

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Brno, 2017

Bc. Petr Srnský



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

OPTOVLÁKNOVÁ INTERFEROMETRIE

FIBER OPTIC INTERFEROMETRY

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Petr Srnský

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Milan Čučka

BRNO 2017

Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor **Telekomunikační a informační technika**

Ústav telekomunikací

Student: Bc. Petr Srnský

ID: 158232

Ročník: 2

Akademický rok: 2016/17

NÁZEV TÉMATU:

Optovláknová interferometrie

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Cílem diplomové práce bude návrh simulačních modelů Machova-Zehnderova a Michelsonova interferometru v prostředí Matlab a VPIphotonics. Dále bude proveden vlastní návrh zapojení a výběr součástí potřebných pro stavbu výše uvedených interferometrů. V poslední části práce bude porovnání dosažených výsledků v simulačních modelech a při měření.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] Fiber optic sensors: an introduction for engineers and scientists. 2nd ed. Editor Eric Udd, William B Spillman. Hoboken: Wiley, c2011, xiii, 498 s. ISBN 978-0-470-12684-4

[2] FILKA, Miloslav. Optoelektronika pro telekomunikace a informatiku. Vyd. 1. Brno: Miloslav Filka, 2009, 369 s. ISBN 978-80-86785-14-1.

Termín zadání: 1.2.2017

Termín odevzdání: 24.5.2017

Vedoucí práce: Ing. Milan Čučka

Konzultant:

doc. Ing. Jiří Mišurec, CSc.
předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

ABSTRAKT

Cílem diplomové práce je teoretický rozbor optovláknového senzorického snímání pomocí koherentní a nekoherentní interferometrie, vytvoření simulačních modelů interferometrů a jejich praktické měření. V první části se práce zabývá popisem základních fyzikálních principů a interferometrů. Ve druhé části se práce zabývá popisem a návrhem optických mikrofonů, které jsou založeny na principech fyzikálních interferometrů Michelsonova a Mach - Zehnedorova interferometru. Oba modely jsou simulovány v simulačním prostředí VPIphotonics. Ve třetí části práce jsou oba zmíněné modely sestaveny a měřeny. V poslední části práce jsou uvedeny rozdíly mezi interferometry a popsány výsledky měření.

KLÍČOVÁ SLOVA

Interferometr, interference, koherence, koherentní délka, index lomu, fyzikální interferometr, optický interferometr

ABSTRACT

The aim of the diploma thesis is theoretical analysis of optical fiber sensory sensing using coherent and incoherent interferometry, creation of simulation models of interferometers and their practical measurement. The first part deals with the description of basic physical principles and interferometers. In the second part the thesis deals with the description and design of optical microphones, which are based on the principles of physical interferometers Michelson and Mach - Zehnedor interferometer. Both models are simulated in the VPIphotonics simulation environment. In the third part of the thesis, both models are assembled and measured. The last part of the thesis presents the differences between the interferometers and the results of the measurements.

KEYWORDS

Interferometer, interference, coherence, coherence length, refractive index, physical interferometer, optical interferometer

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svou diplomovou práci na téma „Optovláknová interferometrie“ jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové 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 diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této diplomové práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a/nebo majetkových a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

Brno

.....

(podpis autora)



Faculty of Electrical Engineering
and Communication
Brno University of Technology
Purkynova 118, CZ-61200 Brno
Czech Republic
<http://www.six.feec.vutbr.cz>

PODĚKOVÁNÍ

Výzkum popsany v této diplomové práci byl realizován v laboratořích podpořených z projektu SIX; registrační číslo CZ.1.05/2.1.00/03.0072, operační program Výzkum a vývoj pro inovace.

BRNO

.....
podpis autora



EVROPSKÁ UNIE
EVROPSKÝ FOND PRO REGIONÁLNÍ ROZVOJ
INVESTICE DO VAŠÍ BUDOUCNOSTI



OP Výzkum a vývoj
pro inovace

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych poděkoval vedoucímu diplomové práce panu Ing. Milan Čučka za odborné vedení, konzultace, trpělivost a podnětné návrhy k práci.

Brno

.....

(podpis autora)

OBSAH

Úvod	13
1 Optovláknové senzorické snímání	14
1.1 Interference světla	14
1.2 Světlo jako vlna	15
1.3 Zákon lomu	16
1.3.1 Index lomu	17
1.4 Koherence	17
1.5 Interference koherentních vln	18
1.6 Koherentní délka	19
1.7 Typy interferometrů	19
1.7.1 Michelsonův interferometr	20
1.7.2 Mach - Zehnderův interferometr	20
1.7.3 Fabryův - Pérotův interferometr	21
1.7.4 Rayleighův interferometr	22
1.8 Detekční techniky interferometrů	22
1.8.1 Homodynní detekce	23
1.8.2 Heterodynní detekce	24
2 Optické interferometry	25
2.1 Interferometr jako optický mikrofon	25
2.1.1 Návrh a simulace optického mikrofonu na bázi Michelsonova interferometru	25
2.1.2 Návrh a simulace optického mikrofonu na bázi Mach - Zehn- derova interferometru	28
2.1.3 Návrh optického mikrofonu na bázi Sagnacova interferometru	30
3 Optická interferometrie v praxi	33
3.1 Realizace Michelsonova interferometru	34
3.1.1 Měření frekvencí pomocí Michelsonova interferometru	40
3.1.2 Výsledky měření Michelsonova interferometru	42
3.2 Realizace Mach - Zehnderova interferometru	45
3.2.1 Měření frekvencí pomocí Mach - Zehnderova interferometru . .	46
3.2.2 Výsledky měření Mach - Zehnderova interferometru	47
3.3 Měření frekvencí pomocí školního přípravku	50
4 Závěr	53

Literatura	54
Seznam symbolů, veličin a zkratk	57
Seznam příloh	58
A Obsah přiloženého CD	59
A.1 Elektronická verze práce	59
A.2 Složka VPIphotonics	59
A.3 Složka Matlab	59
B Přílohy	60
B.1 Frekvenční průběhy Michelsonova interferometru	60
B.2 Frekvenční průběhy Mach - Zehnderova interferometru	64

SEZNAM OBRÁZKŮ

1.1	Elektromagnetické vlnění.	15
1.2	Snellův zákon.	16
1.3	Rozdíl mezi koherenčním a nekoherenčním záření.	17
1.4	Interference na dvojštěrbíně.	18
1.5	Interferometr se stejnou délkou ramen.	19
1.6	Základní rozdělení interferometrů.	19
1.7	Michelsonův interferometr.	20
1.8	Mach - Zehnderův interferometr.	21
1.9	Fabryův - Pérotův interferometr.	21
1.10	Rayleighův interferometr.	22
1.11	Schéma homodynní detekce.	23
1.12	Schéma heterodynní detekce.	24
2.1	Schéma zapojení Michelsonova interferometru v simulačním prostředí.	26
2.2	Výstupní signál měřícího ramena.	27
2.3	Výstupní signál Michelsonova interferometru.	27
2.4	Schéma zapojení Mach - Zehnderova interferometru v simulačním prostředí.	28
2.5	Výstupní signál měřícího ramena.	29
2.6	Výstupní signál Mach - Zehnderova interferometru.	29
2.7	Sagnacův interferometr.	31
2.8	Schéma optického mikrofónu pro detekci multifrekvenčního signálu.	31
3.1	Blokové schéma měřeného Michelsonova interferometru.	34
3.2	Laserová dioda: typ SLT5412.	34
3.3	Přípravek pro umístění laserové diody s teplotní stabilizací.	35
3.4	Optický izolátor.	36
3.5	Vazební člen s dělicím poměrem 50/50.	37
3.6	Technické specifikace vazebního členu – coupleru.	37
3.7	Konektor FC/APC.	38
3.8	Optická spojka.	38
3.9	Faradayovo zrcadlo.	39
3.10	Fotodioda.	39
3.11	Ukázka zapojení Michelsonova interferometru v laboratoři.	40
3.12	Generátor Escort EGC-3235A.	41
3.13	Výstupní signál Michelsonova interferometru při frekvenci 1 Hz.	42
3.14	Výstupní signál Michelsonova interferometru při frekvenci 5 Hz.	42
3.15	Výstupní signál Michelsonova interferometru při frekvenci 10 Hz.	42
3.16	Výstupní signál Michelsonova interferometru při frekvenci 100 Hz.	43

3.17	Výstupní signál Michelsonova interferometru při frekvenci 500 Hz. . .	43
3.18	Výstupní signál Michelsonova interferometru při frekvenci 1000 Hz. .	43
3.19	Výstupní signál Michelsonova interferometru při frekvenci 1500 Hz. .	44
3.20	Blokové schéma měřeného Mach - Zehnderova interferometru.	45
3.21	Ukázka zapojení Mach - Zehnderova interferometru v laboratoři. . .	46
3.22	Výstupní signál Mach - Zehnderova interferometru při frekvenci 1 Hz.	47
3.23	Výstupní signál Mach - Zehnderova interferometru při frekvenci 5 Hz.	47
3.24	Výstupní signál Mach - Zehnderova interferometru při frekvenci 10 Hz.	47
3.25	Výstupní signál Mach - Zehnderova interferometru při frekvenci 100 Hz.	48
3.26	Výstupní signál Mach - Zehnderova interferometru při frekvenci 300 Hz.	48
3.27	Výstupní signál Mach - Zehnderova interferometru při frekvenci 500 Hz.	48
3.28	Výstupní signál Mach - Zehnderova interferometru při frekvenci 700 Hz.	49
3.29	Výstupní signál Michelsonova interferometru (na školním přípravku) při frekvenci 1 Hz.	50
3.30	Výstupní signál Mach - Zehnderova interferometru (na školním přípravku) při frekvenci 1 Hz.	50
3.31	Výstupní signál Michelsonova interferometru (na školním přípravku) při frekvenci 300 Hz.	51
3.32	Výstupní signál Mach - Zehnderova interferometru (na školním přípravku) při frekvenci 300 Hz.	51
3.33	Výstupní signál Michelsonova interferometru (na školním přípravku) při frekvenci 300 Hz.	52
3.34	Výstupní signál Mach - Zehnderova interferometru (na školním přípravku) při frekvenci 300 Hz.	52
B.1	Výstupní signál Michelsonova interferometru při frekvenci 50 Hz. . . .	60
B.2	Výstupní signál Michelsonova interferometru při frekvenci 200 Hz. . .	60
B.3	Výstupní signál Michelsonova interferometru při frekvenci 300 Hz. . .	60
B.4	Výstupní signál Michelsonova interferometru při frekvenci 400 Hz. . .	61
B.5	Výstupní signál Michelsonova interferometru při frekvenci 600 Hz. . .	61
B.6	Výstupní signál Michelsonova interferometru při frekvenci 700 Hz. . .	61
B.7	Výstupní signál Michelsonova interferometru při frekvenci 800 Hz. . .	62
B.8	Výstupní signál Michelsonova interferometru při frekvenci 900 Hz. . .	62
B.9	Výstupní signál Michelsonova interferometru při frekvenci 1100 Hz. .	62
B.10	Výstupní signál Michelsonova interferometru při frekvenci 1200 Hz. .	63
B.11	Výstupní signál Michelsonova interferometru při frekvenci 1300 Hz. .	63

B.12 Výstupní signál Michelsonova interferometru při frekvenci 1400 Hz. . .	63
B.13 Výstupní signál Mach - Zehnderova interferometru při frekvenci 50 Hz.	64
B.14 Výstupní signál Mach - Zehnderova interferometru při frekvenci 200 Hz.	64
B.15 Výstupní signál Mach - Zehnderova interferometru při frekvenci 400 Hz.	64
B.16 Výstupní signál Mach - Zehnderova interferometru při frekvenci 600 Hz.	65

ÚVOD

Cílem diplomové práce je teoretický rozbor optovláknového sensorického snímání pomocí koherentní a nekoherentní interferometrie, návrh simulačních modelů Michelsonova a Mach-Zehnderova interferometru. Dále je v práci proveden vlastní návrh zapojení a výběr součástek potřebných pro stavbu výše uvedených interferometrů. V poslední části práce je vysvětlena realizace interferometrů a popis dosažených výsledků měření s porovnáním výsledků v simulačních modelech.

Optovláknem, neboli optické vlákno, je skleněné nebo plastové vlákno, které prostřednictvím světla přenáší signály ve směru své podélné osy a využívá se v telekomunikacích. Postupně vytlačuje metalické kabely jak na dálkových trasách, tak již na trasách kratších. Optická vlákna se dají využít i jako sensorické snímače a právě tato problematika je v této práci diskutována a řešena.

Moderní vláknově optické senzory se vyvíjí od doby, kdy bylo vynalezeno optické vlákno. Jejich nástup byl velmi razantní. Přesto, že dnes neexistuje fyzikální veličina, kterou by nebylo možné jimi měřit, nedošlo u nich k tak velkému rozšíření, jak se předpokládalo. Jako hlavní důvod této skutečnosti lze považovat jak ekonomickou stránku věci, tak i přístup uživatelů měřící techniky. Použití vláknově optických sensorů je v některých aplikacích nenahraditelné, protože i nejlepší klasické senzory nedosahují tak přesných parametrů. Mezi základní výhody vláknově optických sensorů patří jejich nízká hmotnost, velmi malé rozměry, pasivita, vysoká citlivost, linearita, široké spektrum použití a hlavní výhodou je odolnost proti elektromagnetickému rušení. Mezi hlavní nevýhody patří vysoká cena.

Vláknově optické senzory můžeme využít jako senzory rotace, zrychlení, elektrického pole a magnetického pole, teploty, tlaku, vlhkosti, viskozity, chemických a biochemických vlastností.

Zdroj optického záření je podle požadavků nejčastěji tvořen buď luminiscenční diodou (nekoherentní zdroj záření) nebo laserovou diodou (koherentní zdroj záření) a je charakterizován zejména vlnovou délkou λ , šířkou pásma $\Delta\lambda$, optickým výkonem, stabilitou a druhem provozu (kontinuální nebo pulsní). Snímače optického záření jsou obvykle fotodiody, PIN diody nebo lavinové diody podle požadované citlivosti, odstupů signál – šum, zisku a podle způsobu dalšího zpracování snímaného signálu.

V práci jsou rozebrány základní fyzikální vlastnosti a základní druhy interferometrických sensorů. Mezi tyto senzory patří například Michelsonův interferometr, Mach-Zehnderův interferometr, Sagnacův interferometr. Realizace a měření frekvenční škály v této práci proběhla ve dvou konfiguracích a to u Michelsonova a Mach-Zehnderova interferometru.

1 OPTOVĚKNOVÉ SENZORICKÉ SNÍMÁNÍ

Tato kapitola pojednává o základních pojmech optovlákenného senzornického snímání a fyzikálních principech, na kterých je optovlákenná interferometrie založena. Dále se věnuje fyzikálnímu popisu světelného záření a nabízí popis základních interferometrů.

Pod pojmem optovlákenné senzornické snímání si představujeme určitý druh snímání parametrů za pomoci optických vláken. Zařízení sloužící ke snímání těchto parametrů se nazývá interferometr. Interferometr je zařízení využívající vlnové podoby světla. Na světlo lze pohlížet jako na vlnění podobné vlně běžící po nataženém laně. Světlo laseru je monochromatické a koherentní, čímž se liší od světla slunce nebo žárovky. Monochromatické znamená, že má jen jednu barvu, tedy jednu vlnovou délku. Koherentní znamená, že všechny vlny, představme si je jako sinusovky, mají stejnou fázi. Světlo laseru lze nejlépe připodobnit k vlnění běžícímu jedním směrem po napnutém laně. Světlo je elektromagnetické vlnění, stejně, jako radiové vlny, jen vlnová délka je velmi malá.

Interferometr využívá skutečnosti, že monochromatické a koherentní světlo je schopné interference, to znamená sčítání a odečítání vlny. Rozdělíme-li světelný svazek na dva, například polopropustným zrcadlem, necháme svazky procházet různými drahami a pak je na dalším nebo tomtéž polopropustném zrcadle sloučíme, vlny se sečtou nebo odečtou podle toho jsou-li tzv. ve fázi, nebo tzv. v protifázi. Ve fázi znamená, že se setkávají maxima s maximy sinusovky, v protifázi se naopak setkává maximum s minimem. Vlny sloučené ve fázi vytvoří vlnu původní, jako před rozdělením. [3]

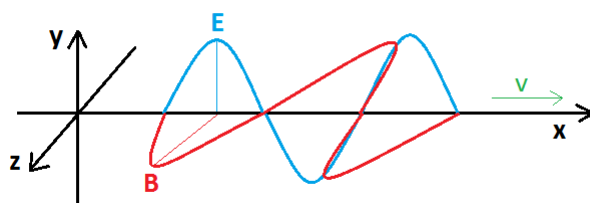
1.1 Interference světla

Interference neboli skládání světla je jev, při němž se nejvýrazněji projevují vlnové vlastnosti světla. Interference spočívá v tom, že vlnění, která přicházejí do určitého bodu z různých zdrojů, se v daném bodě vzájemně skládají. U mechanického vlnění se sčítají okamžité výchylky kmitajícího pružného prostředí, u elektromagnetického vlnění se sčítají okamžité výchylky elektrické složky a magnetické složky elektromagnetického vlnění. Interference je jev, pomocí kterého se ve fyzice dokazuje vlnová povaha zkoumaného fyzikálního jevu. Pokud dojde k interferenci, je vlnová povaha jevu potvrzena. O objasnění interference světla se zasloužil anglický fyzik Thomas Young, který důsledně vycházel z představy, že světlo je vlnění. [4]

1.2 Světlo jako vlna

Světlo je elektromagnetické vlnění s velmi vysokou frekvencí. Existují ale i další druhy elektromagnetického vlnění jako rádiové vlny, infračervené záření, UV záření, atd., které tvoří spektrum elektromagnetických vln. Obecně elektromagnetické vlnění představuje děj vzájemných přeměn elektrické a magnetické složky pole. Obě složky, elektrická, kterou představuje vektor intenzity elektrického pole \mathbf{E} a magnetická, kterou tvoří vektor magnetické indukce \mathbf{B} , vytvářejí jediné elektromagnetické pole.

Tyto složky jsou na sebe navzájem kolmé a jsou kolmé na směr šíření vlnění. Z toho tedy vyplývá, že každé elektromagnetické vlnění je vlnění příčné.



Obr. 1.1: Elektromagnetické vlnění.

Na obrázku 1.1 se elektromagnetická vlna šíří v kladném směru osy x , vektor intenzity elektrického pole se promítá do osy y a vektor magnetické indukce do osy z . Dále platí, že u postupné vlny jsou oba vektory ve fázi, což znamená, že obě veličiny nabývají svých maximálních hodnot ve stejném okamžiku. Na světlo se dá nahlížet jako na vlnění z pohledu vlnové optiky nebo jako na částice z pohledu kvantové fyziky. Toto je důsledkem širokého frekvenčního spektra, což způsobuje rozdílné velikosti energie. A je to právě energie, která rozhoduje, zda-li má světlo blíže k vlnovému chování nebo k částicovému chování. Oba tyto principy se navzájem nevyklučují, jen je pro určité situace výhodnější využívat popisu vlnového chování a někdy částicového pomocí fotonů. [5]

Rovinnou vlnu postupující ve směru osy x lze popsat harmonickými funkcemi:

$$E = E_m \sin 2\pi\left(\frac{t}{T} - \frac{x}{\lambda}\right) = E_m \sin \omega\left(t - \frac{x}{v}\right) \quad (1.1)$$

$$B = B_m \sin 2\pi\left(\frac{t}{T} - \frac{x}{\lambda}\right) = B_m \sin \omega\left(t - \frac{x}{v}\right) \quad (1.2)$$

Rychlost šíření elektromagnetického vlnění závisí na prostředí, kterým se vlnění šíří. Zde platí vztah:

$$v = \frac{1}{\sqrt{\epsilon\mu}}, \quad (1.3)$$

kde ϵ je permitivita a μ je permeabilita prostředí. Ve vakuu se tedy elektromagnetické vlnění šíří rychlostí:

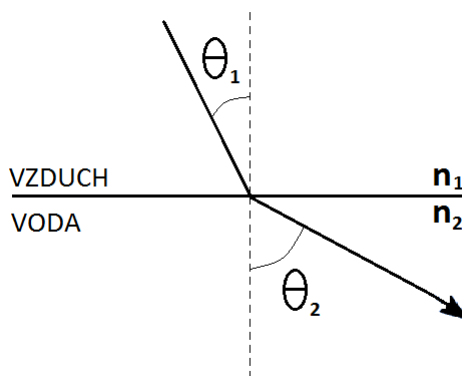
$$c = \frac{E_m}{B_m} = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0\mu_0}} = 3 \cdot 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \quad (1.4)$$

1.3 Zákon lomu

Dopadá-li paprsek z prostředí s indexem lomu n_1 do prostředí s indexem lomu n_2 , dochází k lomu paprsku. Lomený paprsek zůstává v rovině dopadu. Úhel dopadu značíme θ_1 , úhel lomu značíme θ_2 . Pro tyto úhly platí vztah:

$$\frac{\sin \theta_1}{\sin \theta_2} = \frac{n_2}{n_1} \quad (1.5)$$

Tento vztah se nazývá Snellův zákon a patří k základním zákonům popisujícím šíření vlnění, které přechází tzv. lomem přes rozhraní z jednoho prostředí do jiného prostředí, kde se skokově mění optické vlastnosti prostředí. Např. vzduch – voda, jak lze vidět na obrázku 1.2. [6]



Obr. 1.2: Snellův zákon.

1.3.1 Index lomu

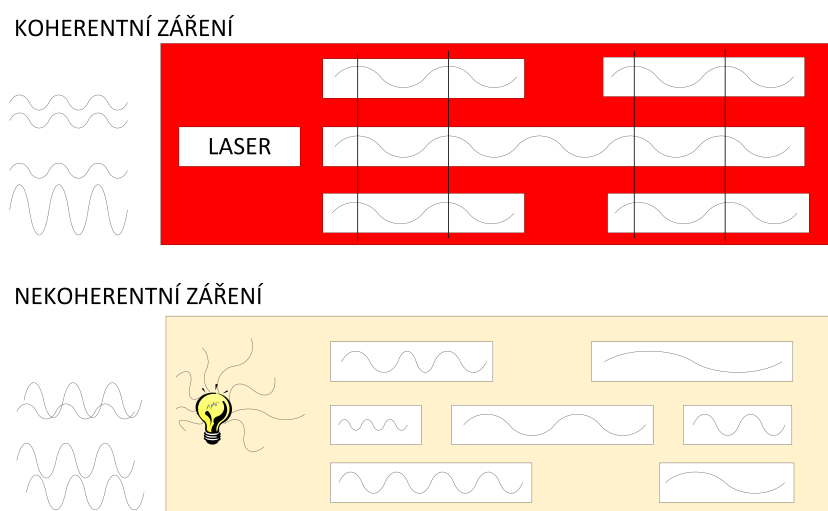
Jedná se o vztah, který popisuje prostředí, ve kterém k lomu světelného paprsku dochází. Jde o bezrozměrnou jednotku o celkové hodnotě větší než 1. Index lomu je dán vztahem: [6]

$$n = \frac{c}{v}[-], \quad (1.6)$$

kde c je rychlost šíření světla ve vakuu a v je rychlost šíření světla v daném materiálu.

1.4 Koherence

Koherencí rozumíme vzájemnou souvislost fáze a amplitudy vlnění vycházejících buď ze dvou různých míst na povrchu zářícího tělesa (koherence prostorová) nebo vlnění vycházejícího z jednoho místa, avšak s určitým časovým odstupem (koherence časová). Koherentní vlnění je vlnění o stejné frekvenci, stejného směru kmitání a stejné fázi nebo fázovém rozdílu. Mezi zdroje koherentního elektromagnetického vlnění patří především lasery, masery. Na obrázku 1.3 je vidět rozdíl mezi koherentním a nekoherentním zdrojem a šíření elektromagnetických vln.



Obr. 1.3: Rozdíl mezi koherenčním a nekoherenčním zářením.

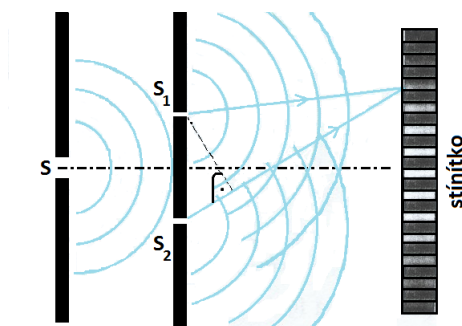
Optické záření dělíme na základě koherence do tří skupin:

- koherentní,
- částečně koherentní,
- nekoherentní.

Na koherenci závisí také interference vln. Jestliže vlny interferují, ať už destruktivně či konstruktivně, záleží to na jejich vzájemném fázovém posunu. Dvě vlny nazveme koherentními, jestliže je jejich fázový rozdíl konstantní, tedy i jejich vlnová délka je shodná. [7]

1.5 Interference koherentních vln

Koherentní jsou dvě světelné vlny o stejné frekvenci, jejichž vzájemný fázový rozdíl v daném místě je konstantní. Skládání dvou vlnění lze demonstrovat např. interferencí na dvojštěrbíně viz. obrázek 1.4 , kterou osvětlíme zdrojem monofrekvenčního světla o vlnové délce λ ze štěrbině S. Štěrbiny S_1 a S_2 jsou pak zdrojem dvou koherentních vln, které se skládají na stínítku za dvojštěrbínou, kde pozorujeme interferenční obrazce. [8]



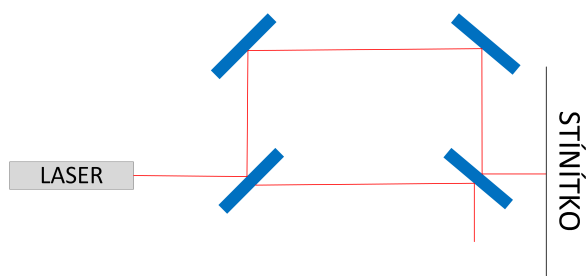
Obr. 1.4: Interference na dvojštěrbíně.

Na stínítku dochází k mezním situacím:

- V místě vznikne interferenční maximum: na stínítku pozorujeme maxima jako světlá místa. Vlnění se setkají se stejnou fází.
- V místě vznikne interferenční minimum: na stínítku pozorujeme minima jako tmavá místa. Vlnění se setkává s opačnou fází.

1.6 Koherentní délka

Koherentní délka udává největší dráhový rozdíl, při němž je ještě světlo daného zdroje schopno interference. U polovodičových laserů jde typicky o centimetry, u kvalitních He-Ne laserů až o metry. Koherentní délka je důležitým parametrem u aplikací využívajících interference, jako například při měření délky, či měření poloměrů křivosti optických ploch. Na obrázku 1.5 vidíme interferometr, který zobrazí na stínítku interferenční proužky pouze v případě, je-li koherentní délka laseru nejméně tak dlouhá jako rozdíl délek obou ramen. [9]



Obr. 1.5: Interferometr se stejnou délkou ramen.

1.7 Typy interferometrů

V následujících podkapitolách budou uvedeny a vysvětleny základní typy fyzikálních interferometrů. Tyto je možné rozdělit do tří skupin: viz. obrázek 1.6

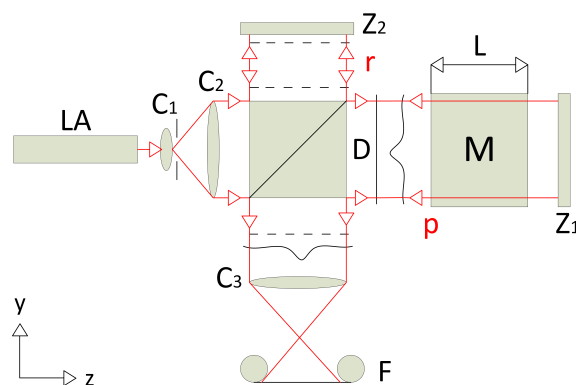
- interferenční komparátory - slouží k měření délek,
- interferenční refraktometry - slouží k určení indexů lomu kapalin a plynů,
- interferenční spektroskopy - slouží k určení jemné struktury spektrálních čar.



Obr. 1.6: Základní rozdělení interferometrů.

1.7.1 Michelsonův interferometr

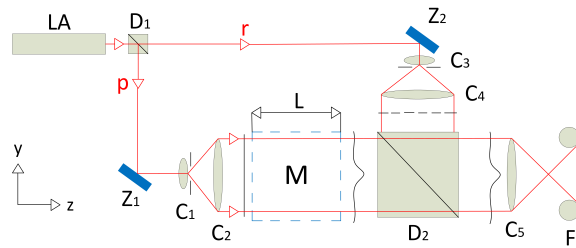
Měřený transparentní objekt se vkládá do měřicího prostoru M v jedné z větví interferometru. Úzký světelný svazek z laseru LA je upraven čočkami C_1 a C_2 na paralelní svazek o větším průměru, který se na děliči D rozdělí na svazek předměťový p a referenční r. Předměťový svazek prochází měřicím prostorem M o délce L, přičemž původní rovinná vlnoplocha se po průchodu transparentní nehomogenitou tam a zpět deformuje. Po odraze předměťového a referenčního svazku na zrcadlech Z_1 a Z_2 se svazky opět spojí a v důsledku různých optických drah předměťových a referenčních paprsků vzniká interference. Čočka C_3 slouží k zobrazení roviny z měřicího prostoru do fotoaparátu F. [10]



Obr. 1.7: Michelsonův interferometr.

1.7.2 Mach - Zehnderův interferometr

Mach – Zehnderův interferometr slouží pro přesná měření transparentních objektů, i když není tak citlivý jako Michelsonův interferometr, u kterého prochází předměťový svazek měřeným objektem dvakrát. Měřicí prostor lze však umístit do dostatečné vzdálenosti od optických prvků a od referenčního svazku. Proto lze toto zařízení používat i pro výzkum objektů generujících do okolí tepelný tok. Přesnost měření lze zvýšit aplikací korekcí na zakřivení paprsků, které jsou účinné právě u interferometrů s jedním průchodem paprsků měřeným objektem. Zařízení může být seřizováno na konečnou a nekonečnou šířku interferenčních proužků v referenční oblasti natočením děliče D_2 . Nevýhodou Mach – Zehnderova interferometru je nutnost používat vysoce kvalitní čočky, zrcadla a děliče. schema viz. obrázek 1.8.

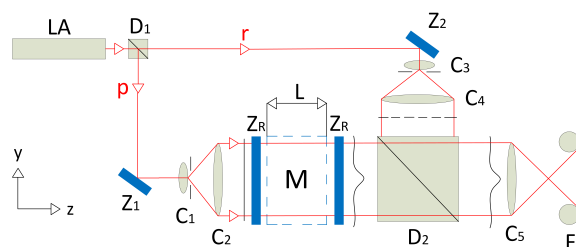


Obr. 1.8: Mach - Zehnderův interferometr.

Světelný svazek z laseru LA se na děliči D_1 rozdělí na svazek předmětový p a referenční r. Předmětový svazek je upraven čočkami C_1 a C_2 na paralelní svazek o větším průměru a prochází měřicím prostorem M o délce L, přičemž původní rovinná vlnoplocha se transparentním objektem deformuje. Obdobně je čočkami C_3 a C_4 upraven referenční svazek. Po spojení svazků na děliči D_2 vzniká díky různým optickým drahám předmětových a referenčních paprsků interference. Čočka C_5 zobrazuje pak rovinu z měřicího prostoru do fotoaparátu F. [11]

1.7.3 Fabryův - Pérotův interferometr

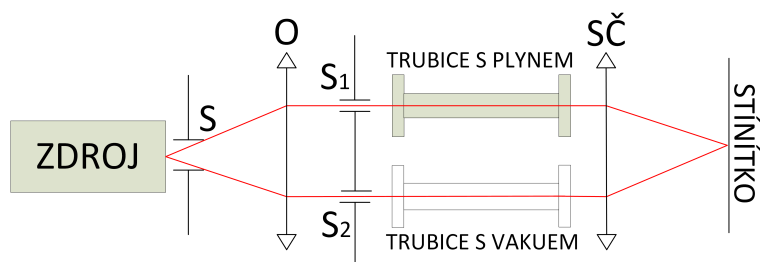
Nejcitlivějším interferometrem pro výzkum transparentních objektů je Fabryův - Pérotův interferometr uvedený na obrázku 1.9. Jedná se vlastně o Mach - Zehnderův interferometr, popsáný v předešlé podkapitole, viz obrázek 1.7, jehož měřicí prostor je doplněn o rezonátor s polopropustnými zrcadly Z_R . Předmětový svazek p pak prochází měřeným transparentním objektem vícekrát (obvykle deset až stokrát), což lze ovlivnit transmitancí zrcadel Z_R . Zrcadla musí však být umístěna co nejblíže měřicího prostoru, aby se minimalizovaly chyby měření způsobené zakřivením paprsků. [12]



Obr. 1.9: Fabryův - Pérotův interferometr.

1.7.4 Rayleighův interferometr

Na obrázku 1.10 zkoumané světlo prochází štěrbinou S, objektivem O a poté dvěma štěrbinami S_1 a S_2 rovnoběžnými se štěrbinou S. Za těmito štěrbinami se nachází spojná čočka SČ, za kterou dochází k interferenci, tedy ke vzniku interferenčních proužků na stínítku. Mezi objektivem a dvojtěrbínovou destičkou se vkládají trubice obsahující plyn a vakuum a porovnávají se optické dráhy paprsků, které prochází trubicemi. [13]



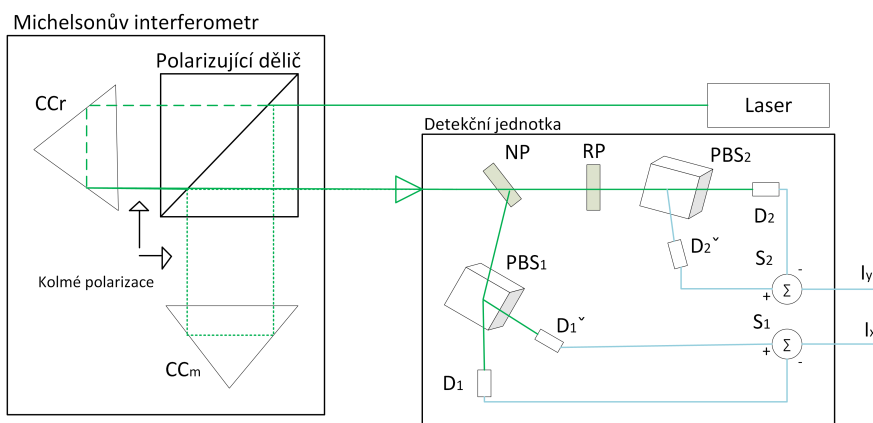
Obr. 1.10: Rayleighův interferometr.

1.8 Detekční techniky interferometrů

Laserové interferometry je možné použít k přesnému měření vzdálenosti. Například Michelsonův interferometr je možné využít k měření změny polohy měřicího zrcadla. Nejjednodušší metodou detekce změny polohy měřicího zrcadla Michelsonova interferometru je počítání interferenčních proužků na výstupu interferometru. Základní rozlišení je pak dáno polovinou vlnové délky použitého laseru. V tomto případě však není možné detekovat směr pohybu měřicího zrcadla. Tato kapitola se zabývá metodami, které umožňují dosáhnout vyššího rozlišení a detekce směru pohybu měřicího zrcadla interferometru.

1.8.1 Homodynní detekce

Při homodynní detekci jsou dva signály, které jsou vzájemně fázově posunuty o $\frac{\pi}{2}$, získány kombinací optických prvků a rozdílových zesilovačů. Schéma interferometru s homodynní detekcí je na obrázku 1.11. Zdrojem světla pro interferometr je laser, ze kterého vychází svazek lineárně polarizovaný v úhlu 45 stupňů, na polarizujícím děliči se tedy svazek rozdělí na dva svazky, které mají navzájem kolmou polarizaci – s polarizace je odražena do měřicí větve a p polarizace prochází do referenční větve. V obou větvích jsou umístěny koutové odražeče, od kterých se svazky odrazí zpět na polarizující dělič. Svazek z referenční větve má p polarizaci, děličem tedy prochází. Zatímco svazek z měřicí větve má s polarizaci, je tedy odražen. Osa obou svazků po průchodu polarizujícím děličem je stejná, protože však svazky mají navzájem kolmou polarizaci, nepozorujeme na výstupu interferometru interferenci. [14]

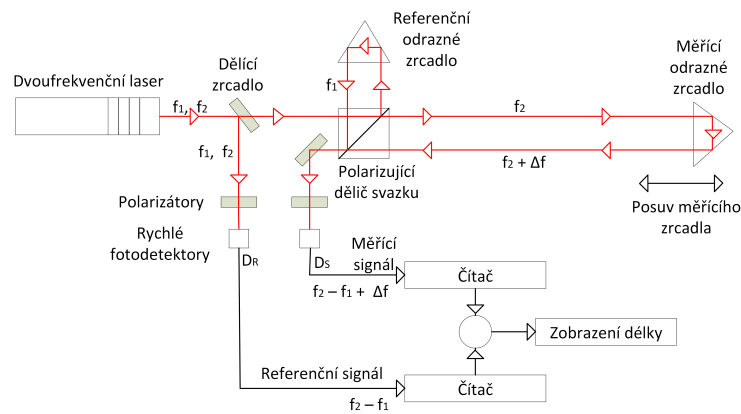


Obr. 1.11: Schéma homodynní detekce.

- CCr je koutový odražeč v referenční větvi,
- CCm je koutový odražeč v měřicí větvi,
- NP je nepolarizující dělič,
- RP je zpožďovací deska,
- PBS1 a PBS2 jsou polarizující děliče,
- D jsou fotodetektory,
- S jsou rozdílové zesilovače.

1.8.2 Heterodynní detekce

Při heterodynní detekci využíváme jako zdroj světla dvoufrekvenční laser. Polarizace obou frekvencí jsou navzájem kolmé. Svazek nejprve rozdělíme nepolarizujícím dělicím zrcadlem. Jedna část svazku prochází přímo přes polarizátor, který je natočený v úhlu 45 stupňů vůči polarizacím obou frekvencí. Za polarizátorem pak mají svazky obou frekvencí stejnou polarizaci. Vzhledem k tomu, že obě frekvence laseru jsou blízké, vzniknou za polarizátorem zázněje, které zaznamenáváme pomocí rychlého fotodetektoru a měříme čítačem. Druhá část svazku dopadá na polarizující dělič svazku, od kterého se jedna polarizace odráží do referenční větve interferometru, druhá polarizace prochází do měřicí větve interferometru. V obou větvích jsou poté umístěny koutové odražeče, od kterých se svazky odráží zpět do polarizujícího děliče. Za polarizujícím děličem je poté opět umístěn polarizátor a detektor pro detekci záznějů připojený na čítač.



Obr. 1.12: Schéma heterodynní detekce.

Na obrázku 1.12 vidíme, že zdrojem světla je dvoufrekvenční laser, jehož obě frekvence f_1 a f_2 mají navzájem kolmou polarizaci. Rozdíl frekvencí je měřen pomocí záznějů na fotodetektoru D_R . Svazek je rozdělen polarizujícím děličem tak, že jedna frekvence prochází do referenční větve, druhá do měřicí větve. Na výstupu interferometru spolu svazky interferují a opět měříme rozdíl frekvencí pomocí záznějů na fotodetektoru D_S . Jestliže se měřicí zrcadlo nepohybuje, pak frekvence záznějů na fotodetektoru D_S bude stejná jako na fotodetektoru D_R , a tedy fázový rozdíl obou naměřených signálů se nebude měnit. Při pohybu měřicího zrcadla dochází vlivem Dopplerova jevu ke změně frekvence f_2 o Δf , frekvence záznějů se tedy změní a dojde k nárůstu nebo poklesu fázového rozdílu mezi naměřenými signály. [14]

2 OPTICKÉ INTERFEROMETRY

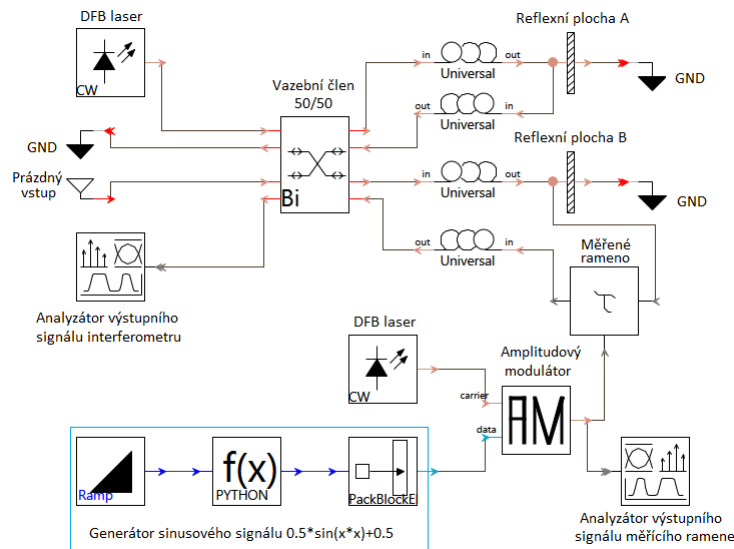
Dosud byly probrány základní principy fyzikálních interferometrů. Tato kapitola se bude věnovat popisu optických mikrofonů, jejich principům a využití v praxi.

2.1 Interferometr jako optický mikrofon

Využití optických mikrofonů na bázi interferometrů se využívá v oblasti senzorové techniky. V praxi se tyto interferometry využívají například k monitoringu na úsecích kudy projíždí různé typy vozidel. Dále se využívají jako detektory nášlapu v budovách. Jejich obrovskou výhodou je odolnost vůči elektromagnetickému rušení a vysoká citlivost. Optické mikrofony převádí změny akustického tlaku na změny optického signálu. Zvuková vlna nemá takové účinky jako mechanické vibrace vlákna způsobené otřesy vlivem chůze nebo jeho deformace vlivem narušení. V praxi to znamená, že zvuk tak způsobí mnohem menší změnu délky optické dráhy a tak vyžaduje vyšší kontrast proužků, zejména pro aplikace jako odposlech, kdy se může jednat o velmi slabé signály. V následujících podkapitolách budou popsány a odsimulovány různá provedení optických mikrofonů na bázi interferometrů. Simulace jsou provedeny pomocí speciálního simulačního programu nesoucí název VPIphotonics.

2.1.1 Návrh a simulace optického mikrofonu na bázi Michelsonova interferometru

V simulačním programu VPIphotonics bylo navrženo následující schéma 2.1. Zdrojem takto navrženého interferometru je DFB laser, který vysílá optický signál do obousměrného vazebního členu 2×2 s dělicím poměrem 50/50. V praxi se jedná o součástku, která dělí optický paprsek do dvou různých směrů, čímž dochází k dělení výkonu světelného zdroje v závislosti na daném dělicím poměru. V praktickém zapojení je důležité si uvědomit, že v případě použití reálných součástí může dojít ke zkreslení výstupního optického signálu vlivem vnitřních nepřesností vazebního členu. V simulaci tomu tak není, protože součástka je ideální s ideálním dělicím poměrem bez jakéhokoliv útlumu. Po průchodu optického signálu vazebním členem se signál rozdělí a putuje do obou ramen interferometru. Horní rameno, kde se nachází reflexní plocha A je tzv. referenční rameno. Zde signál putuje optickým kabelem až k reflexní ploše A, kde dochází k úplnému odrazu světelného svazku, který putuje zpět do vazebního členu a poté je uzemněn.



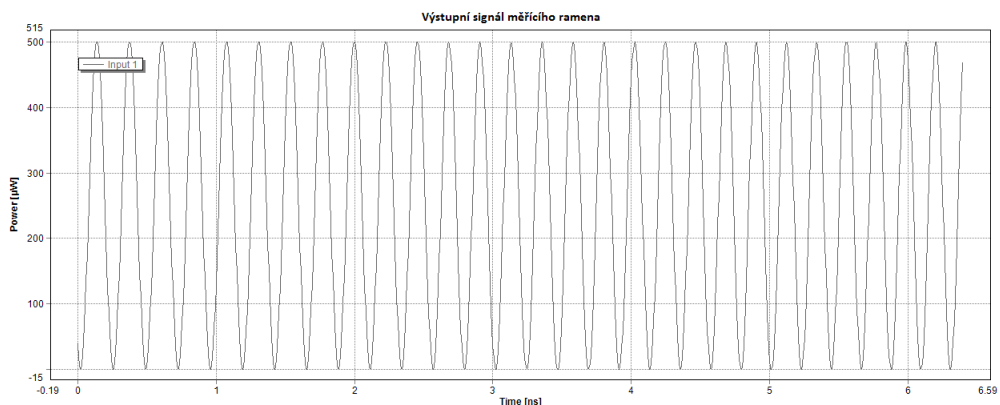
Obr. 2.1: Schéma zapojení Michelsonova interferometru v simulačním prostředí.

Spodní rameno, kde se nachází reflexní plocha B je tzv. rameno měřené. Optický signál z DFB laseru, který vstupuje do měřeného ramena putuje optickým kabelem k reflexní ploše B, odkud se odráží. Po odražení od reflexní plochy B, dříve než signál dorazí zpět do vazebního členu, dochází k ovlivnění původního optického signálu měřenou veličinou. V praxi se může jednat například o vibrace, které rozpo-
hybují část optického kabelu, čímž dojde k mísení původního optického signálu se signálem měřeným. V simulaci byl jako měřený signál zvolen sinusový signál, který se skládá ze tří bloků. V prvním bloku se vytváří proměnná x . Ve druhém bloku se počítá matematická funkce $0.5 * \sin(x^2) + 0.5$. Ve třetím bloku dochází k přeměně matematického signálu na signál elektrický.

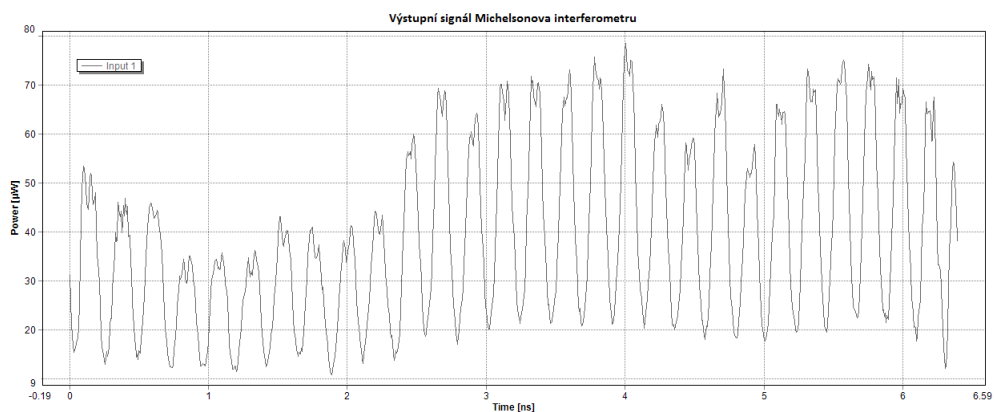
Matematická funkce je volena tak, aby co nejvíce odpovídala realitě, kdy $\sin(x^2)$ je sinusový průběh. Vynásobíme-li $\sin(x^2)$ mocnitelem 0.5 docílíme poloviční amplitudy signálu. Pokud k této funkci přičteme 0.5 posuneme frekvenční osu průběhu do poloviny osy amplitudy. Toto děláme proto, aby bylo možno signál modulovat na signál optický.

Tímto způsobem vytvořený elektrický signál přivádíme na vstup amplitudového modulátoru, kde je tento elektrický signál převeden na signál optický za pomoci DFB laseru, který je nastavený na polovinu optického výkonu, než zdrojový DFB laser. Je to z toho důvodu, že optický signál ze zdrojového DFB laseru se dělí ve vazebním členu v poměru 50/50, čímž dojde po průchodu vazebním členem do měřícího ramena ke snížení jeho optického výkonu o polovinu. Namodulovaný optický signál viz. obrázek 2.2 je poté pomocí bloku τ mísen s původním optickým signálem.

Oba signály jsou přivedeny na výstup měřícího ramena a prochází zpět vazebním členem, kde signály interferují a na výstupu jsou měřeny fázové rozdíly ramen analyzátořem výstupního signálu interferometru viz. obrázek 2.3.



Obr. 2.2: Výstupní signál měřícího ramena.

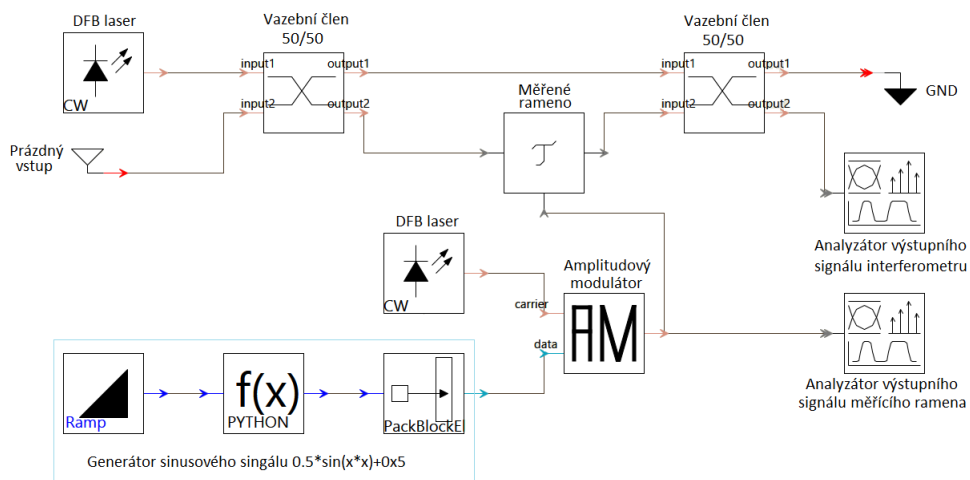


Obr. 2.3: Výstupní signál Michelsonova interferometru.

Z grafů je vidět, že frekvence a pozice minim a maxim odpovídají měřícímu ramenu. Je zde vidět určité zkreslení z důvodů nelineárních jevů v použitém optickém vláknu. Jelikož se jedná pouze o simulaci, je vhodné si pravdivost údajů ověřit měřením na reálném zapojení. [15]

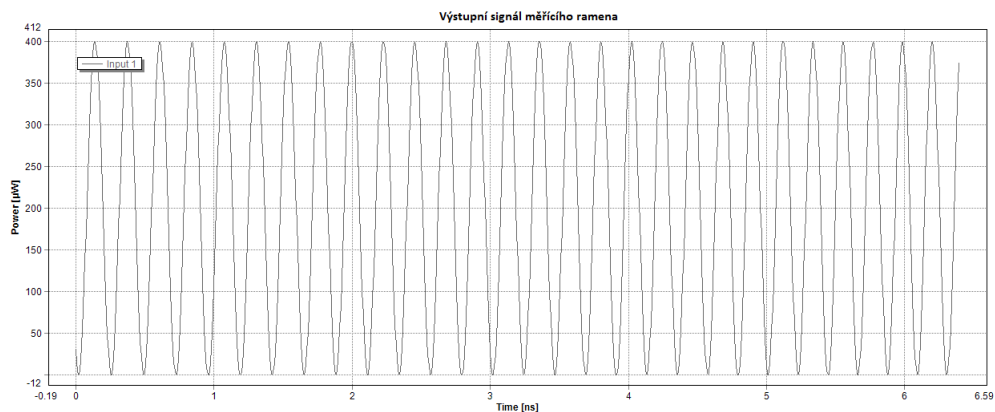
2.1.2 Návrh a simulace optického mikrofonu na bázi Mach - Zehnderova interferometru

V simulačním programu VPIphotonics bylo navrženo následující schéma 2.4. Zdrojem takto navrženého interferometru je DFB laser, který vysílá optický signál do obousměrného vazebního členu s dělicím poměrem 50/50. Optický signál se poté rozdělí na dva signály s polovičním optickým výkonem. Horní část interferometru je tzv. referenční rameno. Z výstupu prvního vazebního členu putuje optický signál na vstup druhého vazebního členu, kde se opět rozdělí na dva optické svazky.

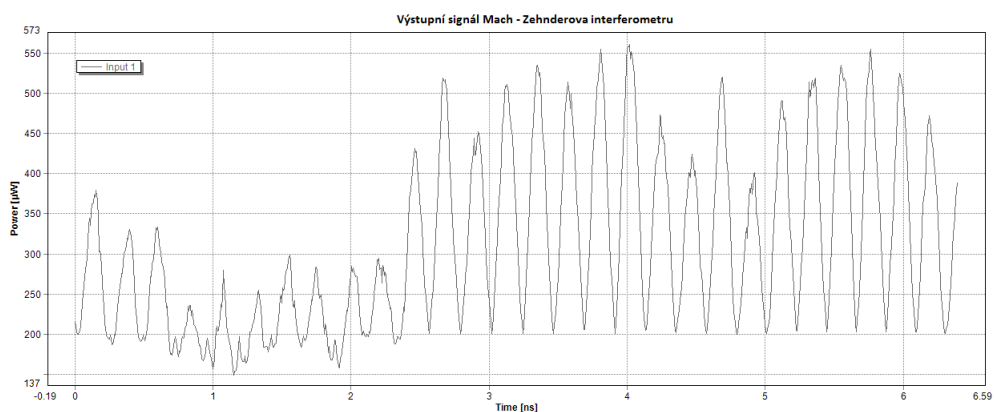


Obr. 2.4: Schéma zapojení Mach - Zehnderova interferometru v simulačním prostředí.

Dolní část interferometru je tzv. měřící rameno. V simulaci byl vytvořen model rušivého signálu, který je vyobrazen na obrázku 2.5. V simulaci tento signál detekujeme pomocí analyzátoru výstupního signálu měřícího ramena. Tento signál má poloviční amplitudu oproti signálu vstupnímu, tedy signálu vstupujícímu do prvního vazebního členu. Signál je přiveden na zpožďovací prvek – blok τ , kde se mísí s původním signálem vstupního DFB laseru, který má už ovšem po průchodu prvním vazebním členem poloviční amplitudu a putuje dále na vstup druhého vazebního členu, kde se opět rozdělí v poměru 50/50. Výsledný měřený signál můžeme pozorovat na obrázku 2.7. Zpožďovací prvek byl v simulaci použit proto, abychom se co nejvíce přiblížili podmínkám reálného zapojení. [16]



Obr. 2.5: Výstupní signál měřícího ramena.



Obr. 2.6: Výstupní signál Mach - Zehnderova interferometru.

Interferometr lze v praxi realizovat například pomocí DFB laseru s vlnovou délkou 1550 nm a vyzařovacím výkonem 0.8 mW. Stejná konfigurace byla zvolena i v simulaci. Dále využijeme dvou vazebních členů 50/50 a jednovidového optického vlákna. Z výstupu prvního vazebního členu vedeme optickým kabelem signál do druhého vazebního členu, kde světelné paprsky interferují a vyhodnocují se zde fázové změny, ovlivněné změnou optické trasy měřeného ramena. Z druhého vazebního členu je optický signál převeden na signál elektrický fotodiodou, zesílen a zobrazen například na osciloskopu. V praxi můžeme optický kabel v části měřeného ramena připevnit například na membránu reproduktoru, kterou budíme elektrickým signálem, čímž dochází k vibracím membrány. Na osciloskopu poté můžeme sledovat výstupní signál interferometru. [17]

Tento typ interferometrů se využívá zejména pro měření akustického tlaku nebo hydrostatického tlaku. U reálného zapojení musíme brát v úvahu koherentní délku zdrojového laseru. V tomto případě je koherentní délka dána vztahem:

$$L_c = \frac{\lambda^2}{n\Delta\lambda}, \quad (2.1)$$

kde λ je vlnová délka zdrojového DFB laseru, $\Delta\lambda$ je spektrální šířka světelného svazku a n je index lomu daného optického kabelu.

Za předpokladu, že pro zapojení využijeme DFB laser s vlnovou délkou 1550 nm je dána koherentní délka laseru 1,6 mm. Tento údaj znamená, že délky obou ramen interferometru by neměly být vzájemně rozdílné o více než 1,6 mm. Typická spektrální šířka je 1 nm a index lomu optického kabelu je 1,46. Taková konfigurace může být použita za předpokladu, že interferometr bude určen k laboratorním podmínkám, tedy délky obou ramen v řádu metrů. Za předpokladu, že bychom požadovali takový interferometr na měření řádově ve stovkách metrů až kilometrů, museli bychom použít vhodný DFB laser s vhodnou koherentní délkou. [17]

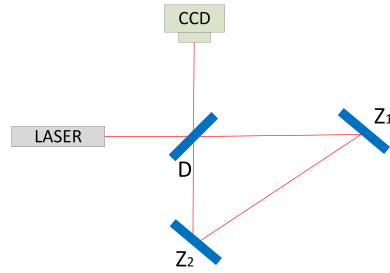
2.1.3 Návrh optického mikrofonu na bázi Sagnacova interferometru

Sagnacův interferometr

V praxi se jedná o optický gyroskop, který se využívá ke zjištění úhlové rychlosti. Pracuje na principu Sagnacova interferometru viz. obrázek 2.7, který vede svazky laseru proti sobě na stejné optické dráze. Pokud je prostředím tvořícím dráhu interferometru otáčeno určitou rychlostí, je díky relativistickému skládání rychlostí různá rychlost šíření svazků ve směru a v protisměru otáčení. Výsledkem je detekovatelný fázový posuv ϕ na výstupu z interferometru. V optickém vláknovém gyroskopu bývá optická dráha Sagnacova interferometru realizována pomocí optického vlákna navinutého ve tvaru cívky. Otáčeli-li se optický vláknový gyroskop s úhlovou rychlostí ω platí:

$$\phi = \frac{4\pi * Lr}{c\lambda}\omega, \quad (2.2)$$

kde L je celková délka navinutého vlákna, r je poloměr cívky, c je rychlost světla ve vakuu a λ je vlnová délka laserového záření.

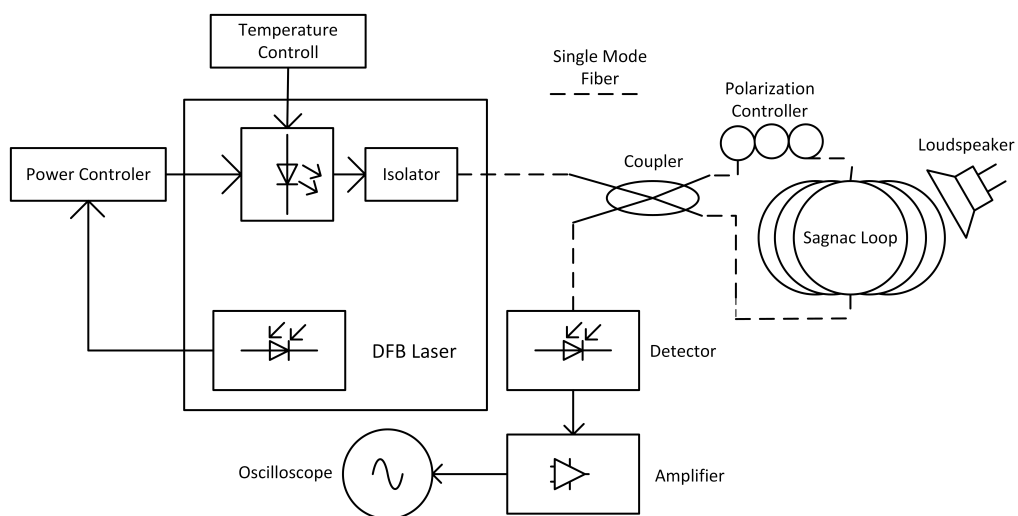


Obr. 2.7: Sagnacův interferometr.

Pokud dvěma laserovým svazkům na výstupu ze Sagnacova interferometru dáme do cesty čočku rozptylku, vzniknou dvě kulové divergující vlny, které spolu interferují. V podstatě se jedná o obdobu Youngova experimentu s tím, že při změně úhlové rychlosti otáčení senzoru se mění fázový rozdíl mezi těmito vlnami a dojde k posuvu polohy maxim a minim vzniklých interferenčních proužků.

Optický mikrofon na bázi Sagnacova interferometru

Na následujícím obrázku 2.8 vidíme schéma optického mikrofonu pro detekci a záznam multifrekvenčních a řečových signálů, kde namísto reproduktoru můžeme například na vlákno promluvit lidským hlasem. U Sagnacova interferometru jsou odstraněna vláknová zrcátka a obě ramena jsou spojena do smyčky. Znamená to, že obě vlny se šíří proti sobě a délka obou optických drah je v klidovém stavu stejná. [18]



Obr. 2.8: Schéma optického mikrofonu pro detekci multifrekvenčního signálu.

Jako zdroj optického záření lze použít polovodičový DFB laser s vlnovou délkou 1300 nm. Takový zdroj má úzké spektrum vyzařovací frekvence a poměrně dlouhou koherentní délku (řádově desítky km). Vazební člen má zde poměr 50/50. Ve schématu se dále nachází jednotka teplotní stabilizace. Teplota může mít vliv na pracovní vlnovou délku a změny vyzařovaného výkonu, což může mít vliv na celkovou přesnost. V praxi je ovšem odchylka zanedbatelná a proto v praktickém zapojení jednotka teplotní stabilizace být nemusí. Pro detekci optického výkonu interferometru lze použít čítače proužků, fotodiody připojené na zesilovače nebo přímo integrované s operačním zesilovačem.

U Sagnacova optického interferometru světelný paprsek, který vyzařuje DFB laser putuje na vstup vazebního členu, kde se rozdělí do obou ramen v poměru 50/50 a šíří se v tzv. Sagnacově smyčce. Poté se vrací zpět do vazebního členu, jehož výstup je připojen na fotodetektor. Pomocí zesilovače lze promítnout spektrum na osciloskopu. Dojede-li k působení jakékoliv frekvence v oblasti Sagnacovi smyčky – zde se může jednat o vibrace nebo připevnění vlákna k membráně reproduktoru v laboratorních podmínkách, popřípadě k působení řečového signálu. Pak detektor takovou aktivitu zaznamená a lze ji následně pozorovat na osciloskopu. [19]

3 OPTICKÁ INTERFEROMETRIE V PRAXI

Následující kapitoly pojednávají o využití optických interferometrů v praxi. Pro oba modely byly vybrány reálné komponenty, pomocí kterých byly oba interferometry sestaveny a následně pomocí nich byly měřeny frekvence z předem dohodnutého frekvenčního pásma. Oba modely zapojení Michelsonova i Mach - Zehnderova interferometru byly změřeny ve dvou variantách. První variantou byl kompletní návrh součástí a sestavení interferometru. Druhá varianta spočívala v měření frekvencí za pomoci speciálního školního přípravku. Důraz byl kladen především na kvalitu optického zdrojového laseru, čistotu vláken a konektorů, snaha o izolaci referenčního ramena od vlivu jakýchkoli vibrací. Škála měřených frekvencí se pohybovala od 1 Hz po 1,5 kHz. Důraz byl kladen zejména na nižší frekvence. Právě nízké frekvence jsou důvodem, proč se optické interferometry využívají.

Monochromatický a koherentní optický svazek, jenž se šíří libovolným optickým prostředím je vysoce citlivý na jakýkoliv vnější podnět. V praxi se setkáváme například s ochranou perimetru, kdy rameno interferometru je umístěno v určité hloubce pod zemí. Narušíme-li perimetr chůzí nebo například zasekneme rýč do povrchu půdy, dojde k určitému vibračnímu působení na rameno interferometru umístěné pod daným perimetrem, což má za následek ovlivnění optického svazku v optickém prostředí. Analýzou můžeme zjistit, ve které části došlo k narušení a jaká frekvence v daném perimetru na vlákno působila.

Výhodou je, že optické interferometry lze využít na dlouhé vzdálenosti. Pomocí interferometrů lze snímat mnoho přírodních aktivit jako jsou například: [20]

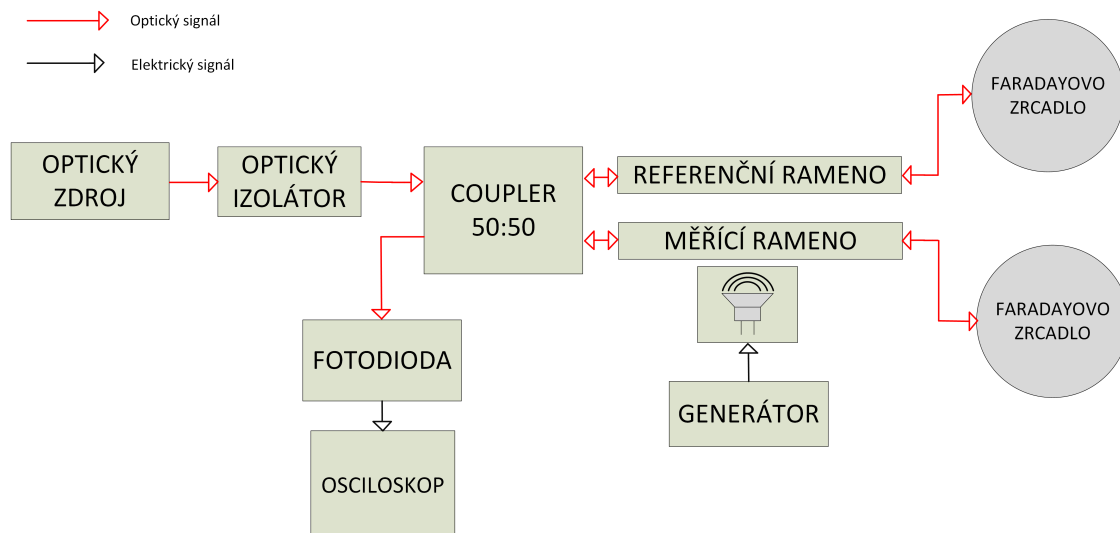
- zemětřesení,
- erupce vulkánů,
- zlomy v zemské kůře,
- sesuv laviny.

Při všech těchto aktivitách dochází ke generování velmi nízkých frekvencí, které nelze lidským sluchem detekovat.

Názorným příkladem využití optického interferometru je vědecké zařízení v USA nesoucí název LIGO – Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory. Jedná se o vědecký institut, který jako první na světě přímo detekoval gravitační vlny, které byly způsobeny vzájemným působením dvou černých děr. Interferometr je tvořen dvěma rameny dlouhými 4 km, které jsou na sebe kolmé a pracuje na principu porovnávání dvou identických laserových paprsků v interferometru. [21]

3.1 Realizace Michelsonova interferometru

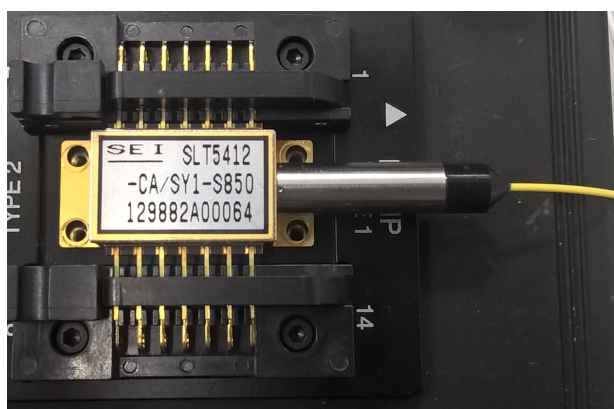
Pro praktický návrh Michelsonova interferometru bylo vytvořeno následující blokové schéma 3.1



Obr. 3.1: Blokové schéma měřeného Michelsonova interferometru.

Optický zdroj

Optickým zdrojem byla zvolena laserová dioda, viz. obrázek 3.2, umístěná v přípravku s integrovanou teplotní stabilizací od společnosti ThorLabs viz. obrázek 3.3.



Obr. 3.2: Laserová dioda: typ SLT5412.

Výběr správného optického zdroje pro konstrukci interferometru je jeden z důležitých aspektů. Podle výběru optického zdroje se dále odvíjí konstrukce interferometru a výběr jednotlivých komponent. V tomto případě byla využita laserová dioda. Jedná se o optický zdroj na principu polovodičové diody, na jejímž PN přechodu dochází k přeměně elektrické energie na energii světelnou. Hlavním rozdílem mezi laserovými diodami a LED diodami je například fakt, že laserové diody mají výrazně užší spektrum. Jsou tedy zdrojem koherentního a monochromatického záření s mnohem větší koherentní délkou.

V měřené konfiguraci byla využita laserová dioda s následujícími parametry:

- výstupní výkon z vlákna: 9.95 mW,
- vlnová délka ve vakuu: 1549.967 nm,
- nominální vlnová délka: 1553.33 nm,
- výstupní proud laseru: 47.6 mA,
- výstupní napětí laseru: 1.1 V,
- pracovní teplota laseru: 25 °C.



Obr. 3.3: Přípravek pro umístění laserové diody s teplotní stabilizací.

Na obrázku 3.3 se nachází přípravek, který byl v zapojení využit. Tento přípravek obsahuje vestavěný držák pro usazení laserové diody, čímž zajišťuje mechanickou stabilitu. Dále obsahuje kompletní balík funkcí určený k ovládání a chlazení laserové diody. Tento ovladač laserové diody je řízen vestavěným diagonálním barevným dotykovým displejem, který usnadňuje naladění a optimalizaci parametrů výstupu laseru. Provozní parametry jsou nastaveny pomocí intuitivního systému menu. [22]

- napájecí proud: až 1.5 A,
- napájecí napětí: >4 V.

Optický izolátor

Optický izolátor je využit v konfiguraci Michelsonova zapojení z důvodu ochrany optického zdroje. Světelný paprsek odražený od zrcadla, který se vrací oběma rameny zpět a prochází přes vazební člen by mohl mít za následek poškození laserové diody působením světelné energie na čočku laseru. Izolační prvek funguje tak, že propouští optický svazek pouze v jednom směru. Při zapojení do obvodu je tedy nutné respektovat směr, ve kterém izolační prvek optický svazek propouští.

Optický izolátor viz. obrázek 3.4 má následující parametry:

- operační vlnová délka: 1550 nm +/- 15 nm,
- výkon: 300 mW,
- izolace: 30 - 35 dB,
- průchozí útlum: 0.58 - 0.9 dB,
- zpětné ztráty: >55 dB,
- typ vlákna: SMF-28e,
- konektory: FC/APC.

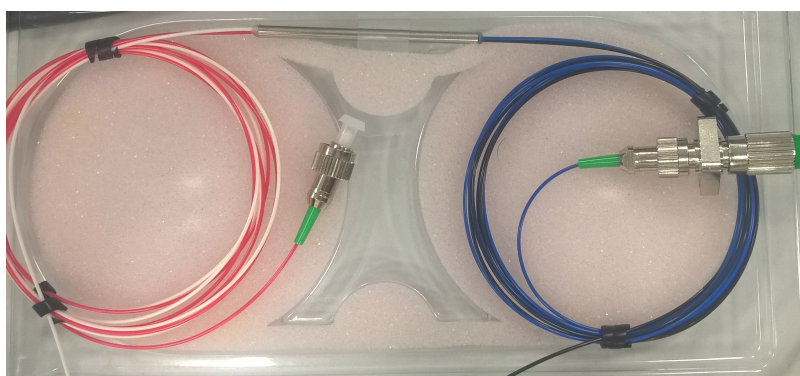


Obr. 3.4: Optický izolátor.

Vazební člen

Jako vazební člen je využit v zapojení optický vazební člen – coupler viz. obrázek 3.5. V konfiguraci Michelsonova interferometru je využit pouze jeden coupler, pomocí kterého je optický signál výkonově rozdělen v poměru 50:50. Optické couplery se rozdělují na planární a fúzní. V obou měřených konfiguracích byly využity planární couplery. Základní rozdíly mezi těmito typy vazebních členů:

- Planární: maximální poměr dělení 1:64, menší velikost, vyšší cena.
- Fúzní: maximální poměr dělení 1:32, větší velikost, nižší cena. [23]



Obr. 3.5: Vazební člen s dělícím poměrem 50/50.

Technické specifikace jsou uvedeny v tabulce na obrázku 3.6

Operate Wavelength:	1550nm				
Fiber Type:	SMF - 28e fiber with 900um loose tube				
Splitting Ratio:	50:50				
Main Spec		IL (dB)	PDL(dB)		
Port1 (color red) -> Port3 (color black)		3.25	0.03		
Port1 (color red) -> Port4 (color blue)		3.31	0.01		
Port2 (color white) -> Port3 (color black)		3.30	0.02		
Port2 (color white) -> Port4 (color blue)		3.21	0.03		
Operating temperature		-20 °C to +70 °C			
Storage temprature		-40 °C to +85 °C			
Connector	Input 1	Input 2	Output 3	Output 4	
	FC/APC	FC/APC	FC/APC	FC/APC	

Obr. 3.6: Technické specifikace vazebního členu – coupleru.

Ramena interferometru

Ramena interferometru tvoří jednovláknová optická vlákna s konektory FC/APC viz. obrázek 3.7



Obr. 3.7: Konektor FC/APC.

Optický konektor je důležitá pasivní optoelektronická součástka, která musí zajistit rozebíratelné propojení dvou vláken. Vláknem je zalepeno ve feruli a jeho konec je zaleštěn spolu s čelem ferule do jedné plochy. Nedůležitějším požadavkem kladeným na optický konektor je malý útlum a dobrá opakovatelnost spojení. Vložený útlum konektoru má v zásadě příčiny dvojího druhu:

- Vnitřní ztráty: rozdílné parametry spojovaných vláken – rozdílné průměry jádra nebo pláště, nesoustřednost, nekruhovost, rozdílné numerické apertury.
- Vnější ztráty: mechanické chyby vzniklé při výrobě nebo montáži – nesouostnost spojovaných vláken, podélné oddálení nebo úhlová odchylka čelních ploch vláken, poškozené nebo znečištěné čelní plochy.

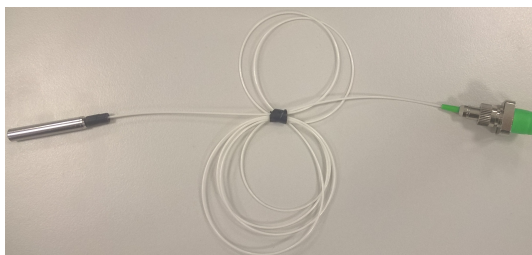
Propojení optických vláken a vazebního členu je zajištěno optickou spojkou, viz. obrázek 3.8. V reálném zapojení optické spojky navyšují měrný útlum a tím mají také vliv na výsledky měření.



Obr. 3.8: Optická spojka.

Faradayovo zrcadlo

Faradayovo zrcadlo je v konfiguraci Michelsonova interferometru využito za účelem úplného odrazu světla. Světlo, které je odraženo se vrací zpět do vazebního členu. V konfiguraci Michelsonova interferometru jsou využita tato zrcadla dvě – na výstupu každého ramena. Použité Faradayovo zrcadlo je na obrázku 3.9.

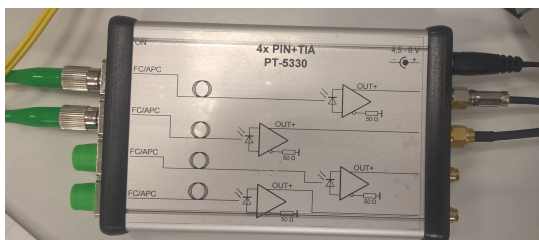


Obr. 3.9: Faradayovo zrcadlo.

Fotodioda

V praxi lze využít tři typy fotodetektorů: fotorezistor, PIN detektor nebo lavinový detektor (APD). V obou konfiguracích byl zvolen PIN detektor s transimpedančním zesilovačem viz. obrázek 3.10. PIN detektory mají vysokou kvantovou účinnost. Intenzita modulovaného světelného paprsku je na fotodetektoru převedena na odpovídající proud.

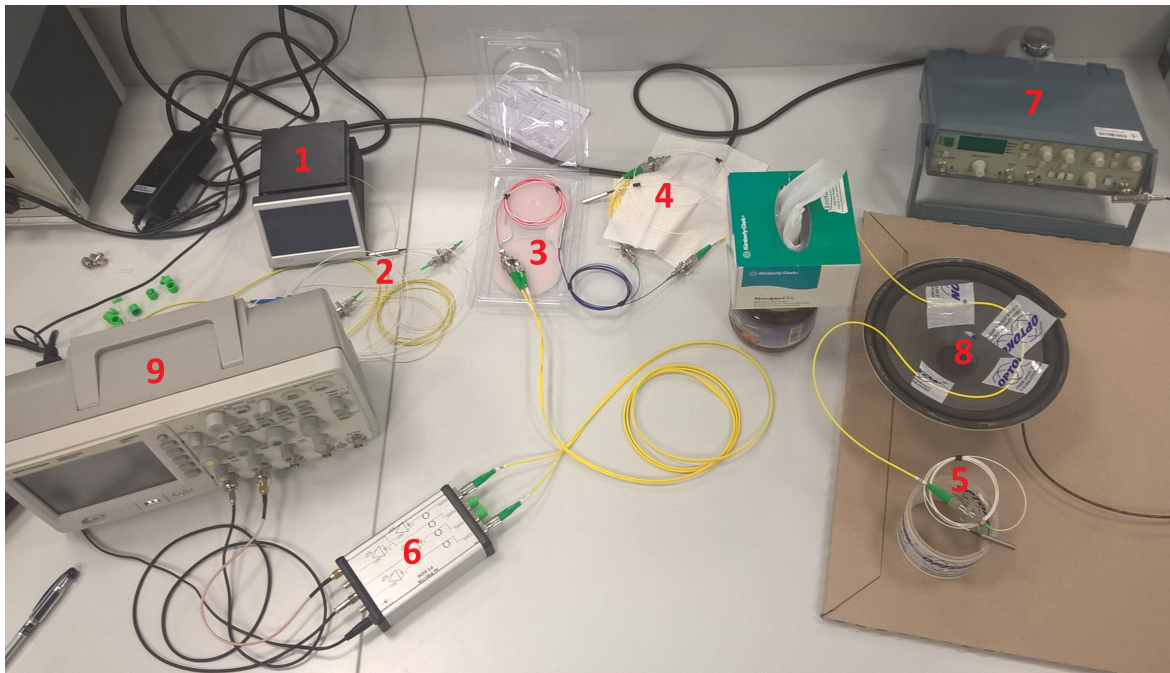
- detektor: InGaAs,
- napájecí napětí: 3.15 - 3.45 V,
- napájecí proud (bez zátěže): 40 mA (max),
- detekční pásmo vlnové délky: 1100 - 1650 nm,
- šířka pásma: 450 MhZ.



Obr. 3.10: Fotodioda.

3.1.1 Měření frekvencí pomocí Michelsonova interferometru

Frekvenční analýza dohodnutých kmitočtů Michelsonova interferometru probíhala v laboratorních podmínkách – v laboratoři předmětu optických sítí a přenosových medií. Snahou bylo detekovat a naměřit frekvenční škálu pomocí popsaného zapojení, viz. obrázek 3.11.



Obr. 3.11: Ukázka zapojení Michelsonova interferometru v laboratoři.

- 1 - optický zdroj,
- 2 - optický izolátor,
- 3 - vazební člen – coupler,
- 4 - referenční rameno,
- 5 - měřící rameno,
- 6 - fotodioda,
- 7 - frekvenční generátor,
- 8 - reproduktor,
- 9 - osciloskop.

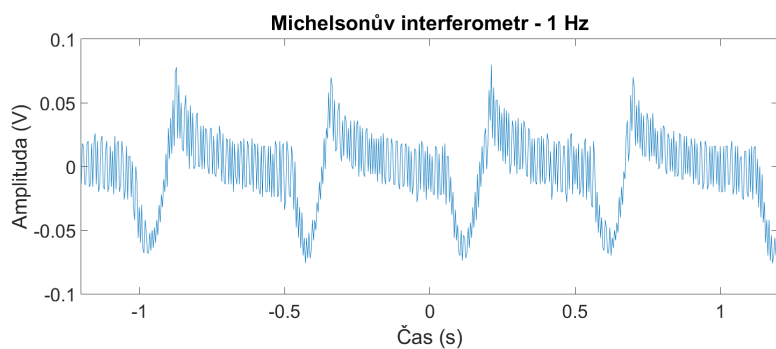
Při zapojování a měření Michelsonova interferometru byly očištěny všechny konektory. Optický zdroj byl nastaven na hodnotu výstupního proudu 5 mA. Teplotní stabilizace laserové diody byla nastavena na hodnotu 25 °C z důvodu co nejnižšího zkreslení výsledné vlnové délky světelného signálu (1553.33 nm). Jako první byl zapojen na výstup optického zdroje optický izolátor. Tento optický izolátor posloužil při měření jako ochranný prvek optického zdroje. Funguje v podstatě jako zrcadlo, které propouští optický signál pouze jedním směrem. Tento propustný směr je vyznačen na součástce černou šipkou. Optický signál za optickým izolátorem je veden telekomunikačním jednovidovým optickým vláknem na vstup do vazebního členu a poté putuje do obou ramen s poloviční intenzitou. Délky obou ramen byly v řádech jednotek metrů. Bylo nutné, aby referenční rameno bylo umístěno takovým způsobem, aby nebylo vystaveno vlivu jakémukoli vnějšímu vibračnímu působení. Rameno měřící bylo pevně uchyceno k membráně reproduktoru. Tento reproduktor byl využit jako generátor škály měřených frekvencí. Reproduktor byl buzen generátorem, viz. obrázek 3.12, jenž je součástí standardní výbavy laboratoře. Tento typ generátoru je schopen na svém výstupu generovat: stejnosměrný, sinusový, trojúhelníkový a obdélníkový signál v rozpětí frekvencí: 0.01 Hz do 5 MhZ. Pro tento typ měření byl klíčový sinusový signál s frekvenčním rozpětím 1 Hz až 1.5 kHz.

Světelné signály v obou ramenech, které se odrážejí od Faradayových zrcadel, putují zpět a interferují ve stejném vazebním členu, ve kterém byly rozděleny. Výsledný optický signál je převeden na vstup fotodiody, kde dochází k převodu z optického signálu na signál elektrický. Tento signál byl zobrazen osciloskopem, který je spolu s generátorem standardním vybavením laboratoře. Pomocí osciloskopu lze naměřená data exportovat v příslušném formátu a následně zpracovat v programu Matlab.

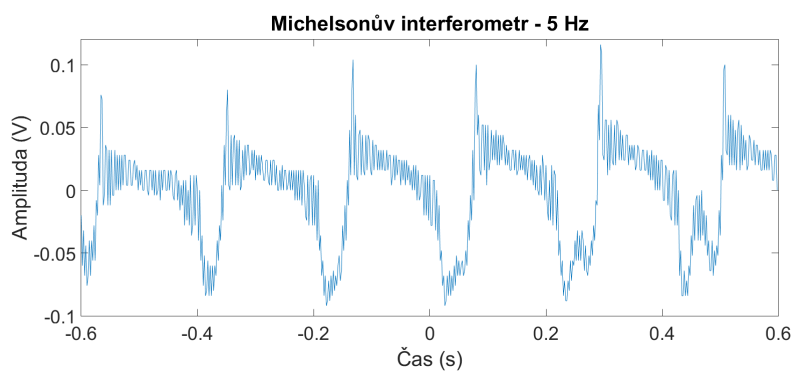


Obr. 3.12: Generátor Escort EGC-3235A.

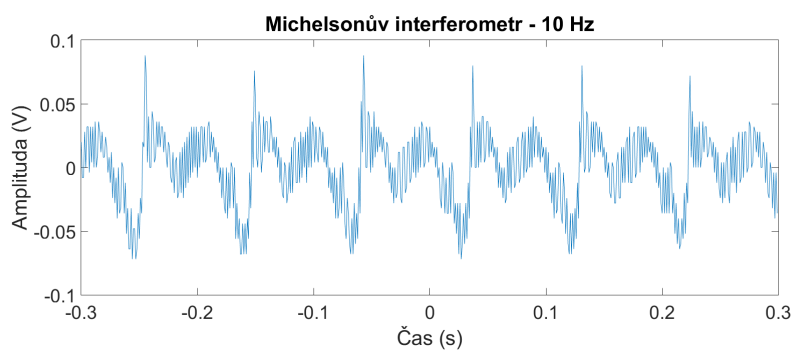
3.1.2 Výsledky měření Michelsonova interferometru



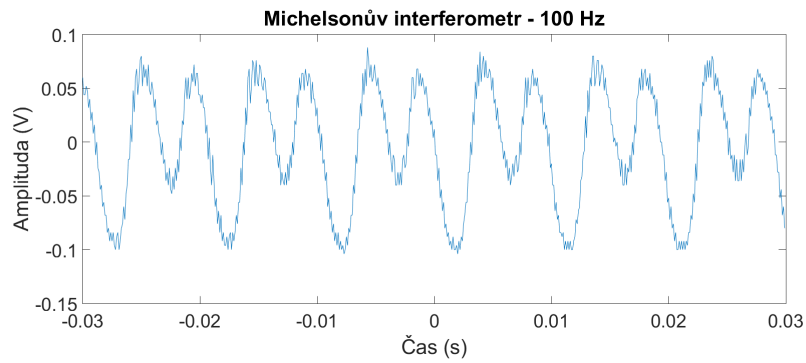
Obr. 3.13: Výstupní signál Michelsonova interferometru při frekvenci 1 Hz.



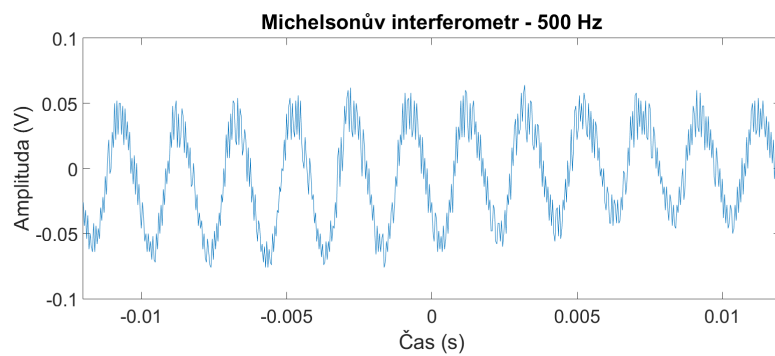
Obr. 3.14: Výstupní signál Michelsonova interferometru při frekvenci 5 Hz.



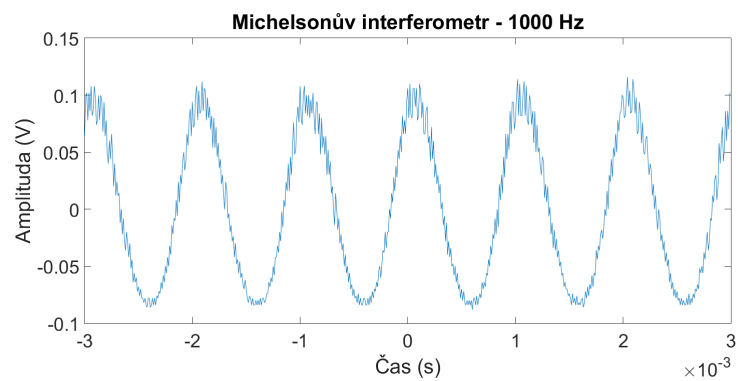
Obr. 3.15: Výstupní signál Michelsonova interferometru při frekvenci 10 Hz.



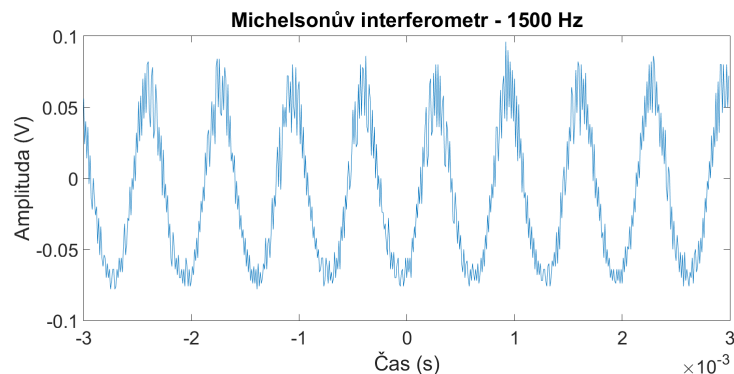
Obr. 3.16: Výstupní signál Michelsonova interferometru při frekvenci 100 Hz.



Obr. 3.17: Výstupní signál Michelsonova interferometru při frekvenci 500 Hz.



Obr. 3.18: Výstupní signál Michelsonova interferometru při frekvenci 1000 Hz.



Obr. 3.19: Výstupní signál Michelsonova interferometru při frekvenci 1500 Hz.

Naměřena byla následující frekvenční škála:

1 Hz, 5 Hz, 10 Hz, 50 Hz, 100 Hz, 200 Hz, 300 Hz, 400 Hz, 500 Hz, 600 Hz, 700 Hz, 800 Hz, 900 Hz, 1000 Hz, 1100 Hz, 1200 Hz, 1300 Hz, 1400 Hz, 1500 Hz.

V samotné práci jsou uvedeny pouze klíčové frekvence. Zbylé frekvence jsou součástí přílohy. Přiložené grafy zobrazují výstup osciloskopu zvolených frekvencí. Na obrázcích 3.13, 3.14, 3.15, lze pozorovat ovlivněné průběhy nízkých frekvencí. Zde docházelo ke značnému zkreslení, patrně vlivem nepřesností použitých komponent a to zejména optických spojek a vazebního členu. Je nutné zmínit, že zejména frekvence 1 Hz a 5 Hz bylo velmi obtížné efektivně generovat pomocí reproduktoru a následně změřit. Při měření nízkých frekvencí docházelo k šumu, který na těchto grafech můžeme pozorovat, nicméně interferometr byl tyto frekvence schopný detekovat, ačkoli byly značně zkreslené.

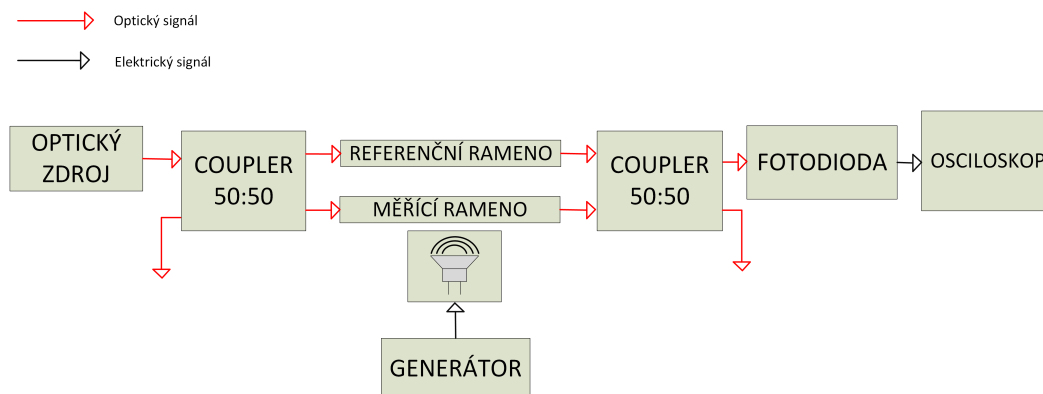
Další klíčové frekvence jsou zobrazeny na obrázcích 3.16, 3.17, 3.18. Tyto frekvence již nejsou ovlivněny tak velkým šumem jako předchozí nižší frekvence. Ovšem zejména na frekvenci 100 Hz lze pozorovat viditelné výkyvy v oblasti maximálního napětí a nulové polohy napětí. Tento jev je patrně způsoben zpětnými odrazy od podložky reproduktoru, čímž dochází ke změnám fáze.

Nejvyšší frekvence detekovaná Michelsonovým interferometrem lze pozorovat na obrázku 3.19. Průběh se nijak neliší od frekvencí středních a vyšších a lze konstatovat, že výsledky měření a výsledky simulací jsou podobné.

V závěru měření byl proveden pokus, který spočíval v prodloužení délky měřícího ramena na dvojnásobnou délku oproti ramenu referenčnímu. Tímto bylo zjištěno, že přes dostatečnou koherentní délku optického zdroje nebylo možné pomocí osciloskopu efektivně zachytit měřenou frekvenci.

3.2 Realizace Mach - Zehnderova interferometru

Pro praktický návrh Mach - Zehnderova bylo vytvořeno následující blokové schéma 3.20

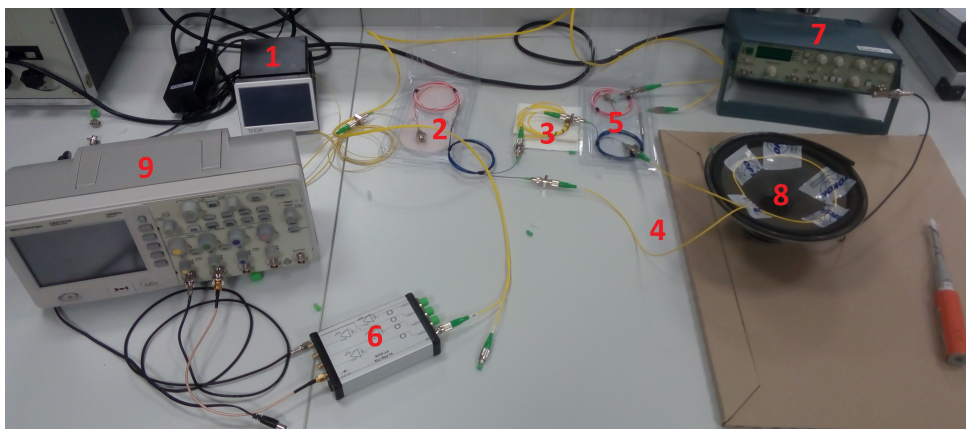


Obr. 3.20: Blokové schéma měřeného Mach - Zehnderova interferometru.

Interferometr v této konfiguraci je schopen detekovat a měřit frekvence podobně jako Michelsonův interferometr. V případě Mach - Zehnderova interferometru odpadá nutnost použití optického izolátoru. Tato skutečnost v reálném zapojení znamená snížení útlumu a zkreslení optického signálu, který ze zdroje putuje rovnou do prvního vazebního členu. Optický signál je opět veden telekomunikačním jednovodovým vláknem a následně přiveden do druhého vazebního členu. Mezi vazebními členy jsou dvě ramena. Referenčním ramenem je veden optický signál, jenž má po průchodu vazebním členem poloviční intenzitu. Měřícím ramenem prostupuje optický signál také s poloviční intenzitou s tím rozdílem, že na toto rameno působí frekvence. Stejně jako u Michelsonova interferometru bylo využito generátoru, který budil membránu reproduktoru, na kterém bylo rameno pevně umístěno. Generovány byly známé frekvence z předem dohodnuté frekvenční škály. Oba optické signály, jak referenční, tak ovlivněný měřící signál, vstupují do druhého vazebního členu. Oproti Michelsonově interferometru, kde se oba optické signály vrací zpět do vazebního členu kde spolu interferují, v případě Mach - Zehnderova interferometru využíváme druhého vazebního členu. Oba vazební členy v reálném zapojení byly použity s totožnými vlastnostmi. V reálném zapojení to tedy znamená navýšení útlumu a je zde reálné riziko nepřesnosti výkonového rozdělení obou optických signálů na výstupu vazebního členu. Optický signál vystupující z obou ramen prochází druhým vazebním členem, kde opět dochází k rozdělení v poměru 50:50. Optické signály spolu interferují a vstupují do fotodiody, kde dochází k převodu optického signálu na signál elektrický. Elektrický signál je zobrazen pomocí osciloskopu.

3.2.1 Měření frekvencí pomocí Mach - Zehnderova interferometru

Frekvenční analýza dohodnutých kmitočtů Mach - Zehnderova interferometru probíhala v laboratorních podmínkách – v laboratoři předmětu optických sítí a přenosových medií. Snahou bylo detekovat a naměřit frekvenční škálu pomocí popsaného zapojení, viz. obrázek 3.21.

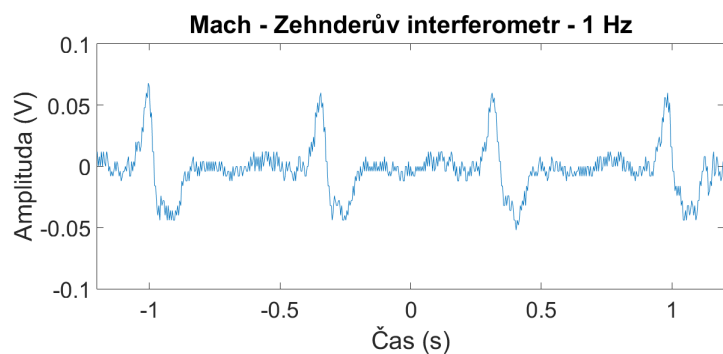


Obr. 3.21: Ukázka zapojení Mach - Zehnderova interferometru v laboratoři.

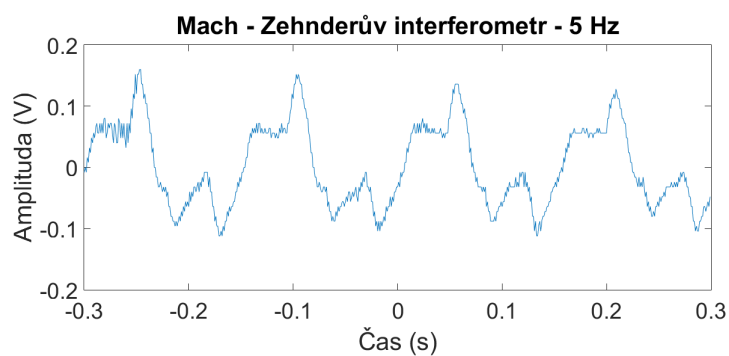
- 1 - optický zdroj,
- 2 - vazební člen - coupler,
- 3 - referenční rameno,
- 4 - měřící rameno,
- 5 - vazební člen - coupler,
- 6 - fotodioda,
- 7 - frekvenční generátor,
- 8 - reproduktor,
- 9 - osciloskop.

Počátkem samotného měření bylo správné nastavení parametrů na optickém zdroji. Výstupní proud byl nastaven na hodnotu 17.5 mA s teplotní stabilizací 25 °C. Optický zdroj byl použit stejný jako v konfiguraci Michelsonova interferometru. Délky obou ramen byly shodné a to v řádech jednotek metrů. Experimentálně bylo zjištěno, že výstupní proud z optického zdroje musí být nastaven na minimální hodnotu 4,9 mA, aby byla zajištěna detekce na fotodiodě. Na výstupech druhého vazebního členu byly naměřeny výkony optického signálu 4.5 mW a 4.2 mW. Optický signál s tímto výkonem působil na fotodidu.

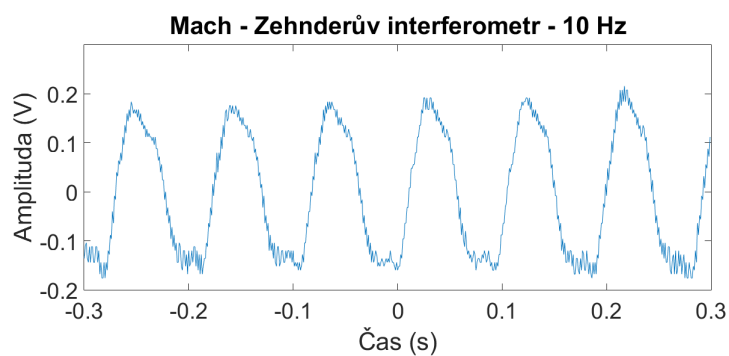
3.2.2 Výsledky měření Mach - Zehnderova interferometru



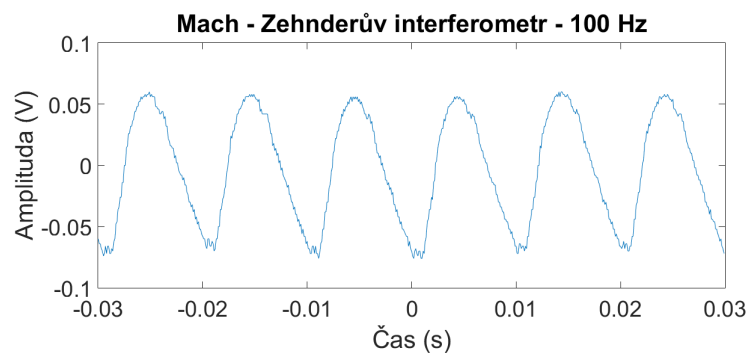
Obr. 3.22: Výstupní signál Mach - Zehnderova interferometru při frekvenci 1 Hz.



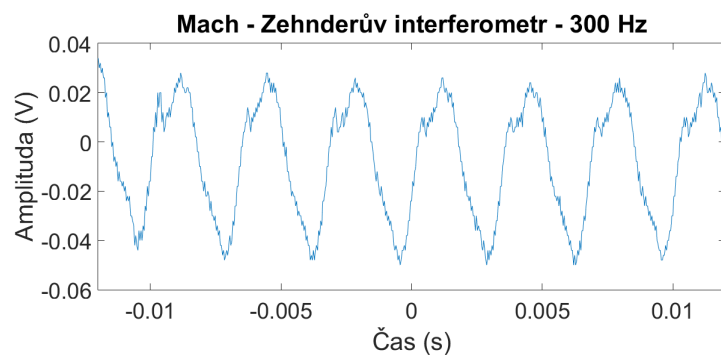
Obr. 3.23: Výstupní signál Mach - Zehnderova interferometru při frekvenci 5 Hz.



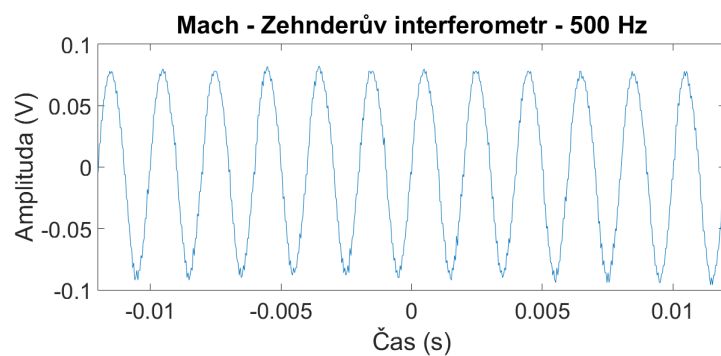
Obr. 3.24: Výstupní signál Mach - Zehnderova interferometru při frekvenci 10 Hz.



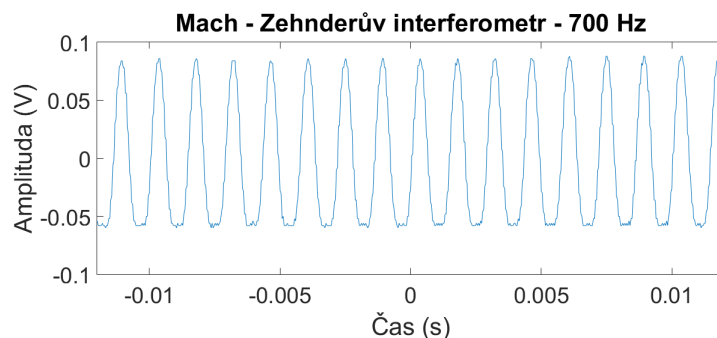
Obr. 3.25: Výstupní signál Mach - Zehnderova interferometru při frekvenci 100 Hz.



Obr. 3.26: Výstupní signál Mach - Zehnderova interferometru při frekvenci 300 Hz.



Obr. 3.27: Výstupní signál Mach - Zehnderova interferometru při frekvenci 500 Hz.



Obr. 3.28: Výstupní signál Mach - Zehnderova interferometru při frekvenci 700 Hz.

Naměřena byla následující frekvenční škála:

1 Hz, 5 Hz, 10 Hz, 50 Hz, 100 Hz, 200 Hz, 300 Hz, 400 Hz, 500 Hz, 600 Hz, 700 Hz.

U Mach - Zehnderova interferometru nebyly měřeny vyšší frekvence, protože cílem práce bylo měření frekvencí nižších. Vyšší frekvence byly měřeny z důvodu ověření, že interferometry jsou schopny tyto frekvence detekovat, což se potvrdilo u předchozí konfigurace. V samotné práci jsou uvedeny pouze klíčové frekvence. Zbylé frekvence jsou součástí přílohy práce.

Přiložené grafy zobrazují výstup osciloskopu zvolených frekvencí. Na obrázcích 3.22, 3.23, 3.24, lze pozorovat ovlivněné průběhy nízkých frekvencí. Zde docházelo ke zkreslení, již ale ne tak velkému jako u předchozího Michelsonova interferometru. Vlivem nepřesností použitých komponent a to zejména optických spojek a vazebních členů. Frekvence 1 Hz a 5 Hz nebylo tak obtížné zachytit a změřit jako u Michelsonova interferometru, přesto při měření nízkých frekvencí docházelo k šumu a zpětným rázům od podložky, které na těchto grafech můžeme pozorovat.

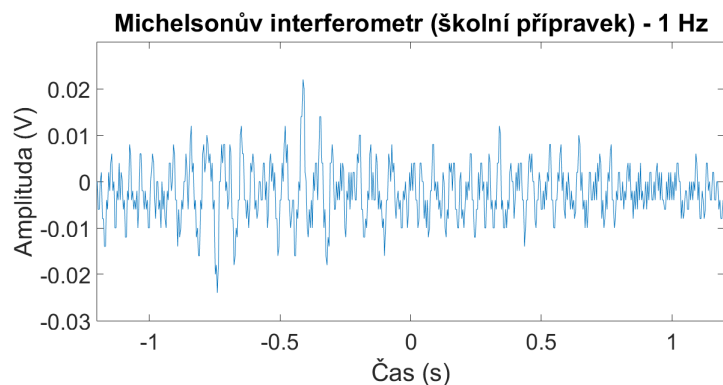
Další klíčové frekvence jsou zobrazeny na obrázcích 3.25, 3.26, 3.27. Tyto frekvence již nejsou ovlivněny jako frekvence předchozí nižší. Zejména na frekvenci 500 Hz lze pozorovat téměř čistý sinusový průběh. V této oblasti frekvencí nedocházelo k tak silným zpětným rázům na podložku a v případě, že obě ramena byla správně umístěna, nedocházelo k žádnému vnějšímu rušení.

Nejvyšší frekvence detekovaná Mach - Zehnderovým interferometrem lze pozorovat na obrázku 3.28. O zachyceném průběhu lze konstatovat, že je poměrně čistý bez vnějšího rušení.

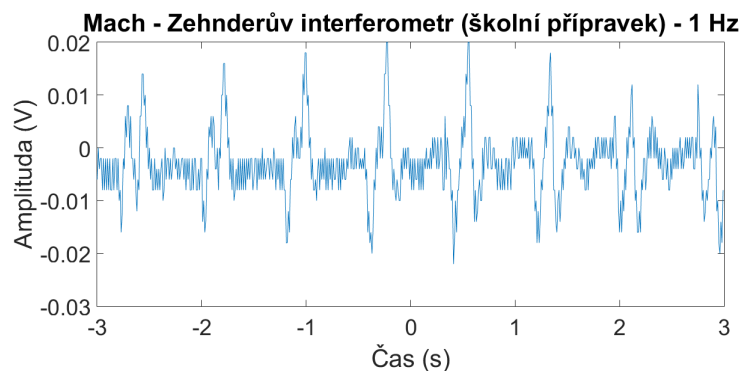
Při měření Mach - Zehnderova interferometru dále docházelo k jevu tzv. „přelévání“ výkonu mezi oběma rameny. Tento jev lze pozorovat na osciloskopu v případě, že připojíme oba výstupy k osciloskopu. Tento jev je zapříčiněn použitou fotodiodou, která je schopna efektivně zpracovávat signál do výkonu 1 mW. V tomto případě byl naměřen signál s výkonem 4.5 mW.

3.3 Měření frekvencí pomocí školního přípravku

V závěru praktického měření frekvencí pomocí optických interferometrů, tedy optických mikrofonů, byly proměřeny obě konfigurace Michelsonova i Mach - Zehnderova interferometru prostřednictvím školního přípravku. Cílem bylo porovnání výsledků a ověření správnosti měření realizovaných interferometrů pomocí uvedených komponent a školního přípravku.



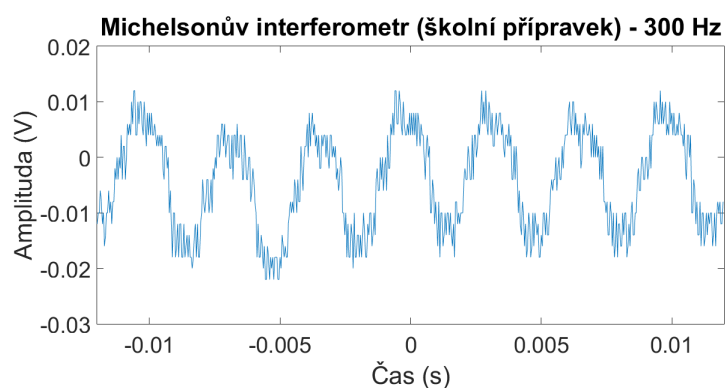
Obr. 3.29: Výstupní signál Michelsonova interferometru (na školním přípravku) při frekvenci 1 Hz.



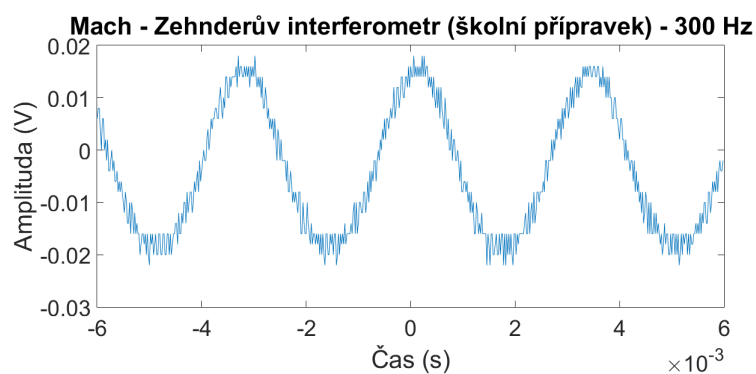
Obr. 3.30: Výstupní signál Mach - Zehnderova interferometru (na školním přípravku) při frekvenci 1 Hz.

První dva průběhy odpovídají frekvenci 1 Hz. V případě konfigurace Michelsonova interferometru lze pozorovat značné zkreslení signálu a změn amplitudy. V případě konfigurace Mach - Zehnderova interferometru je průběh méně ovlivněn rušením, ale přesto průběh zcela neodpovídá výsledku, kterého bychom chtěli dosáhnout. Ve všech případech lze ovšem konstatovat, že při měření nízkých frekvencí obou konfigurací v případě stavěného interferometru i konfigurací interferometrů měřených

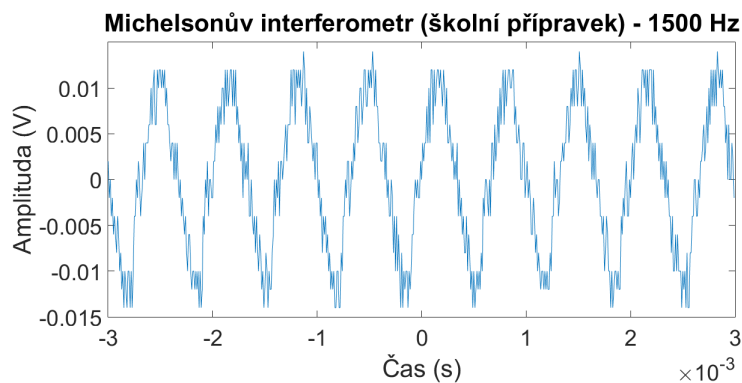
pomocí školního přípravku, docházelo k velkému rušení. Důležité je zmínit, že generování nízkých frekvencí pomocí kmitání membrány reproduktoru není vhodným řešením. V tomto případě záviselo nejen na nastavené frekvenci generátoru, ale také na amplitudě. Dalším rušivým elementem mohlo být například mírné ťuknutí do stolu, popřípadě zpětné rázy od podložky reproduktoru nebo nevhodné podložení obou ramen. Tyto rázy ovlivňovaly měření zejména při nižších frekvencích. Interferometry jsou také citlivé na frekvenci mluveného slova. Při měření bylo nutné zachovat v místnosti ticho bez jakýchkoliv vnějších rušivých vlivů.



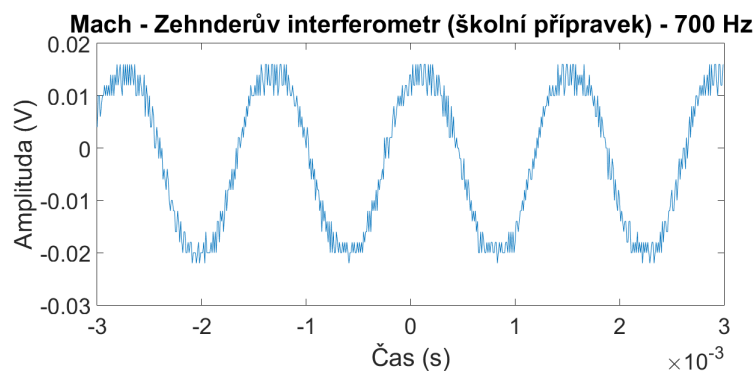
Obr. 3.31: Výstupní signál Michelsonova interferometru (na školním přípravku) při frekvenci 300 Hz.



Obr. 3.32: Výstupní signál Mach - Zehnderova interferometru (na školním přípravku) při frekvenci 300 Hz.



Obr. 3.33: Výstupní signál Michelsonova interferometru (na školním přípravku) při frekvenci 300 Hz.



Obr. 3.34: Výstupní signál Mach - Zehnderova interferometru (na školním přípravku) při frekvenci 300 Hz.

Pro demonstraci správnosti měření byly naměřeny ještě frekvence 300 Hz, v případě Michelsonova interferometru 1500 Hz a v případě Mach - Zehnderova interferometru 700 Hz. V případě Michelsonova interferometru lze pozorovat ostřejší špičky v maximálních a minimálních hodnotách napětí. Všechna zapojení v obou konfiguracích byla měřena za stejných podmínek, ačkoli zdrojů rušení se v laboratoři nacházelo mnoho. Vzhledem k tomu, že interferometry jsou vysoce citlivé na jakékoliv vnější podněty mohou se ve výsledných grafech objevovat značná zkreslení, která již byla popsána v předchozích kapitolách.

4 ZÁVĚR

Cílem diplomové práce byl teoretický rozbor optovláknového senzorického snímání pomocí koherentní a nekoherentní interferometrie vytvoření simulačních modelů interferometrů a jejich praktické měření. V úvodu byly diskutovány a vysvětleny základní pojmy. Bylo vysvětleno o čem problematika pojednává a co je náplní diplomové práce.

V první části práce byly diskutovány základní optické a fyzikální principy, které je nutné pro následný návrh a simulaci pochopit. Jedná se zejména o pohled na světlo z hlediska elektromagnetického vlnění, interferenci světla a koherenci. Dále zde byly popsány a vysvětleny základní typy fyzikálních interferometrů, které byly rozděleny do tří skupin - komparátory, spektroskopy, refraktometry. Z každé skupiny byly popsány základní interferometry a to zejména ty, které v následující kapitole byly využity k návrhu a simulaci optických interferometrů.

V druhé části práce byly navrženy a simulovány pomocí simulačního prostředí VPIphotonics optické interferometry, v praxi známé jako optické mikrofony. Tyto optické mikrofony slouží zejména k detekci vibrací nebo parazitních frekvencí, které působí na optické vlákno. V práci byly popsány a simulovány optické mikrofony, založené na principech fyzikálních interferometrů - Michelsonův interferometr a Mach - Zehnderův interferometr. Dále byl navržen a popsán optický mikrofon založený na principu Sagnacovy smyčky. Principy měření byly popsány a vysvětleny a výsledky simulací byly vyhodnoceny v grafech. Z výsledků vyplývá, že návrhy v simulačním prostředí nebudou vlivem určitých nereálných parametrů odpovídat výsledkům, které by byly naměřeny reálnými interferometry.

Třetí část pojednává o optovláknové interferometrii v praxi. Hovoří se zde o praktickém využití interferometrů a aplikacích v praxi. Byly vybrány dva modely interferometrů a to Michelsonův a Mach - Zehnderův. Pro oba interferometry byla navržena bloková schémata a následně byl proveden výběr vhodných součástí pro sestavení obou konfigurací v praxi. Měření frekvencí pomocí interferometrů bylo prakticky realizováno v laboratorních podmínkách při délkách ramen řádově jednotek metrů. V práci jsou dále popsány principy měření a důležitá kritéria, která mají vliv na délky obou ramen interferometru. Klíčovým kritériem je koherentní délka použitého optického zdroje, neboť právě tento technický údaj vypovídá o tom, zda bude interferometr vhodný pro využití k detekci nebo měření signálů na delší vzdálenosti například na vzdálenosti desítek kilometrů. Vzhledem k využití laserové diody a její koherentní délky, by oba měřené interferometry dokázaly detekovat a měřit frekvence na mnohem delší vzdálenosti, než byly délky ramen v laboratorních podmínkách. Ovšem je potřeba dávat pozor na to, aby obě ramena byla stejně dlouhá popřípadě rozdíl délek obou ramen byly co nejmenší.

LITERATURA

- [1] UDD, Eric a William SPILLMAN. *Fiber optic sensors: an introduction for engineers and scientists*. 2nd ed. Hoboken: Wiley, c2011. ISBN 978-0-470-12684-4.
- [2] FILKA, Miloslav. *Optoelektronika pro telekomunikace a informatiku*. Brno: Miloslav Filka, 2009. ISBN 978-80-86785-14-1.
- [3] Koherenční optika - Interferometrie. *ÚPT AV ČR* [online]. Brno, 2016 [cit. 2016-12-13]. Dostupné z: <http://www.isibrno.cz/ko2/index.html>
- [4] *Skládání vlnění :: MEF* [online]. Jaroslav Reichl, 2016 [cit. 2016-12-13]. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/452-skladani-vlneni>
- [5] Elektromagnetické vlnění. *Gymnázium Brno* [online]. [cit. 2016-12-13]. Dostupné z: http://www.gymkren.cz/text_old/Fyzika/f24.pdf
- [6] Optika jednoduše. *Optika jednoduše* [online]. Přerov: Radim Vaculík, 2006 [cit. 2016-12-13]. Dostupné z: <http://optika.kuratkoo.net/odraz.htm>
- [7] Světlo, laserové záření. *Therapy* [online]. FoNet, spol., 2009 [cit. 2016-12-13]. Dostupné z: <http://www.therapy.cz/laserove-zareni.php>
- [8] Optika jednoduše. *Optika jednoduše* [online]. Přerov: Radim Vaculík, 2006 [cit. 2016-12-13]. Dostupné z: <http://optika.kuratkoo.net/interference.htm>
- [9] Encyclopedia of Laser Physics and Technology - coherence length, nonlinear optics, holography. *RP Photonics Consulting GmbH* [online]. Dr. Rüdiger Paschotta [cit. 2016-12-13]. Dostupné z: https://www.rp-photonics.com/coherence_length.html
- [10] *13.3 Michelsonův interferometr* [online]. Brno: Odbor termomechaniky a techniky prostředí, Fakulta strojního inženýrství, Vysoké učení technické v Brně [cit. 2016-12-13]. Dostupné z: <http://ottp.fme.vutbr.cz/~pavelek/optika/1303.htm>
- [11] *13.4 Machův - Zehnderův interferometr* [online]. Brno: Odbor termomechaniky a techniky prostředí, Fakulta strojního inženýrství, Vysoké učení technické v Brně [cit. 2016-12-13]. Dostupné z: <http://ottp.fme.vutbr.cz/~pavelek/optika/1304.htm>
- [12] *13.5 Fabryův - Pérotův interferometr* [online]. Brno: Odbor termomechaniky a techniky prostředí, Fakulta strojního inženýrství, Vysoké učení technické v Brně [cit. 2016-12-13]. Dostupné z: <http://ottp.fme.vutbr.cz/~pavelek/optika/1305.htm>

- [13] Interferometry. *SlidePlayer* [online]. Laura Matoušková, 2016 [cit. 2016-12-14]. Dostupné z: <http://slideplayer.cz/slide/2962821/>
- [14] PIKÁLEK, Tomáš. *Analýza a ověření metody měření indexu lomu vzduchu pro laserovou interferometrii* [online]. Brno, 2016 [cit. 2016-12-14]. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=125866. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce Ing. Zdeněk Buchta, Ph.D.
- [15] DORAZIN, David. *Distribuované optické senzorické systémy* [online]. Brno, 2016 [cit. 2016-12-14]. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=125043. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce Ing. Milan Čučka.
- [16] SRNSKÝ, Petr. Fiber Optic Interferometry. *Student EEICT*. 2017, **2017**(23), 3.
- [17] Optical fibre Mach-Zehnder Microphone. *IEEE* [online]. 2007, **2007**, 389-391 [cit. 2016-12-14]. DOI: 10.1109/IMOC.2007.4404287. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/search/searchresult.jsp?newsearch=true&queryText=optical%20fibre%20mach-zehnder%20microphone>
- [18] Interferometry pro optické mikrofony a perimetry. *Publi.cz* [online]. Code Creator, s.r.o., part of the Midis Group, 2016 [cit. 2016-12-14]. Dostupné z: <https://publi.cz/books/237/03.html>
- [19] ŘEHÁK, Ota. *Optovláknový interferometrický systém pro měření vibrací* [online]. Praha, 2014 [cit. 2016-12-14]. Dostupné z: https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/61140/F3-DP-2015-Rehak-Ota-Optovlaknovy_interferometricky_system_pro_mereni_vibraci.pdf?sequence=1&isAllowed=y. Bakalářská práce. České vysoké učení technické v Praze. Vedoucí práce Ing. Michal Lucki, Ph.D.
- [20] *Jesen.cz*. *Jesen.cz* [online]. LeComp - Leoš Báča, web@design2008-2013 [cit. 2017-05-22]. Dostupné z: <http://www.jesen.cz/clanek17.html>
- [21] LIGO's Interferometer —LIGO Lab— Caltech. *LIGO Lab —Caltech— MIT* [online]. California Institute of Technology Pasadena, CA 91125: LIGO Laboratory [cit. 2017-05-22]. Dostupné z: <https://www.ligo.caltech.edu/page/ligos-ifo?highlight=interferometer>

- [22] Compact Laser Diode Drivers with TECs and Mounts for TO Can Pigtailed LDs. *Thorlabs, INC. - Your Source for Fibre Optics, Laser Diodes, Optical Instrumentation and Polarization Measurement and Control* [online]. Thorlabs, c1999-2017 [cit. 2017-05-22]. Dostupné z: https://www.thorlabs.com/newgrouppage9.cfm?objectgroup_id=7752&pn=CLD1010LP
- [23] FBT vs PLC Fiber Optic Splitters - What's the difference? —Multicom. *Multicom — Video, Data and Voice Solutions* [online]. 1076 Florida Central Parkway Longwood, FL 32750: Multicom, c2017 [cit. 2017-05-22]. Dostupné z: <http://www.multicominc.com/training/technical-resources/fbt-vs-plc-fiber-optic-splitters-whats-the-difference/>

SEZNAM SYMBOLŮ, VELIČIN A ZKRATEK

λ	vlnová délka
E	elektrická intenzita
B	magnetická indukce
t	čas
T	perioda signálu
v	rychlost
x	výchylka
ω	úhlová rychlost
E_m	hodnota intenzity elektrického pole
B_m	hodnota magnetické indukce
v	rychlost
ϵ	permitivita prostředí
μ	permeabilita prostředí
ϵ_0	permitivita vakua
μ_0	permeabilita vakua
θ_1	úhel dopadu paprsku
θ_2	úhel lomu paprsku
n	index lomu
c	rychlost světla
f	frekvence
L_c	koherenční délka
L	délka vlákna
r	poloměr
ϕ	fázový posuv

SEZNAM PŘÍLOH

A	Obsah přiloženého CD	59
A.1	Elektronická verze práce	59
A.2	Složka VPIphotonics	59
A.3	Složka Matlab	59
B	Přílohy	60
B.1	Frekvenční průběhy Michelsonova interferometru	60
B.2	Frekvenční průběhy Mach - Zehnderova interferometru	64

A OBSAH PŘILOŽENÉHO CD

A.1 Elektronická verze práce

Obsahuje elektronickou verzi práce s názvem DPxsrnsk00.pdf

A.2 Složka VPIphotonics

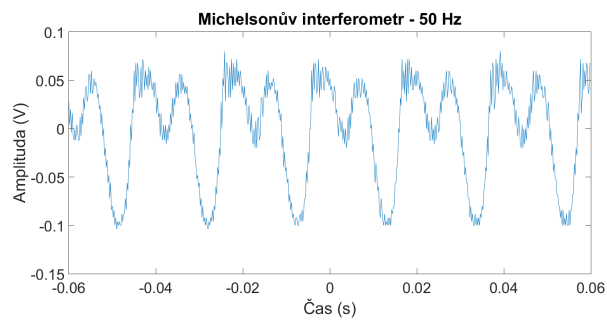
Obsahuje archiv se simulacemi Michelsonova interferometru a Mach - Zehnderova interferometru ze simulačního prostředí VPIphotonics.

A.3 Složka Matlab

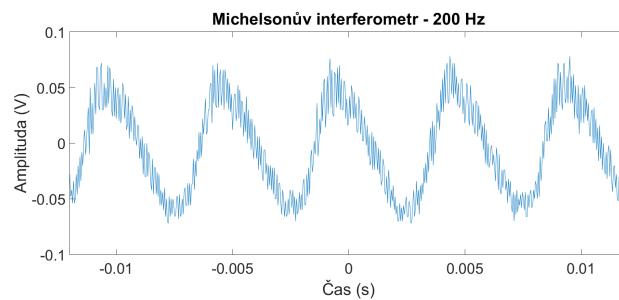
Obsahuje všechny grafy v podobě měřených frekvencí Michelsonova interferometru a Mach - Zehnderova interferometru.

B PŘÍLOHY

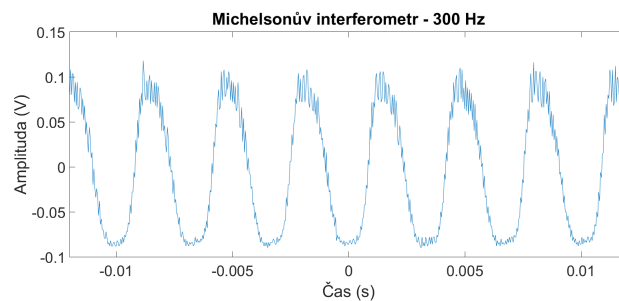
B.1 Frekvenční průběhy Michelsonova interferometru



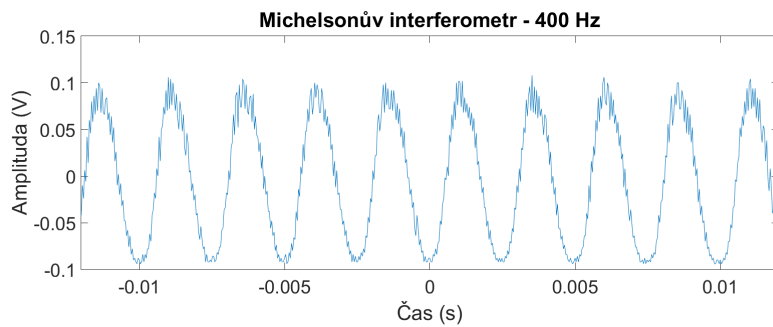
Obr. B.1: Výstupní signál Michelsonova interferometru při frekvenci 50 Hz.



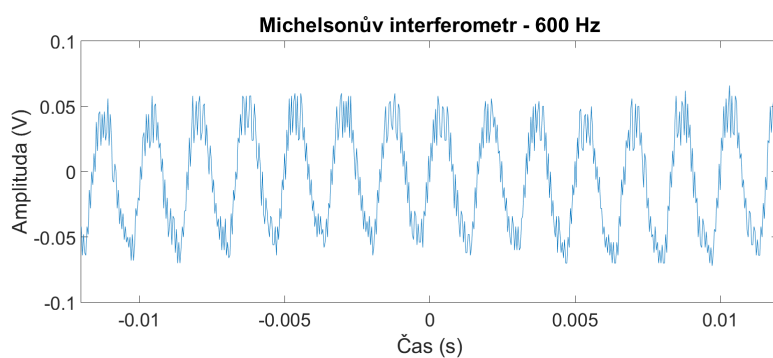
Obr. B.2: Výstupní signál Michelsonova interferometru při frekvenci 200 Hz.



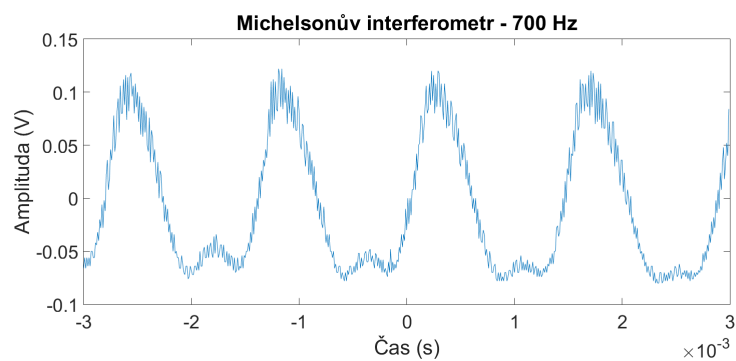
Obr. B.3: Výstupní signál Michelsonova interferometru při frekvenci 300 Hz.



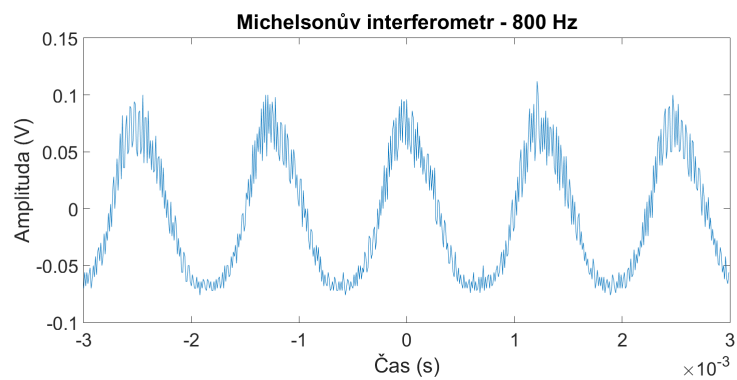
Obr. B.4: Výstupní signál Michelsonova interferometru při frekvenci 400 Hz.



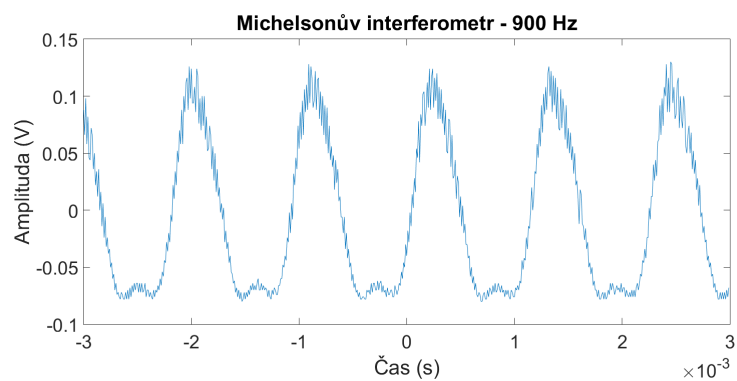
Obr. B.5: Výstupní signál Michelsonova interferometru při frekvenci 600 Hz.



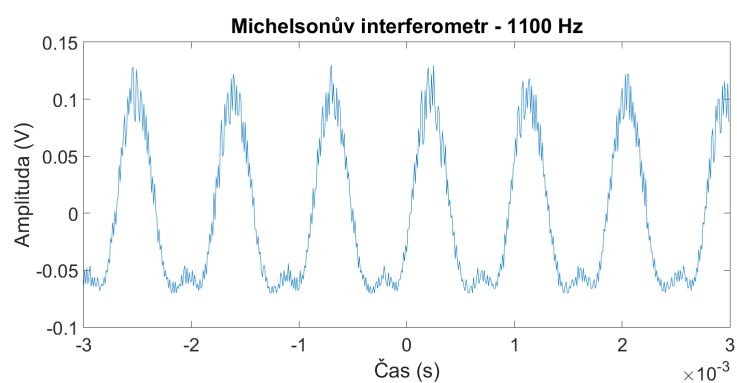
Obr. B.6: Výstupní signál Michelsonova interferometru při frekvenci 700 Hz.



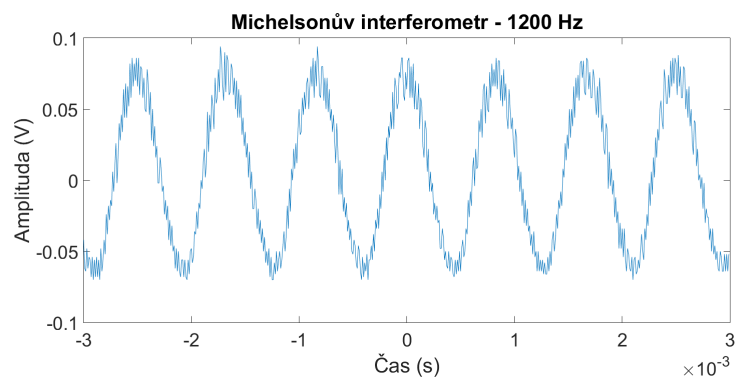
Obr. B.7: Výstupní signál Michelsonova interferometru při frekvenci 800 Hz.



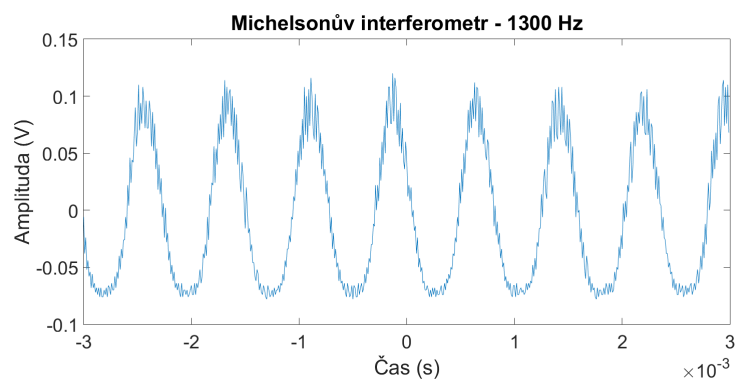
Obr. B.8: Výstupní signál Michelsonova interferometru při frekvenci 900 Hz.



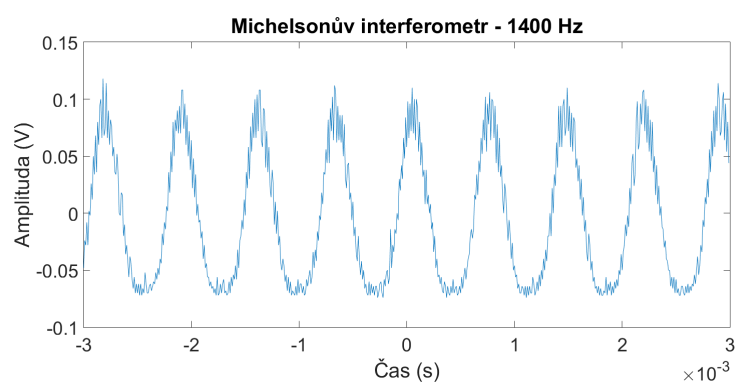
Obr. B.9: Výstupní signál Michelsonova interferometru při frekvenci 1100 Hz.



Obr. B.10: Výstupní signál Michelsonova interferometru při frekvenci 1200 Hz.

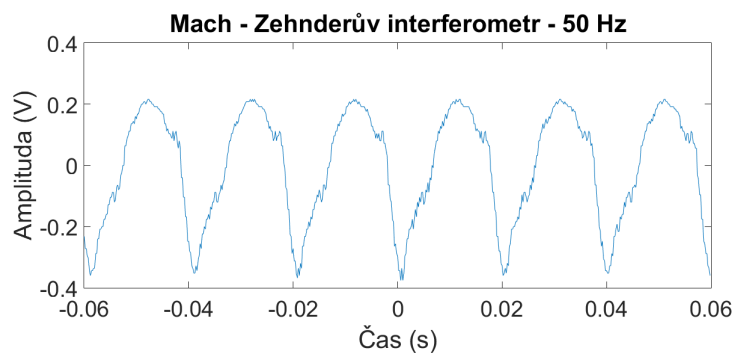


Obr. B.11: Výstupní signál Michelsonova interferometru při frekvenci 1300 Hz.

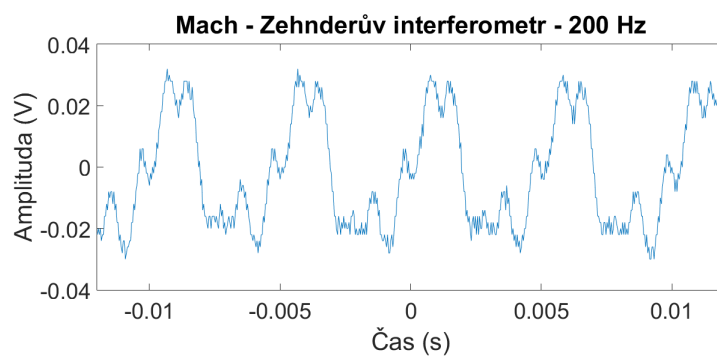


Obr. B.12: Výstupní signál Michelsonova interferometru při frekvenci 1400 Hz.

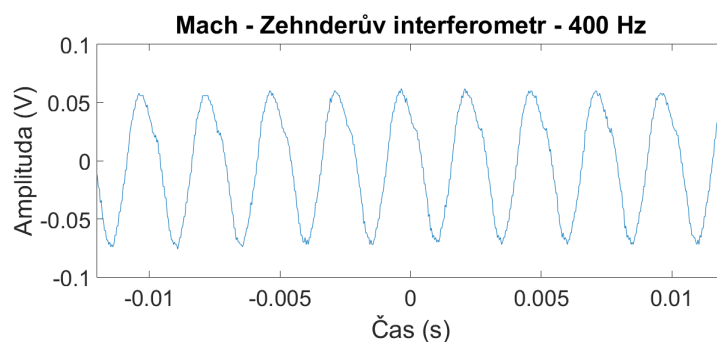
B.2 Frekvenční průběhy Mach - Zehnderova interferometru



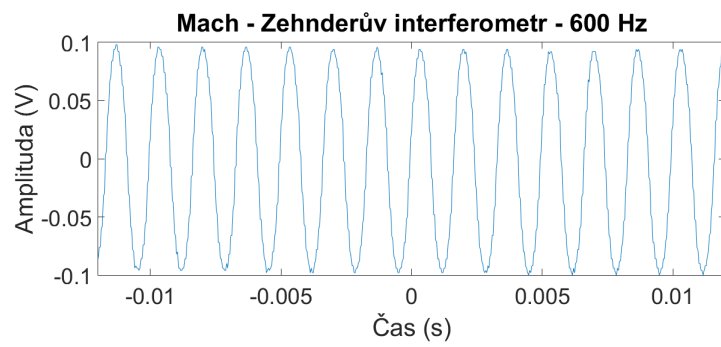
Obr. B.13: Výstupní signál Mach - Zehnderova interferometru při frekvenci 50 Hz.



Obr. B.14: Výstupní signál Mach - Zehnderova interferometru při frekvenci 200 Hz.



Obr. B.15: Výstupní signál Mach - Zehnderova interferometru při frekvenci 400 Hz.



Obr. B.16: Výstupní signál Mach - Zehnderova interferometru při frekvenci 600 Hz.