měření úhlové rychlosti a polohy. Výzkum v oblasti těchto interferometrů se zabývá odstraněním šumů, případně teplotní stabilitou těchto zařízení tak, aby bylo docíleno co nejefektivnějších systémů.

1.3.4 Fabry-Perotův interferometr

Fabry-Perotův interferometr se skládá ze dvou paralelních odrazových ploch oddělených od sebe určitou vzdáleností. Interference nastává při vícenásobné superpozici odraženého a přeneseného paprsku mezi paralelními odrazovými plochami. Na vstup tohoto interferometru dopadá paprsek, který po průchodu první odrazovou plochou dopadá na druhou, tam se část paprsku odrazí a část prochází dál. Odražený paprsek putuje zpět na první odrazovou plochu, kde se opět část odrazila a část projde zpět do interferometru. Tento jev se opakuje a výsledkem je mnohonásobná interference způsobená mnohonásobnými odrazy mezi těmito plochami. Obecně se FPI senzory dělí na vnější a vnitřní.



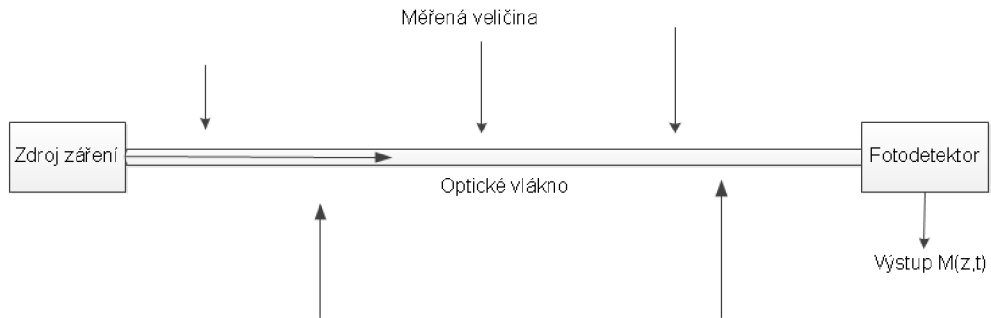
Obr. 1.8: a) Schéma vnějšího Fabry-Perotova interferometru, b) Schéma vnitřního Fabry-Perotova interferometru

Na obrázku Obr. 1.8a je zobrazen vnější senzor s FPI, kde je vlákno přerušeno a dutina vlákna je zastoupena vzduchem. Na obrázku Obr. 1.8b) je vnitřní senzor s FPI, kde je dutina tvořena vzduchovou mezerou, ve které je umístěna například Braggova vláknová mřížka. Při působení např. mechanického napětí dojde k prodloužení dutiny a tím k rozdílu délky optické trasy nebo indexu lomu dutin.

1.4 Distribuované optické vláknové senzory

Distribuované optické vláknové senzory prochází v posledních letech širokým vývojem, díky jejich výhodám ve srovnání s konvenčními elektrickými senzory. Distribuované systémy je možné rozdělit na intrinsické a kvazi-distribuované senzory. Intrinsické distribuované systémy se uplatňují tam, kde je měřeno spojitě podél optického vlákna. Jedná se například o monitorování vibrací budov, teploty, případně pohybu osob. U všech těchto aplikací se jedná o real-time (okamžitě neboli v reálném čase). Kvazi-distribuované senzory se využívají pro sledování více dějů díky využití například

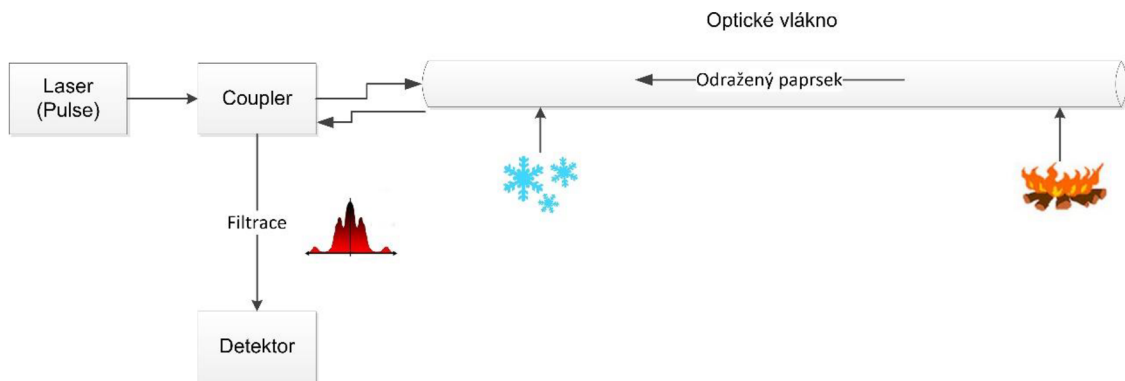
časového, frekvenčního, či vlnového multiplexu. Jedná se o sledování v diskretních úsecích vlákna [1], [2], [3].



Obr. 1.9: Princip distribuovaného senzoru

1.4.1 Distribuovaný teplotní senzor – DTS

Distribuovaný senzor neboli také Ramanovské OTDR patří k takzvaným rozprostřeným senzorům. Jedná se o přední typ v senzorech k měření teploty. Je znám pod zkratkou DTS. Už z názvu vyplývá, že tento senzor využívá optické vlákno pro snímání teploty. Díky jednomu měření je možné získat několik tisíc hodnot teploty a tím pádem určit teplotu podél optického vlákna. Zdrojem paprsku, který je vyslán do vlákna, je laser. Tento paprsek je odražen zpět díky lineárním a nelineárním jevům, které nastávají v optickém vlákne. Dále je tento paprsek přijat akviziční jednotkou a vyhodnocen. Ukázka distribuovaného teplotního senzoru je na obrázku Obr. 1.10.

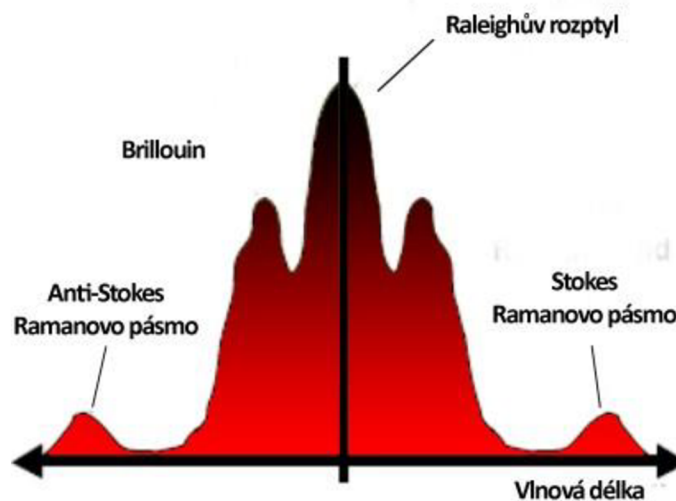


Obr. 1.10: Schéma senzoru teploty na principu Ramanovského OTDR.

Vyhodnocuje se signál, který je převážně v bočních pásmech. Vlnová délka budícího signálu, kterou se do optického vlákna svítí, nemá na vyhodnocení vliv. Pásma na jiných frekvencích jsou takzvaně Ramanova pásma a signál je srovnán pomocí takzvaných Stokesových a Anti-Stokesových složek, která dávají informaci o teplotě. Dále tuto problematiku reflektuje diagram spekter jednotlivých rozptylů na obrázku Obr. 1.11 [1], [10].

1.4.2 Stokesův posun

Jedná se o rozdíl maxim absorpce a emise spektra stejného energetického přechodu. Tento rozdíl je uváděn v hodnotách vlnové délky případně frekvence. Při absorpci fotonů je zvýšena energie, kdy celý systém vstupuje do excitovaného stavu. Protikladný stav je uvolnění vnitřní energie systému, kdy dochází k emisi fotonu a systém ztrácí energii. Pokud je energie emitovaného fotonu menší, než energie absorbujícího fotonu tak je tento rozdíl energií nazýván Stokesův posun. Při stavu, kdy má emitovaný foton více energie než absorbovaný foton se tento stav nazývá anti-Stokesův posun [1], [3].



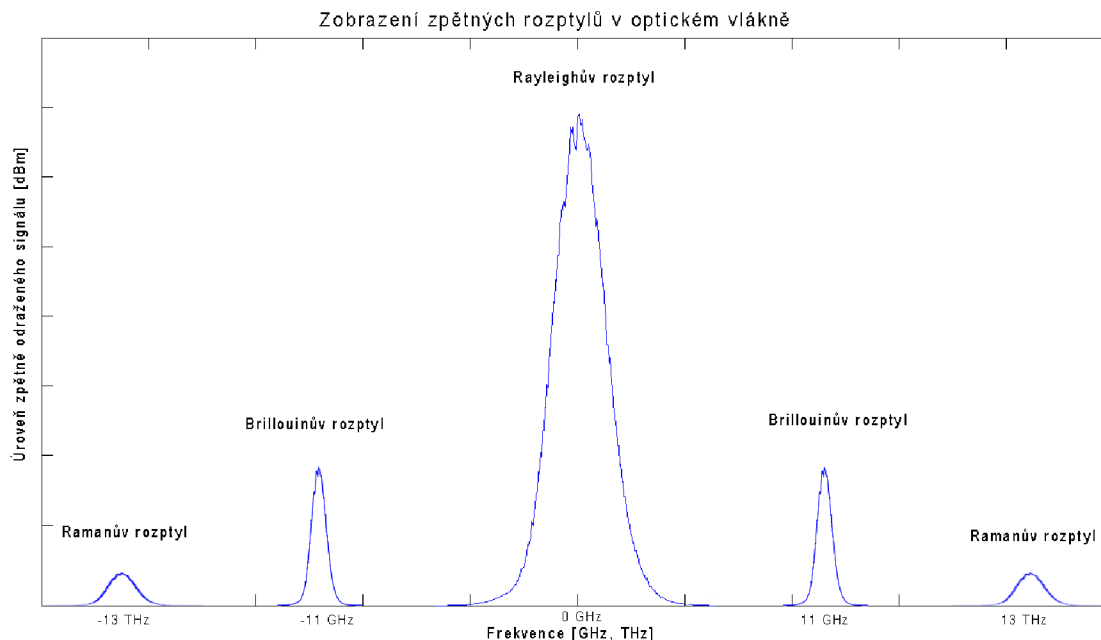
Obr. 1.11: DTS (Stokesův posun) – Ramanovské OTDR

Princip funkce senzorů využívajících zpětně odraženého paprsku je vysvětlen také na obrázku Obr. 1.12. Na vlnové délce 1550 nm má Brillouinův rozptyl o 15 dB slabší přijatý signál, než Rayleighův rozptyl. Je také posunut přibližně o 11 GHz. Ramanovy rozptyly jsou více než o řád menší a jsou posunuty od Rayleighova rozptylu o 13 THz. Na základě těchto vlastností je možné využít zpětně odražené paprsky pro detekci fyzikálních či jiných dějů. Nevýhodou této metody je, že odražený signál je řádově slabší než vyslaný, což je ilustrováno na obrázku Obr. 1.12 [1], [3].

Technologie, kterou využívají distribuované senzory teploty, je využita v lineárních požárních systémech převážně v tunelech případně v metru. Dále je možné nalézt její uplatnění v geotechnice a monitoringu kabelů VVN (velmi vysokého napětí). Dále v monitoringu produktovodů a na skládkách uhlí. Senzor DTS je nastaven podle aplikace, kdy se přesně nastavuje rychlost reakce, případně přesnost podle toho, o jakou vzdálenost od senzoru se jedná. Měření na těchto senzorech je ovlivněno několika důležitými faktory [1], [3], [6] :

- celkovou délkou měřeného úseku,
- prostorovým a teplotním rozlišením a přesností měření,

- časem potřebným pro měření, kdy se naměřené hodnoty průměrují.



Obr. 1.12: Rozptyly v optickém vlákně

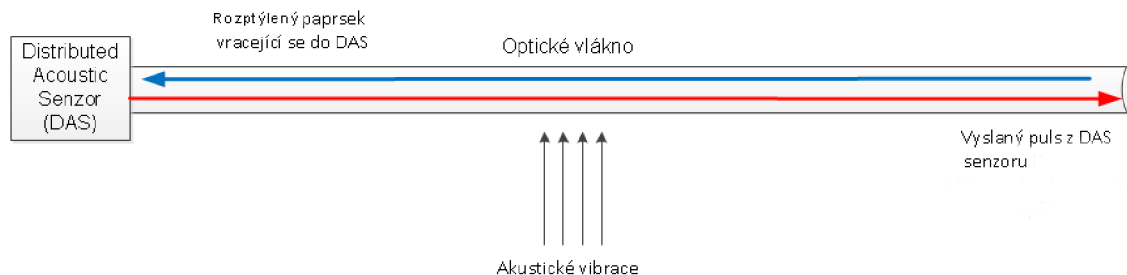
1.4.3 Distribuovaný teplotní a strukturní senzor – DTSS

Distribuovaný teplotní a strukturní senzor – DTSS - Brillouinova OTDR jsou podobné systémům DTS. Jsou schopny kromě teploty snímat i mechanické stavy, či namáhání vlákn. Jedná se především o rozprostřené senzorké systémy. K vyhodnocení jevů, které nastávají v okolí vlákna, se využívají boční pásma, které jsou blíže k nosné vlnové délce signálu. Jedná se o Brillouinova pásma. U těchto systémů je sledován integrální vliv teploty a namáhání. Pokud je požadavek na snímání jen jedné z veličin, je nutné využít optický kabel s jedním vláknem zafixovaným ke měřené struktuře a přenášet do něj deformace ze struktury. To znamená jedno pevné vlákno a jedno volné. Tyto systémy jsou využity především v geotechnice, případně ve stavebnictví, kdy délka vlákna je několik set metrů a rozlišení těchto systémů je kolem 1 m. Tuto technologii není možné použít se standardními optickými kabely. Vlákno musí sloužit k přenosu mechanického namáhání. To znamená, že nesmí obsahovat speciální tahové prvky a upravenou konstrukci proti těmto jevům. Tím pádem je konstrukce kabelů pro DTSS velice speciální. U těchto kabelů je nevýhodou vysoký útlum vlákna, kterým jsou limitovány dispozice kabelu při instalaci [1], [3], [10].

1.4.4 Distribuovaný akustický senzor

DAS je zkratkou distribuovaného akustického senzoru neboli Rayleighova OTDR. Tento distribuovaný optický senzor dokáže detekovat akustické vibrace podél optického vlákna

na vzdálenost až 40 km s prostorovým rozlišením až 1 m, případně s jiným nastavením až 200 km s přesností 50 m. DAS využívá funkce Rayleighova rozptylu. Jedná se o stejnou složku rozptýleného světla, které využívá OTDR, ale způsob vyhodnocení se liší. Každý zvuk či vibrace vytváří různou akustickou energii, ta je absorbována molekulami v jádře optického vlákna a tato změna způsobuje posuv fáze ve zpětně rozptýleném světle. Tyto změny jsou detekovány a zpracovány vyhodnocovací jednotkou [1], [8], [9].



Obr. 1.13: Schéma distribuovaného akustického senzoru

Využití těchto druhů senzorů je především v ochraně vedení produktovodů nebo ochraně perimetru. Jedná se o střežení budov, hranic států či důležité infrastruktury. Dále je možné využít tyto senzory v oblasti železniční dopravy, kdy je sledován pohyb vlakových souprav. Pro detekci se u těchto distribuovaných senzorů využívají jednovidová optická vlákna. Finanční úsporou je využití již stávajících vláken [13].

Tento druh senzorů využívá interference zpětně odražených vln z optického vlákna. Vlny spolu interferují na podobném principu jako u Fabry-Perrotova interferometru. Kdy v čase t_0 světelná vlna $NH1_{M3}$ je odražená od náběžné hrany optického pulzu v tom místě, které reprezentuje odrazivá plocha $M3$. Dále v čase $t_0 = T_{pvg}/4$ tato vlna přejde vzdálenost stejnou jako je polovina šířky pulzu. Další světelná vlna $DH2_{M2}$ se odrazí od sestupné hrany pulzu (jedná se o odrazivou plochu $M2$). Tyto dvě světelné vlny spolu interferují [1], [8]:

Podobně jako u FP interferometru platí [1] :

$$R_{FP} = \frac{P_r}{P_i} = 2R(1 + \cos\varphi), \quad 1.9$$

kde P_r je odražený optický výkon, P_i je propuštěný optický výkon a odrazivost ploch $R = R_1 \ll 1$. Fázový posun je možné zapsat jako:

$$\varphi = \frac{4\pi n}{\gamma} L, \quad 1.10$$

kde n je indexem lomu vlákna a L je délka optického vlákna.

Z výše uvedeného plyne, že při vložení optického vlákna do země, která bude na vlákno tlačit z povrchu například chůzí člověka, je možné sledovat změnu indexu lomu, a tím pádem změnu průchodu fáze světelné vlny. Interference se mění v čase a odpovídá určité pozici ve vlákne, kde došlo ke změně. Rozlišení systému je možné vypočítat jako [1]:

$$\tau = \frac{2L}{vg^2}, \quad 1.11$$

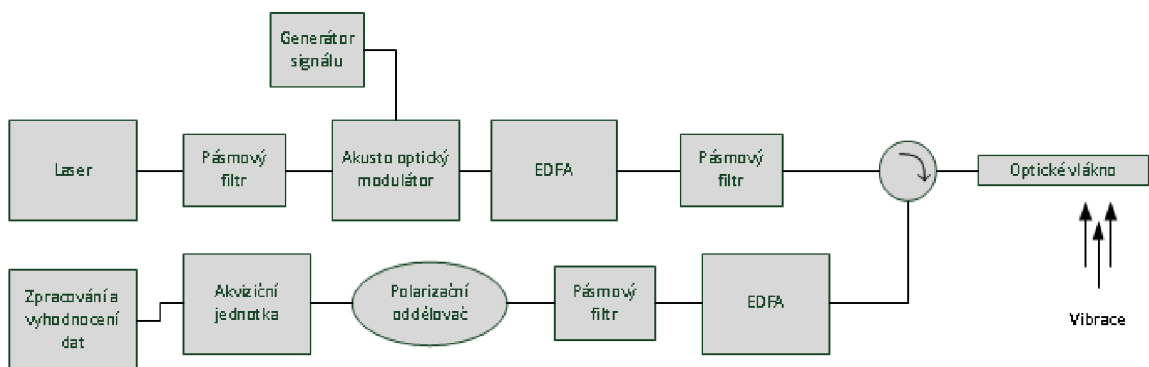
kde L je vzdálenost do bodu odrazu, vg je skupinová rychlost šíření světla ve vlákne.

Vlivy působící na citlivost optického vlákna:

- hloubka uložení optického kabelu,
- materiál, ve kterém je optický kabel uložen,
- klimatické podmínky a skladba půdy či materiálu, ve kterém je optický kabel uložen,
- nejdůležitějším vlivem je typ optického kabelu, z důvodu různé disperze, útlumu,
- použití chrániček, či dalších ochranných prvků při uložení.

Laser pro senzorický systém

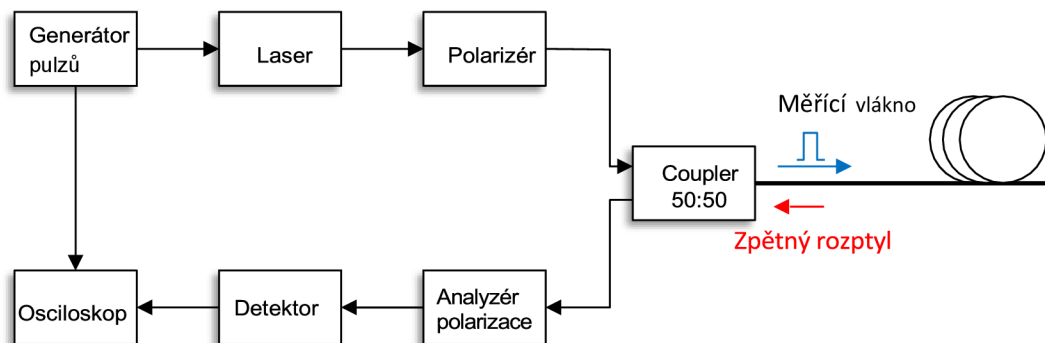
Potřeby fázového OTDR jsou velmi vysoké z hlediska laserového zdroje. Fázové OTDR vyžaduje specifické požadavky na použitý laser, aby bylo možné docílit principu plovoucího interferometru. Takový laser musí mít extrémně úzkou šířku spektrální čáry v řádu maximálně jednotek kHz, dále je vyžadována vysoká míra koherence a kmitočtové stability. Laser musí být také uložen v prostředí s konstantní teplotou a minimálním vlivem akustických vibrací, aby dosáhl minimálního frekvenčního posunu [8], [9].



Obr. 1.14: Schéma měřicího systému

1.4.5 Polarizační OTDR (POTDR)

První návrh POTDR vznikl roku 1981. Tato metoda je založena na měření stavu polarizace Rayleighova zpětného rozptylu v optickém vlákně. Základní zapojení POTDR je zobrazeno na obrázku Obr. 1.15. POTDR může být sestaveno přidáním několika komponent na kontrolu polarizace do klasického OTDR. Polarizér slouží ke generování lineárně polarizovaného světla, které je následně vysláno doměřeného vlákna. Stav polarizace světla procházející optickým vláknem může být ovlivněn mnoha vlivy jako například tlakem, teplotou, elektrickým polem atd.



Obr. 1.15: Schéma zapojení POTDR

Princip POTDR spočívá v tom, že jsou vysílány pulzy do optického vlákna, a ty kontinuálně vyvolávají Rayleighovo rozptýlení tak, jak postupují vláknem. Konvenční OTDR využívá intenzity světla zpětně rozptýleného signálu jako nositele informace, která určuje útlum podél celé délky vlákna. Zpětný rozptyl v optickém vlákně také nese informaci o polarizaci světla, která může být podobně využita k distribuovanému snímání fyzikálních veličin podél optického vlákna a na této vlastnosti je založeno POTDR. Polarizační vlastnosti světla ve vlákně se potom mění v závislosti na externích vlivech podél měřené trasy a tyto změny polarizace světla se snímají a dále vyhodnocují [1].

2. 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.

3. 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 3.1, laboratorní měření v kapitole 3.2, 3.4 a měření v reálných podmínkách pak v kapitolách 5 - 7.

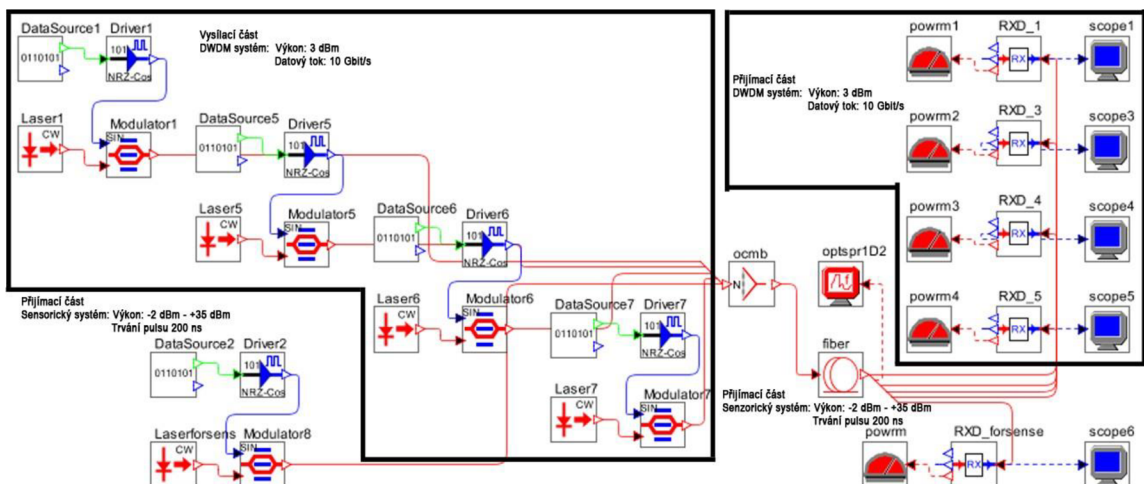
3.1 Simulace možných řešení

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

3.1.1 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. 3.1.



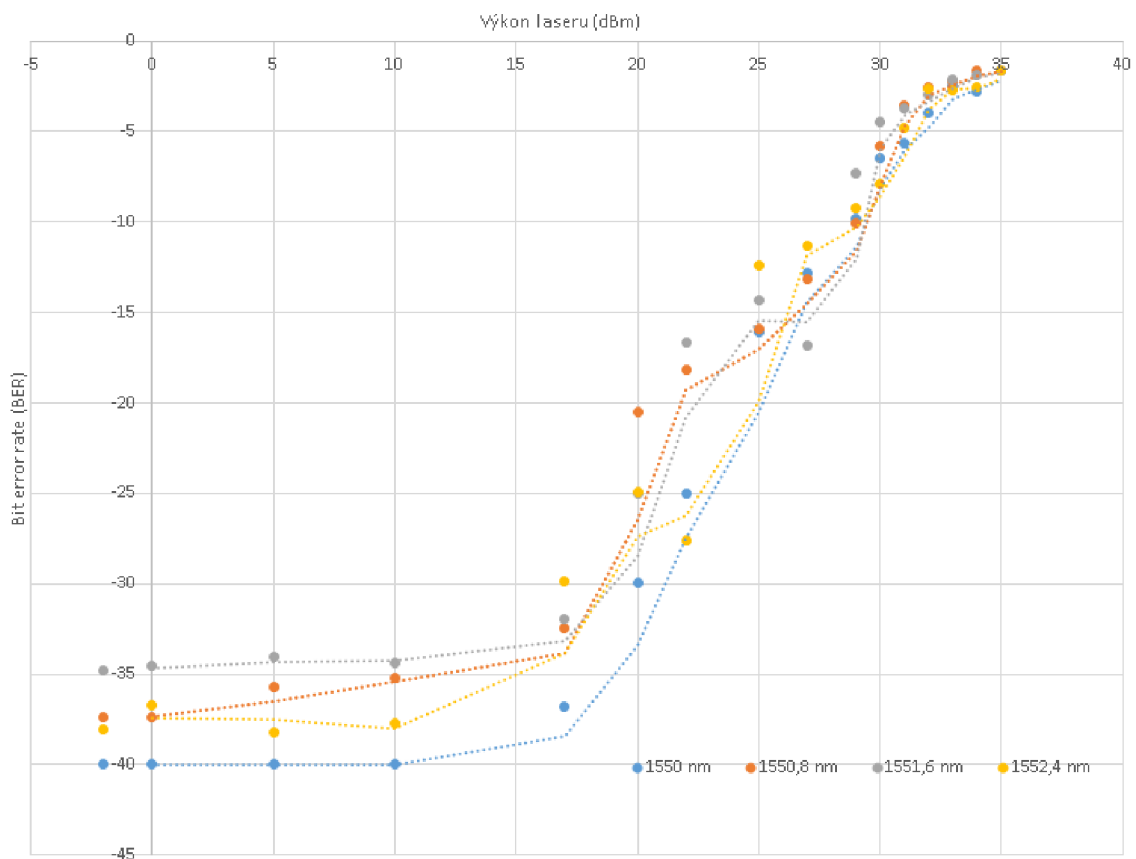
Obr. 3.1: Schéma simulace Senzoru a DWDM systému v programu Optisim

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. 3.2.

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. 3.2: Závislost výkonu sensorického systému na chybovosti přenosového systému

3.1.2 Pulsní generátor pro Φ -OTDR systémy v programu VPIphotonics

Tvorba pulsního generátoru pro senzorické systémy využívající Φ – OTDR byla podmíněna nedostatkem v programu Optsim a VPIphotonics. Tyto simulační programy jsou převážně pro tvorbu datových sítí, mají jen částečnou podporu pro senzorické aplikace. Výhodou těchto programů jsou již některé přednastavené části, které jsou společné pro senzorické a datové systémy. Jedná se například o optická vlákna, která zahrnují simulace nelineárních a lineárních jevů a dalších. VPIphotonics obsahuje i přednastavené lasery a detektory signálu. Generátor pulsního signálu dovoluje vytvořit puls s rozdílným časem trvání, opakovací frekvencí a výkonem. Při popisu simulace pulsního generátoru je také rozebrána problematika zpětně odraženého pulsu při využití Φ – OTDR systémů [20]. Vztah pro výpočet délky trvání zpětně odraženého průběhu a jeho opakovací frekvenci je závislý na délce optického vlákna a vychází z [9]:

$$\tau = \frac{2 \cdot s}{v} = \frac{2 \cdot 100 \cdot 10^3}{2 \cdot 10^8} = 1 \cdot 10^{-3}(\text{s}) \quad 3.1$$

Opakovací frekvenci je možné vypočítat:

$$f = \frac{1}{\tau} = \frac{1}{1 \cdot 10^{-3}} = 1(\text{kHz}) \quad 3.2$$

Dále je možné z těchto vztahů vypočítat rozlišení signálu, například pro signál, který je využit také v simulaci 2 μs :

$$\Delta Z = \frac{\vartheta \cdot T_p}{2} = \frac{2 \cdot 10^8 \cdot 2 \cdot 10^{-6}}{2} = 200 \text{ m.} \quad 3.3$$

Optické pulsy, které jsou navázány do vlákna, musí odpovídat délce optického vlákna a šířka pulsu požadovanému rozlišení. Při průchodu pulsu optickým vláknem je část signálu odražena díky Rayleighovu nebo Brillouinovu rozptylu. Odražený paprsek je poté zpracován a klasifikován, jedná se o nejpoužívanější techniku při práci se senzory využívajícími zpětně rozptýlený signál. Zpětně odražený výkon lze určit ze vztahu: [23]

$$P_R(t) = \frac{P_i \cdot S_{\gamma R} \cdot W_0 \cdot \vartheta_g \cdot \exp^{-\gamma \cdot \vartheta_g \cdot t}}{2} = P_R(0) \cdot \exp^{-\gamma \cdot \vartheta_g \cdot t}, \quad 3.4$$

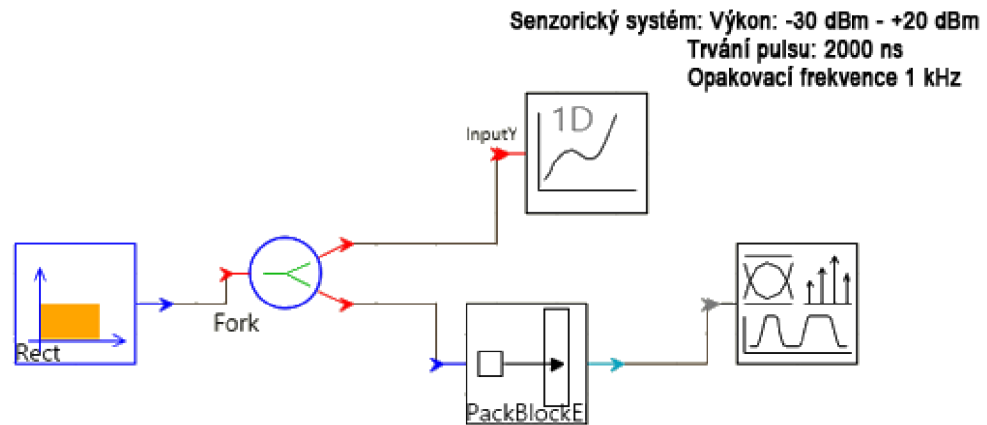
Kde γ je koeficient útlumu a odpovídá 1/20 zpětně odraženého Rayleighova rozptylu, který je udáván v dB, P_i je vstupní výkon, γR je Rayleighův koeficient, S je podílem zachyceného optického výkonu, který je definován pro optická vlákna jako:

$$S = \frac{NA^2}{4n^2}, \quad 3.5$$

kde NA je numerická apertura a n je index lomu optického vlákna.

Puls v našem simulačním modelu má vstupní výkon 150 mW a délku trvání 2 μs . Pokud použijeme vztah $P_R(0)$, jak je popsáno v [23], tak vidíme, že je odražený výkon o 52 dB slabší než vstupní výkon.

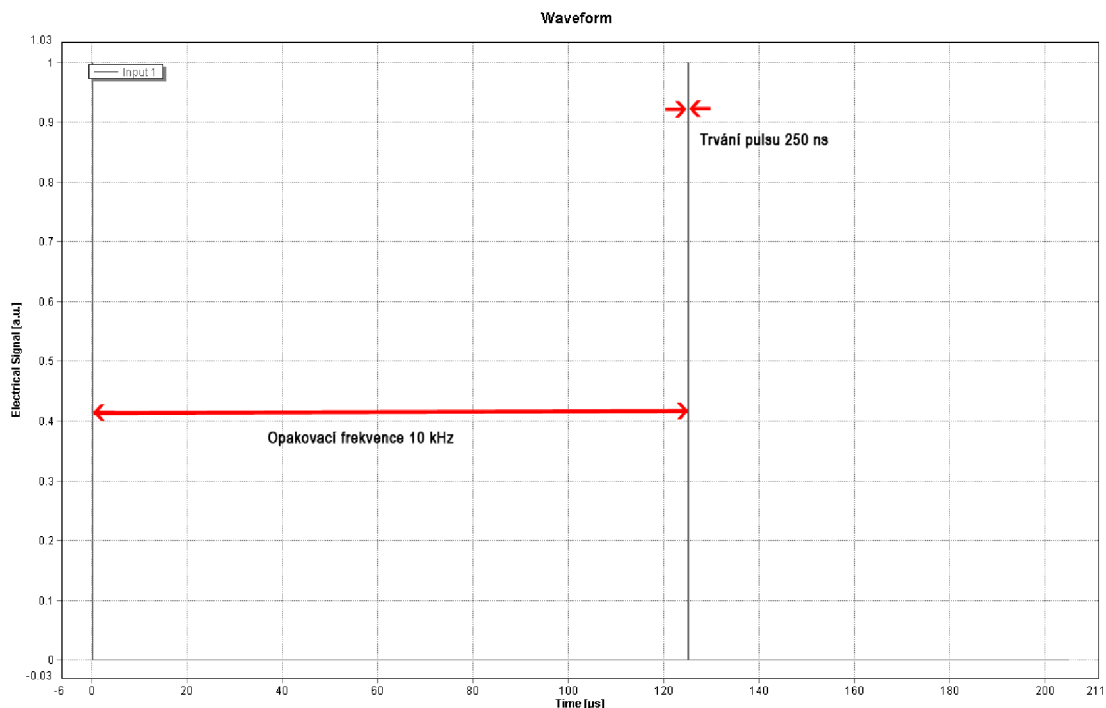
Simulace pulsního generátoru v programu VPIphotonics obsahuje pro ukázkou několik vytvořených pulsů. Tyto pulsy mají rozdílnou opakovací frekvenci a čas trvání. Pulsní generátor je tvořen blokem Rect, který generuje puls o daných parametrech. Blok PckBlockE určuje opakovací frekvenci generátoru. Signal analyzer slouží k zobrazení výsledného signálu. Ostatní bloky jsou třeba ke správné funkci simulačního programu a není nutné porozumět jejich funkci [18]. Simulační schéma je zobrazeno na obrázku Obr. 3.3.



Obr. 3.3: Schéma simulace pulsního generátoru signálu

Výsledky simulace

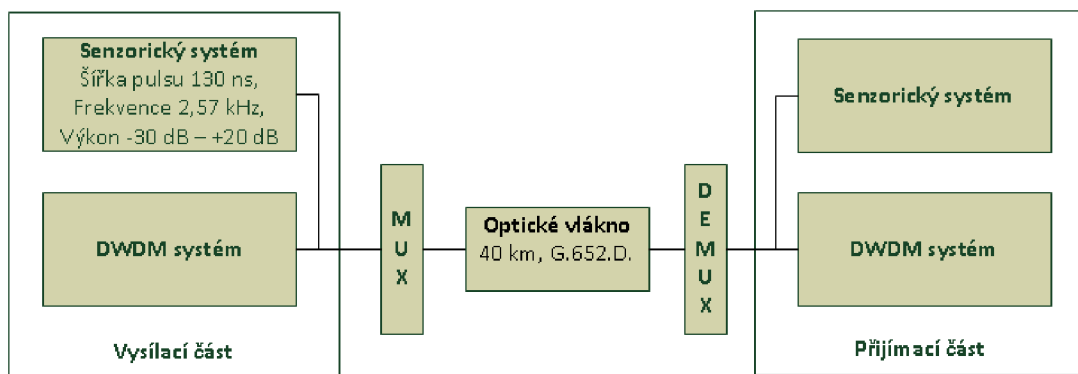
Výsledkem simulace je několik pulsů pro různě dlouhé optické trasy. První puls má délku trvání 250 ns a opakovací frekvenci 10 kHz. Z těchto vlastností plyne, že jeho rozlišení je 25 m a je možné jej využít na trase dlouhé 12,4 km. Ukázka výsledků simulace je na obrázku Obr. 3.4. Vzhledem k omezené možnosti využití pulsního generátoru v prostředí VPIphotonics je na základě těchto výsledků a teoretických vztahů vytvořen obdobný pulsní generátor v programu Matlab [18]. Tento generátor obsahuje rozhraní, které umožní zadání konkrétní délky vlákna a požadovaného rozlišení. V rámci interního výpočtu vybere optimální puls.



Obr. 3.4: Zobrazení pulsu o frekvenci 10 kHz a délce trvání 250 ns v programu VPIphotonics.

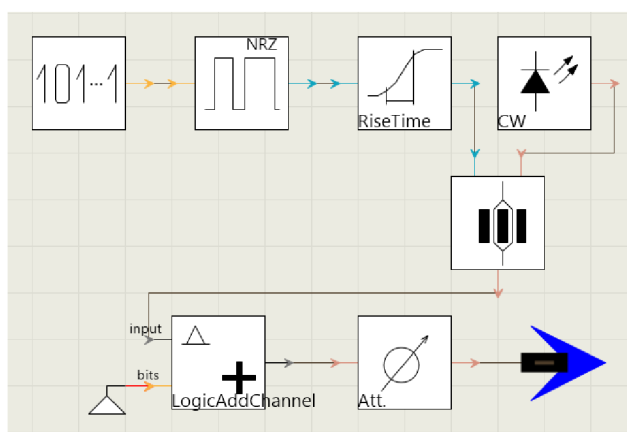
3.1.3 Přenos vysokovýkonového senzorického systému a DWDM systému na jednom optickém vlákně

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. 3.5.



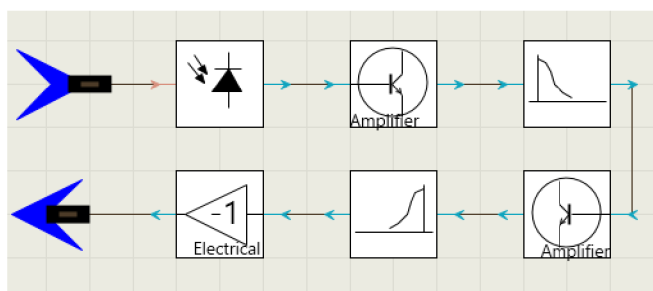
Obr. 3.5: Blokový diagram simulačního modelu v programu VPIphotonics

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. 3.6.



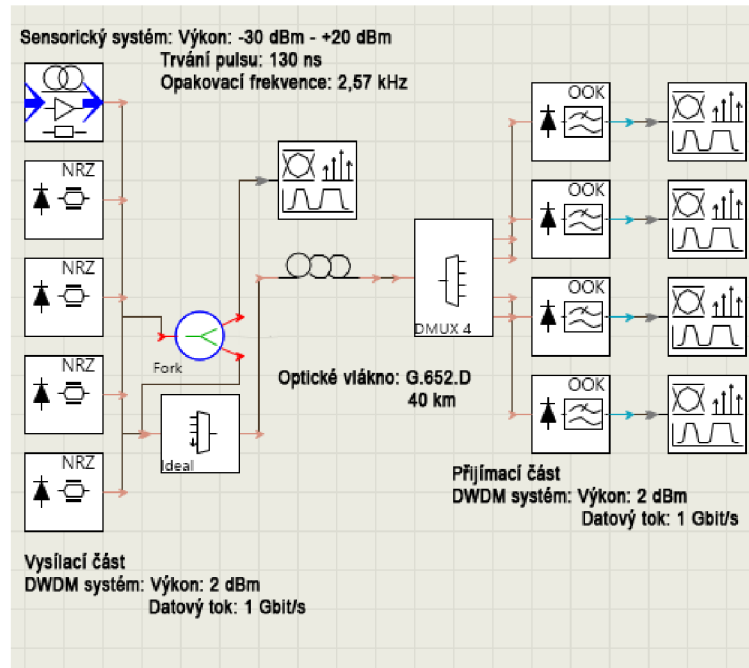
Obr. 3.6: Vysílací část DWDM systému v programu VPIphotonics

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. 3.7.



Obr. 3.7: 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. 3.8.

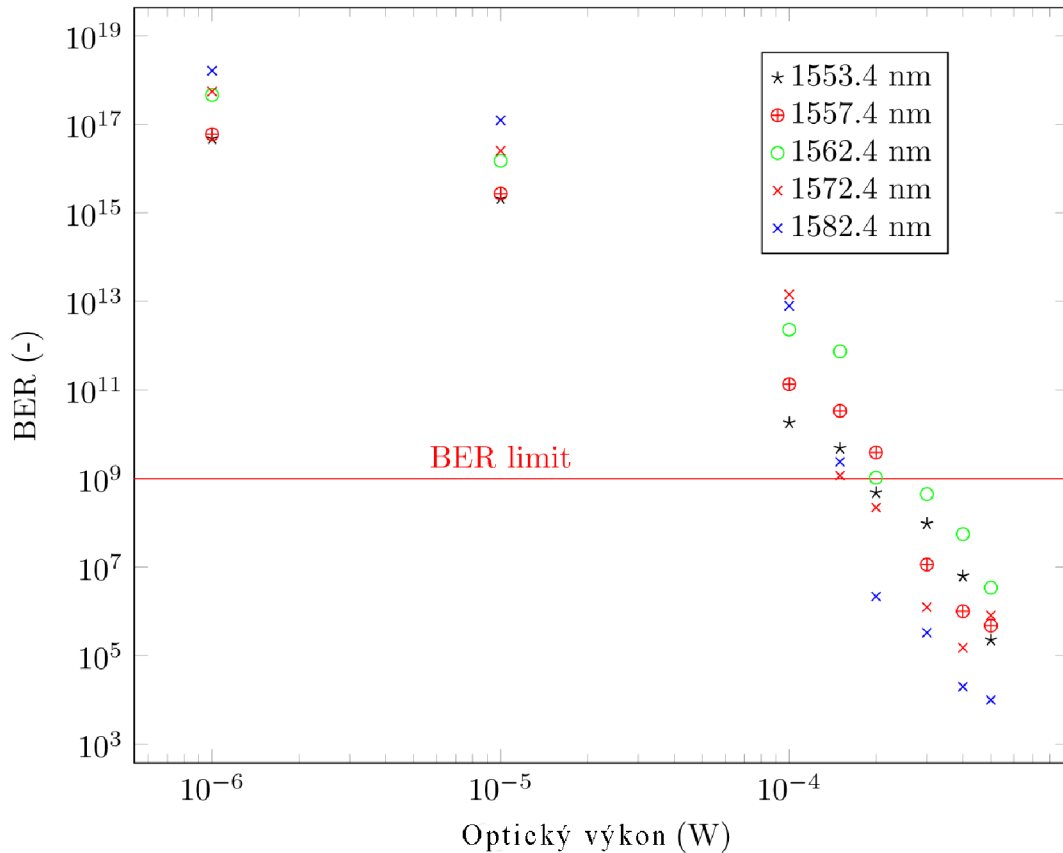


Obr. 3.8: Simulační model senzorního a přenosového systému ve VPIphotonics

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 senzorního laseru dochází k degradaci dat. Z dosud neznámých důvodů dochází k rychlému nástupu degradace datového signálu už při nízkém výkonu senzorního systému a při dostatečném odstupu vlnových délek obou systémů. Graf závislosti chybovosti DWDM systému na výkonu senzorního systému je na obrázku Obr. 3.9. Z grafu je možné vidět vysoký nárůst chybovosti již při nízkých výkonech a dostatečném odstupu senzorního 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 senzorního a přenosového systému. Simulace v programu Optsim dokazují, že přenos dat je limitován maximálním optickým výkonem senzorního systému. Výsledky simulací dokazují, že pro správnou funkci Φ – 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.



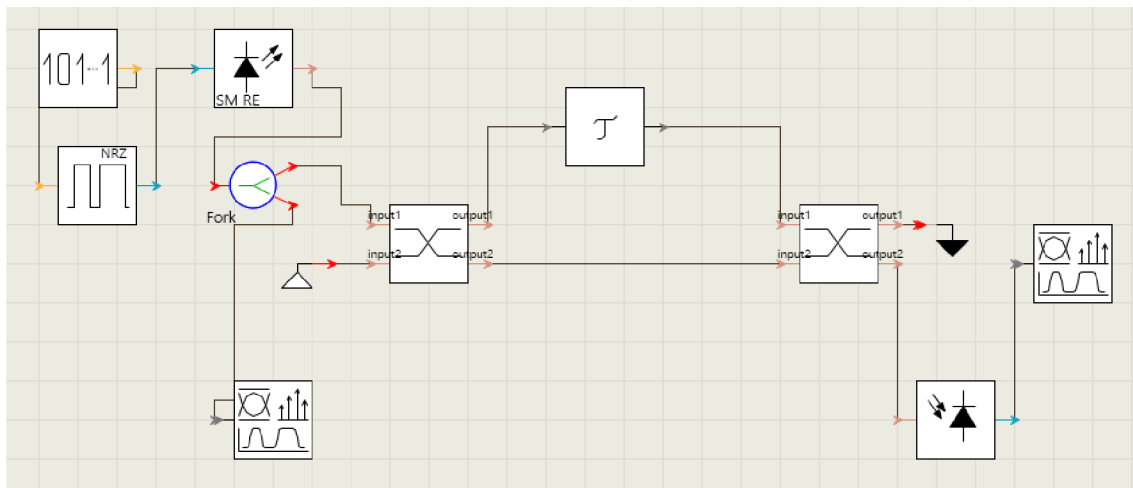
Obr. 3.9: Graf závislosti výkonu sensorického systému na chybovosti DWDM systému, který je zatížen chybou

3.1.4 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 složitá lokalizace. Tento problém nastává při sledování vibrací na optickém vlákne, 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. 3.10.

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. 3.10: 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.

3.1.5 Simulace duálního Machova-Zehnderova interferometru

Tato kapitola se zabývá simulací duálního Machova-Zehnderova interferometru v prostředí Matlab, přesněji v jeho rozšíření Simulink. Duální Machův-Zehnderův interferometr byl pro tuto simulaci zvolen z toho důvodu, že v pokračování práce se toto zapojení realizuje v laboratorním prostředí a tak bude možno výstup měření porovnat se simulací. Pro simulaci modelů interferometrů případně jejich koexistenci je využito několik typů simulačních programů. Principem využití více druhů simulačních programů bylo také porovnání mezi jednotlivými simulačními prostředími a přístupem k simulaci optických senzorů. Závěrem lze říci že co se týká porovnání reálného měření se simulačními prostředími, tak program VPIphotonics se přiblížil reálným výsledům

nejvíce. Tento fakt reflektuje také to, že vydání programu a aktualizace předdefinovaných prvků je z poslední doby. Datum vydání programu Optsim je z počátku roku 2009.

3.1.5.1 Aplikace Matlab

Matlab je interaktivní programové prostředí a skriptovací programovací jazyk vyvíjen společností MathWorks. Jedná se o software multiplatformní, čili je k dispozici na většině operačních systémů. Původně byl jazyk určen pro matematické účely, ale časem byl upraven, byly přidány nové funkce, rozšířen a dnes se dá využít v široké škále aplikací. Matlab je využíván pro vědecké a výzkumné účely, a to jak v soukromém sektoru tak i v řadách akademických. Hlavní datovou strukturou tohoto programovacího jazyka je matice. Hlavní využití Matlabu spočívá ve vědeckotechnických pracích, simulacích, paralelních výpočtech, atd. Zahrnuje výpočty, vizualizaci a programování do uživatelsky ovládaného prostředí. Typické oblasti použití:

- inženýrské výpočty,
- tvorba algoritmů,
- modelování a simulace,
- analýza dat,
- vědecká a inženýrská grafika,
- tvorba aplikací (včetně GUI).

Komponenty Matlabu

Prostředí Matlab se skládá z řady komponent, kde každá slouží k jinému účelu.

Toolboxy - Knihovny

Důležitou součástí softwaru Matlab jsou knihovny funkcí, které jsou nazývány tool boxy. Tyto toolboxy obsahují vždy uceleným způsobem zpracovaný určitý obor numerické matematiky, analytické matematiky, statistiky a další obory, ve kterých nachází Matlab uplatnění.

Simulink

Simulink je program, který využívá Matlab a jeho funkce k simulaci dynamických systémů. Do Matlabu byl přidán později, a to až ve verzi 4. Zatímco u Matlabu je nejdůležitější příkazový řádek, ovládání u Simulinku je jednodušší a intuitivnější, kdy z palety prvků si na pracovní plochu přetahuje uživatel různé funkční bloky, které upravuje a propojuje podle potřeby.

Guide

Toto prostředí umožňuje vytvářet aplikace s grafickým rozhraním a nazývá se GUIDE (Graphical User Interface Development Enviroment) a poskytuje následující vlastnosti:

- tvorba a editace uživatelského rozhraní pomocí základních komponent,
- všechny komponenty, lze měnit za běhu programu,
- vzhled vytvořené GUI aplikace se ukládá do souboru *.fig a jeho zdrojový kód do souboru *.m prostředí Matlab se skládá z řady komponent, kde každá slouží k jinému účelu.

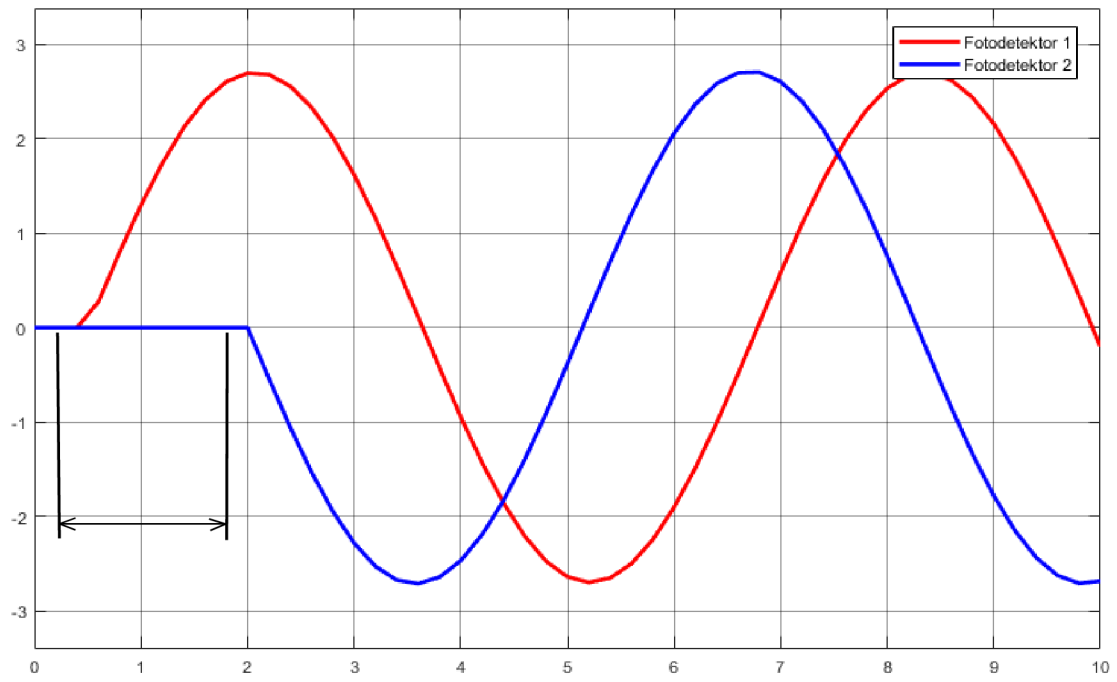
3.1.5.2 Simulace DMZI v prostředí Simulink

Simulace demonstruje signálové pochody odpovídající zapojení duálního Machova–Zehnderova interferometru, který byl rozebrán dříve.

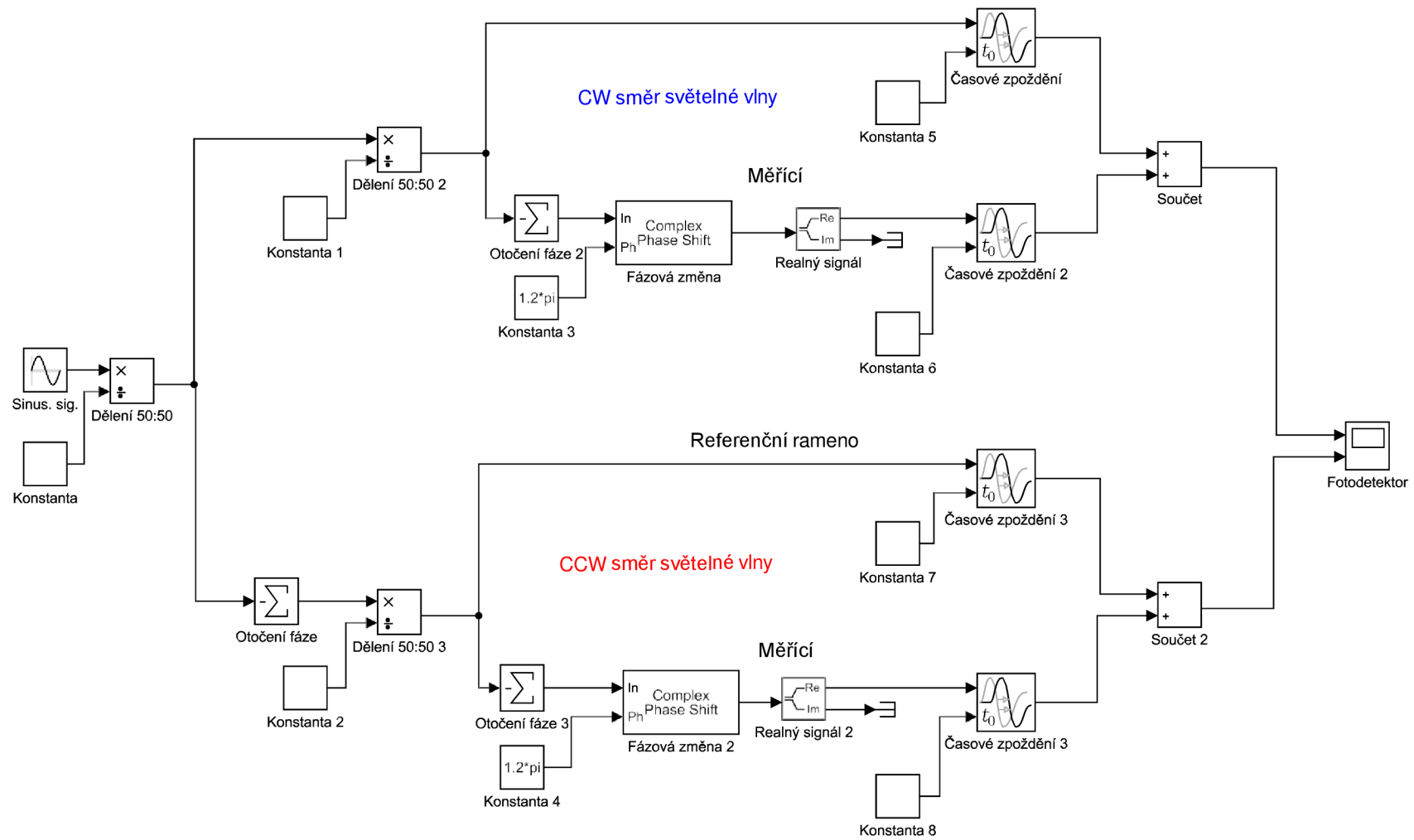
Zapojení simulace je zobrazeno na schématu. Jako zdroj záření je použit blok generující sinusový signál. Signál dále postupuje do coupleru 50 : 50, který se ovšem v Simulinku nenachází a tak je realizován tak, že je signál upraven na polovinu v bloku dělení a na jednom výstupu je otočena jeho fáze o 180° . Takto rozdělený signál dále putuje do dalších dvou couplerů, které jsou realizovány totožně jako první coupler. V Simulinku ovšem není možné posílat signály po jednom spojení v obou směrech, jak je tomu u optického vlákna v našem zapojení, a tak je referenční a měřící vlákno rozděleno v simulaci na 2 logické spoje, jeden spoj simuluje CW směr a druhý CCW směr, i když v reálném zapojení je toto spojení realizováno jedním optickým vláknem.

Následně signál jde do měřícího ramena, kde je použit blok změny fáze signálu, ten simuluje vznik vibrací v okolí optického vlákna. Tento blok však mění signál na komplexní a proto je v simulaci použit blok, který oddělí pouze reálnou složku signálu, která je pro nás důležitá. Dále signál jde do bloku, který ovlivňuje časové zpoždění signálu. V tomto bloku se signál zpozdí v každém rameni o jinou dobu, která je závislá na pozici vibrace, protože signál způsobený vibrací, ke každému fotodetektoru musí urazit jinou vzdálenost po optickém vlákně.

Po průchodu měřícím a referenčním ramenem oba signály (jak v CW směru, tak v CCW směru) následně interferují v couplerech, což je v simulaci realizováno sčítacím členem a poté jsou signály detekovány na fotodetektoru. Výstup simulace je zobrazen na obrázku Obr. 3.11. Z grafu je zřejmé, že každý signál dorazil k detektoru v jiný čas, tento čas se změří, a podle něj se poté může vypočítat poloha zdroje vibrací v okolí optického vlákna.



Obr. 3.11 Výstup simulace DMZI.



Obr. 3.12 Simulační model DMZI.

3.1.5.3 Teoretický výpočet polohy vibrace

Tato kapitola bude věnována výpočtu místa vzniku vibrace při měření duálním Machovým-Zehnderovým interferometrem, který byl simulován výše za pomoci programu Matlab. Pro teoretický výpočet bude použita rovnice, která byla odvozena v kapitole věnující se duálnímu Machovu-Zehnderovu interferometru.

Určení vstupních proměnných a konstant:

- Délka ramen interferometru: $L = 1000$ m (pouze vymyšlená vzdálenost pro účel tohoto výpočtu, v reálném zapojení se přesná délka změří pomocí OTDR),
- rychlost světla: $c = 3 \cdot 10^8$ m/s (pro náš výpočet stačí její zaokrouhlená hodnota),
- index lomu jádra vlákna: $n = 1,46$ (v laboratorním zapojení zjistíme přesný index lomu použitého vlákna),
- časový rozdíl mezi signály přijatými na obou fotodetektorech: $\Delta t = 1,5 \mu\text{s}$ (podle hodnoty časového rozdílu mezi signály určujeme polohu vibrace a tedy je klíčovým parametrem).

$$x = \frac{1}{2} \cdot \left(L - \frac{c \cdot \Delta t}{n} \right) = \frac{1}{2} \cdot \left(1 \cdot 10^3 - \frac{3 \cdot 10^8 \cdot 1,5 \cdot 10^{-6}}{1,46} \right) \quad 3.6$$
$$= 345,89 \text{ m}$$

K navození představy, jak musí být měření časového rozdílu přesné, bude v tabulce uvedeno několik vypočítaných hodnot. Časový rozdíl musí být volen v určitém rozsahu a to v závislosti na délce měřeného vlákna, protože díky tomu se mění doba, za kterou světelný paprsek projde optickým vláknem.

Tab. 3.1: Tabulka teoretických výpočtů polohy vibrace na vlákně

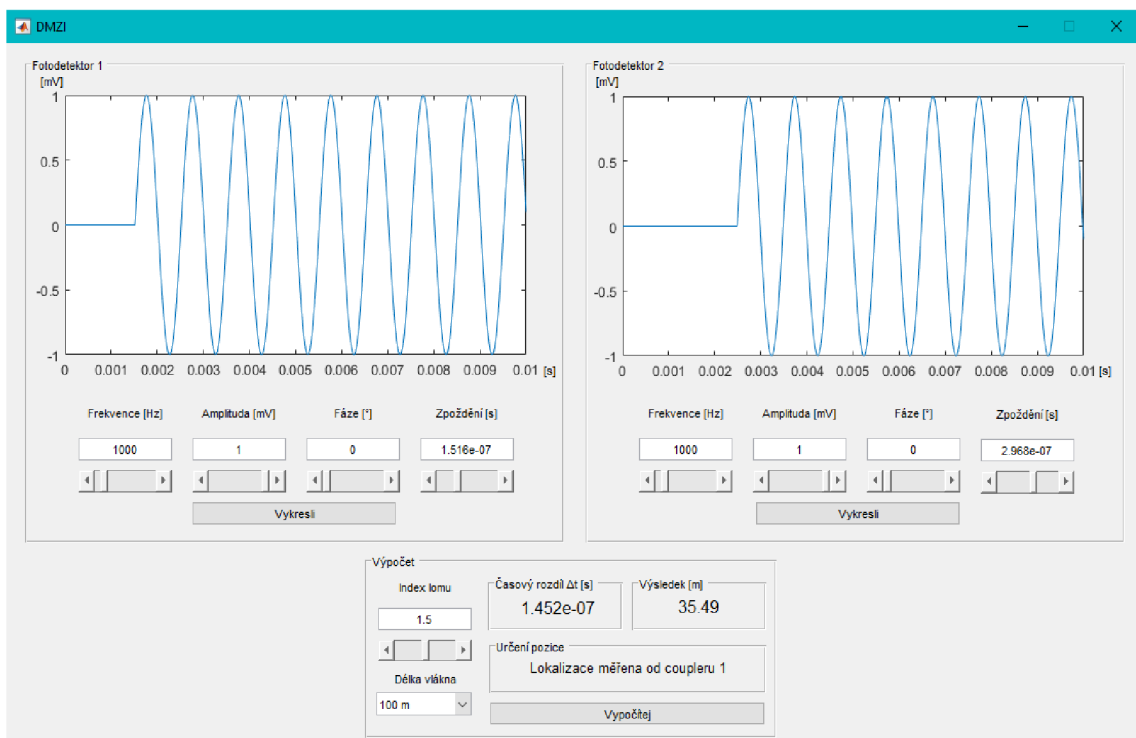
L [m]	Δt [s]	x [m]
$1 \cdot 10^3$	$0,1 \cdot 10^{-6}$	490
$1 \cdot 10^3$	$1 \cdot 10^{-6}$	397
$1 \cdot 10^3$	$1,5 \cdot 10^{-6}$	346
$1 \cdot 10^3$	$2 \cdot 10^{-6}$	294
$1 \cdot 10^3$	$3 \cdot 10^{-6}$	192
$1 \cdot 10^3$	$4 \cdot 10^{-6}$	89

Z tabulky je zřetelné, s jakou citlivostí je třeba změřit časový rozdíl mezi signálem, abychom byli schopni změřit polohu vibrace. U kilometrového optického vlákna je třeba, abychom byli schopni změřit rozdíl menší než $5 \mu\text{s}$. Dále je v tabulce

vidět, že hodnoty výpočtů dosahují pouze k polovině celkové délky trasy, to je z důvodu, že záleží na pořadí dvou přijatých signálů v čase a podle toho se určuje vzdálenost k jednomu či druhému coupleru.

3.1.5.4 Aplikace pro simulaci DMZI

Aplikace pro zpracování dat z měření pomocí duálního interferometru je popsána níže. Jedná se o aplikaci, která umožňuje simulovat duální Machův–Zehnderův interferometr a to tak, že si uživatel vygeneruje výstupy na dvou fotodetektorech a podle tohoto nastavení, může dopočítávat teoretickou pozici vibrace, která je ovšem závislá na parametrech optického vlákna.



Obr. 3.13: Aplikační software DMZI

Pro vývoj této aplikace bylo využito skriptovacího jazyku Matlab a to jeho verze R2017a. V tomto prostředí byla aplikace navržena pro operační systém Windows, pomocí grafického uživatelského rozhraní GUIDE, což je jedna z komponent Matlabu, která umožňuje tvorbu aplikací a jejich grafických uživatelských rozhraní.

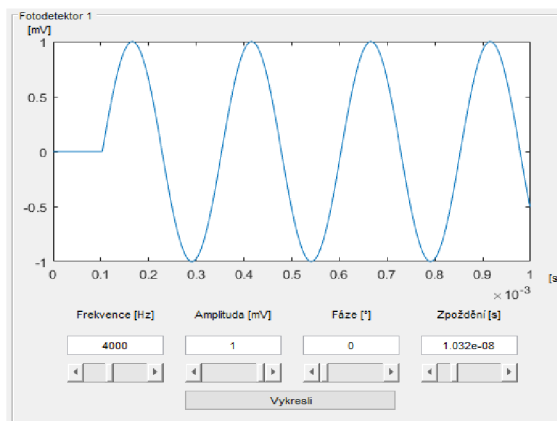
V horní části jsou dvě okna, ve kterých se nastavují parametry na výstupech fotodetektoru 1 a fotodetektoru 2 a takto nastavené výstupy jsou zde zobrazeny na grafech. Ve spodní části programu je okno, které se věnuje výpočtu pozice vibrací. Funkčnost této aplikace bude podrobně rozebrána dále.

Popis funkčnosti aplikace

Aplikace je opticky rozdělena na dvě části, první část se zaměřuje na generování signálu, který je přijat na prvním a druhém fotodetektoru interferometru. Ve druhé části, se z vygenerovaných signálů počítá teoretická pozice vibrací v okolí optického vlákna, kde si můžeme délku a index lomu tohoto vlákna nastavit.

Generování signálu

V aplikaci se nacházejí dvě stejná okna, která slouží ke generování signálů na obou fotodetektorech duálního Machova-Zehnderova interferometru. V této sekci generujeme sinusový signál, u kterého můžeme nastavit jeho parametry: frekvenci, amplitudu, fázi a zpoždění signálu v čase. Tyto parametry můžeme v aplikaci nastavit pomocí posuvníků a nebo zapsat přesnou hodnotu do textového okna. Zpoždění je ovšem v grafu několiknásobně zvětšeno, kvůli názornosti, jelikož reálná hodnota je pouhým okem nepostřehnutelná. Takto vygenerovaný signál je poté zobrazen v grafu za pomoci tlačítka Vykresli. Signály v aplikaci uživatel generuje pro oba fotodetektory a podle hodnot těchto signálů je dále počítána teoretická poloha vibrace v závislosti na parametrech optického vlákna.



Obr. 3.14: Část určená fotodetektoru v softwaru DMZI

Výpočet pozice vibrace

Ve spodním okně, nazvaném výpočet, které je zobrazeno na obrázku Obr. 3.15 aplikace počítá polohu vibrace podle dvou vygenerovaných signálů a hodnot nastavených právě v tomto okně. V okně výpočtu může uživatel nastavit index lomu a délku teoreticky měřeného optického vlákna. Takto zadané hodnoty jsou následně použity při výpočtu, podle rovnice:

$$x = \frac{1}{2} \cdot \left(L - \frac{c \cdot \Delta t}{n} \right) [\text{m}], \quad 3.7$$

kde L je vzdálenost mezi couplery, délka měřicího či referenčního vlákna, Δt je časový rozdíl generovaných signálů, c je rychlost světla a n je index lomu optického vlákna.

The image shows a software window titled "Výpočet" (Calculation). It has several input fields and a button. The "Index lomu" field contains the value "1.6". The "Časový rozdíl Δt [s]" field contains "1.452e-08". The "Výsledek [m]" field contains "3.63969". Below these, there is a "Délka vlákna" field with a dropdown menu showing "10 m". To the right, there is a section titled "Určení pozice" with the text "Lokalizace měřena od coupleru 1". At the bottom right, there is a button labeled "Vypočítej".

Obr. 3.15: Část, kde je proveden výpočet simulace DMZI.

Po výpočtu lokalizace, aplikace vypíše vzdálenost vibrace na optickém vlákně, pozici, od kterého coupleru je tato vzdálenost počítána a časový rozdíl Δt mezi signály, což je kritická hodnota při výpočtu lokalizace vibrací u duálního Machova-Zehnderova interferometru a v reálném zapojení potřebujeme změřit tento údaj co nejpřesněji kvůli přesnosti výsledného výpočtu.

3.2 Měření systémů využívající Braggovy mřížky

Dílčím cílem práce je také studium kvazi-distribovaných systémů a jejich možnost využití pro distribuované snímání. Jedná se o systémy, které tvoří bodové senzory umístěné v dané vzdálenosti za sebou na optickém vlákně. Při určitých zapojeních vzniká podobnost se systémy využívající zpětně odražený paprsek. Příkladem může být sensorický systém pracující na kilometrové trase s mrtvou zónou 50 m a 50 m přesností. V tomto zapojení je výhodnější využití senzoru, který pracuje s Braggovými mřížkami.

3.3 Zdroj s detektorem záření pro sensorické systémy

Cílem disertační práce je sestavení cenově dostupného sensorického systému pro snímání vibrací případně i teploty. V oblasti zdrojů záření jsou komerčně dostupné zařízení od firem Thorlabs či Coherent a další. Motivací sestavit vlastní zdroj záření byla cena finálně sestrojeného zařízení.

Vysílací část

Další rozvíjející se oblastí jsou zdroje záření pro telekomunikace, kdy využíváme nepřeberné množství tzv. SFP modulů pro různé vzdálenosti a kapacity přenosu. Tyto moduly jsou stále více dostupnější a cenově výhodnější. Motivací práce bylo sestavení vlastního zdroje záření s detektorem, který využívá SFP modul od firmy Linktel LX1443CDR. Jedná se o modul, který vysílá na vlnové délce 1542,94 nm v optickém pásmu C. S rychlostí 1,25 Gb/s. Maximální vysílací výkon je 4 dBm a to odpovídá přibližně 80 km dosahu. Modul pracuje na napětí 3,3 V. Vstupním konektorem je optický

konektor LC. Zdroj záření disponuje kovovým pouzdem, ve kterém je možné SFP moduly libovolně měnit, dle vlnové délky případně potřebného vysílacího výkonu.



Obr. 3.16: SFP modul Linktel

Výhodou zařízení je vysoká odolnost proti elektromagnetickému rušení, kdy jsou tyto zdroje vysílače rušeny okolním magnetickým polem, případně elektrickým vedením. Zdroj s detektorem tím pádem neruší okolní zařízení a je možné jej použít například v muničních skladech či dalších prostorech, které může elektrické pole narušit. Níže jsou uvedeny datové listy použitého SFP.

Tab. 3.2: Technický list použitého SFP modulu Linktel elektrické parametry

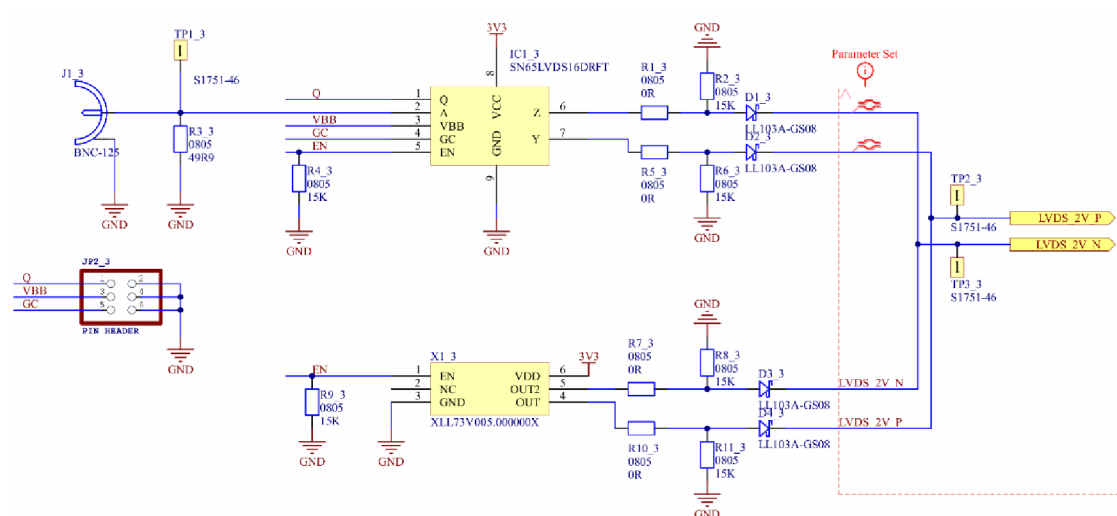
Parameter	Symbol	Minimum	Typical	Maximum	Unit	Notes
Module Supply Current	I _{cc}	-	-	450	mA	-
Transmitter Differential Input Voltage (TD +/-)	-	200	-	2400	mV _{P-P}	1
Receiver Differential Output Voltage (RD +/-)	-	600	-	1200	mV _{P-P}	2
Low speed output: Transmitter Fault(TX_FAULT) / Loss of Signal (LOS)	VOH	2.0	-	V _{cc}	V	3
	VOL	0	-	0.8	V	-
Low speed output: Transmitter Disable (TX_DISABLE), MOD_DEF 1, MOD_DEF 2	VOH	2.0	-	V _{cc}	V	4
	VOL	0	-	0.8	V	-

Důležitými parametry jsou optický výkon, centrální vlnová délka případně spektrální šířka.

Tab. 3.3: Technický list použitého SFP modulu Linktel optické parametry

Parameter	Symbol	Minimum	Typical	Maximum	Unit	Notes
Launch Optical Power	P _o	-1	-	+4	dBm	-
Center Wavelength Spacing	-	-	100	-	GHz	-
Wavelength Stability	Δλ _c	-0.1	-	+0.1	nm	-
Extinction Ratio	EX	8.0	-	-	dB	-
Spectral Width (-20dB)	Δλ	-	-	0.3	nm	-
Side Mode Suppression Ratio	SMSR	30	-	-	dB	-
Total Jitter	TJ	-	-	0.075	UI	-
Dispersion Penalty	-	-	-	3	dB	-
Optical Rise/Fall Time	T _{rise} /T _{fall}	-	-	260	ps	-
Pout @TX-Disable Asserted	P _{off}	-	-	-40	dBm	-
Eye Diagram	IEEE Std 802.3-2005 Gigabit Ethernet 1000BASE compatible					

Pro lepší orientaci je uvedeno schéma zařízení které bylo sestaveno na testování zdrojů záření.



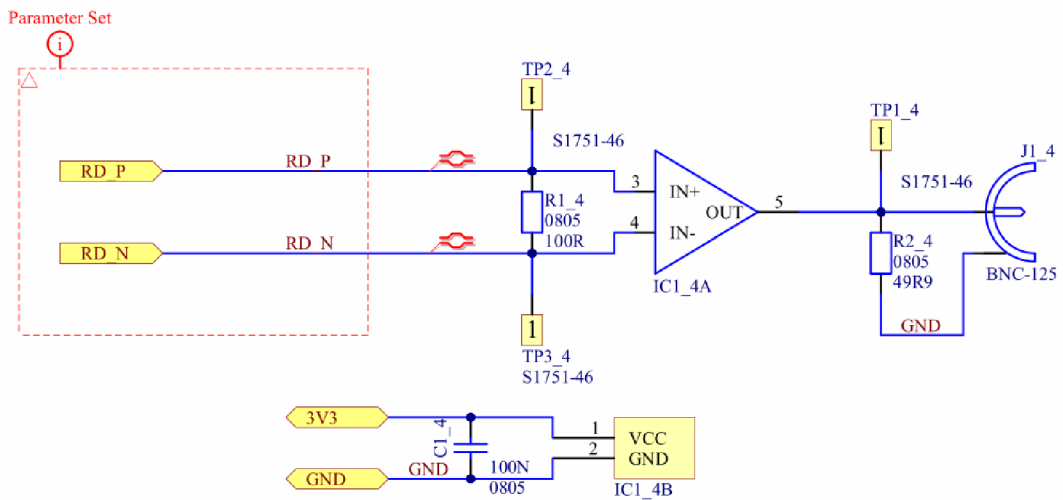
Obr. 3.17: Schéma vysílací části. Horní je vysílací část pro externí vysílač a spodní část obsahuje interní vysílač desky.

Přijímací část – detektor

Přijímací část má citlivost -24 dBm. Vstupem je konektor LC duplex. Veškerá data přijatá z optické trasy jsou vyvedena na konektor prostřednictvím tzv. LVDS páru – diferenciálního páru, který obsahuje kladný a záporný vodič. Vzhledem k charakteru výstupního signálu je nutné jej nadále upravit k čemuž je využit řídicí driver. (PI90LV02TEX). Jedná se o vysokorychlostní driver, který převádí diferenciální LVDS pár na single-ended. Například při vysílání logické nuly je napětí záporné a při vysílání logické jedničky je napětí kladné. Hlavním důvodem je izolace signálu vůči zemnímu potenciálu GND. Driver signál potom převede na single-ended.

Přijímací část

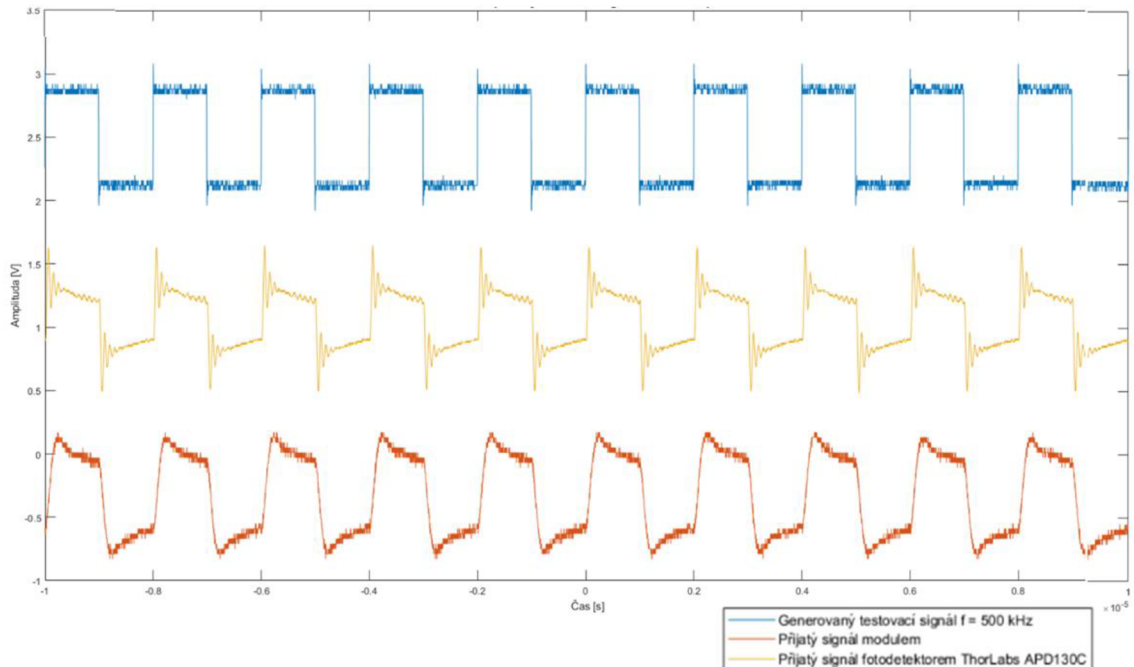
Na schématu je zobrazen driver, který je popsán výše a dále zakončovací odpor který slouží k zakončení LVDS páru, který slouží k eliminaci odrazů na konci linky. Na schématu je také zobrazena napájecí část 3,3V DC a napájení část je blokována kondenzátorem 100 nF kvůli vyšším pracovním frekvencím.



Obr. 3.18: Schéma přijímací části.

Vysílací část

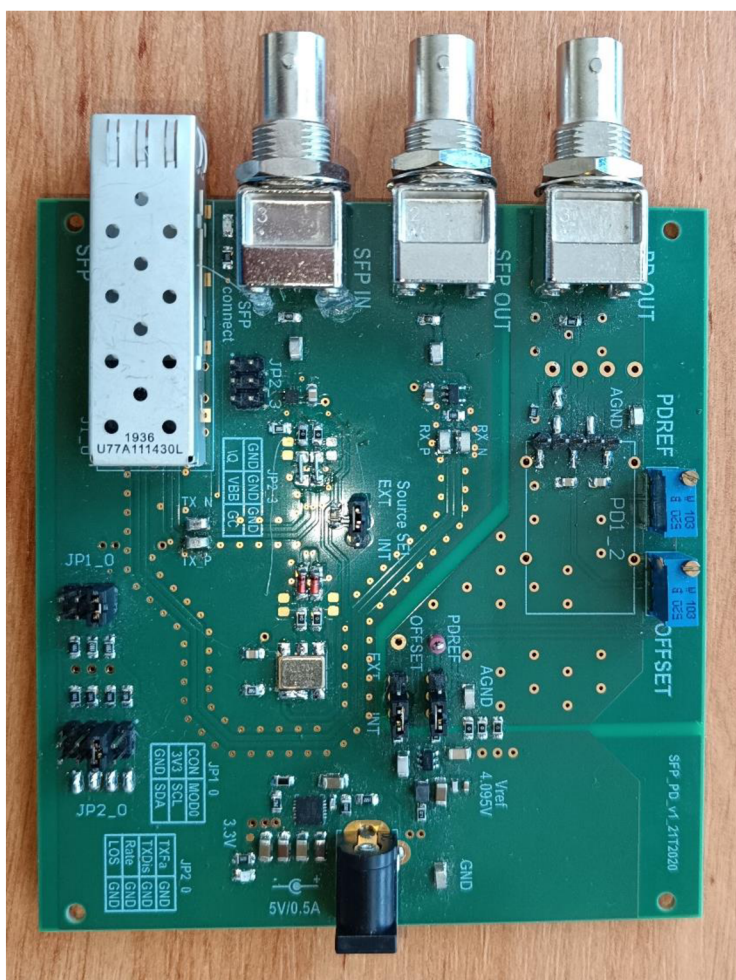
Na schématu je zobrazen konektor typu BNC, poté budič linky LVDS který slouží k opětovnému převedení signálu LVDS na single-ended. Pro případ vývoje je ve spodní části zamýšlen oscilátor který není využit. Pracovní rychlost je omezena na 1,25 GB/s a dále je omezena pracovní frekvence na 100 kHz.



Obr. 3.19: Modrý průběh: Generovaný testovací signál $f = 500$ kHz, Červený průběh: Přijatý signál modulem, Oranžový signál: Přijatý signál fotodetektoem ThorLabs APD130C

Napájecí část zdroje

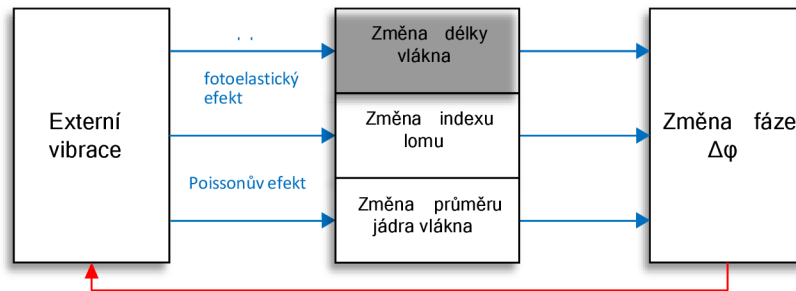
Celý modul je napájen 5 V DC a SFP modul vyžaduje napájecí napětí 3,3 V DC a proto je nutné vstupní napětí upravit. K tomu je využit regulátor typu LDO (Low dropout) tzn. IC1/LP38798SD, který má nastavitelné výstupní napětí. K nastavení tohoto napětí slouží pin FB, který je připojen k napěťovému děliči. Výstupní kondenzátory slouží k omezení zvlnění výstupního napětí. Modul obsahuje i kontrolní LED diodu.



Obr. 3.20: Funkční vzorek zdroje s detektorem

3.4 Interferometry pro lokalizaci vibrace

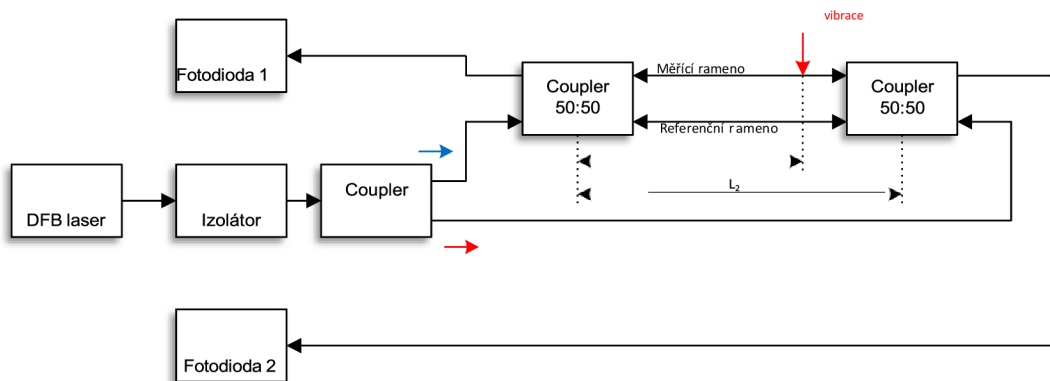
Tématem disertační práce je návrh jednoduchého optovláknového senzoru. Cílem je měření vibrace, kterou může generovat například zemětřesení, pohyb vlaku či jiné jevy. Úkolem senzoru tedy není jen zjistit, že k jevu došlo a je důležité i lokalizovat v jakém místě optického vlákna. Níže jsou uvedeny využitelné interferometry k lokalizaci vibrace.



Obr. 3.21: Schéma vlivu vibrací na testované vlákno

3.4.1 Duální Machův-Zehnderův interferometr (DMZI)

Klasická verze Machova–Zehnderova interferometru je schopná pouze změřit danou fyzikální veličinu, nikoli však tuto veličinu lokalizovat. K lokalizaci se používá její modifikace a to tzv. duální Machův–Zehnderův interferometr (DMZI), který je zobrazen na obrázku Obr. 3.22.



Obr. 3.22: Duální Machův-Zehnderův interferometr

Jako zdroj světelného záření je použit vysoce koherentní laser (DFB laser). Přes první coupler 50:50, je světelný paprsek ze zdroje světelného záření rovnoměrně rozdělen do dvou cest, které přivedou světelný signál do dvou coupleru 50:50, jedna cesta je ve směru hodinových ručiček (CW) a druhá proti směru hodinových ručiček (CCW). Paprsek je zároveň přenášen jak do měřicího, tak i referenčního ramene interferometru z obou směrů, jak CW tak i CCW. Jakmile vibrace, či jiná fyzikální veličina působí na měřící rameno, fáze světelné vlny se mezi dvěma rameny liší a tak vzniká fázový posuv mezi rameny. Světelný paprsek je přenesen na oba konce, kde

interferuje v couplerech. Nakonec je signál snímán pomocí dvou fotodiod a převeden na signál elektrický, přičemž jedna fotodioda snímá CW a druhá CCW optický signál. Čas, kdy CW optická vlna interferuje může být vypočítán z rovnice [1]:

$$t = \frac{x \cdot n}{c} \text{ [s]}, \quad 3.8$$

kde n je index lomu jádra vlákna, c je rychlost světla, x je pozice vibrace a t námi hledaný čas. Čas, kdy dorazí CCW optická vlna k druhému coupleru, může být spočítán z rovnice:

$$t = \frac{(L - x) \cdot n}{c} \text{ [s]}, \quad 3.9$$

kde L je vzdálenost mezi dvěma couplery, tedy délka měřicího či referenčního vlákna a rozdíl mezi těmito dvěma časy odpovídá rovnici:

$$\Delta t = \frac{(L - 2 \cdot x)n}{c} \text{ [s]}, \quad 3.10$$

a konečně polohu vibrace je možné spočítat pomocí rovnice:

$$x = \frac{1}{2} \cdot \left(L - \frac{c \cdot \Delta t}{n} \right) \text{ [m]}, \quad 3.11$$

Měření časového rozdílu dvou signálů nám umožňuje určit polohu vibrace a je to kritický parametr v přesnosti lokalizace, při použití této techniky měření vibrací.

Jelikož paprsky v obou směrech jsou vyslány stejným zdrojem světelného záření a ovlivněny stejnou vibrací, oba interferované signály detekovány fotodiodami jsou vysoce korelativní a časové zpoždění může být zjištěno lokalizací maxima křížové korelace mezi dvěma detekovanými signály. Z toho vyplývá, že vibrace může být lokalizována pomocí duálního Machova-Zehnderova interferometru [1].

3.4.2 Kruhový Machův-Zehnderův interferometr

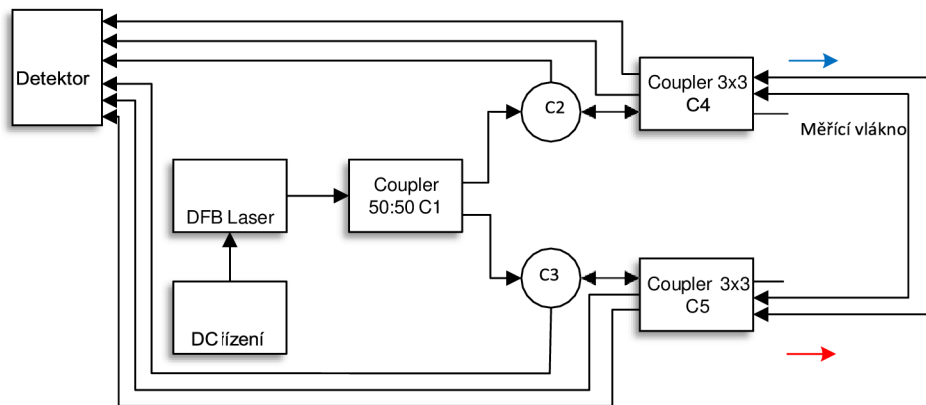
Další modifikací Machova-Zehnderova interferometru je kruhový Machův-Zehnderův interferometr, jehož blokové schéma je zobrazeno na obrázku Obr. 3.23. Tento interferometr pracuje na velmi podobném principu jako duální MZI, a je schopen zachytit či lokalizovat vibrace z více různých zdrojů. V tomto návrhu je využito dvou symetrických 3x3 couplerů a dvou optických cirkulátorů, které jsou použity proto, aby mohl vstup coupleru zároveň fungovat i jako výstup. Jako snímáné vlákno je použito dvoujádrové jednojádřové optické vlákno, čímž je dosaženo redukce rozdílu délek referenčního a měřicího vlákna. Jako detektor v tomto zapojení je použit šesti-vstupový fotodetektor, schopen pracovat synchronizovaně se stejnou citlivostí [1].

Zdrojem světelného záření v tomto zapojení je DFB laser, který vysílá

kontinuální světelnou vlnu CW, která je v coupleru 50:50 rozdělena do dvou cest. Přes cirkulátor C2 je světlo přivedeno do 3x3 coupleru C4, kde je světlo přivedeno do dvou vláken snímacího kabelu. Tyto dvě světelné vlny postupují interferometrem ve směru hodinových ručiček (CW) a nakonec interferují v 3x3 coupleru C5. Zároveň je druhá světelná vlna přivedena přes cirkulátor C3 a coupler C5 do dvou vláken měřícího kabelu, ovšem tyto optické vlny postupují ve směru proti směru hodinových ručiček (CCW) a nakonec interferují v coupleru C4 [1].

Na rozdíl od klasického MZI, kruhový interferometr je schopný lokalizovat vibrace, díky zpracování signálu jak z CW tak CCW směru.

Opět i v této variantě je pro výsledek měření kritické, správně určit časový rozdíl mezi signály přijatými na obou koncích interferometru pomocí fotodiod.



Obr. 3.23: Kruhový Machův-Zehnderův interferometr

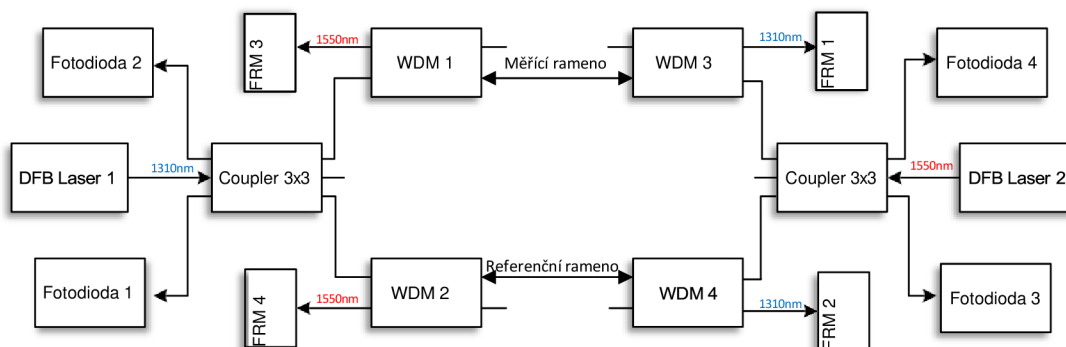
3.4.3 Duální Michelsonův interferometr (DMI)

Dalším interferometrem určeným k lokalizaci vibrací je modifikace Michelsonova interferometru a to ve formě duálního Michelsonova interferometru (DMI). Jedná se o verzi, ve které je využito Faradayových rotačních zrcadel, které minimalizují nechtěný vliv polarizace na výsledky měření.

Jak je vidět na obrázku Obr. 3.24, jedná se o dva Michelsonovy interferometry operující každý na vlastní vlnové délce. Jeden pracuje na vlnové délce 1310 nm druhý na vlnové délce 1550 nm. Vysílač světelného signálu č. 1 vysílá CW světelný paprsek o vlnové délce 1310 nm do 3x3 coupleru C1 a je veden přes WDM 1 a WDM 2 do měřícího a referenčního ramena. Na konci interferometru je signál odražen od dvou zrcadel FRM 1 a FRM 2, které odrazí paprsky o vlnové délce 1310 nm zpět do coupleru C1, kde oba signály spolu interferují. Oba výstupy C1 jsou detekovány fotodiodami 1 a 2, jejich fázový rozdíl je $2\pi/3$. Druhý interferometr pracuje úplně stejným způsobem, ovšem na vlnové délce 1550 nm. Laser č. 2 vysílá světelný paprsek, který je veden přes členy WDM 3 a WDM 4 do měřícího a referenčního ramene, na konci ramen je signál odražen zrcadly

FRM 3 a FRM 4. Signál z druhého zdroje interferuje v coupleru a výstup je detekován fotodiodami 3 a 4. Čtyři výstupy fotodiod jsou snímány vysoko rychlostní kartou připojenou k počítači. Naměřené výsledky jsou dále v počítači zpracovány [1].

Lokalizace vibrace probíhá podobně jako u DMZI a to tak, že je vyhodnocován časový rozdíl mezi dvěma signály interferometru.



Obr. 3.24: Duální Michelsonův interferometr.

3.4.4 Sagnacův interferometr pracující na dvou vlnových délkách

U předchozích interferometrů byl klíčový prvek v jejich zapojení přesný, vysoce koherentní zdroj světelného záření, kdežto u Sagnacova interferometru se používá širokopásmových led diod, což snižuje cenu celého systému.

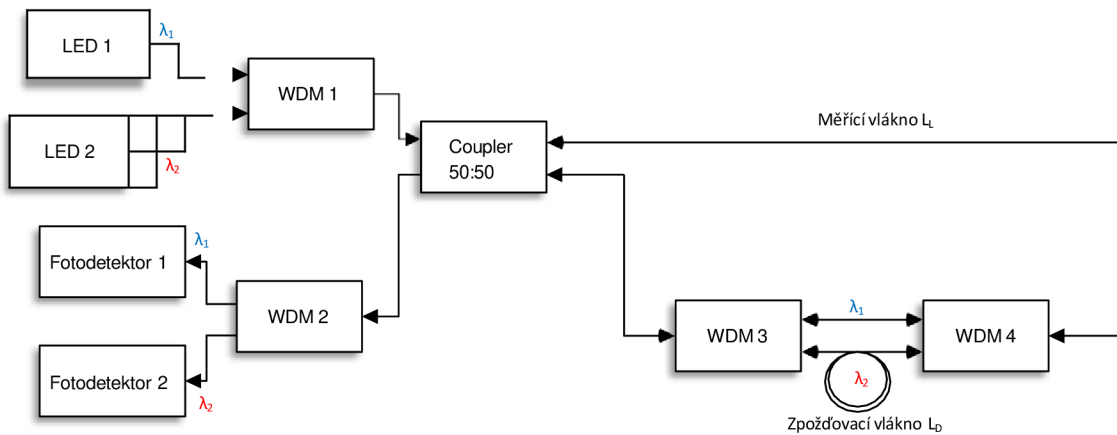
Senzor se skládá ze dvou Sagnacových interferometrů, přičemž každý pracuje na vlastní vlnové délce λ_1 a λ_2 . Dva zdroje světelného záření jsou připojeny na vstupy WDM 1. Výstup WDM 1 je přiveden na vstup širokopásmového 3 dB coupleru. Optické vlákno mezi výstupy širokopásmového coupleru tvoří Sagnacův interferometr (měřící vlákno). Zbývající výstup širokopásmového coupleru je připojen na dvě fotodiody, do kterých je signál rozdělen pomocí WDM 2. Diferenciální Sagnacův interferometr pracující na λ_2 je realizován přidáním dvou WDM couplerů a zpoždovacího vlákna jak je zobrazeno na obrázku Obr. 3.25 [1].

Dvě optické vlny šířící se proti sobě na vlnové délce λ_1 ve snímacím vlákně, určují výstup Sagnacova interferometru. Světlo z druhého zdroje na vlnové délce

λ_2 vysíláno do snímacího vlákna a přes WDM 3 a 4 také do zpoždovacího vlákna, vytváří diferenciální Sagnacův interferometr určující polohu vibrace.

Časově proměnná odchylka kdekoli na snímacím vlákně způsobí, že signál na fotodetektoru 1 vytvoří časově proměnný signál, způsoben dvěma proti sobě šířícími se signály na vlnové délce λ_1 . Výstupní signál této části interferometru je úměrný frekvenci vibrace a vzdálenosti od centra snímacího vlákna. Druhá část senzoru je ten samý Sagnacův interferometr modifikován do formy pozičně necitlivého diferenčního

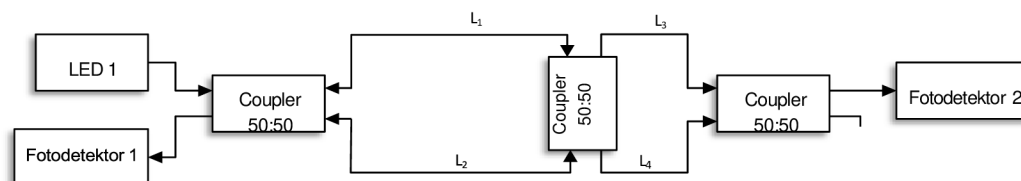
Sagnacova interferometru. Toho je docíleno na druhé vlnové délce λ_2 přidáním dvou WDM couplerů a zpoždovacího vlákna L_D o mnohem větší délce než je délka snímacího vlákna L_L . Touto modifikací je docíleno toho, že výstup interferometru na fotodetektoru 2 je pouze úměrný zdroji vibrací a nemá explicitní vztah ke vzdálenosti zdroje vibrací. K tomu, aby bylo možné lokalizovat zdroj vibrací, je třeba z hodnot obou výstupů spočítat koeficient pro každou vzdálenost a přístroj tak zkalibrovat [1].



Obr. 3.25: Sagnacův interferometr pro lokalizaci vibrace pracující na dvou vlnových délkách

3.4.5 Sagnacův-Machův-Zehnderův interferometr

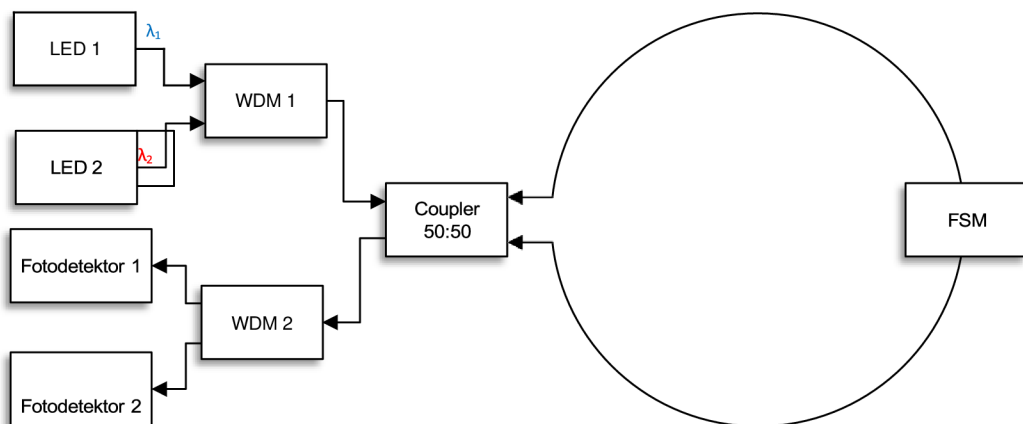
Jedná se o zapojení, které je složeno ze dvou interferometrů a to Sagnacova a Machova-Zehnderova. Využívají stejná optická vlákna a prvky. Schéma zapojení senzoru je zobrazeno na obrázku Obr. 3.26, Sagnacův interferometr se skládá z vláken L_1 a L_2 a prvního coupleru. Jedno rameno Machova-Zehnderova interferometru se skládá z vláken L_1 a L_4 , a to druhé z vláken L_2 a L_3 . Laserová dioda vysílá světelnou vlnu do obou interferometrů, fotodetektor 1 přijímá signál ze Sagnacova interferometru a fotodetektor 2 z Mach-Zehnderova interferometru, všechny couplery dělí signál v poměru 50:50. Výstup Sagnacova interferometru je funkcí pozice, kde se vibrace vyskytla a taky velikosti této snímané vibrace. Kdežto výstup Machova-Zehnderova interferometru je funkcí pouze velikosti a frekvence aplikované vibrace. Takže pozice a velikost vibrace o je možno zjistit výpočtem z těchto signálů, získaných pomocí dvou různých interferometrů [1].



Obr. 3.26 Kombinovaný Sagnacův-Machův-Zehnderův interferometr

3.4.6 Kombinovaný Sagnacův-Michelsonův interferometr

Druhým kombinovaným interferometrem, je Sagnacův–Michelsonův interferometr, pracující na podobném principu, jako předchozí sensor. Klíčovým prvkem tohoto zapojení bude zrcadlo odrážející jen zvolenou vlnovou délku světla a propouštějící ostatní světelné signály. Sensor se skládá ze dvou částí, Sagnacova interferometru a Michelsonova interferometru, které jsou buzeny dvěma zdroji světelného záření o vlnových délkách λ_1 a λ_2 . Světelné zdroje jsou přes WDM 1 přivedeny do širokopásmového coupleru 50:50 a z coupleru jsou signály přivedeny do měřícího vlákna. Zbývající port coupleru je připojen na vstup WDM 2 odkud je signál přiveden na dva fotodetektory. Sagnacův a Michelsonův interferometr v jednom vlákně jsou realizovány pomocí zrcadla (FSM), které odraží pouze určitou vlnovou délku a všechny ostatní propouští. Toto zrcadlo je umístěno uprostřed měřícího vlákna. Jeden ze dvou párů světelných signálů bude pomocí zrcadla odražen, čili bude pracovat jako Michelsonův interferometr na vlnové délce λ_1 . Na propuštěné vlnové délce λ_2 bude pracovat Sagnacův interferometr. Výstup Sagnacova interferometru snímán fotodetektoem 2 je úměrný vzdálenosti vibrace od centra měřícího ramena a také na velikosti aplikované vibrace. Tento interferometr je necitlivý na malé změny frekvence. Časově proměnné rušení na měřícím vlákně také vytvoří výstupní signál na Michelsonově části interferometru. To vytváří výstupní signál úměrný vibraci bez závislosti na pozici aplikované vibrace. Zpracováním těchto dvou signálů jsme schopni určit pozici i charakter vibrace [1].



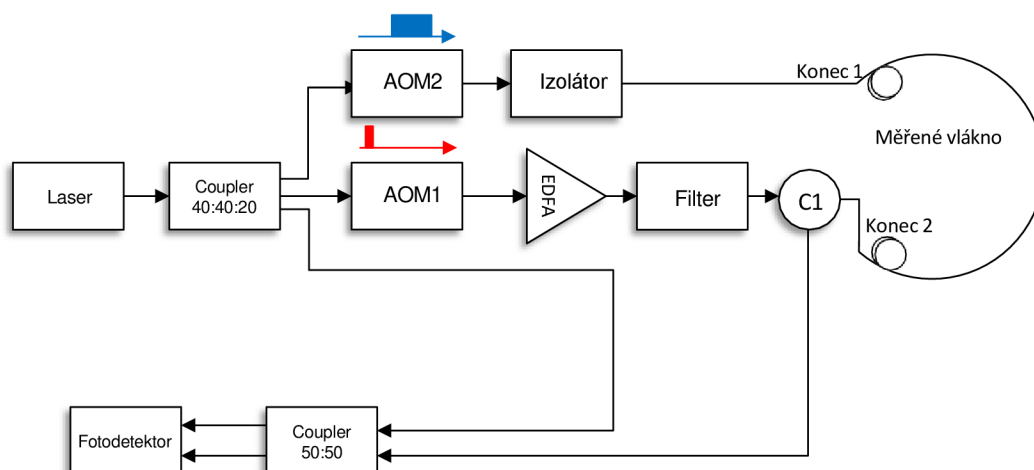
Obr. 3.27: Schéma kombinovaného Sagnacova-Michelsonova interferometru

3.5 Lokalizace vibrace senzory kombinující interferometrii a Φ -OTDR

Tento druh senzorů je využíván k přesnému lokalizování vibrací pokud nemáme k dispozici oba konce optických vláken, což při reálných měřeních je skoro vždy [1].

3.5.1 Machův-Zehnderův interferometr a Φ -OTDR

Tento kombinovaný systém, jak bylo popsáno výše využívá výhod obou metod. Přesnost lokalizace je docílena pomocí části pracující jako Φ – OTDR, která snímá změnu fáze jednoho typu impulzů v systému. Machova–Zehnderova část tohoto senzoru se stará o co nejpřesnější měření snímané frekvence. Jako zdroj světelného záření je použit laser s velmi úzkou spektrální čarou, který generuje kontinuální světelnou vlnu. Optická vlna je poté rozdělena couplerem v poměru 40:40:20. První část signálu je modulována pomocí opticko-akustického modulátoru na úzké pulzy, poté jsou tyto pulzy zesíleny EDFA vláknovým zesilovačem a vyslány do měřicího vlákna na konci 2 a slouží ke generování Rayleighova rozptylu, který je sbírán cirkulátorem. Druhá část signálu je taktéž modulována pomocí opticko-akustického modulátoru, ale na široké impulzy. Poslední část optické vlny zůstává kontinuální a je využita jako referenční. Všechny signály jsou poté snímány balancovaným fotodetektozem. Rayleighova zpětný rozptyl je generován úzkými pulzy, tento světelný signál putuje z měřicího vlákna ke konci 2, zároveň se vláknem šíří i široké impulzy, které se šíří z konce 1 do konce 2, ty interferují s referenčním signálem v coupleru. Rayleighova rozptyl a interferující signály jsou tak přijaty úspěšně. V této měřicí metodě je kritické nastavení výkonových hladin, šířky a frekvence pulzů, vzorkování a signálové zpracování [1].



Obr. 3.28: Zapojení kombinovaného senzoru MZI s ϕ -OTDR [1]

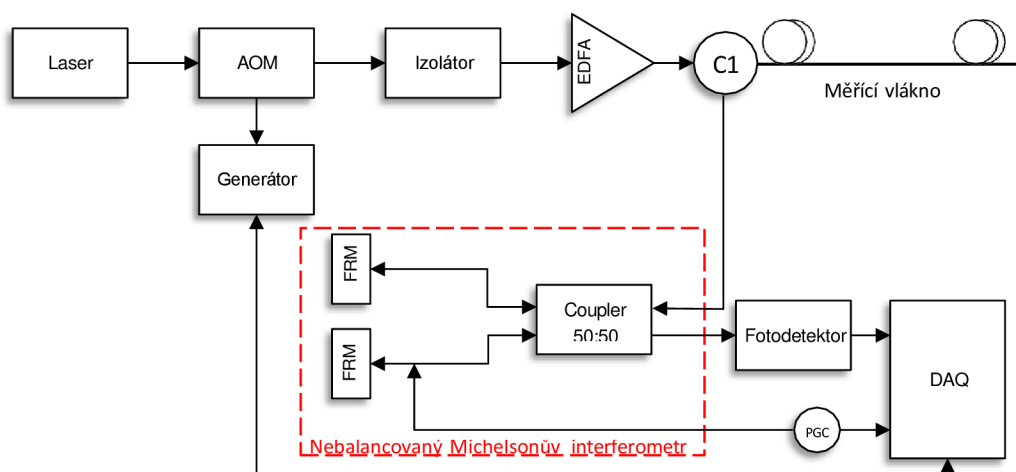
3.5.2 Michelsonův interferometr a Φ -OTDR

Jako druhý senzor spojující techniky měření zpětného rozptylu a interferenci světla bude v této práci rozebráno fázové OTDR spojené s Michelsonovým interferometrem využívající speciální PGC algoritmus. Nebalancovaný Michelsonův interferometr slouží v tomto zapojení k eliminaci nežádoucích polarizačních vlivů. Rayleigho zpětný rozptyl bude interferovat díky zpoždění mezi dvěma rameny interferometru a fáze tohoto signálu ponese měřené informace [1].

Tím, že do zapojení vložíme PGC signál, jehož frekvence je vyšší než snímáný signál a modulujeme jím jedno rameno interferometru, dosáhneme toho, že systém má relativně stabilní citlivost na změny fáze. Jako zdroj světelného signálu je použit vysoce koherentní laser s úzkou spektrální čarou. Kontinuální světelné záření je modulováno akusticko-optickým modulátorem, přičemž šířka pulzu a frekvence je udávána generátorem. Dále je tento signál zesílen pomocí EDFA zesilovače [1].

Následně tyto pulzy putují měřícím vláknem a v čase generují Rayleigho zpětný rozptyl. Optická cesta mezi EDFA zesilovačem, měřícím vláknem a MI je kontrolována pomocí cirkulátoru. Nevyvážený Michelsonův interferometr je poté použit k tomu, aby Rayleigho rozptyl interferoval na výstupu tohoto interferometru a generoval tak požadovaný signál. Fáze interferovaného signálu nese snímanou informaci [1].

Faradayova zrcadla jsou v zapojení použita k redukci nežádoucích polarizačních vlivů. Signál je poté detekován vysoce citlivým fotodetektozem. FFT je provedena k identifikaci generovaných frekvenčních složek signálu po celé délce vlákna [1].



Obr. 3.29: Zapojení nebalancovaného Michelsonova interferometru

4. KLÍČOVÉ STAVEBNÍ PRVKY INTERFEROMETRŮ

Pro lepší pochopení problematiky byla nejdříve provedena studie důležitých klíčových prvků využívaných v interferometrických senzorech.

4.1 Couplery 2x2

Světelný svazek je při průchodu interferometrem třeba rozdělit z důvodu sledování rozdílů změny světelného toku u měřicí a referenční větve. Rozdělení je dané v určitém poměru za cenu snížení amplitudy signálu.

Coupler 2x2 (popřípadě 1x2) je jeden z nejběžněji používaných couplerů. Tvoří jej dvě optická vlákna, která jsou při vysoké teplotě přes sebe překroucena, natáhnuta a zatavena. Jádra optických vláken se skoro dotýkají a tím coupler získává své vlastnosti. Dle délky sváru se určuje dělicí poměr tohoto coupleru. Například 30/70, ale nejčastěji se jedná o 50/50. Z toho plyne, že signál rozdělí do dvou výstupních vláken ve stejném poměru. Níže bude text věnován převážně couplerům s dělicím poměrem 50/50 [1].

Přesnost dělicího poměru coupleru 2x2 je poměrně těžké přesně určit. Přesnost ovlivňuje hned několik faktorů. Ať už se jedná o fyzické poškození nebo o faktory, které se nedají ovlivnit. Optické vlákno je velmi citlivé na fyzické poškození. Může se jednat o mikrostopické prasklinky nebo miniaturní nečistoty, které dokáží negativně ovlivnit výslednou přesnost coupleru. Druhým faktorem jsou případy, kdy již není ovlivněno vlákno, ale spíše způsob měření. Rozdílné přesnosti dosahuje coupler při používání různých vlnových délek zdroje koherentního záření. Je nutné počítat s tím, že jinou přesnost bude mít coupler při použití vlnové délky 1310 nm a jinou při použití vlnové délky 1550 nm. Dalším faktorem ovlivňujícím přesnost, v této kategorii je samotný dělicí poměr. Coupler dosahuje jiné přesnosti, pokud například použijeme dělicí poměr 50/50, a nebo pokud použijeme coupler s poměrem 10/90 [1].

U coupleru typu 2x2, popřípadě 1x2, je možné využít dva druhy couplerů. První druh je tzv. jedno-oknový (Single Window). Tento coupler má již při výrobě definováno, se kterou vlnovou délkou může pracovat. Například tedy pokud je využíváno coupleru, který má definovanou vlnovou délku 1310 nm, lze měřit pouze na této vlnové délce. Pokud by bylo měřeno na jiné, například na 1550 nm, mohlo by dojít ke změně dělicího poměru signálů. Druhý druh je tzv. dvou-oknový (Dual Window), kdy tento coupler umožňuje měřit na obou definovaných vlnových délkách. Tudiž umožňuje měření například jak na vlnové délce 1310 nm, tak i na 1550 nm, aniž by došlo ke změně dělicího poměru. Ona výhoda je však vykoupena nižší přesností coupleru. Zatímco u jedno-oknových couplerů se přesnost prakticky neliší, a to ať už se měří na vlnové délce 1310 nm nebo na vlnové

délce 1550 nm, tak u dvou-oknového coupleru je přesnost nižší s porovnáním jedno-oknového [1].

Tab. 4.1: Tabulka parametrů couplerů Go4fiber. [7]

Sledované parametry	jedno-oknový (SW)			dvou-oknový (DW)		
vlnová délka (nm)	1310 nebo 1550			1310 a 1550		
dělicí poměr (%)	50/50	30/70	10/90	50/50	30/70	19/90
maximální nadměrné ztráty (dB)	0,1					
maximální vstupní ztráty (dB)	3,4	5,6/1,8	10,8/ 0,65	3,5	5,9/1, 9	5,9/ 1,9
maximální ztráty závislé na polarizaci (dB)	0,08	0,1/0,08	0,1/ 0,05	0,1	0,1/ 0,08	0,1/ 0,05
minimální zpětná ztráta (dB)	50					
minimální směrovost 1x2 (dB)	50					
maximální směrovost 2x2 (dB)	65					

Uvedené přesnosti jsou pro couplery 2x2 a 1x2, nabízených společností Go4fiber.

Tab. 4.2: Tabulka parametrů couplerů ThorLabs [7]

-	jedno-oknový (SW)						dvou-oknový (DW)		
vlnová délka (nm)	13 10			15 50			1310 a 1550		
dělicí poměr (%)	50/ 50	30/7 0	10/90	50/ 50	30/70	10/90	50/ 50	30/ 70	19/9 0
WDL_1 (dB)	$\leq 0,15$	$\leq 0,15$	$\leq 0,15$	$\leq 0,15$	$\leq 0,15$	$\leq 0,15$	0,2		
IL_2 (dB)	$\leq 3,6$	$\leq 1,6/\leq 6,8$	$\leq 0,7/\leq11,4$	$\leq 3,6$	$\leq 1,6/\leq 6,8$	$\leq 0,7/\leq11,4$	3,8	-	12,7/ 0,8
PDL_3 (dB)	$\leq 0,2$	$\leq 0,2$	$\leq 0,2$	$\leq 0,15$	$\leq 0,15$	$\leq 0,15$	$\leq 0,15$	-	$\leq 0,15$
minimální zpětná ztráta (dB)	60								
minimální směrovost(dB)	60								

Přesnost couplerů 2x2 je vytvořena průměrem hodnot uvedených výše. Jak již bylo popsáno přesnost se dá velmi těžce určit. Výsledné hodnoty pro couplery 2x2 jsou uvedeny v tab. 2.4. Přesnost couplerů je závislá na dělicím poměru, používané vlnové délce, zda se jedná o SM (singlemode) nebo MM (multimode) a také na výrobci.

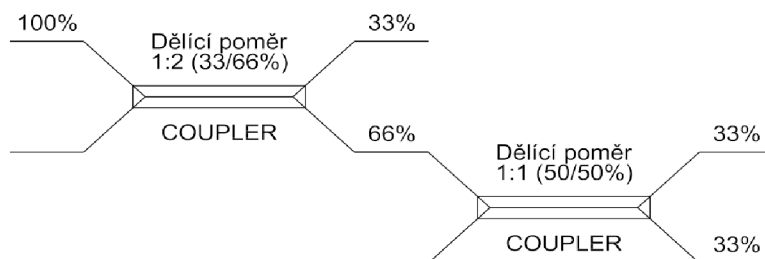
Tab. 4.3: Tabulka přesností 2x2 couplerů.

-	jedno-oknový (SW)						dvou-oknový (DW)		
vlnová délka (nm)	13 10			15 50			1310 a 1550		
dělicí poměr (%)	50/50	30/70	10/90	50/50	30/70	10/90	50/50	30/70	19/90
WDL_1 (dB)	0,125						0,15		
IL_2 (dB)	3,35	5,88/ 1,74	10,78/ 0,67	3,33	5,92/ 1,74	10,8/ 0,67	3,4	5,7/ 1,925	11,47/ 1,925
PDL_3 (dB)	0,12	0,143/ 0,12	0,15/ 0,103	0,11	0,123/ 0,103	0,13/ 0,087	0,15	0,125/ 0,115	0,133/ 0,1
minimální zpětná ztráta (dB)	5						5		
minimální směrovost (dB)	5						5		

Při porovnání výsledků přesností couplerů 2x2 s dělicím poměrem 50/50 je patrné, že nejpřesnější je použití coupleru na vlnové délce 1550 nm.

4.2 Coupler 3x3

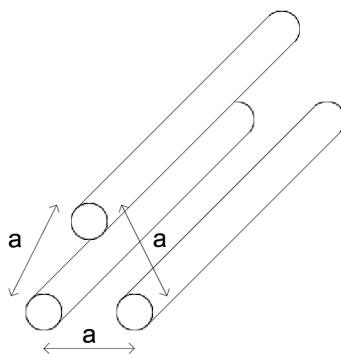
Coupler 3x3 se od výše uvedeného coupleru 2x2 liší již na první pohled počtem vstupů. To však není jediné, coupler 3x3 má úplně jiný princip dělení signálu světelného svazku. Je méně používaný než výše uvedený coupler 2x2. 3x3 couplery již nedělí signál na dva signály, ale na signály tři. Tudiž pokud vchází na vstup coupleru signál 100 % coupler 3x3 tento signál rozdělí a výstupem budou tři signály o amplitudě 33 % z amplitudy původního signálu. Tyto signály na výstupech budou vůči původnímu signálu také posunuty, konkrétně o $2/3 \pi$. Technologie výroby couplerů 3x3 je mnohem složitější než u couplerů 2x2. Existují dva nejvíce používané způsoby výroby těchto couplerů. První je řešen tak, že se využije dvou couplerů 2x2. Tyto couplery musí mít nastavený dělicí poměr tak, aby byly schopny rozdělit 100 % amplitudy signálu na tři výstupy, každý s danými 33 % amplitudy původního signálu.



Obr. 4.1: Coupler 1x3 ze dvou coulerů 2x2

Jak lze vidět na obrázku Obr. 4.1, využijí se dva couplery 2x2 nebo 1x2. První coupler s dělicím poměrem 1:2 a ten druhý s dělicím poměrem 1:1. Signál ze 100 % amplitudou je přiveden na vstup prvního coupleru s dělicím poměrem 1:2, zde se signál rozdělí v daném poměru a na prvním výstupu je dosaženo požadovaných 33 % amplitudy. Na druhém výstupu je pak zbylých 66 % amplitudy. Těchto 66 % amplitudy původního signálu je přivedeno na vstup druhého z couplerů s dělicím poměrem 1:1 (50/50). Zde se signál rozdělí znovu a na obou výstupech je 33 % původního vstupního signálu.

Druhá varianta výroby je o poznání složitější. Jedná se prakticky o stejnou technologii jako u couplerů 2x2 tudíž svařování optických vláken tak, aby se jejich jádra co nejvíce přiblížila k sobě. Zde je však důležité udržet stejnou vzdálenosti všech tří jader od sebe.



Obr. 4.2: Jádra coupler 3x3

4.2.1 Výpočty a přesnosti couplerů 3x3

Vyjádření intenzity na výstupech couplerů 3x3, je následující:

$$y_n(t) = C_1 C_2 \cos \left[\Phi(t) - (n - 1) \frac{2\pi}{3} \right], \quad 4.1$$

kde $n = 1, 2, 3$, C_1, C_2 jsou intenzity a kontrast interferenčních proužků a $\Phi(t)$ je optický fázový rozdíl mezi výstupy.

Definice fázového posunu je vyjádřena jako:

$$\Phi(t) = C_3 \cos(\omega t), \quad 4.2$$

kde C_3 je fázový rozdíl a ω je úhlová frekvence signálu.

U coupleru 3x3 jsou výstupní signály naprosto symetrické je možné využít následující rovnici:

$$\cos x + \cos\left(x - \frac{2\pi}{3}\right) + \cos\left(x + \frac{2\pi}{3}\right) = 0. \quad 4.3$$

4.2.2 Přesnost u měření couplerů 3x3

Příkladem je coupler společnosti Phoenic Photonics který má parametry dle tabulky Tab. 4.4.

Tab. 4.4: Tabulka přesností coupleru 3x3 od společnosti Phoenix Photonics.

SPECIFIKACE:	Jednotky	3x3 monolitické couplery	
Vlnová délka	nm	1310 nebo 1550	
Šířka pásma	nm	±20	
Dělicí poměr	%	33/33/33	
Třída		P	A
Nadměrné ztráty	dB	0,10	0,15
PDL	dB	<0,10	<0,15
Směrovost	dB	>55	>50
Typ. Vložný útlum	dB	4,9	5,0
Max. vstupní ztráty	dB	5,4	5,6
Jednotnost	dB	1,0	1,2
Monotónnost	dB	0,5/0,3/0,3	
Tepelná stabilita	dB/°C	0,003	
Operační teplota	°C	-40 až +85	
Skladující teplota	°C	-40 až +85	

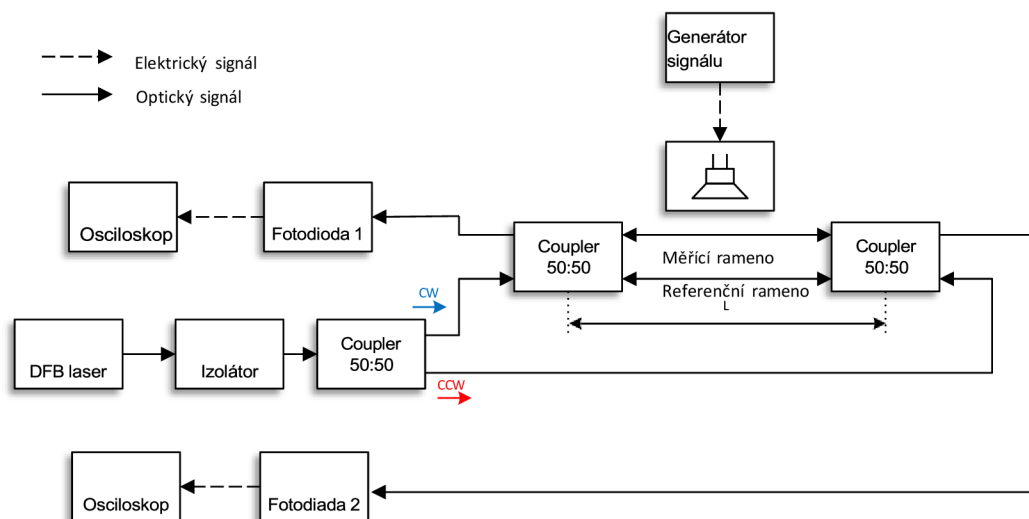
Couplery 2x2 které jsou dostupnější a také prodávány mají ve svých technických listech popsány většinou všechny důležité parametry. U couplerů 3x3 jsou parametry neúplně či zavádějící. Což znemožňuje dobrý výběr. Výběr couplerů pro měření byl proto zaměřen jen na prodejce, kteří uvádějí úplné informace o svých zařízeních, aby bylo možné daná měření i jejich části porovnávat.

4.2.3 Srovnání couplerů 3x3 a 2x2

Důležitým faktem srovnání je výrobní technologie výrobců couplerů. Ta je klíčovým prvkem přesnosti. Mezi couplery 2x2 a 3x3 není zásadní rozdíl jen z hlediska útlumu amplitudy. To je způsobeno dělicím poměrem. Obecně lze říci, že na základě měření vychází coupler 2x2 jako přesnější v dělicím poměru a ve zkreslení signálu.

5. MĚŘENÍ DUÁLNÍHO MACHOVA-ZEHNDEROVA INTERFEROMETRU

Duální Machův–Zehnderův interferometr byl vybrán z důvodu dostupnosti potřebných komponent a jednodušší konstrukci senzoru schopného lokalizovat zdroj vibrací.



Obr. 5.1: Blokové schéma zapojení DMZI

Pro laboratorní měření byla sestaveno testovací zapojení DMZI podle schématu na obrázku Obr. 5.1. Následující kapitoly popisují možnosti lokalizace vibrace pomocí DMZI.

Komponenty laboratorního zapojení pro měření

Pro laboratorní zapojení je stěžejní výběr komponent interferometru. Dále jsou stručně popsány.

Zdroj světelného záření – Laserová dioda

Jako zdroj světelného záření byla použita laserová dioda typu SLT5412, která je umístěna v přístroji s integrovanou teplotní stabilizací od společnosti ThorLabs, který se nachází na obrázku Obr. 5.2.

Výběr vhodného optického zdroje je při konstrukci interferometru jedním z nejdůležitějších aspektů. Podle výběru optického zdroje se dále odvíjí výběr dalších komponent. Jelikož pro konstrukci interferometru potřebujeme zdroj koherentního světla se stabilním výstupním paprskem, byla zvolena laserová dioda, která se vyznačuje lepšími vlastnostmi než LED dioda jako například vyšším vyzařovacím výkonem, užší spektrální šířkou, emitované světlo je monochromatické (jedné vlnové délky) a také mají mnohem větší koherentní délku.

V interferometru byla použita laserová dioda s těmito parametry:

- výstupní výkon laseru: 9,95 mW,
- vlnová délka ve vakuu: 1549,97 nm,
- nominální vlnová délka: 1553,33 nm,
- pracovní teplota: 25 °C.



Obr. 5.2: Řídící jednotka laserové diody

Na obrázku je zobrazeno zařízení, které bylo využito v zapojení. Přístroj obsahuje držák na upevnění laserové diody, čímž zajišťuje mechanickou stabilitu. Toto zařízení obsahuje řadu funkcí k ovládání a chlazení laserové diody. Zařízení je ovládáno barevným dotykovým displejem, který usnadňuje ladění a optimalizaci parametrů výstupu laseru. Provozní parametry jsou nastaveny pomocí intuitivního systému.

- Napájecí proud: až 1,5 A,
- Napájecí napětí: > 4 V.

Optický izolátor

Optický izolátor se používá z důvodu ochrany světelného zdroje. V případě DMZI, kdy jsou světelné paprsky vysílány proti sobě ve stejném optickém vlákně, kde se tyto paprsky částečně vracejí zpět ke světelnému zdroji a mohlo by tak dojít k poškození světelného zdroje. Tento optický prvek funguje tak, že propouští světelný signál pouze v jednom směru.

Optický izolátor má tyto parametry:

- operační vlnová délka: 1550 nm \pm 15 nm,
- průchozí útlum: 0,58 - 0,9 dB,
- zpětné ztráty: >55 dB,

- typ vlákna: SMF-28e,
- konektory: FC/APC.



Obr. 5.3: Optický izolátor

Vazební člen (coupler)

Vazební člen neboli coupler je optická součástka sloužící k rozdělení či sloučení optických signálů. V zapojení duálního Machova–Zehnderova interferometru jsou použity tyto couplery dokonce tři a všechny v dělicím poměru 50:50. Všechny couplery v tomto zapojení budou planární. Existují dva základní druhy coupleru, zde jsou uvedeny základní rozdíly.

- Planární coupler: vysoká kvalita, dobrá stabilita při všech poměrech, menší velikost, až 64 výstupů, použitelné pro vlnové délky 1260 - 1650 nm, jsou dražší a jejich výroba je složitější.
- Fúzní coupler: jednoduchá výroba, poměry mohou být upravovány, pracují pouze na třech vlnových délkách, až 32 výstupů, jsou levnější než planární coupler.



Obr. 5.4: Coupler

Optická vlákna a jejich propojení

Ramena interferometru byla realizována pomocí jednovidových optických vláken G.652 s konektory FC/APC. Tento druh propojovacích patch kabelů se využívá v mnoha aplikacích. Konektor je také důležitý prvek optického vlákna. Jedná se o pasivní optickou součástku, zajišťující rozebíratelný spoj optického vlákna s dalšími prvky. Vláknem je zalepeno ve feruli a jeho konec je zaleštěn spolu s čelem ferule do jedné plochy. Nejdůležitější vlastnosti konektoru jsou nízký útlum a vysoká opakovatelnost spojení. Propojení optických vláken a coupleru bude realizováno pomocí optických spojek. Tyto spojky vnášejí do zapojení útlum

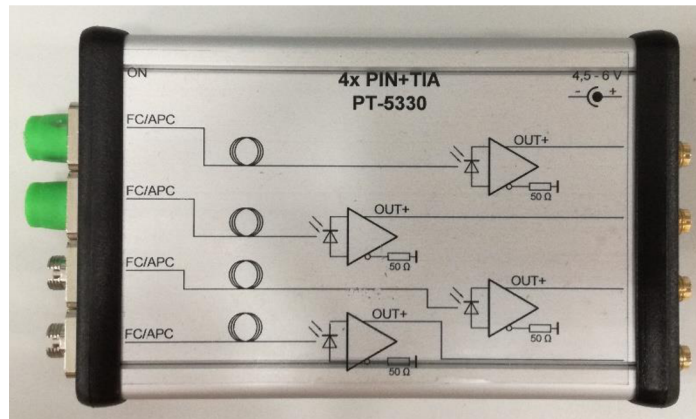
a požadavkem na kvalitní spojku je, aby tento útlum byl co nejnižší.

Fotodetektor

V praxi je více možností jak převádět optický signál na elektrický. V tomto zapojení bude použit PIN detektor s transimpedančním zesilovačem typu PT-5330. PIN detektory mají vysokou kvantovou účinnost a rychlou odezvu.

Technické parametry detektoru:

- detektor: InGaAs,
- napájecí napětí 3,15-3,45 V,
- napájecí proud (bez zátěže): 40 mA,
- detekční pásmo vlnové délky: 1100-1650 nm,
- šířka pásma: 450 MHz.



Obr. 5.5: Fotodetektor PT-5330

Digitální USB osciloskop

Ke snímání již převedeného signálu optického na elektrický byl použit digitální USB osciloskop Analog Discovery 2 od výrobce Digilent. Jedná se o kompaktní zařízení, které může plnit řadu funkcí jako např. umožňuje uživateli měřit, zobrazovat, generovat či zaznamenávat různé druhy signálů. Velká výhoda tohoto zařízení je v jeho malé velikosti a váze, takže je možné ho bez problému přemístit, kam je třeba, připojit k počítači a měřit. Pro měření DMZI je nejdůležitější vlastností tohoto zařízení to, že může pracovat jako dvou kanálový digitální osciloskop o parametrech:

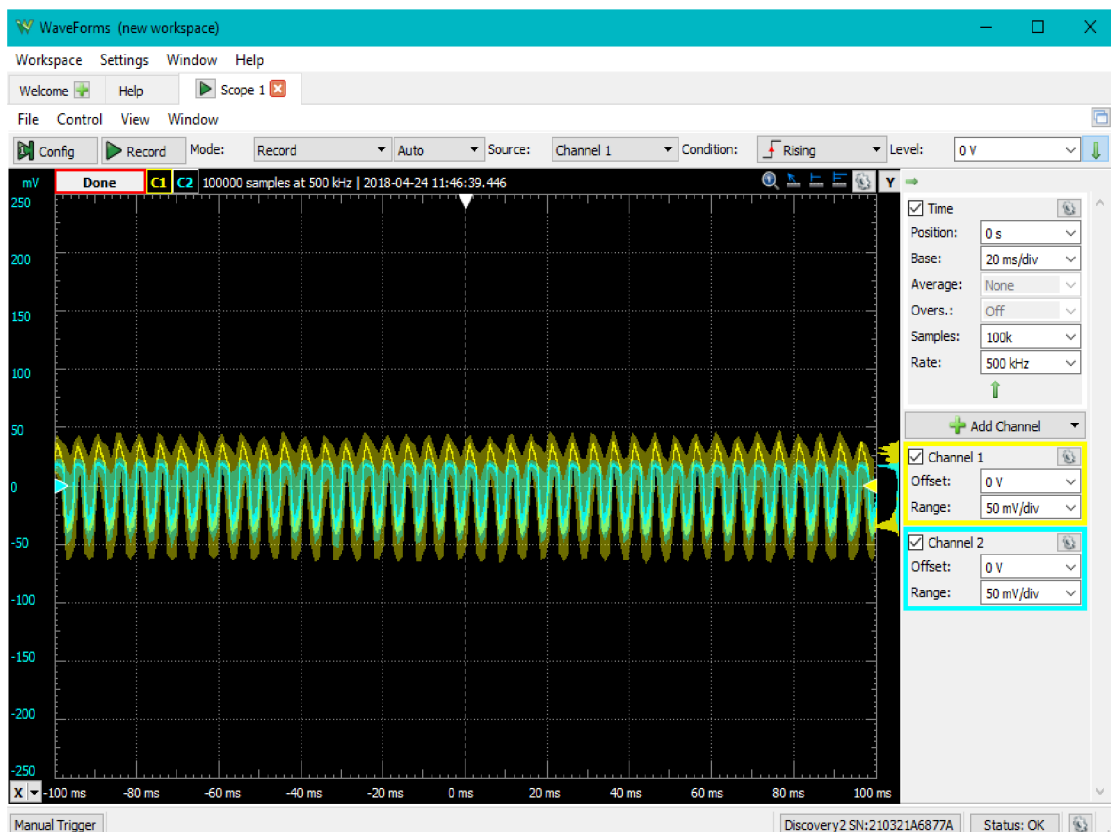
- vstupní impedance: 1 M Ω ,
- rozlišovací schopnost: 14 bitů,
- vzorkovací frekvence: 100 MS/s,

- šířka pásma: 30 MHz.



Obr. 5.6: Digitální USB osciloskop Analog Discovery 2.

Jak již bylo řečeno, USB osciloskop je připojen k PC, na kterém je nutné mít nainstalovaný software Waveforms 2015, který je volně ke stažení na oficiálních webových stránkách výrobce Digilent. Grafické uživatelské rozhraní tohoto softwaru je zobrazeno na obrázku Obr. 5.7. Ovládání programu je velice intuitivní a podobné ovládání klasického osciloskopu, jen s tím rozdílem, že veškeré nastavení se provádí nastavováním hodnot na počítači. Software může pracovat v několika režimech, jako například mód zobrazení signálu v reálném čase nebo změření a zaznamenání časového úseku.



Obr. 5.7: Grafické rozhraní programu Waveforms.

Generátor signálu a reproduktor

V tomto měření se snímaly a vyhodnocovaly vibrace působící na jednovidové optické vlákno. Tyto vibrace byly uměle vytvářeny za pomoci generátoru signálu ESCORT EGC-3235A. Tento generátor za pomoci sinusového signálu o námi zvolených frekvencích budil reproduktor, který vytvářel vibrace působící na část optického vlákna, v různých vzdálenostech mezi couplery.

5.1 Zpracování dat z měření - aplikace v programovacím prostředí Matlab

V předchozích kapitolách byla rozebrána aplikace, která slouží k simulaci výstupních signálů na fotodetektorech duálního Machova–Zehnderova interferometru a následně se z těchto údajů počítá pozice zdroje vibrací v okolí vlákna.

Tato kapitola se bude opět věnovat aplikaci, avšak tato aplikace bude zpracovávat reálné výsledky měření z duálního Machova–Zehnderova interferometru, který byl sestaven a odzkoušen.

Měření tohoto zapojení probíhalo v několika etapách a byly odzkoušeny krátké i delší měřicí úseky optických vláken. Následně probíhal vývoj aplikačního softwaru v závislosti na potřebách měření z důvodu dosažení co nejlepších výsledků.

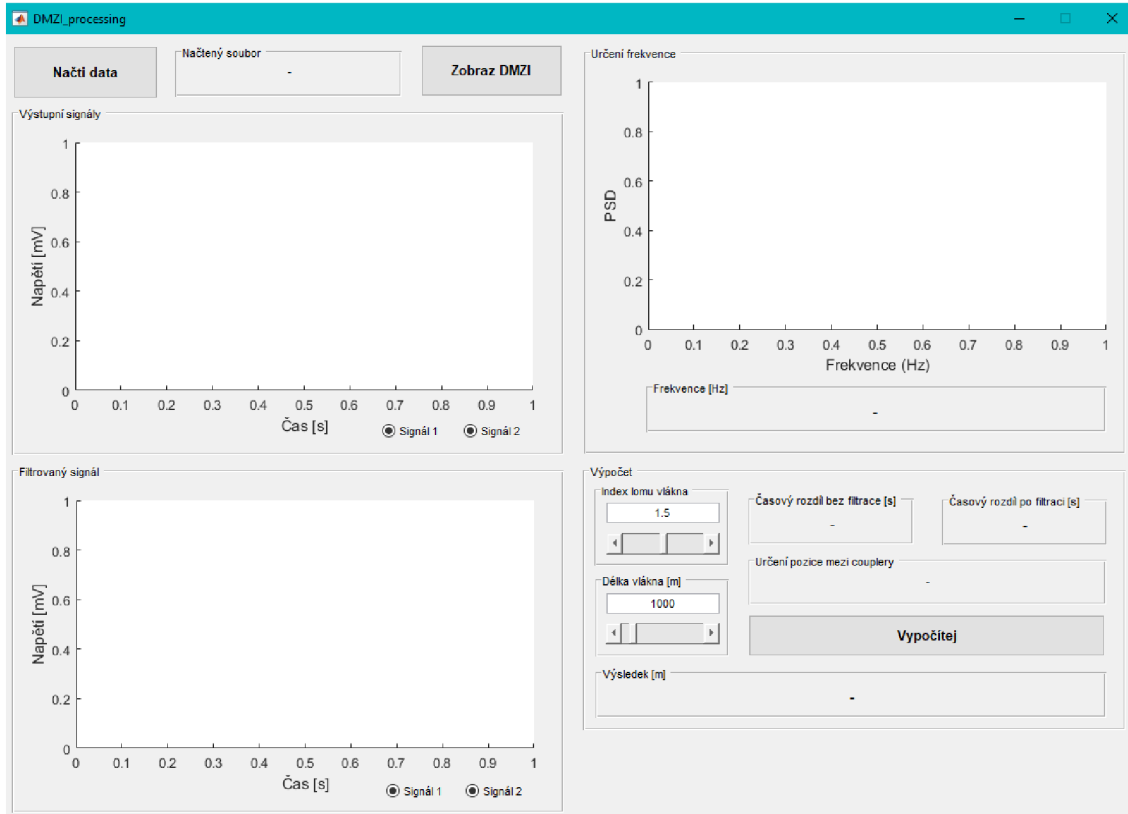
5.1.1 Popis aplikace a grafického uživatelského rozhraní

V horní části aplikace se nachází tlačítko Načti data, kterým se jednoduše načtou pořízená data do aplikace ze souboru ve formátu *.csv. Vedle tohoto tlačítka je pole, ve kterém je zobrazen název načteného souboru pro větší přehlednost při používání aplikace. Sadu těchto tlačítek doplňuje tlačítko Zobraz DMZI, kdy stisk tohoto tlačítka vyvolá blokové schéma duálního Machova–Zehnderova interferometru pro názornost při práci.

Pod výše zmíněnými tlačítky se nacházejí dva grafy, první graf vykresluje signály, které byly naměřeny na výstupu DMZI pomocí fotodetektoru, bez dalších úprav. Na druhém grafu v prvním sloupci jsou vykresleny signály po filtraci vyšších frekvenčních složek, které ruší užitečný signál potřebný k dalšímu zpracování. Po této filtraci je signál plynulejší, méně zarušený. V obou těchto grafech je pomocí tlačítek (tzv. radio buttons) umožněno uživateli odebrat z grafu jeden či druhý signál a vykreslit pouze signál zachycen požadovaným fotodetektorem.

V pravé horní části aplikace se nachází graf, který zobrazuje závislost výkonu spektrální hustoty na frekvenci. Prakticky tento graf ukazuje, při jaké frekvenci má výkon spektrální hustoty nejvyšší hodnotu a podle tohoto algoritmu dokáže aplikace určit přesnou frekvenci přijatého signálu v určitém časovém úseku.

Nejdůležitější část aplikace se nachází v pravém dolním rohu, tato část je označena jako výpočet. V této části se nastavují hodnoty indexu lomu optického vlákna a jeho délka. Po nastavení těchto hodnot a stisku tlačítka Vypočítej, aplikace vypíše hodnotu Δt jak před filtrací, tak po filtraci, následně zobrazí od kterého coupleru se pozice určuje a ve spodním okně je vypsána pozice, kde se vibrace na vlákne přibližně vyskytuje.

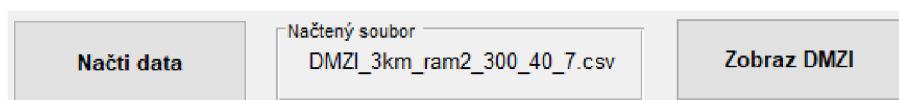


Obr. 5.8: Aplikační software sloužící ke zpracování dat z DMZI

5.1.2 Popis jednotlivých komponent aplikace

V této části budou podrobněji popsány části aplikace a vysvětleny nejdůležitější části kódu, vytvořeného v prostředí Matlab za pomoci rozšíření GUIDE.

Načtení souboru



Obr. 5.9: Načtení souboru a výpis jména souboru.

Po stisku tlačítka Načti data se zobrazí nabídka výběru požadovaného souboru, kde si uživatel zvolí soubor, který chce v aplikaci zpracovat. Po výběru souboru a potvrzení, se tento soubor načte do aplikace a jeho název se zobrazí v poli Načtený soubor. Tyto úkony

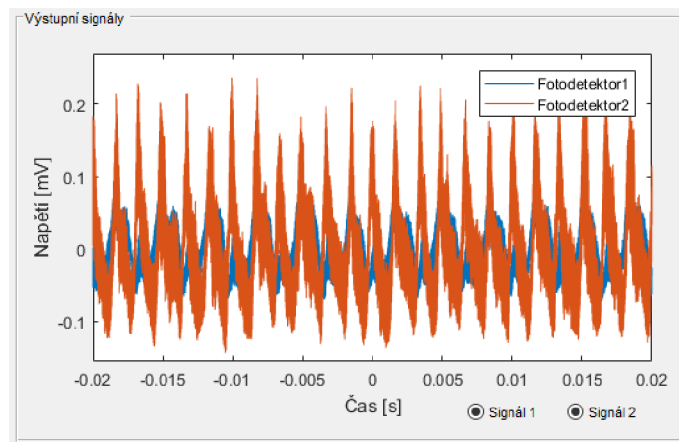
jsou naznačeny v následujícím bloku kódu, kde je soubor načten pomocí příkazu `uigetfile()`, a data jsou uložena do proměnné příkazem `csvread()`. Z této proměnné následně aplikace vybírá data po sloupcích a ukládá do proměnných pro čas a dva kanály osciloskopu.

Načtení souboru *.csv.

```
[FileName , PathName ] = uigetfile ( '* . csv ' ); % načti soubor
complete Path      = strcat( PathName , FileName ); set(
handles. file_name , ' String ' , FileName ); % vypiš název namer =
csvread( completePath , 17 , 0 ); % vlož data do souboru time = namer
(:, 1 ); % vyber první sloupec z proměnné channel1 = namer (: , 2 );
channel2 = namer (: , 3 );
```

Obr. 5.10: Vykreslení výstupních signálů

V této části aplikace jsou vykreslena data, která jsou přijata na dvou kanálech osciloskopu. Data nejsou nijak upravena a jak je vidět na obrázku Obr. 5.11 signály mohou být značně ovlivněny šumem a to především při měření na delší vzdálenosti. Součástí tohoto grafu jsou dvě tlačítka ve spodní části, která slouží k přidání či odebrání signálů z grafu pro větší přehlednost.



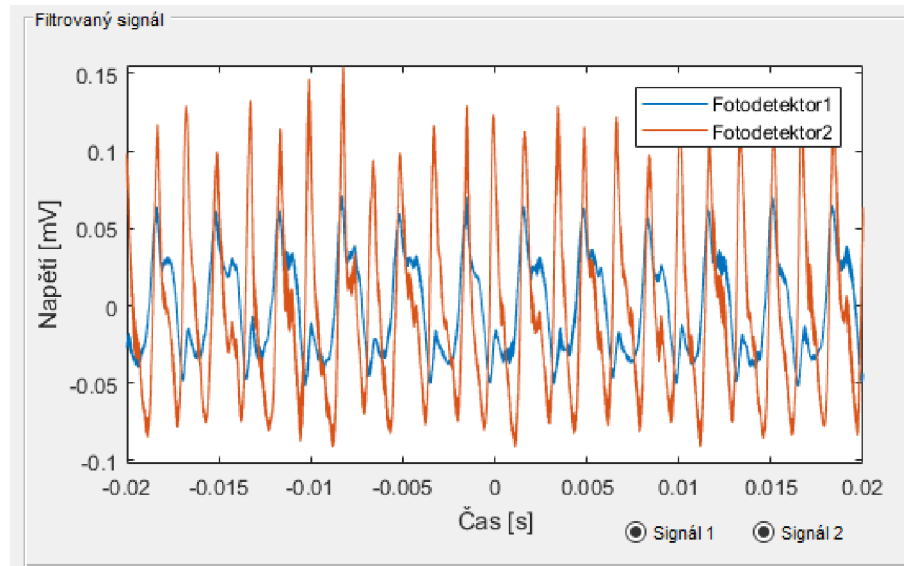
Obr. 5.11: Vykreslení nefiltrovaných signálů na obou fotodetektorech.

Vykreslení signálů

```
plot( handles. graf1 , time , channel1 , time , channel2 ); legend
( handles. graf1 , ' Fotodetektor1 ' , ' Fotodetektor2 ' ); axis(
handles. graf1 , [ -0.02 0.02 -inf inf ] ); xlabel( handles.
graf1 , ' Čas [ s ] ' );
ylabel( handles. graf1 , ' Napětí [ mV ] ' );
```

Obr. 5.12: Filtrace výstupních signálů

Redukce šumu vstupních signálů byla řešena digitálním filtrem. Tento šum bylo potřeba odstranit pro přesnost výsledného výpočtu. Šum byl odstraněn za pomoci filtru dolní propusti, kterým byly odfiltrovány vyšší frekvenční složky signálů.



Obr. 5.13: Vykreslení filtrovaných signálů na obou fotodetektorech.

Filtr byl vytvořen pomocí funkce `designfilt()`, což je funkce prostředí Matlab, která umožňuje vymodelovat digitální filtr pro potřeby aplikace. Při návrhu tohoto filtru je možné volit řadu parametrů, jak je zřejmé ve výpisu, např. typ filtru, hraniční frekvenci, algoritmus tvorby tohoto filtru.

Práce s digitálním filtrem je naznačena ve výpisu kódu. Opět i v tomto grafu je možné odebrat jeden nebo druhý signál z vykresleného grafu, aby měl uživatel názornější náhled na konkrétní signál. Filtrované signály byly vykresleny stejným způsobem, jak je znázorněno ve výpisu.

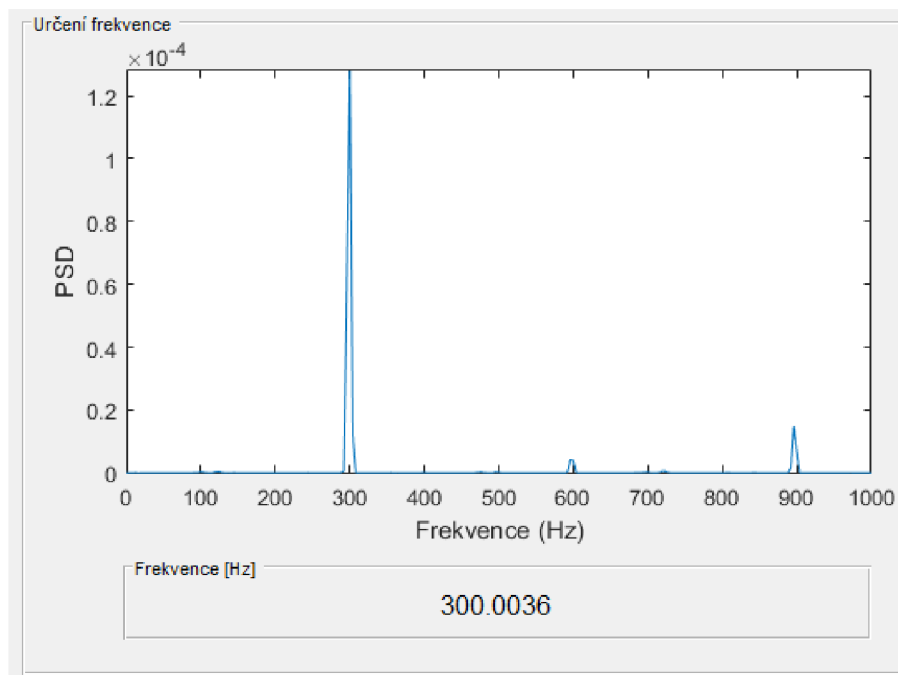
Filtrace signálů

```
DeFilt = designfilt('lowpassfir','FilterOrder',20,'
CutoffFrequency',350,'DesignMethod','window','Window',
{@kaiser,3},'SampleRate',Fs); %vytvoření filtru
y1 = filter(DeFilt,channel1); %filtrace 1. signálu
y2 = filter(DeFilt,channel2); %filtrace 2. signálu
```

Obr. 5.14: Určení frekvence signálu

Tato část aplikace se věnuje získání přesné frekvence signálu z naměřených dat. Frekvence se v aplikaci určuje podle výkonu spektrální hustoty (PSD) závislé na frekvenci. Prakticky nám graf ukazuje, při jaké frekvenci je energie spektrální hustoty

nejvyšší a podle toho určuje hledanou frekvenci. Tento graf můžeme vidět na obrázku Obr. 5.15.



Obr. 5.15: Vyhodnocení frekvence výstupního signálu.

Jak je vidět z výpisu, ke zjištění frekvence je použita funkce `pwelch()`, což je Welchova metoda odhadu spektrální hustoty využívající FFT (Fast Fourier Transformation) a sloužící k převodu signálu z časové oblasti do frekvenční. Tato metoda vrací odhad výkonu spektrální hustoty a z tohoto odhadu následně vybereme maximální hodnotu spektrální hustoty, kde z maximální hodnoty určíme hledanou frekvenci. Na obrázku Obr. 5.15 je vidět odhad frekvence při generování signálu o frekvenci přesně 300 Hz na optickém vlákně délky 3 km.

Zjištění frekvence

```
Nfft = length(channel1); %počet vzorků signálu
[Pxx,f] = pwelch(channel1,gausswin(Nfft),Nfft/2,Nfft,Fs); [~,
loc] = max(Pxx); %max PSD
FREO_ESTIMATE = f(loc); %odhadovaná frekvence
```

Obr. 5.16: Výpočet pozice zdroje vibrací

Jedná se o klíčovou část aplikace. Její rozložení můžeme vidět na obrázku Obr. 5.16. V této části aplikace se za pomoci algoritmů, které budou uvedeny dále zjišťuje poloha zdroje vibrací v okolí optického vlákna.

V první řadě se v této části aplikace nastavují dva důležité parametry optického vlákna a to jeho index lomu a délka. Jak je vidět z obrázku Obr. 5.17 je toto nastavení

realizováno editovatelným polem, které je doplněno o posuvník a tak má uživatel dvě možnosti jak tyto hodnoty nastavit.

Obr. 5.17: Výpočet pozice zdroje vibrací.

Dále je v aplikaci vypočítána časová odchylka Δt jak pro signál filtrovaný tak pro signál bez úprav. V aplikaci se počítá s odchylkou signálů filtrovaných z důvodu vyšší přesnosti. Jelikož je Δt nejdůležitější parametr z hlediska lokalizace vibrací, bylo třeba vyřešit, jakým způsobem ze dvou signálů získat tuto hodnotu. Pro získání této hodnoty bylo využito funkce `xcorr()`, která slouží ke křížové korelaci dvou signálů. Tato funkce vrací křížovou korelaci dvou diskretních signálů, v tomto případě vyfiltrovaných signálů dvou kanálů osciloskopu. Křížová korelace měří podobnost mezi prvním kanálem a posunutým druhým kanálem jako funkci zpoždění. Funkce také vrací vektor se zpožděním, ve kterém byla korelace počítána. Použití této techniky je znázorněno ve výpisu.

Výpis časového rozdílu dvou stejných signálů

```
[acor ,lag ] = xcorr(y1 ,y2); %křížová korelace [~,
I] = max(abs(acor));
lagDiff = lag(I); %rozdíl zpoždění timeDiff =
lagDiff/Fs; %časový rozdíl
```

Obr. 5.18: Výpočet časového rozdílu

Jelikož se pozice vibrace v tomto zapojení počítá mezi dvěma couplery, musí se určit, od kterého coupleru tuto vzdálenost počítáme, z toho důvodu, že rovnice pro výpočet pozice vibrací dokáže určit jako maximální vzdálenost polovinu délky měřeného optického vlákna. Prakticky se jedná o to, že aplikace musí zjistit, který signál je zpožděný a tak určit, ke kterému coupleru se pozice zdroje vibrací váže.

Určení vztažného coupleru

```

if(delta_t >= 0)
set(handles.pozice, 'String', 'Měřeno od coupleru 1'); elseif(
delta_t < 0)
set(handles.pozice, 'String', 'Měřeno od coupleru 2');

```

Obr. 5.19: Výpočet coupleru

Jak je vidět z výpisu výše, v aplikaci je tento problém vyřešen tak, že porovnává výstup křížové korelace Δt a podle toho jestli je hodnota kladná nebo záporná určuje coupler, ke kterému se měření vztahuje. Závěrečná část aplikace slouží k samotnému výpočtu pozice vibrace z naměřených a zvolených hodnot dle rovnice:

$$x = \frac{1}{2} \cdot \left(L - \frac{c \cdot \Delta t}{n} \right) [\text{m}] \quad 5.1$$

kde x je vzdálenost zdroje vibrací od coupleru, L celková délka měřené trasy, c rychlost světla, n index lomu optického vlákna a Δt je časový rozdíl mezi dvěma signály.

Výpočet pozice vibrace

```

L = get(handles.slider_delka, 'Value'); %délka vlákna
n = get(handles.sliderIndex, 'Value'); %index lomu
c = 299792458; %konstanta rychlosti světla vysl
= 0.5*(L -(c* delta_t2 )/n);

```

Obr. 5.20: Výpočet pozice vibrace

Na výpisu je naznačen výpočet v aplikaci. Hodnoty L a n jsou zde získány z nastavení posuvníků a rychlost světla je přesně nastavena.

5.2 Výsledky měření duálního Machova-Zehnderova interferometru

Měření probíhalo v několika etapách v laboratoři optických sítí. Proběhlo měření různých délek optických vláken, kdy se vlákna budila světelným signálem různých výkonových úrovní tak, aby výsledky měření byly co možná nejpřesnější. Vlákna pro měření byla použita jednovidová. Při měření se experimentovalo i s uchycením optického vlákna ke zdroji vibrací. V následující kapitole budou popsány výsledky těchto měření, jak z hlediska frekvenčního, tak vyhledávání pozice zdroje vibrací. V tabulce jsou převedeny hodnoty vstupního proudu laseru na optický výkon na jeho výstupu.

Tab. 5.1: Výkonová charakteristika použitého laseru.

Vstupní proud [mA]	Optický výkon [mW]
25	3,98
30	5,03
35	6,09
40	7,11
45	8,23
50	9,25

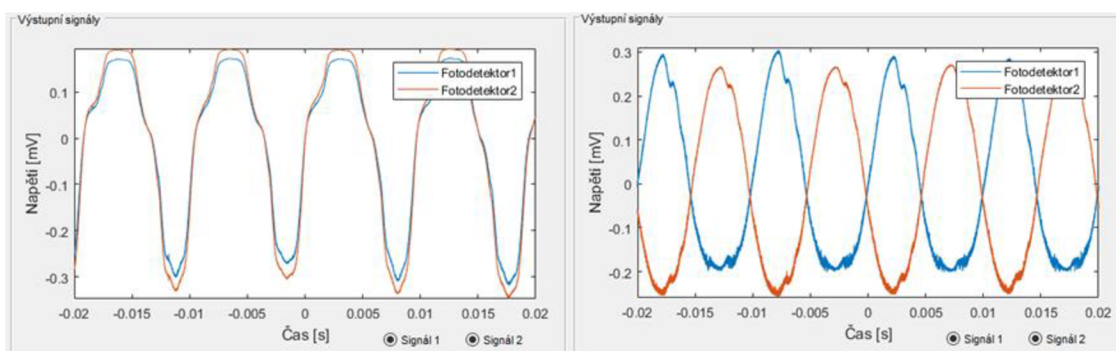
5.3 Měření vláken krátkých délek

Měřením vláken kratších vzdáleností je myšleno použití optických vláken délky do deseti metrů. Měření těchto druhů vláken bylo minimálně rušeno nežádoucím vlivem vnějšího prostředí, takže průběhy signálů byly na osciloskopu jasně zřetelné, a tudíž i zjištění frekvence bylo bez problémů.

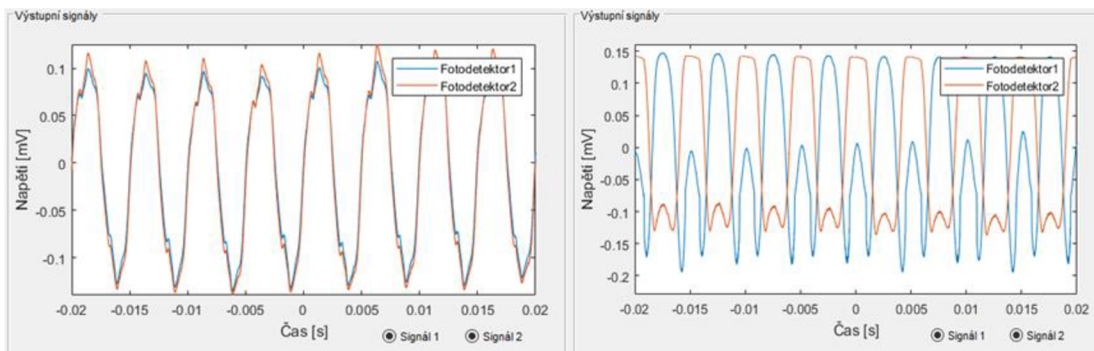
5.3.1 Měření frekvence vibrací

Jak již bylo řečeno v úvodu této práce, interferometry jsou velice přesné a citlivé senzory pokud se jedná o měření vibrací a jinak to není ani u duálního Machova–Zehnderova interferometru. Pro měření krátkých vláken byly použity propojovací optické kabely o délkách 2 a 5 metrů.

Při měření těchto délek vláken byly průběhy signálů čisté a neovlivněny rušením. Díky tomu bylo možno jednoduše určit frekvenci i bez použití filtrů jak je vidět z průběhů signálů na obrázku Obr. 5.21, Obr. 5.22, a také na Obr. 5.23.



Obr. 5.21: Vlevo signál 100 Hz působící na jedno rameno, vpravo signál působící na obě ramena

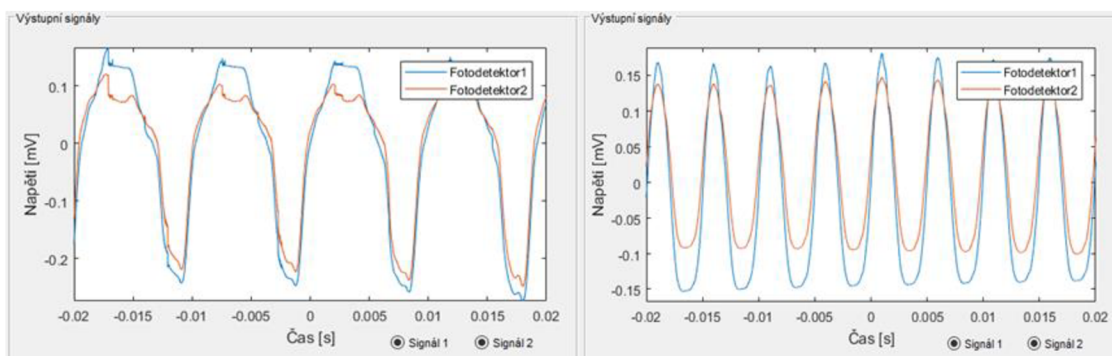


Obr. 5.22: Vlevo signál 200 Hz působící na jedno rameno, vpravo signál působící na obě ramena

Na obrázku Obr. 5.22 jsou zobrazeny výstupy aplikace, kdy měřené vlákno bylo délky 2 metry a reproduktor byl buzen signálem o frekvenci 100 Hz a 200 Hz. Laser byl při tomto měření napájen vstupním proudem 30 mA. Jak je vidět průběhy signálů na obrázcích jsou plynulé a nezarušené a i pouhým pohledem je možné odhadnout periodu signálu a spočítat danou frekvenci, takže aplikace využívající Welshův algoritmus neměla žádný problém při určování přesné frekvence.

Při tomto měření bylo dále zjištěno, že pokud vibrace působí na jedno rameno interferometru, je fáze obou signálů stejná. Jestliže však vibracím vystavíme obě ramena interferometru, fáze jednoho signálu je otočena, respektive posunuta o 180° , ovšem na výsledky detekce vibrací to nemá vliv.

Na obrázku Obr. 5.23 je provedeno identické měření za použití vlákna o délce 5 metrů, vstupní proud laseru byl opět 30 mA. Je vidět, že tato délka vykazuje stejné výsledky jako předchozí kratší vzdálenost. Frekvence je opět zjištěna aplikací velmi přesně. Frekvence 100 Hz a 200 Hz nebyly nijak zásadní pro měření pozice vibrací. Interferometr je schopen přesně měřit frekvence i 2 kHz velmi přesně, jak bylo ověřeno při laboratorním měření.



Obr. 5.23: Měření vlevo 100 Hz a 200 Hz vpravo na vláknu 5 m

5.4 Měření dlouhých úseků optických vláken

Další částí měření bylo testování dlouhých optických vláken a ověření funkce interferometru i na vzdálenosti delší jak 1 km.

5.4.1 Lokalizace vibrace

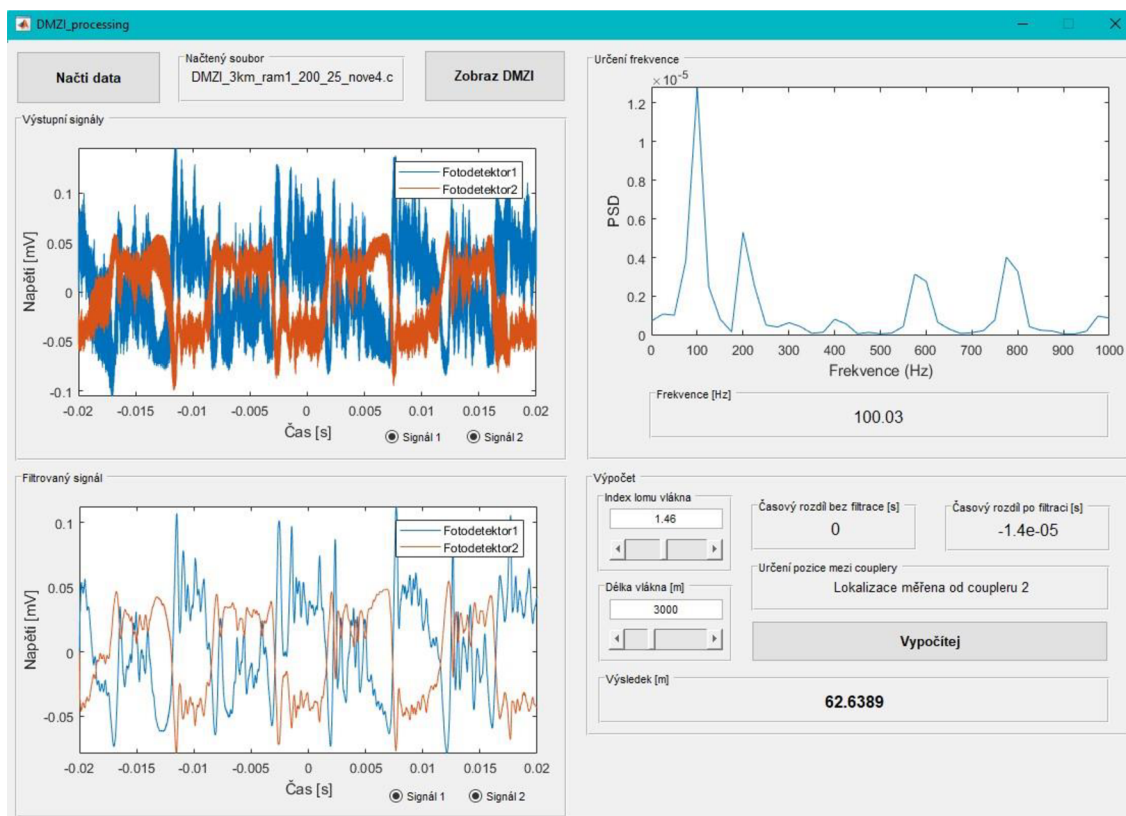
Měření probíhalo na optických vláknech délky 3 km z důvodu dostupnosti v laboratoři a také jsme byli omezeni tím, že k sestavení přístroje je potřeba zapojení dvou identických vláken. V závěrečných pokusech byl pokus změřit vlákna délky 6 km, avšak vlákna nebyla identická a tak měření postrádalo potřebnou přesnost.

5.4.2 Měření frekvence vibrací

Také u delších vláken byly měřeny frekvence do zhruba 300 Hz. U měřených vláken 3 km a 6 km, bylo značně patrné rušení vnějšího prostředí na výstupních signálech a tak bylo nutné v aplikaci použít i filtr typu dolní propusti pro větší přesnost. Avšak i u značně zarušených signálů, byla aplikace schopna velmi přesně určit měřenou frekvenci díky použitému algoritmu.

Na obrázku Obr. 5.24 je zobrazen výstup aplikace při měření vibrací na vláknech délky 3 km. Generátor vibrací byl buzen frekvencí 100 Hz a vstupní proud laseru byl 25 mA, vzhledem k doporučenému budícímu proudu dle technického listu diody. Z obrázku je jasně patrné, že při měření na tomto vláknech je signál rušen vlivem okolního prostředí, jelikož zapojení nebylo provedeno v odrušené místnosti nýbrž v laboratoři. Signály tedy nejsou ani zdaleka tak plynulé, jak tomu bylo při měření na vláknech délky 5 m. Proto je použit filtr typu dolní propusti vytvořen pomocí funkce Matlabu a tak v levé dolní části výstupu aplikace můžeme vidět signály po filtraci. I přes značné zarušení výstupního signálu je algoritmus stále schopen velmi přesně vypočítat frekvenci vibrací.

Měření na vláknech délky 6 km je zobrazeno na obrázku Obr. 5.25. Frekvence vibrací byla 305 Hz a vstupní proud laserové diody byl nastaven na 40 mA. Na tuto délku už bylo třeba zvýšit vstupní proud laserové diody a to kvůli útlumu trasy optického vlákna. I přes to, že vlákna nebyla totožná využili jsme vysokou koherentní délku diody která umožnila měřit i pomocí rozvážených ramen interferometru jak bude vysvětleno dále.



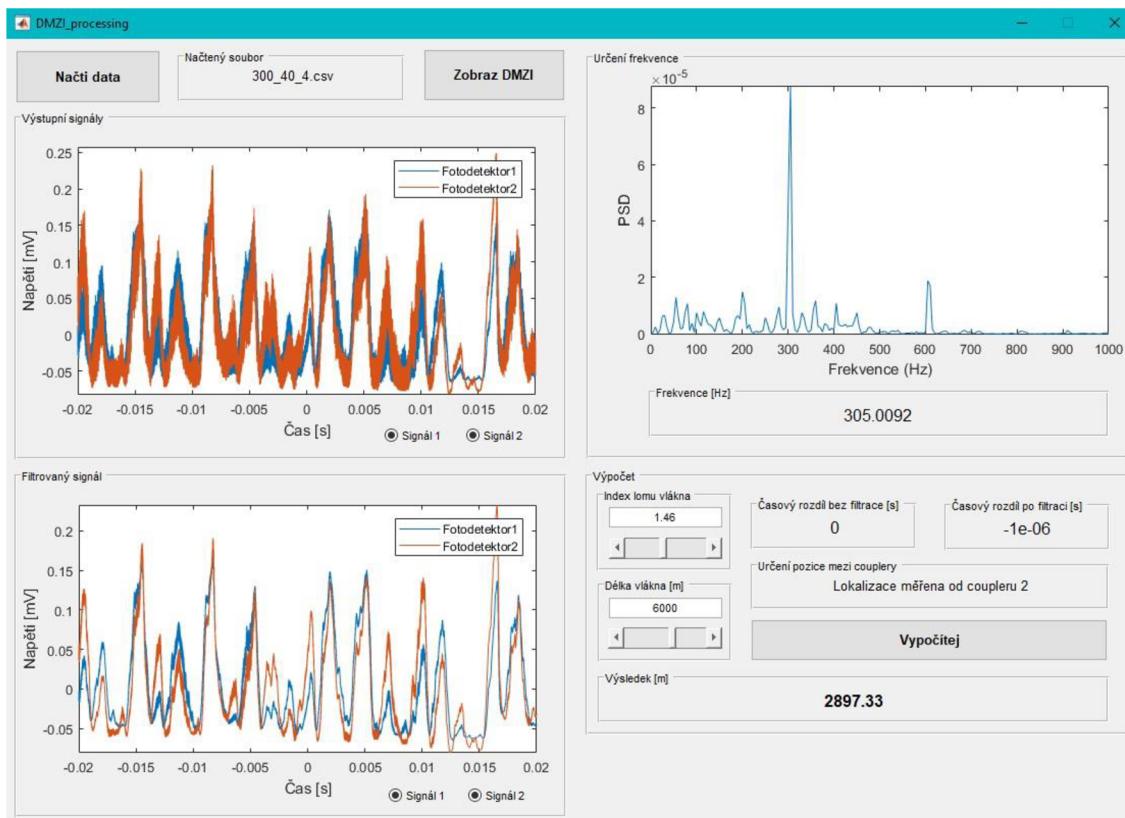
Obr. 5.24: Výstup aplikace pro 100 Hz a 3km vlákna.

5.4.3 Určení pozice zdroje vibrací

V části aplikace pro lokalizaci vibrací, která je zobrazena na obrázku výše byly nastaveny hodnoty měřených vláken podle jejich reálných parametrů, to znamená že index lomu optického vlákna byl nastaven na 1,46 a délka tohoto vlákna byla nastavena na 3000 m. Po stisku tlačítka Vypočítej aplikace vypočítala časový rozdíl před filtrací a po filtraci, pro aplikaci je důležitý rozdíl po filtraci, s kterým následně pracuje algoritmus pro výpočet pozice vibrací. Časový rozdíl byl tedy na našem vzorovém měření $-1,4 \cdot 10^{-5}$ s. Dále aplikace podle tohoto rozdílu vyhodnotila, od kterého optického coupleru je pozice počítána a konečně ve spodní části je vypsán výsledek tohoto měření v metrech.

Jak je tedy vidět z obrázku Obr. 5.24, časový rozdíl na vláknu délky 3 km už jsme schopni s použitými přístroji změřit a z toho vyplývá, že jsme schopni přibližně změřit i pozici zdroje vibrací.

Zdroj vibrací při tomto měření ležel zhruba 2 metry za couplerem a aplikace určila pozici na 62 metr vlákna. To se může jevit jako velká odchylka, ale pokud bereme v potaz, že jsme při tomto měření mohli pokrýt oblast 3 km je tato přesnost v těchto měřeních dostačující. Na obrázku Obr. 5.25 je vidět měření na vláknech délky 6 km. Detekce vibrace fungovala s podobnou tolerancí jako při předchozích měřeních.



Obr. 5.25: Výstup aplikace 300 Hz a 6 km vlákna.

5.4.4 Vyhodnocení měření

Měřením duálního Machova–Zehnderova interferometru byla ověřena jeho funkčnost, jak z pohledu měření frekvence tak lokalizace zdroje vibrací.

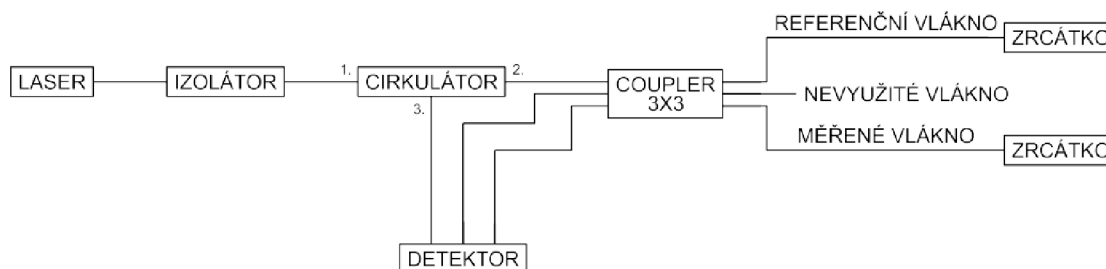
Při určování frekvence je toto zapojení velmi přesné, dokáže si poradit i s výrazně zarušeným signálem a frekvenci přijatého signálu dokáže přesně určit. Díky této vlastnosti je tento interferometr dobrá volba, pokud je třeba identifikovat zdroj vibrací za pomoci frekvenční analýzy. Tím je myšleno, určovat co způsobilo vibrace v okolí optického vlákna (jako například únik na produktovodu, kopání, vrtání, chůze, atd.). Určování pozice zdroje vibrací už byl těžší úkol než pouze určit jejich frekvenci. Jelikož se muselo pracovat s maximální přesností výpočtu minimálních časových rozdílů bylo třeba provádět měření velmi přesně a tak řada měření díky vnějšímu rušení nevyšla podle představ. Měření potvrdilo, že přibližně lokalizovat zdroj vibrací je možné pomocí duálního Machova–Zehnderova interferometru, avšak řada měření také tuto pozici neurčila. Pro získání lepších výsledků by bylo třeba provést více měření v terénu, generovat vibrace na různých úsecích vlákna a tak si udělat obrázek o chování výstupů v závislosti na vzdálenostech generátoru vibrací.

6. MĚŘENÍ MICHELSONOVA INTERFEROMETRU

Dalším velmi často používaným senzorickým systémem pro měření vibrací či seismických aktivit je Michelsonův interferometr. Ten má oproti předchozímu řešení v podobě duálního Machova-Zehnderova interferometru výhodu v tom že nemusí mít přístupný druhý konec svého zapojení. To znamená že, nemusíme být na druhé straně měřící trasy. Stačí na konec měřeného vlákna či trasy instalovat Faradayova zrcátka.

Zapojení se skládá ze zdroje záření, laserové diody SLT 5412 využitá také pro měření duálního Machova-Zehnderova interferometru. Na základě toho je možné porovnat výsledky obou měření. Laserový zdroj pracuje na vlnové délce 1507 – 1515 nm a jeho řídicí prvek umožňuje měnit vstupní proud, tím pádem teplotu a vlnovou délku. V zapojení je využit také izolátor z důvodu ochrany laserové diody při nechtěném odrazu záření od zrcátek. Izolátor odráží dopadající signál pomocí polarizačního filtru. Vstup laserové diody a cirkulátoru je zapojen do cirkulátoru který je propojen s detektorem a couplerem 3x3. Cirkulátor je zařízení s třemi porty které propustí signál pouze z portu 1 dále na port 2 a 3. Vracející se signál vstoupí portem 2 zpět a pokračuje na port 3. Zárukou funkce cirkulátoru je nemožnost výstupu svazku na port 1. Z principu zapojení vyplývá že laserová dioda je ochráněna jak izolátorem tak cirkulátorem, to zaručuje vysokou odolnost vůči lidské chybě a práci ze zrcátka které nám odráží signál zpět.

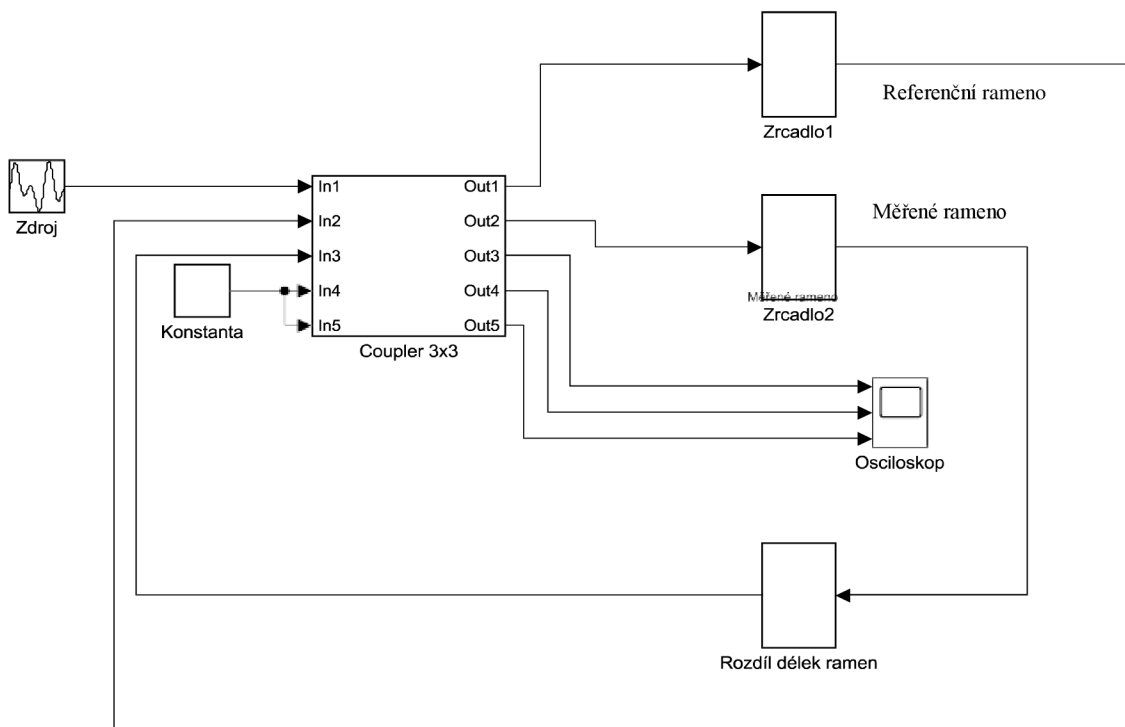
Zapojení a princip coupleru je popsán výše. V zapojení Michelsonova interferometru slouží k možnosti sledování signálu ve všech krocích. To znamená, neovlivněný signál z laseru, signál který projde cirkulátorem a signál referenční a měřící. Jedno rameno coupleru je na straně trasy nevyužité. Na výstupu coupleru je tedy zapojena měřící trasa, ta bude přikotvena ke generátoru vibrací, kde budeme detekovat různé frekvence jako v předchozích měřeních. Na dalším ramenu je zapojena referenční trasa, která nesmí být nijak ovlivněna. Na konci obou ramen jsou umístěna Faradayova rotační zrcadla, tyto zrcadla otáčejí rovinu polarizace o 90° a díky tomu je možné měřit interferenci světelného svazku. Na obrázku Obr. 6.1 je uvedeno schématické zapojení testovacího systému.



Obr. 6.1: Zapojení Michelsonova interferometru s couplerem 3x3

6.1 Simulace Michelsonova interferometru

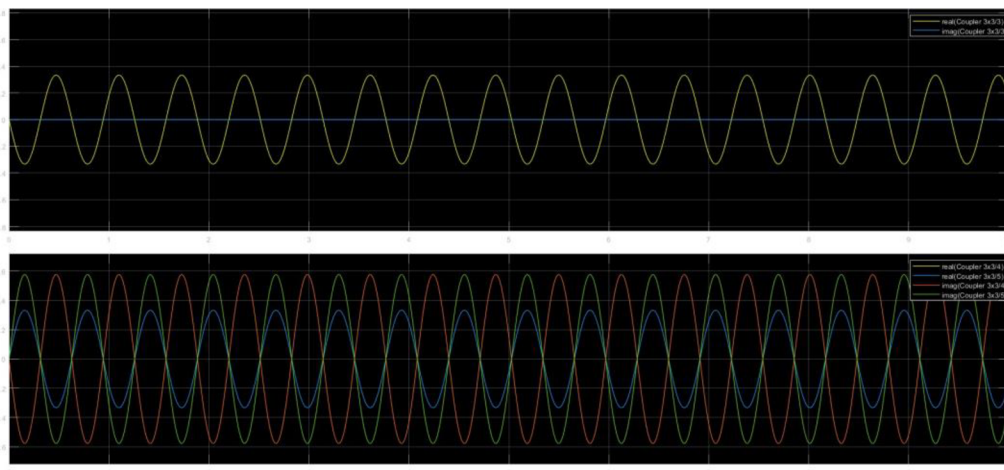
Simulační model který byl vytvořen jak v programu VPIphotonics a také v programu Matlab, porovnává chování jednotlivých sensorických systémů. Prvotním problémem simulací je chování jednotlivých programů. Jak již bylo uvedeno dříve, ty jsou především programovány pro simulace přenosových sítí, a ne pro sensorické systémy. Jednotlivé prvky a jejich chování je většinou idealizované a nesimuluje děje které nastávají u sensorických systémů.



Obr. 6.2: Blokový model simulace v programu Matlab

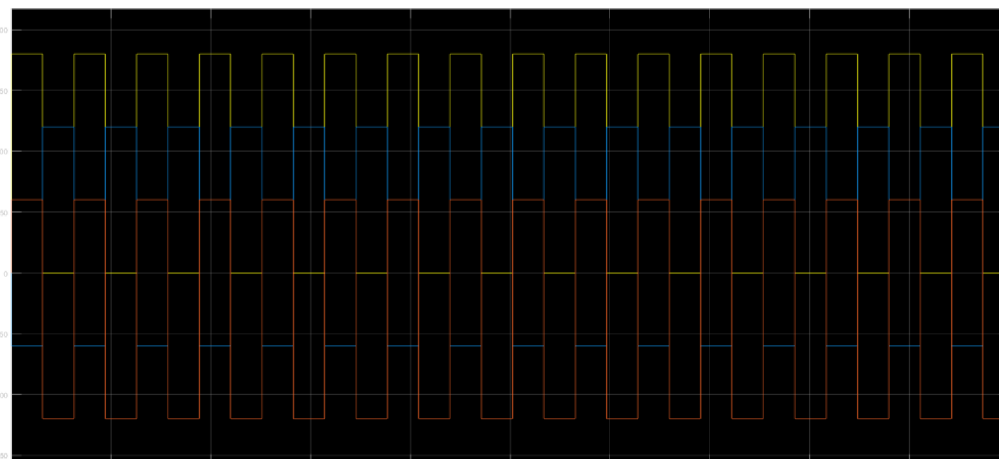
Simulační model v programu Matlab je složen ze zdroje záření, ten generuje sinusový signál s amplitudou 1 V a frekvencí 10 Hz s fázovým posunem 0 rad. Dále je signál rozdělen pomocí coupleru 3x3 do měřicího a referenčního ramene. Signál má třetinovou amplitudu původního signálu. Simulace nebere v potaz neosazené porty coupleru. Obě ramena jsou ukončena bloky, které simulují Faradayova rotační zrcadla a otáčí signál o 45° . Blok pro rozdílnou délku ramen je zatím nevyužit, protože pracujeme s balanovaným interferometrem. Signály z obou ramen vstupují do coupleru, kde dochází k interferenčnímu posunu signálů o 120° . Signál je zobrazen pomocí výstupu osciloskopu. Dle teorie by měl mít výstupní signál portu coupleru 3x3 třetinovou amplitudu původního signálu a stejnou fázi. Druhý port by měl mít třetinovou amplitudu původního ale fázi posunutou o 120° . Třetí port má opět třetinovou amplitudu ale fáze je posunuta oproti druhému výstupu o 120° Tedy celkem o 240° oproti původnímu signálu.

Na obrázku Obr. 6.3 můžeme sledovat amplitudy signálu na výstupu z coupleru 3x3, kde je možné vidět sinusový signál, který generuje světelný svazek s amplitudou 1 V ze zdroje a výstupy signálu jsou třetinové.



Obr. 6.3: Výstup na osciloskopu z programu Matlab

Dále je zobrazen výstup fáze jednotlivých ramen coupleru, kde je vidět posun signálu.

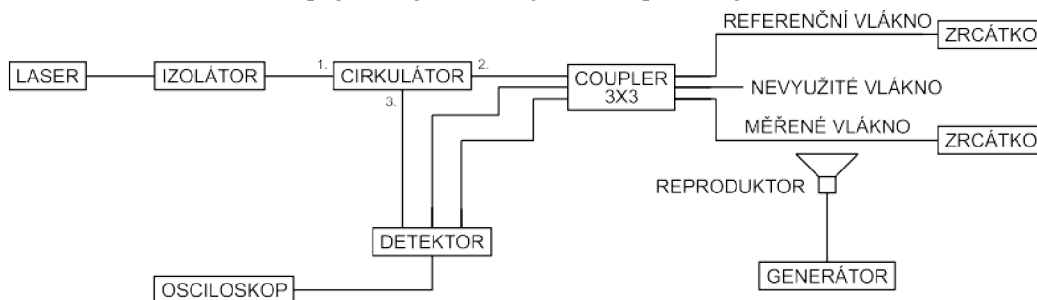


Obr. 6.4: Výstup na osciloskopu z programu Matlab

6.2 Měření Michelsonova interferometru v laboratoři

Pro měření bylo využito několik metod zpracování signálu. Signál byl uložen osciloskopem a poté vyhodnocovacím zařízením Analog Discovery, který byl připojen k počítači.

Blokové schéma zapojení a jednotlivých komponent je vidět na Obr. 6.5.



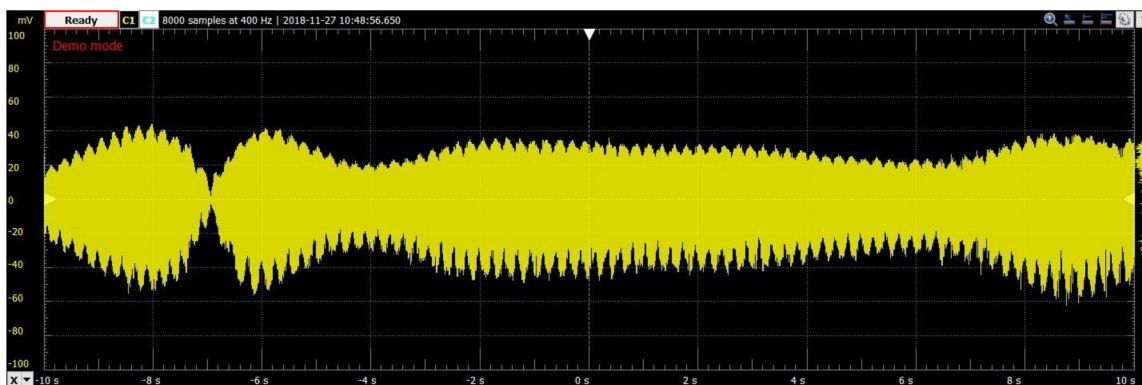
Obr. 6.5: Blokové schéma zapojení Michelsonova interferometru

Z blokového schématu je vidět že využíváme pro měření vibrací Michelsonova balancovaného interferometru. Na vstupu je osazen zdroj s izolátorem a coupler 2x2. Interferometr má jedno referenční rameno, u kterého nedochází k ovlivnění vnějšími vlivy. A dále jedno měřicí, které detekuje změny okolí. V zapojení je toto rameno instalováno na reproduktor, který generuje vibrace.

Cílem měření v laboratoři bylo co nejpřesněji změřit frekvenci signálu generovanou reproduktorem abychom ověřili detekční schopnosti Michelsonova interferometru tedy v jakém rozsahu naše měřicí sestava pracuje nejlépe. Byly proměřeny frekvence v rozmezí 1, 10, 100, 500, 1000, 1500 Hz. Délka ramen interferometru byla v laboratorním měření 2 m, ale pokud je dodržena shodná délka ramen je možné při dostatečně silném zdroji pracovat s délkou ramen až několik stovek kilometrů. Zpracování takového signálu ale bude již takřka nemožné, pokud by se vyhodnocovala oblast kolem celé délky vlákna. Proto je lepší mít detekční oblast kratší, v rámci jednotek metrů.

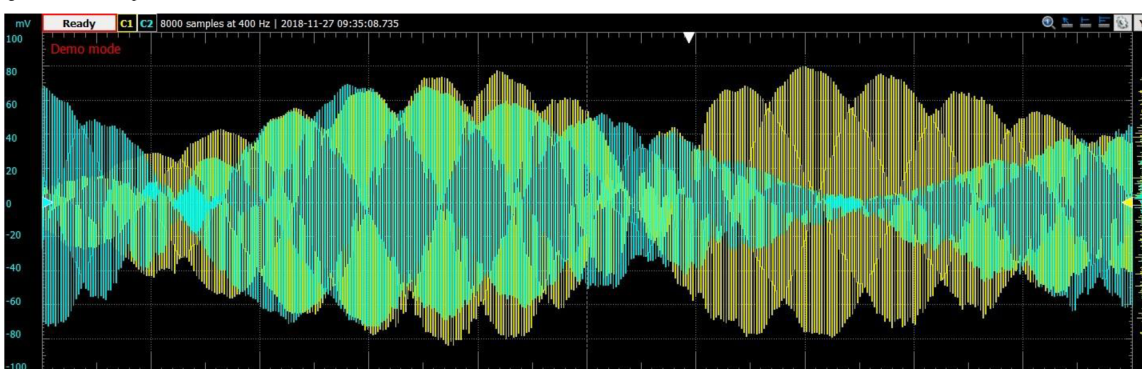
V měření byl také upravován vysílací výkon laserové diody v rámci proudového napájení a to v rozmezí od 15 mA do 25 mA. Data byla vždy ukládána do formátu datové tabulky excelu který generoval osciloskop i Analog Discovery.

Data z měření jsou zaznamenána do spojnicových grafů. Získání hodnoty frekvence je nutné převést graf pomocí Fourierovy transformace. Na obrázku Obr. 6.6 jsou ukázány výstupy signálu. Pro porovnání je také ukázán výstup z osciloskopu. Nevýhoda celého měření osciloskopem je nízká vzorkovací frekvence osciloskopu, která nám neumožňuje dostatečně kvalitní sběr dat.



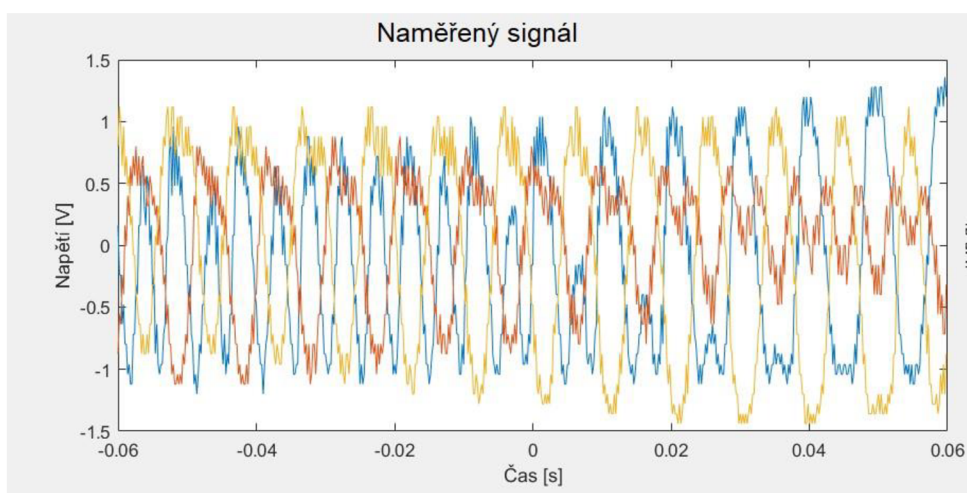
Obr. 6.6: Výstupní graf/signál zobrazený Analog Discovery - výstup cirkulátoru

Na dalším obrázku je vidět rozdíl mezi zobrazením výstupu z cirkulátoru a jednotlivých ramen interferometru.



Obr. 6.7: Výstupní graf/signál zobrazený Analog Discovery - výstup ramen

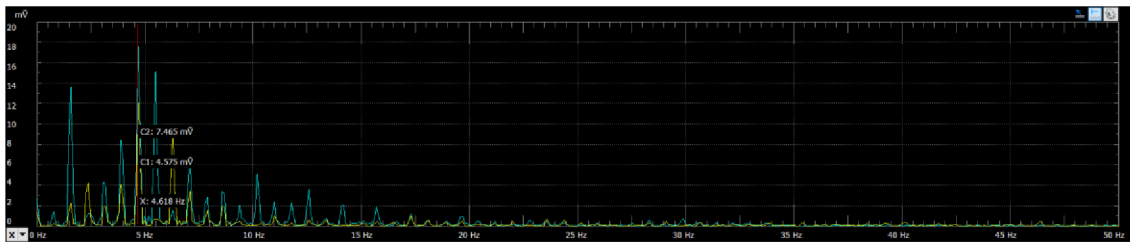
Program analog Discovery umí zobrazit i signál simulující výstup osciloskopu, to nám dává možnost porovnání mezi fyzickým osciloskopem a virtualizovaným pomocí Analog Discovery.



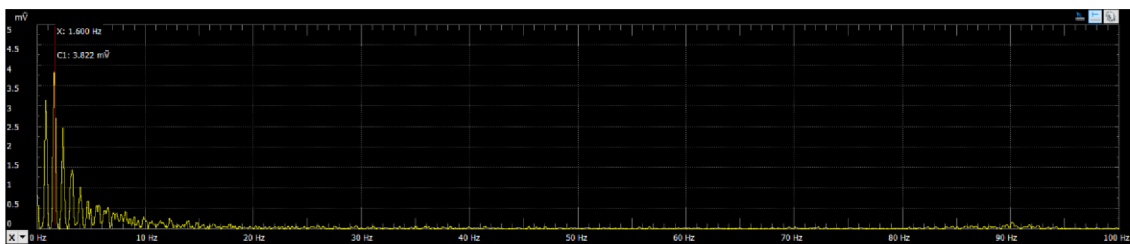
Obr. 6.8: Výstupní graf/signál zobrazený osciloskopem

6.2.1 Výsledky měření pomocí přístroje Analog Discovery

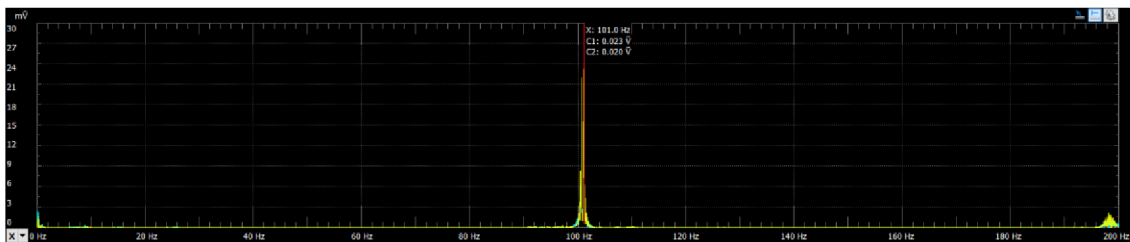
Pro vyhodnocení výsledků byl využit vyhodnocovací software dostupný k zařízení Analog Discovery s názvem WaveForms. Tato metoda zpracování dat je velmi pohodlná, protože dokáže změřený signál rovnou převést do formy signálu který je upraven pomocí FFT. Dále je možné z tohoto signálu ve zvoleném místě odečíst hodnotu změřené frekvence. Měření pomocí Analog Discovery se u coupleru 3x3 skládá ze dvou grafů. Jeden jsou výstupy z ramen interferometru (měřené a referenční) a druhý je výstup z cirkulátoru. Dále jsou uvedeny ukázky vstupních grafů při zvolených frekvencích a napětích diody.



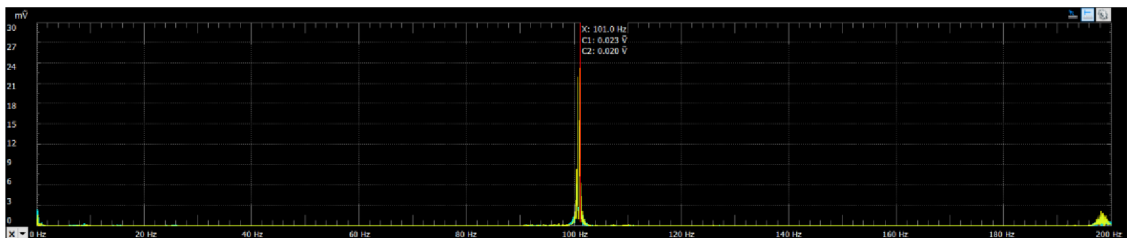
Obr. 6.9: Výstupní graf pro ramena interferometru při 1 Hz a proudu 15 mA pomocí AD



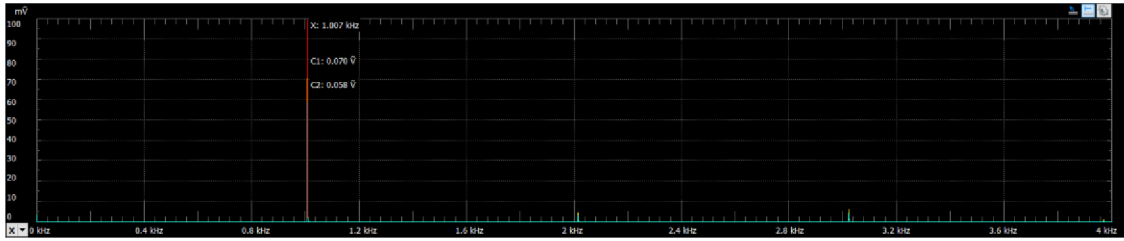
Obr. 6.10: FFT graf výstupu cirkulátoru při 1 Hz a proudu 15 mA pomocí AD



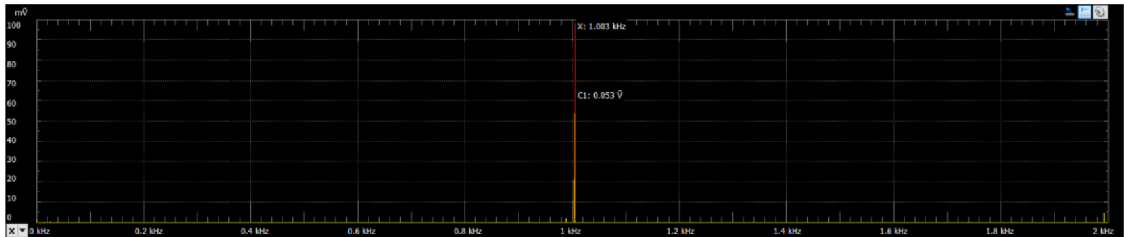
Obr. 6.11: Graf ramen interferometru při 100 Hz a proudu 15 mA pomocí AD



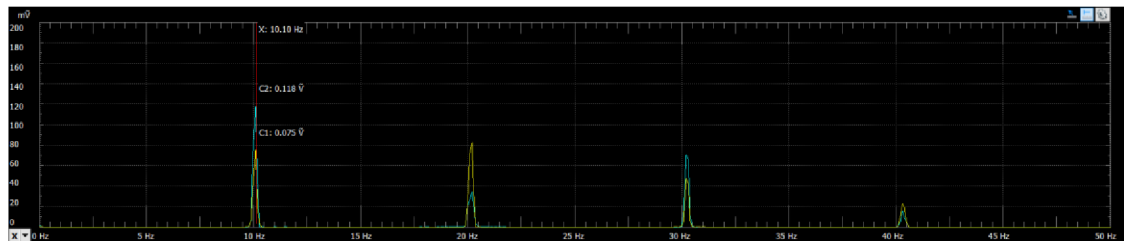
Obr. 6.12: FFT graf výstupu cirkulátoru při 100 Hz a proudu 15 mA pomocí AD



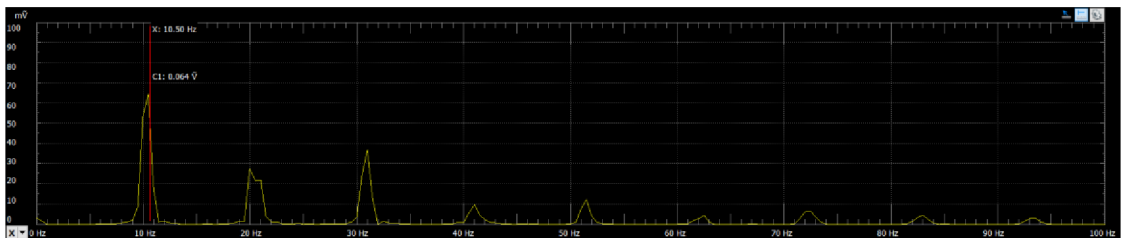
Obr. 6.13: Graf ramen interferometru při 1000 Hz a proudu 15 mA pomocí AD



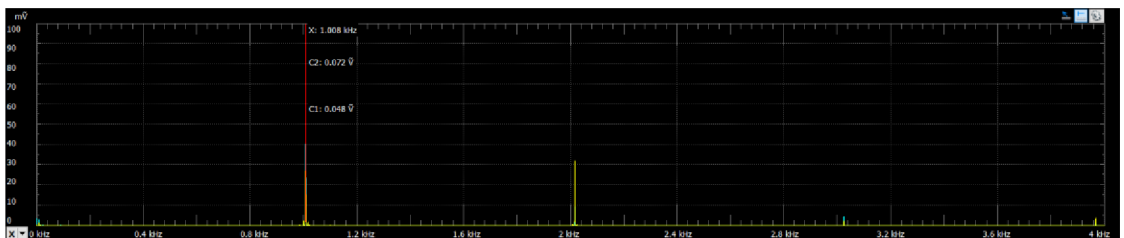
Obr. 6.14: FFT graf výstupu cirkulátoru při 1000 Hz a proudu 15 mA pomocí AD



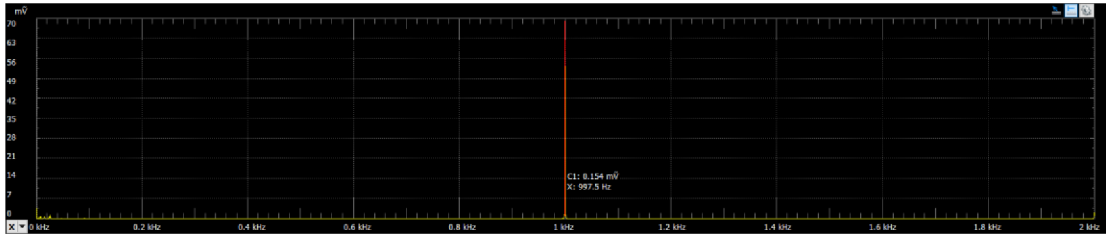
Obr. 6.15: FFT graf výstupu ramen při 10 Hz a proudu 25 mA pomocí AD



Obr. 6.16: FFT graf výstupu cirkulátoru při 10 Hz a proudu 25 mA pomocí AD

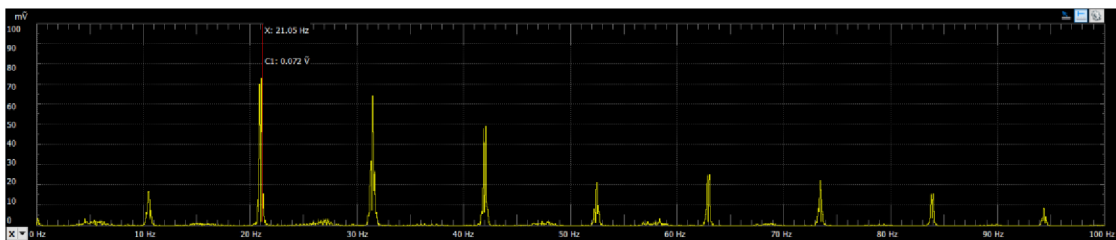


Obr. 6.17: FFT graf výstupu ramen při 1000 Hz a proudu 25 mA pomocí AD

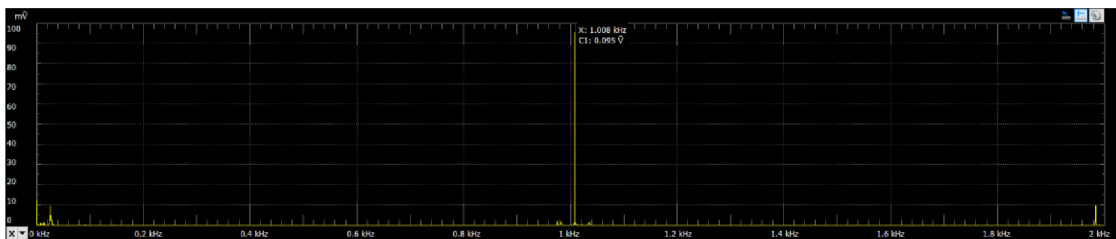


Obr. 6.18: FFT graf výstupu cirkulátoru při 1000 Hz a proudu 25 mA pomocí AD

Další měření spočívalo ve využití coupleru 2x2 a porovnání měřených výsledků. Toto měření je třeba provést hlavně pro porovnání přesnosti dat která byla měřena pomocí Machova-Zehnderova interferometru a říci který interferometr je lepší.



Obr. 6.19: FFT graf výstupu ramen při 10 Hz a proudu 25 mA pomocí AD a coupleru 2x2



Obr. 6.20: FFT graf výstupu ramen při 1000 Hz a proudu 25 mA pomocí AD a coupleru 2x2

Níže je zobrazena přehledná srovnávací tabulka naměřených dat při proudech diody 15 mA a 25 mA u coupleru 3x3 a coupleru 2x2. První sloupec zobrazuje nastavené hodnoty na generátoru, kde následně reproduktor přenášel vibrace na přiložené optické vlákno. Dále jsou zobrazeny hodnoty na výstupu cirkulátoru a obou ramen interferometru. Z dat je patrné, že zde dochází k tzv. záznějům u nižších frekvencí, kdy se daná frekvence opakuje. Tento jev je způsoben nekvalitní fixací optického vlákna k reproduktoru. U vyšších frekvencí k tomuto jevu nedochází. Nepřesné měření může být také způsobeno nepřesnou detekcí.

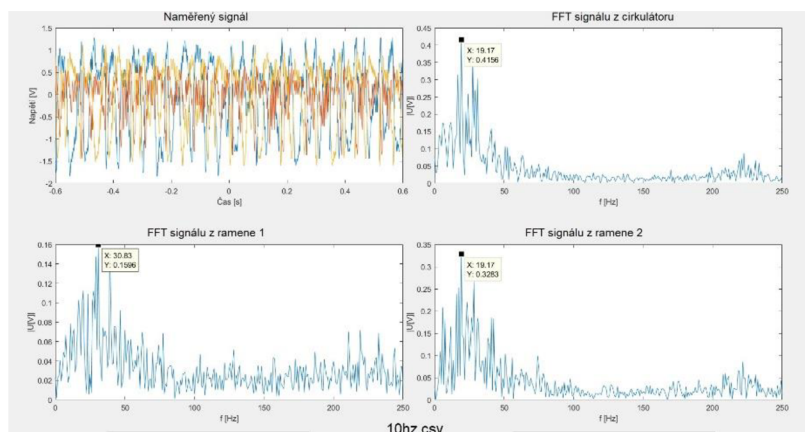
Tab. 6.1: Tabulka nastavované frekvence na generátoru a výstup interferometru.

Nastavovaná frekvence [Hz]	Změřená frekvence [Hz]				
	15mA		25 mA		2x2
	C	R	C	R	
1	1,65	4,718	2	2	3,05
10	20,39	9,555	10,	10,3	21,06
10 0	102	121	104,9	102,4	107,2
50 0	503,5	502,6	499,1	502,5	506,5
10 00	1002	1008	997,6	1007	1008

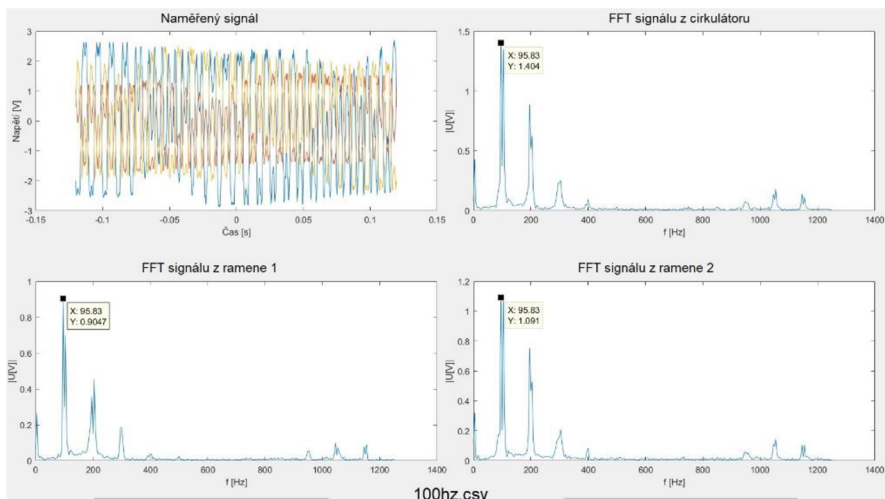
Závěrem lze říci že měření pomocí coupleru 3x3 není nijak výrazně přesnější pro detekci frekvence oproti coupleru 2x2.

6.2.2 Výsledky měření pomocí osciloskopu

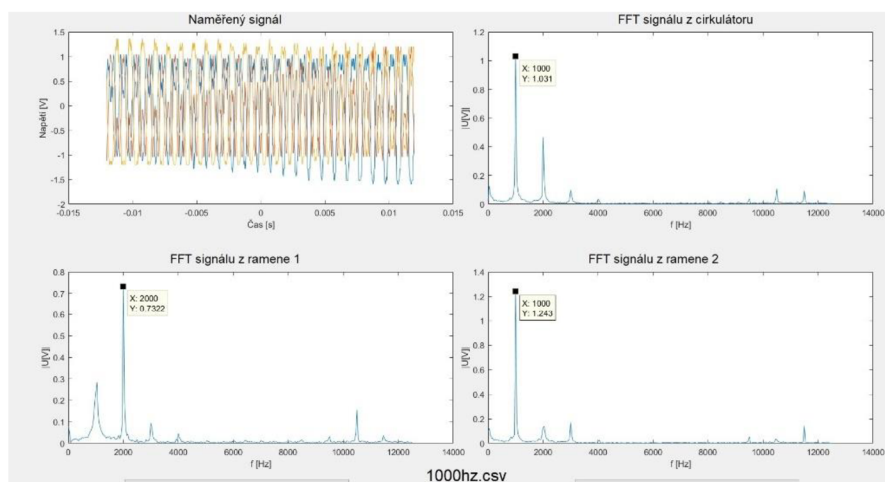
Rozdílem při měření pomocí osciloskopu oproti Analog Discovery byla možnost využití čtyř vstupů osciloskopu oproti dvěma u AD. Výsledný graf je tedy možné definovat třemi složkami (referenční, měření, výstup z cirkulátoru) a to vše v jednom časovém okamžiku. Při měření dochází ke generování obrovského množství dat, proto byl v Matlabu vytvořen skript v rámci diplomové práce na zpracování těchto dat. Ukázky dat jsou níže. [42]



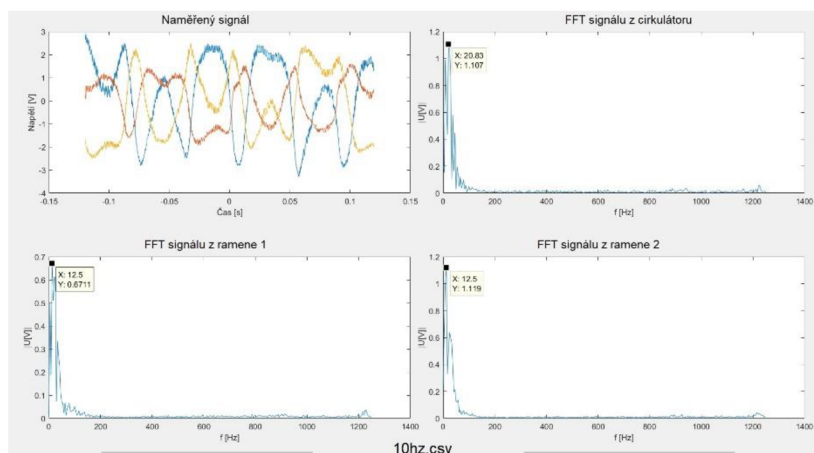
Obr. 6.21: GUI v Matlabu pro frekvenci 10 Hz a vstupní proud diody 15 mA



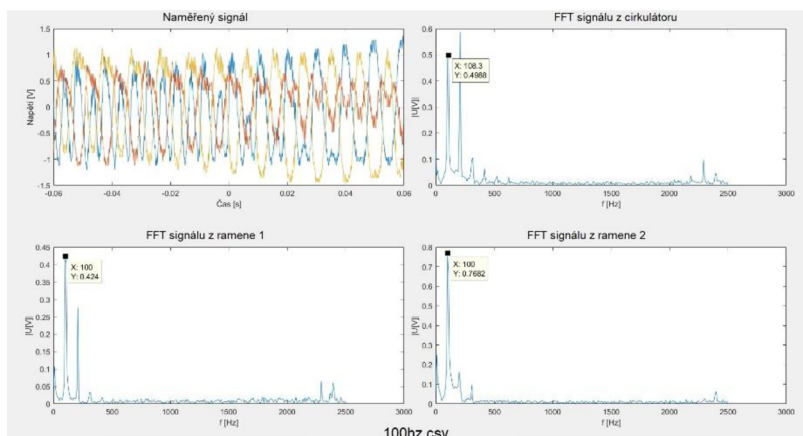
Obr. 6.22: Výstupní GUI v Matlabu pro frekvenci 100 Hz a vstupní proud diody 15 mA



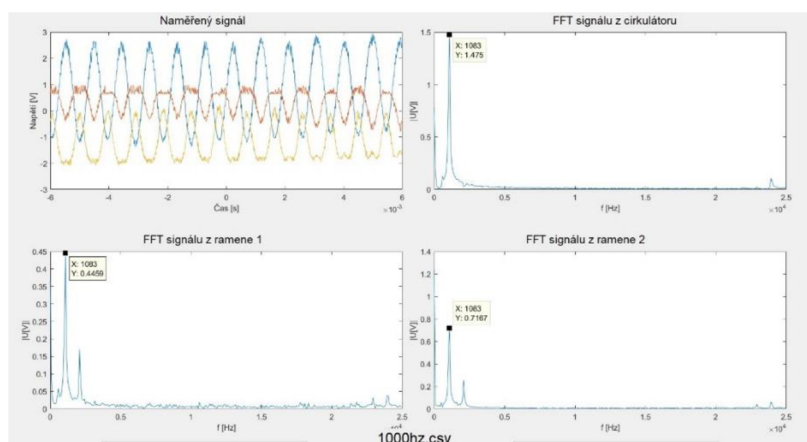
Obr. 6.23: Výstupní GUI v Matlabu pro frekvenci 1000 Hz a vstupní proud diody 15 mA



Obr. 6.24: Výstupní GUI v Matlabu pro frekvenci 10 Hz a vstupní proud diody 25 mA



Obr. 6.25: Výstupní GUI v Matlabu pro frekvenci 100 Hz a proud diody 25 mA



Obr. 6.26: Výstupní GUI v Matlabu pro frekvenci 1000 Hz a proud diody 25 mA

V dalším kroku byla sestavena porovnávací tabulka měření pro výstup z osciloskopu.

Tab. 6.2 Tabulka pro porovnání změřených a generovaných frekvencí

Nastavovaná frekvence [Hz]	Změřená frekvence [Hz]						
	15mA			25 mA			2x2
	C	R1	R2	C	R1	R2	
1	2,5	5	5	5,833	5	4,167	5
10	19,17	30,83	19,17	20,83	12,5	12,5	18,33
100	208,3	100	100	95,83	95,83	95,83	83,33
500	500	1017	500	500	500	-	500
1000	1000	2000	1000	1083	1083	1083	1000

Z dané tabulky vyplývá že hodnoty měření jsou méně přesné jak pomocí Analog Discovery. Tento jev může být způsoben nedostatečnou vzorkovací frekvencí osciloskopu. Může se také jednat o zánějový jev, který způsobí špatné uchycení vlákna.

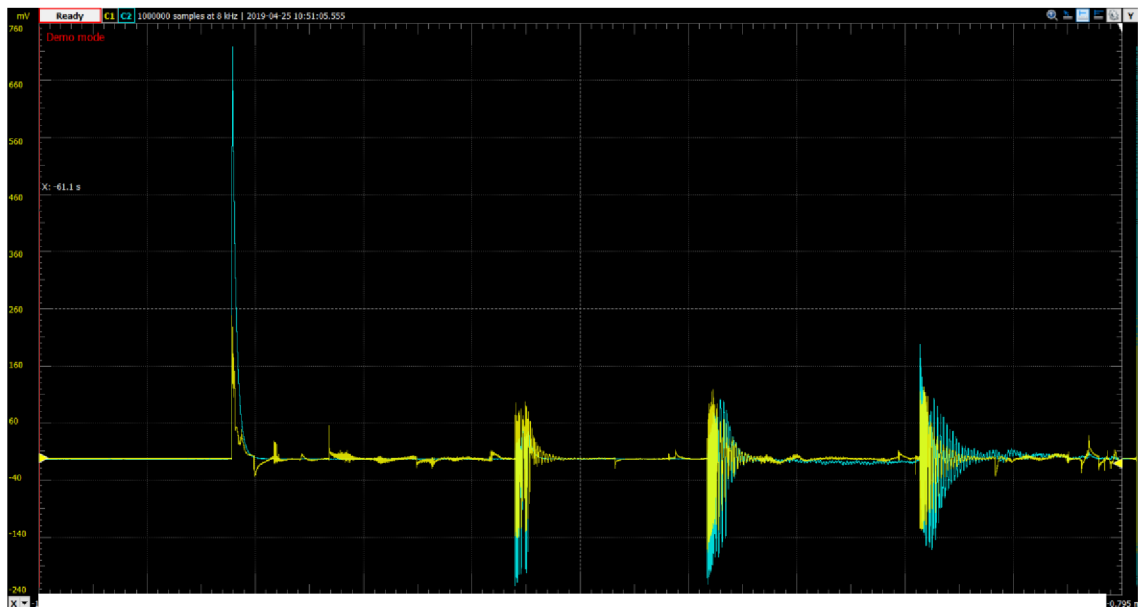
6.3 Lokalizace vibrace pomocí Michelsonova interferometru

Hlavní motivací lokalizace vibrace pomocí Michelsonova vláknového interferometru je princip jeho zapojení. U tohoto druhu interferometru není třeba mít přístupné oba konce měřené trasy. Funkčnost zapojení zajišťují připojená Faradayova rotační zrcadla na konci optické trasy, nevýhodou použití těchto optických prvků je degradace užitečného signálu z interferometru. Hlavní otázkou tedy zůstává, která metodika měření bude přesnější, zda Machův-Zehnderův interferometr či Michelsonův.

Výpočet umístění vibrace

Pro určení přesné pozice vibrace je nutné vypočítat její polohu. Byla zvolena metoda, kdy je průběh měření zaznamenán a poté zpracován.

Příkladem může být měření několika po sobě jdoucích rázů reproduktoru s frekvencí 10 Hz. Kdy první peak viditelný na grafu je spuštění laserové diody. Další tři peaky jsou rázové vibrace působící na optické vlákno, které značí vibraci. Graf zobrazuje záznam celkové doby měření, nikoli průchod světelného svazku, průchod podle kterého se určí místo vibrace je třeba určit výpočtem. Nejprve je třeba určit v jakém čase vnikl peak při spuštění laserového zdroje a poté kdy vznikly další vibrace.



Obr. 6.27: Zaznamenaný průběh měření pro rázy do vlákna s frekvencí 10 Hz.

Pro výpočet využijeme následující vzorec:

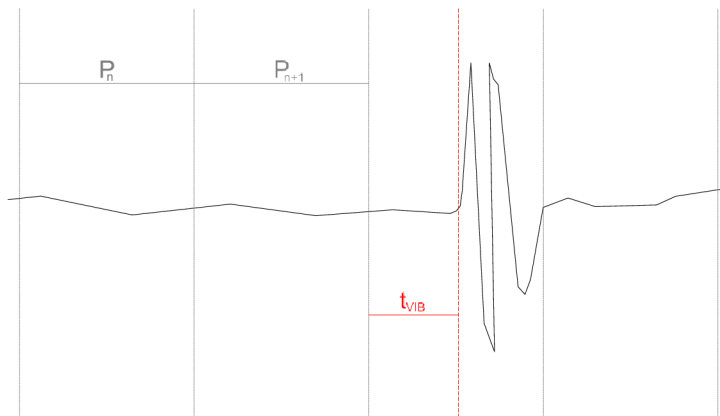
$$\delta_i = t_{START} - t_i \quad 6.1$$

kde t_{START} znamená čas spuštění laserové diody, t_i je čas ve kterém vznikla vibrace a i index značí pořadí vibrace.

Další krok je délka trvání světelného svazku, který projde systémem:

$$t_d = \frac{d}{\frac{c}{n}} \quad 6.2$$

kde d je délka optického vlákna, c je rychlost světla a n je index lomu světla v jádru optického vlákna.



Obr. 6.28: Metodiky hledání vibrace v záznamu dat z osciloskopu či Analog Discovery.

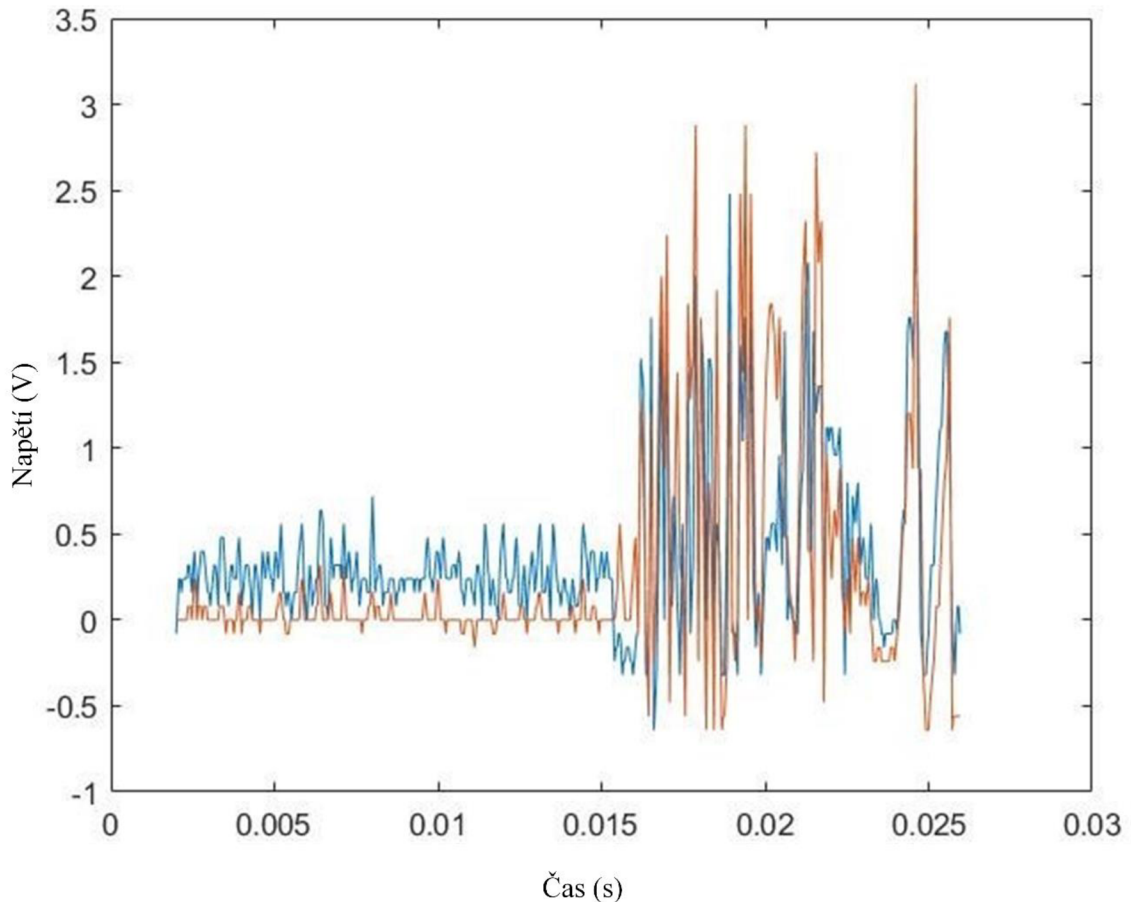
Po určení t_{VIB} je možné určit kde se nachází vibrace na vlákně.

$$d_{VIB} = \frac{c}{n} * t_{VIB}, \quad 6.3$$

kde d_{VIB} je místo vibrace.

6.3.1 Lokalizace vibrace pomocí osciloskopu

Nejdříve byla technika lokalizace otestována pomocí osciloskopu. Bylo testováno několik zapojení ať už dříve testovaný Machův-Zehnderův interferometr v jednoduchém zapojení, či duální Machův-Zehnderův tak Michelsonův interferometr. Při měření Michelsonova interferometru osciloskopem je níže zobrazen výstup z osciloskopu.



Obr. 6.29: Záznam měření z osciloskopu

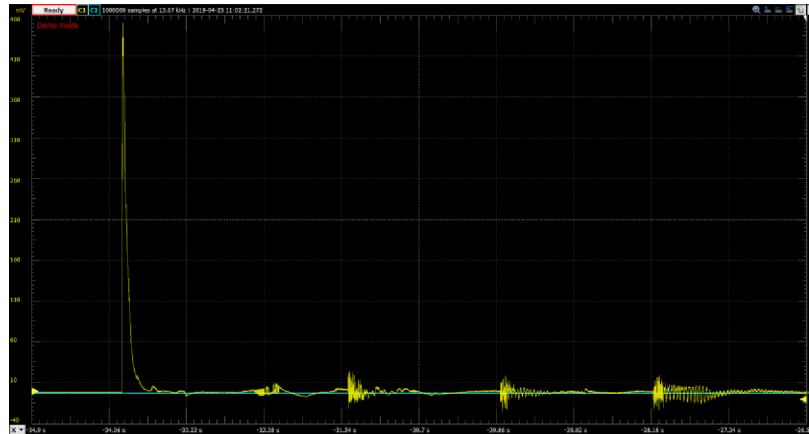
Na výstupu měření je vidět závislost napětí na čase pro zachycené vibrace z obou ramen. Vibrace jsou velmi těžko čitelné, a proto s tímto typem měření nemůže být pokračováno.

6.3.2 Lokalizace vibrace pomocí přístroje Analog Discovery

Po opakovaných testech Michelsonova interferometru a čtení dat pomocí osciloskopu bylo přistoupeno k měření pomocí Analog Discovery, který pracuje s vyšší vzorkovací frekvencí. U tohoto typu interferometru dochází u kratších vzdáleností k nežádoucímu jevu. Světelný svazek se vláknem pohybuje rychlostí světla, ta je ovlivněna indexem lomu vlákna. Rychlost šíření je tak velká, že pokud do vlákna uhodíme je také světelný tok ovlivněn tlakem. To způsobí na tak krátké trase, která je ještě deformovaná Faradayovými

zrcadly nepřesnou detekci a určení polohy.

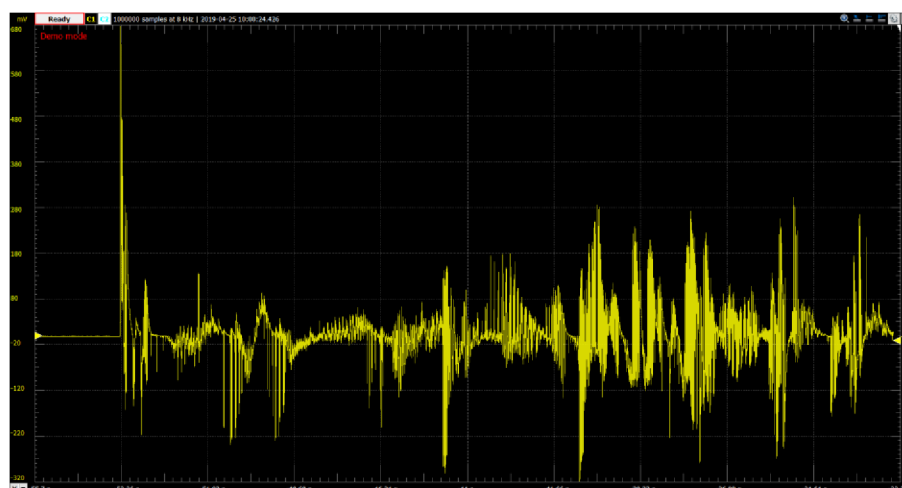
Zapojení v laboratoři bylo realizováno pomocí diody, izolátoru, coupleru a následné rozdělení na dvě optické trasy a ukončeno Faradayovými zrcátky. Výstup coupleru je veden do detektoru, který je tvořen fotodiodou a zesilovačem a následně ukončen v Analog Discovery.



Obr. 6.30: Výstup z Analog Discovery při zapojení MI na vzdálenost 2 m.

Měření bylo realizováno na třech různých trasách odlišných délek optických vláken. Tím je docíleno různé doby šíření světelného svazku vláknem. Trasy byly zvoleny v délkách 2 m, 106 m a 3 km. Délky byly zvoleny na základě dostupných patch kabelů a bubnů optických vláken. Při lokalizaci vibrace na vlákně 2 m dlouhém byla vibrace generována cca 1,5 m od coupleru. Princip měření je stejný jako v předchozích případech, a to na základě spuštění zdroje a času kterým projde svazek vláknem.

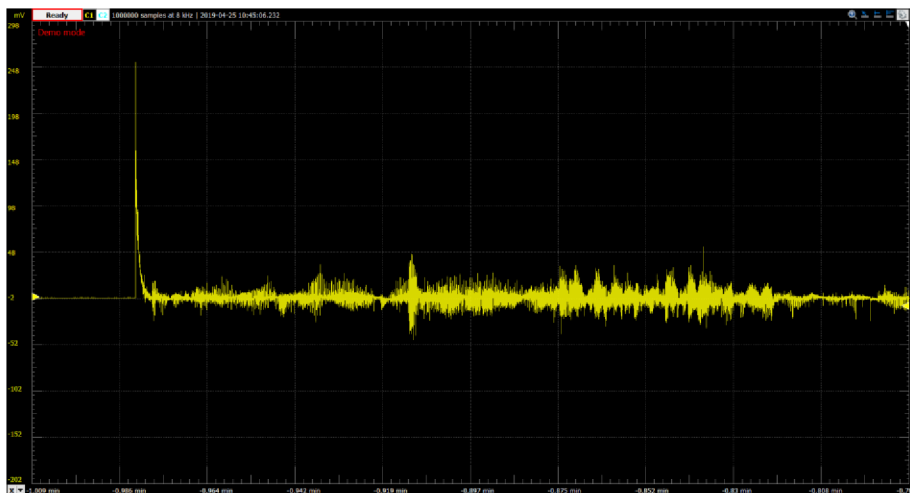
Další měření probíhalo na Michelsonově interferometru s délkou ramen 106 m, kde vibrace vznikaly ve vzdálenosti 105,5 m od coupleru.



Obr. 6.31: Výstup z Analog Discovery při zapojení MI na vzdálenost 106 m

Interferometr s délkou ramen 3 km byl zapojen stejným způsobem jako předchozí,

vibrace vznikaly cca 0,5 m před zrcátkem. Popis všech měření je rozebrán v tabulce. Dále je zde uvedena také ukázka ručního výpočtu místa vibrace.



Obr. 6.32: Výstup z Analog Discovery při zapojení MI na vzdálenost 3 km.

Výpočet místa vibrace se provede následovně:

$$\begin{aligned}\delta_1 &= t_{START} - t_1 = 33,92069233 - 31,46974038 \\ &= 2,45095195 \text{ s.}\end{aligned}\quad 6.4$$

Jeden průchod tedy vypočítáme následovně:

$$P_r = \frac{d}{r} = \frac{d}{\frac{c}{n}} = \frac{2}{\frac{3 * 10^8}{1,48}} = 9,866667^{-9} \text{ s.}\quad 6.5$$

Tedy 2,45095195s je počet průchodů na číslo $n = 2,45095194173576\text{s}$. Zde se tedy nachází vibrace. Časově tedy dle průchodu vláknem:

$$\begin{aligned}P_{248407283} &= P_r * n = 9,866667^{-9} * 248407283 \\ &= 2,45095194173576\text{s}\end{aligned}\quad 6.6$$

z tohoto času vypočítáme t_{VIB} , ta je získaná rozdílem δ_1 a hodnoty $P_{248407283}$.

Potom pomocí výše uvedeného vzorce spočítáme přesnou polohu vibrace.

$$\begin{aligned}d_{VIB} &= \frac{c}{n} * (P_{248407283} - \delta_1) = \frac{3 * 10^8}{1,48} \\ &= (2,45095194173576 - 2,45095195) \\ &- 1,6751839555\text{m.}\end{aligned}\quad 6.7$$

Dále je uvedena přehledová tabulka vypočtených míst vibrace.

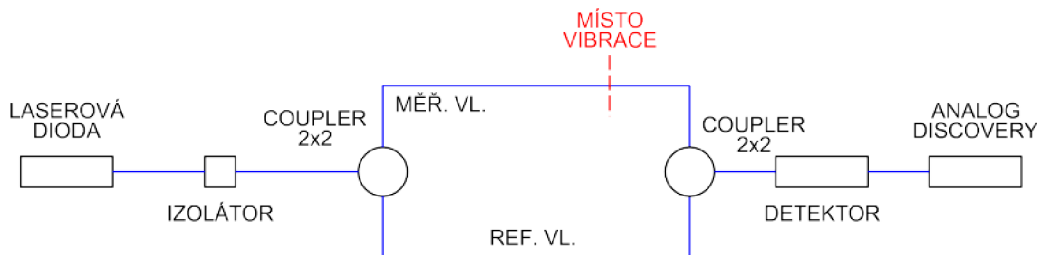
Tab. 6.3: Přehledová tabulka výpočet umístění vibrace

Typ zapojení	Michelsonův interferometr					
	2m		106m		3km	
Strana	Levá	Pravá	Levá	Pravá	Levá	Pravá
1. Vibrace	1,6752	0,3248	79,6712	26,3289	2716,2162	283,7838
2. Vibrace	1,8536	0,1464	95,8939	10,1061	1459,4595	1540,5405
3. Vibrace	1,7828	0,2172	90,0887	15,9113	2391,8919	608,1081

6.3.3 Lokalizace vibrace pomocí Machova-Zehnderova interferometru

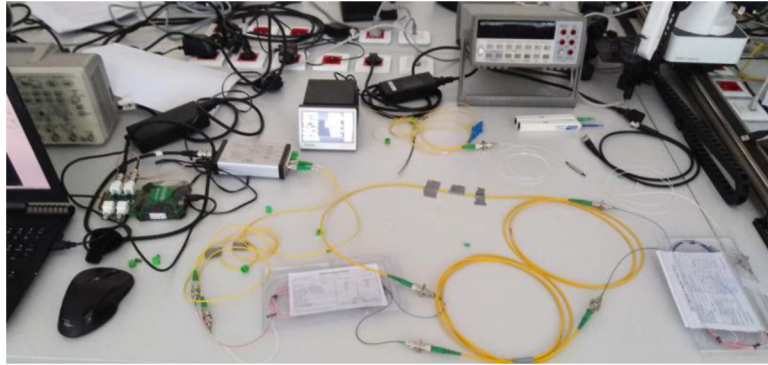
V předchozích kapitolách byla již tato problematika řešena s poměrně dobrými výsledky lokalizace i zpracování. Pro porovnání měření v rámci práce s Michelsonovým interferometrem bylo vytvořeno i měření využívající Machův-Zehnderův interferometr.

Teorie říká, že u Machova-Zehnderova interferometru bude vyšší přesnost lokalizace z důvodu jednocestného průchodu signálu, který je zpracován po průchodu systémem. Světelný signál není ovlivněn Faradayovými rotačními zrcadly, který signál zkreslí při odrazu.



Obr. 6.33: Blokové schéma zapojení Machova-Zehnderova interferometru v laboratoři

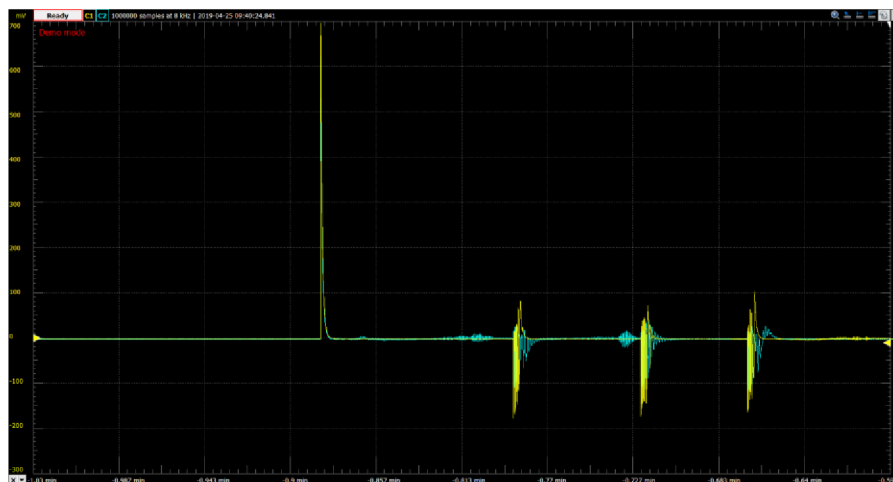
Zapojení v laboratoři ukazuje princip funkce Machova-Zehnderova interferometru. Světelný svazek ze zdroje vstupuje do coupleru 2x2 přes izolátor. V coupleru je tedy rozdělen do dvou ramen. Druhý výstup couleru je nezapojen. Svazek světla projde referenčním a měřícím ramenem, poté se spojí u druhého coupleru. Výsledný svazek je detekován na výstupu z druhého coupleru a zpracován pomocí Analog Discovery.



Obr. 6.34: Ukázka zapojení Machova-Zehnderova interferometru v laboratoři

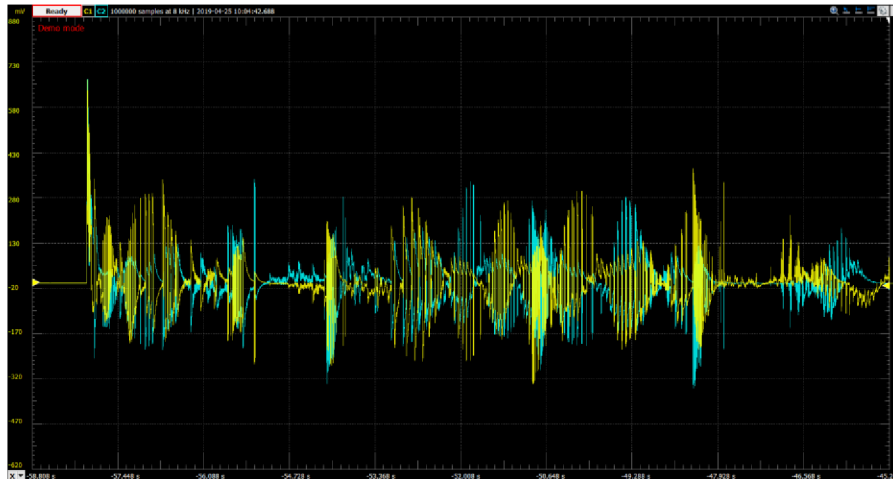
Pro měření a lokalizace pomocí Machova-Zehnderova interferometru byly zvoleny stejné délky optických tras jako v předchozích zapojeních, aby se dala jednotlivá měření porovnávat mezi sebou.

Prvním měřením tedy byla trasa délky 2 m, kde výstup je na obrázku Obr. 6.35. Vibrace vnikla cca 1,5 m od konce vlákna.



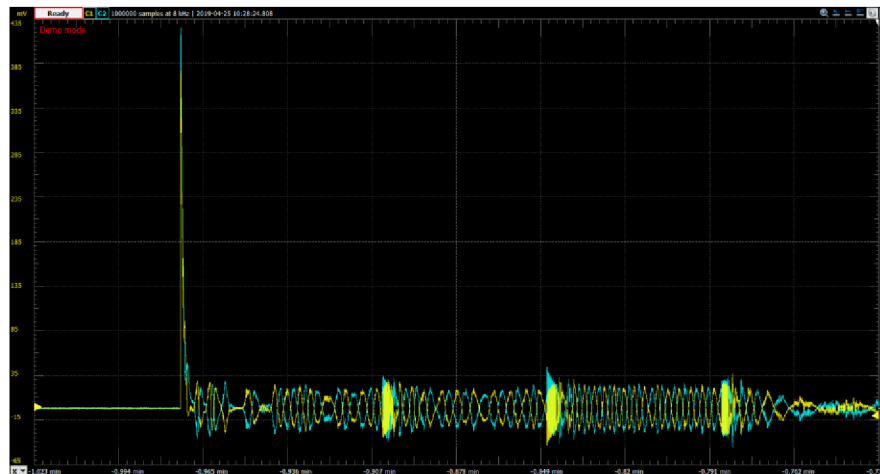
Obr. 6.35: Výstup z AD a zapojení MZI s rameny délky 2 m

Dalším krokem bylo testování trasy dlouhé 106 m. Vibrace vznikla cca ve 105,5 m od prvního coupleru, to znamená na konci trasy. Na výstupu z AD je již vidět šum, který na této délce trasy vzniká okolními rušivými jevy.



Obr. 6.37: Výstup z AD a zapojení trasy 106 m.

Posledním měřením byla trasa délky 3 km. Výstup z měření je zobrazen na obrázku Obr. 6.37. První peak je spuštění laserové diody a další tři jsou vibrace způsobeny v okolí vlákna. Stejně jako u předchozích měření.



Obr. 6.36: Výstup z AD a zapojení trasy 3 km.

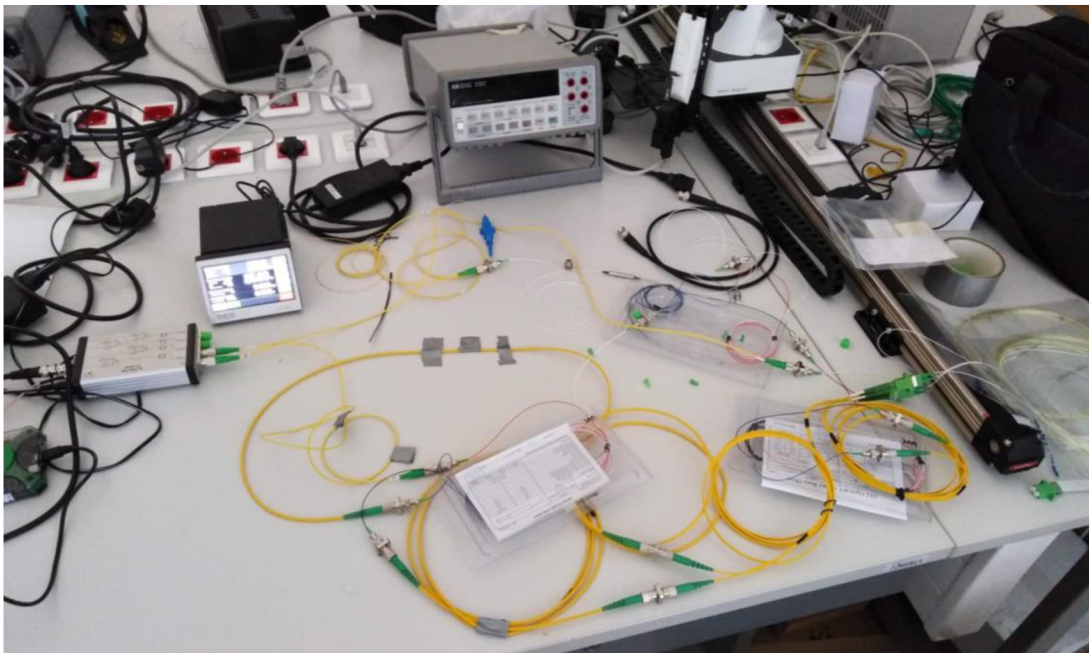
Tab. 6.4: Přehledová tabulka jednotlivých měření s výpočty.

Typ zapojení	Machův-Zehnderův interferometr					
	2 m		106m		3km	
Strana	Levá	Pravá	Levá	Pravá	Levá	Pravá
1. Vibrace	1,707 7	0,2923	84,2112	21,7888	2554,0541	445,9459
2. Vibrace	1,412 7	0,5873	103,3142	2,6858	2918,9189	81,0811
3. Vibrace	1,023 2	0,9768	81,9620	24,0380	2513,5135	486,4865

6.3.4 Porovnávací měření pomocí duálního Machova-Zehnderova interferometru

Jako nejpřesnější metodika lokalizace vibrace se v předchozích zapojeních nejvíce osvědčil duální Machův-Zehnderův interferometr. Principiálně jde o dva Machovy-Zehnderovy interferometry zapojeny proti sobě, díky tomu je získána poloha vibrace, která byla lokalizována z obou směrů.

Princip funkce interferometru byl vysvětlen již v předchozích kapitolách. Proto se jím už dále nebudeme zabývat.



Obr. 6.38: Zapojení duálního Machova-Zehnderova interferometru

Grafické výstupy z měření pomocí Analog Discovery jsou podobné jako při předchozích zapojeních z důvodu srovnatelných výsledků měření a jednotlivých typů systémů. U tohoto měření jde spíše o porovnání s předchozími měřeními.

Tab. 6.5: Tabulka výsledků měření s DMZI:

Typ zapojení	Duální MZI					
	2m		106m		3km	
Strana	Levá	Pravá	Levá	Pravá	Levá	Pravá
1. Vibrace	1,6543	0,3457	96,3829	9,6171	2837,8378	162,1622
2. Vibrace	1,1679	0,8321	72,6168	33,3832	2756,7568	243,2432
3. Vibrace	1,9177	0,0823	92,3189	13,6811	1743,2432	1256,7568

6.3.5 Porovnání jednotlivých metodik měření pomocí interferometru.

Vzhledem k metodice využití senzorického systému je třeba vytvořit zhodnocení jednotlivých typů zapojení při měření. Z prvotních pokusů nejlépe vycházel z pohledu přesnosti měření senzor na principu Michelsonova interferometru s využitím coupleru 3x3. Pokud ale dáme výsledky do porovnávací tabulky zjistíme, že v rámci přesnosti vychází poměrně dobře také zapojení s couplerem 2x2. Coupler 3x3 vychází lépe pro měření nižších frekvencí oproti coupleru 2x2 byl více stabilní a měření byla více opakovatelná. U frekvencí v řádu stovek Hz se již přesnost srovnávala s couplerem 2x2. Výhodou coupleru 3x3 je vyšší stabilita a možnost lokalizace ovlivnění ramene s vysokou přesností, což se projevovalo u signálu, který byl proměnný nebo měl nepatrnou odlišnost měřených frekvencí od budícího generátoru.

Při všech měřeních se také testoval vstupní proud diody, kdy měření probíhala na 15 mA a 25 mA. Zde bylo znatelné, že nižší proud diody neměl u frekvencí 1 Hz až 100 Hz větší vliv při zapojení coupleru 3x3. U vyšších frekvencí od 100 Hz do 1 kHz bylo měření při stejném zapojení přesnější při proudu diody 25 mA tzn. nejvíce se blížily hodnotám generátoru. Z tohoto faktu lze říci že i přes všechny okolní rušící jevy jako je změna teploty, okolní vibrace má vstupní proud diody vliv na přesnost měření.

Dalším faktem bylo srovnání měření a zachytávání dat pomocí osciloskopu a zařízení Analog Discovery. Osciloskop uloží pouze 600 hodnot vůči 3000 tisícům u Analog Discovery.

Závěrem lze říci, že pro nižší frekvence je vhodné použít zapojení ať už Michelsonova nebo Machova-Zehnderova interferometru s couplerem 3x3 a zdrojem světelného záření se vstupním proudem 25 mA u naší zvolené diody.

Vyšší frekvence je možné měřit i se zapojením s couplerem 2x2 protože výsledky jsou u obou zapojení podobné.

Důležitým aspektem je měřicí zařízení, které musí mít vysokou vzorkovací frekvenci a ukládat velký úsek dat. Z tohoto faktu plyne i možná lokalizace vibrace, kdy měření zaznamenaná pomocí osciloskopu nešla vyhodnotit, protože osciloskop dokázal zaznamenat pouze krátký časový úsek. K zaznamenání dat pro vyhodnocení bylo využito digitálního osciloskopu připojeného k počítači. Ten uměl zaznamenat dostatečně dlouhý úsek dat i s dobrým rozlišením. Avšak pro získání přesnějších výsledků se ukazuje, že rozlišovací schopnost zařízení by byla třeba ještě vyšší.

Při výpočtu lokalizace vibrace se data rozdělila do jednotlivých průchodů a v tom ve kterém byla vibrace tak se podrobil analýze ze které bylo určeno přesné místo vibrace.

Výsledky měření ukazují že pro lokalizaci v námi využitých délkách 2 m, 106 m, a 3 km dosahoval největší přesnosti Machův-Zehnderův interferometr s couplerem 2x2. Avšak rozdíly v jednotlivých zapojeních interferometru jsou tak malé, že by bylo třeba využít ještě více přesnějších přístrojů.

Zvolená metodika měření je vhodná především pro kratší měřicí trasy maximálně do několik kilometrů s přesností řádu centimetrů až metrů. Nepřesnosti jsou způsobeny špatným odečítáním časových hodnot z naměřené sekvence a také malou rozlišovací schopností zařízení Analog Discovery.

Důležitým faktem je také působení okolní teploty, vibrací, či dalších vnějších vlivů. Při pozdějších měření bylo také zjištěno, že vlákna nemají totožné délky již z výroby ať už u využitých propojovacích optických vláken 2 m nebo 106 m, kde byl rozdíl v centimetrech. Dále u okonektorovaného vlákna s délkou 3,005 km a 3,076 km kde byl rozdíl cca 71 m. Tento fakt byl později ověřen měřením pomocí reflektometrické metody OTDR na zařízení Luciol instruments LOR220 firmy NETWORK GROUP s.r.o.. Toto zařízení pracuje na principu photon counting (počítání vyslaných a přijatých fotonů) takže principiálně je mnohem přesnější jako konvenční reflektometrický analyzátor. Kdy prostorové rozlišení měřicí trasy je v řádu metrů za to zařízení LOR220 má přesnost v řádu jednotek centimetrů. Takže bylo možné podrobit měření i propojovací patchcordy a kabeláž. Z měření vyplynulo, že běžně dostupné propojovací optické kabely se v délkách liší v řádu maximálně jednotek centimetrů.

Pro lokalizaci vibrace je vždy nutné využít pulsní vysoko výkonový zdroj záření případně akustooptickou modulaci.

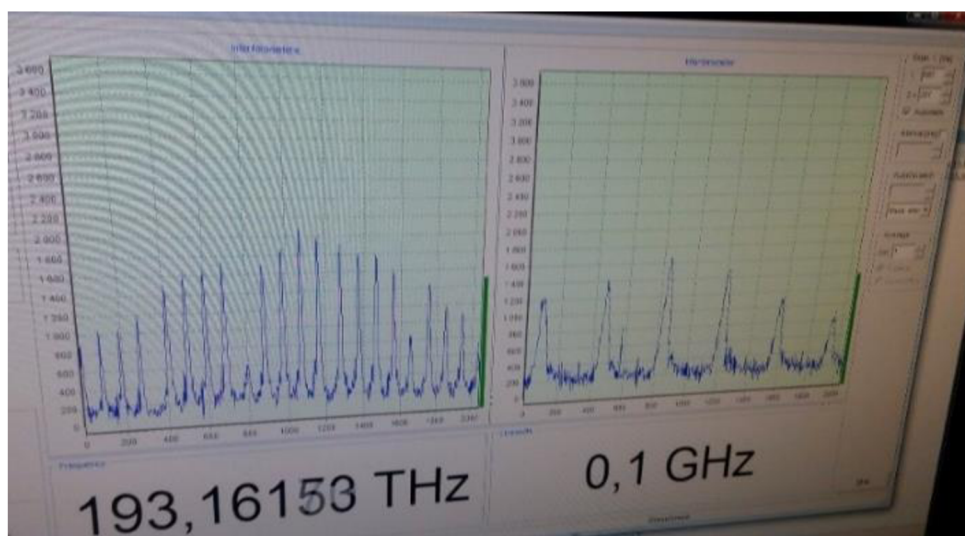
7. KOMBINACE MICHELSONOVA INTERFEROMETRU S VYUŽITÍM VLÁKNOVÉ MŘÍŽKY

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.

7.1.1 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. 7.1: 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:

$$L_{coh} = c\tau_{coh} = \frac{c}{\pi\Delta\nu} \quad 7.1$$

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. 7.1: 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

7.1.2 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.

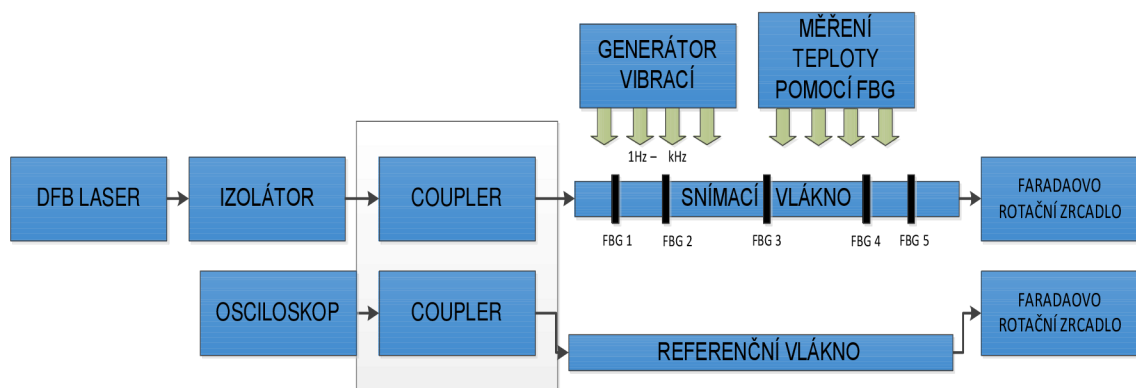
7.1.3 Testování využití vláknových mřížek v interferometru

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. 7.2: 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. 7.2: Blokové schéma zapojení testovacího měření

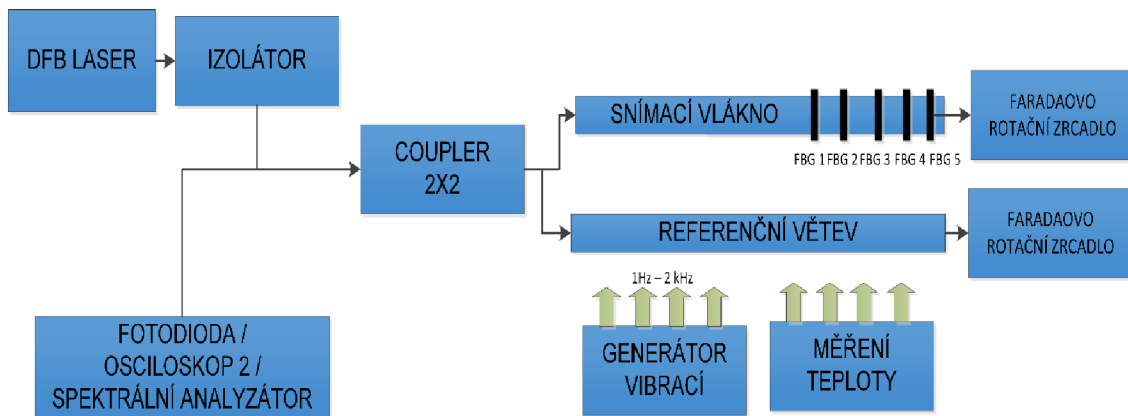
Dále došlo k přeladování DFB diody SLT5412-CA. Tato dioda byla přeladována pomocí teploty peltierova článku, který udržoval na čipu diody danou teplotu a díky tomu

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 použítou 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. Odchylna 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. 7.3.

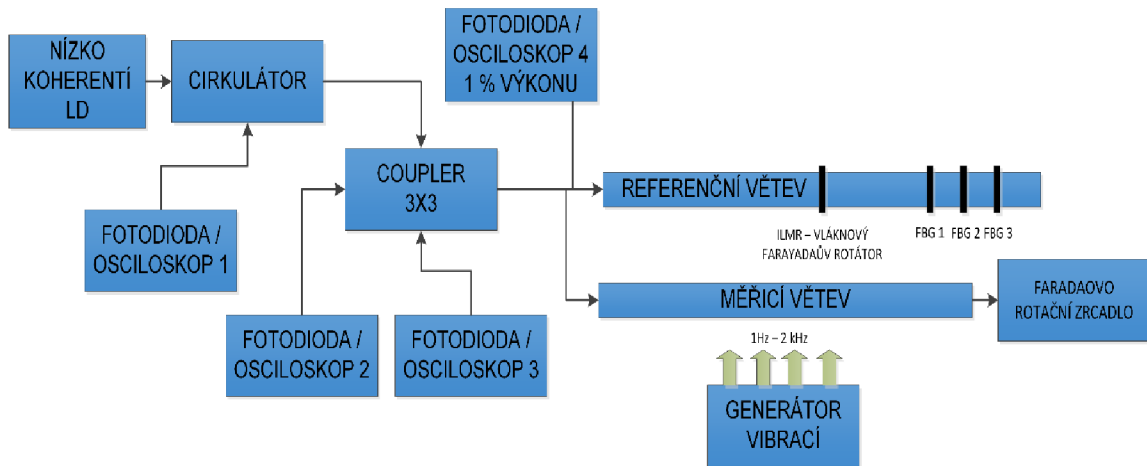


Obr. 7.3: Možná variace měření se spektrálním analyzátozem

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.

7.1.4 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. 7.4.



Obr. 7.4: Blokové schéma zapojení pro kompenzaci délek ramen.

Jak je z obrázku Obr. 7.4 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.

7.1.5 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.

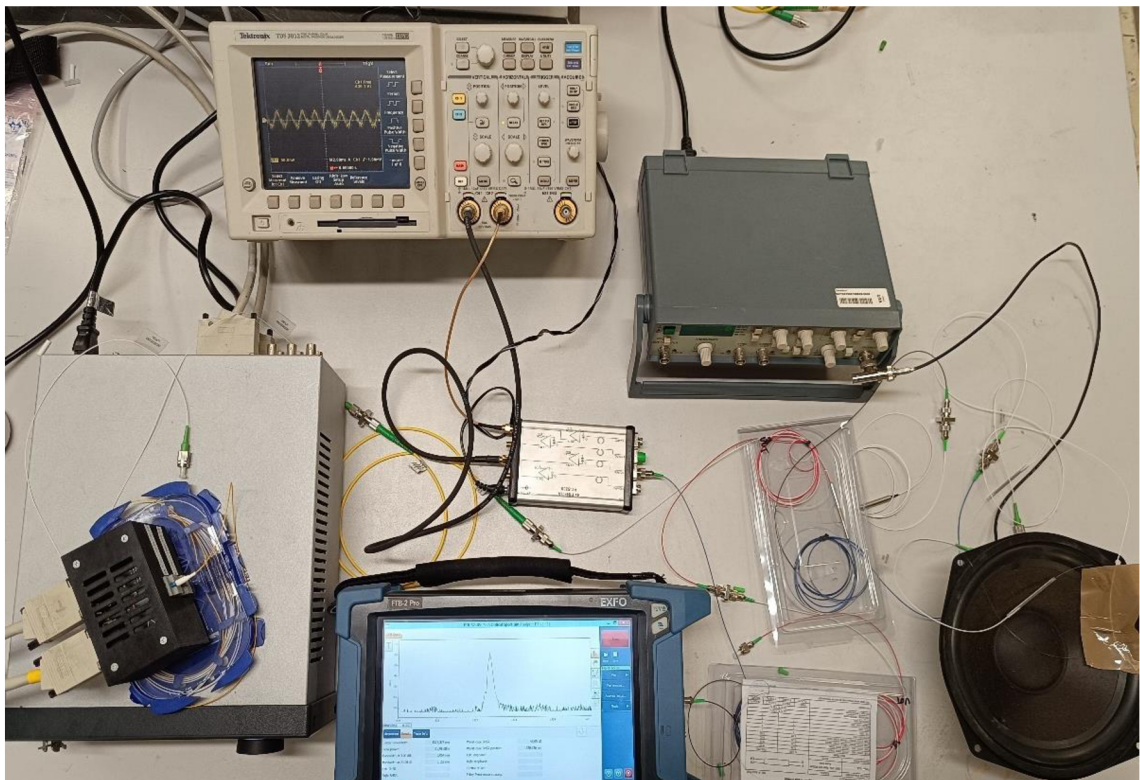
Princip měření

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.

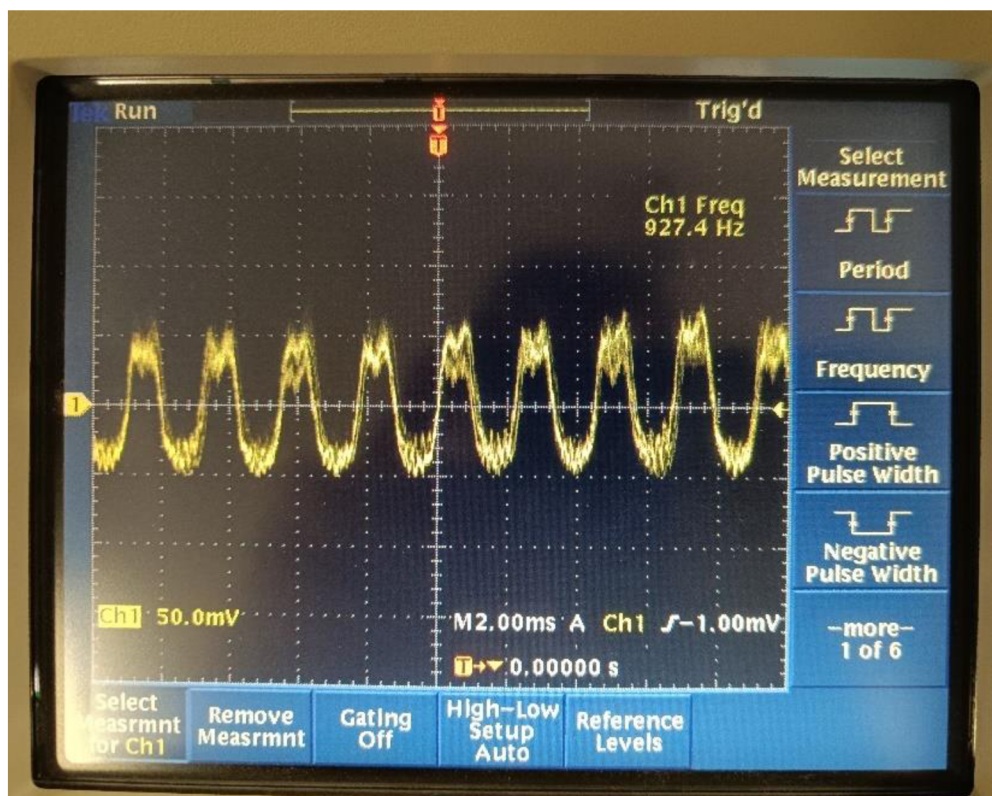
Tab. 7.3: Tabulka s parametry vláknových mřížek:

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. 7.5: Zapojení Michelsonova interferometru v laboratoři

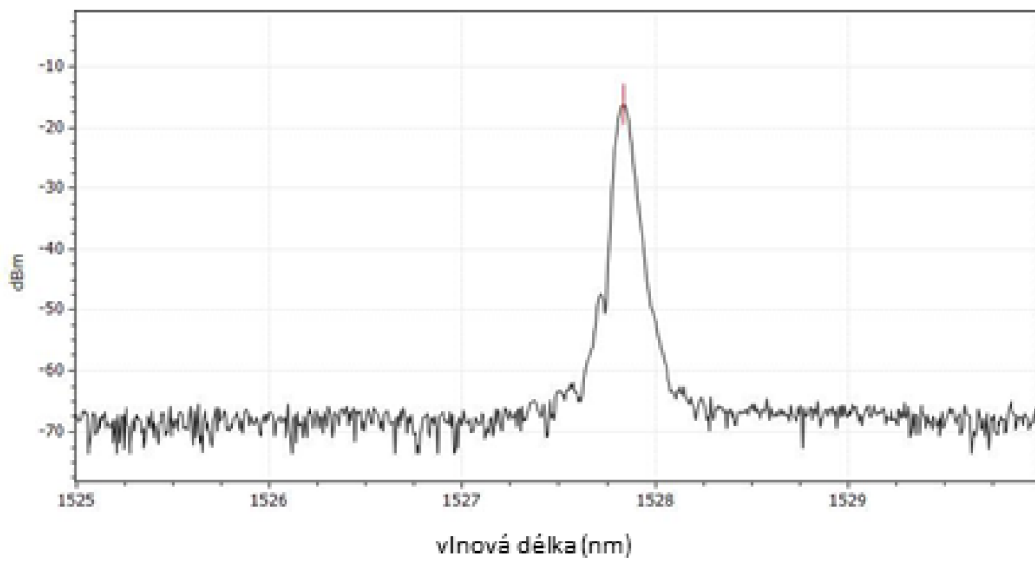


Obr. 7.6: Detekovaný signál na osciloskopu

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. 7.7: 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 kapitole 1.

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 odstupů 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 koherentními a 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.; GREJAR, 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.; GREJAR, 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.; PANASCÍ, M.; MASCHKE, J.; GREJAR, 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) GREJAR, 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.