

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta elektrotechnická

Katedra telekomunikační techniky

**Optovláknový interferometrický systém
pro měření vibrací**

Praha, 2014

Diplomant:

Bc. Ota Řehák

Vedoucí práce:

Ing. Michal Lucki, Ph.D.

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem zadanou diplomovou práci vypracoval sám s přispěním vedoucího práce a používal jsem pouze literaturu v práci uvedenou. Dále prohlašuji, že nemám námitek proti půjčování nebo zveřejňování mé diplomové práce nebo její části se souhlasem katedry.

V Praze dne

.....

.....

Ota Řehák

České vysoké učení technické v Praze
Fakulta elektrotechnická

katedra telekomunikační techniky

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Student: **Bc. Řehák Ota**

Studijní program:
Obor: Sítě elektronických komunikací

Název tématu: **Optovláknový interferometrický systém pro měření vibrací**

Pokyny pro vypracování:

Cílem práce je systematický rozbor možností uspořádání již sestaveného optovláknového interferometrického systému. Finálním výsledkem je optimalizace práce interferometru pro aplikace u senzorického měření stacionárních, stochastických neelektrických signálů na modelu periodických vibrací membrány, primárně pak dosažení vysoké citlivosti na měřenou veličinu, eliminace nežádoucích signálů pro vymezení falešných poplachů, zvýšení opakovatelnosti výsledků či přesné měření frekvence a amplitudy vibrací v podmínkách in-situ. Součástí práce je vyzkoušení vlivu geometrických parametrů soustavy na výsledky, jako jsou např. volba typu uspořádání (Michelson, Sagnac, Mach-Zehnder interferometr), délka ramen interferometru, počet konektorů, umístění polarizátorů, dále pak vlnová délka a kvalita použitého zdroje záření či nastavení bloku detekce interferenčních proužků. Zpracování výsledků lze provádět v libovolném programovém vybavení.

Seznam odborné literatury:

- [1]Luhs, W.: Experiment 10 Michelson interferometer, Eschbach: Laserzentrum FH Münster University of Appl. Sciences, 1995 revised 2003
- [2]Fang, X.: A variable-loop Sagnac interferometer for distributed impact sensing, Lightwave Technology 1996, 14(10), 2250-2254
- [3]Narayanamurthy, C. S.: Analysis of the localization of Michelson interferometer fringes using Fourier optics and temporal coherence, Eur. J. Phys. 2009, 30, 147-155
- [4]Kezmah, M., Donlagic, D., Lenardic, B.: Low Cost Security Perimeter Based on a Michelson Interferometer, Proc of IEEE Sensors, 2008, 1139-1142
- [5]Yung-Cheng, W., Lih-Horng, S., Chung-Ping, Ch.: The Comparison of Environmental Effects on Michelson and Fabry-Perot Interferometers Utilized for the Displacement Measurement, Sensors, 2010, 10, 2577-2586
- [6]Byeong, H. L., Young, H. K., Kwan, S. P., Joo, B. E., Myoung, J. K., Byung, S. R., Hae, Y. Ch.: Interferometric Fiber Optic Sensors, Sensors 2012, 12, 2467-2486

Vedoucí: Ing. Michal Luckí, Ph.D.

Platnost zadání: do konce zimního semestru 2014/2015

prof. Ing. Boris Šimák, CSc.
vedoucí katedry



prof. Ing. Pavel Ripka, CSc.
děkan

V Praze dne 20. 11. 2013

Anotace:

Tato práce se zabývá měřeními na optovláknovém interferometru. V realizovaných měřeních jsou nejprve zkoumány vlivy změn parametrů interferometru a teplotní stabilizace na laser a celý interferometrický systém. Ostatní měření na tomto systému se týkají jeho využití jako senzoru/detektoru známé frekvence a jako optického mikrofonu pro záznam promluvy.

Klíčová slova:

Interferometr, senzor, interferenční proužky, laser, detekce frekvence, optický mikrofon, optické vlákno, senzor vibrací

Annotation:

This thesis deals with the measurement on a fiber-optic interferometer. Implemented measurements are first examined in terms of changed parameters and temperature influence on laser behavior, and the interferometric system. Other measurements regarding this system deal with its application as a sensor of a known frequency, as well as an optical microphone employed for speech recording.

Keywords:

Interferometer, sensor, interference fringes, laser, frequency detection, optical microphone, optical fiber, vibration sensor

Poděkování

Rád bych poděkoval panu Ing. Michalu Luckimu, Ph.D. za jeho vstřícnost, ochotu a mnoho užitečných rad při tvorbě této práce. Spolupráce s ním mne obohatila o mnoho teoretických i praktických znalostí z oblasti fotoniky, fyziky a optických komunikací obecně. Dále bych chtěl poděkovat panu Ing. Richardovi Zelenému za pomoc, vstřícnost a užitečné rady při praktickém měření na vláknovém interferometru.

Obsah

1. Úvod	1
1.1 Cíle práce	1
2. Fyzikální princip optovláknových interferometrů	2
2.1 Interference dvou vln	2
2.2 Interferenční proužky	5
2.2.1 Parametry pozorovatelnosti proužků	6
2.3 Koherence	7
2.4 Polarizace	8
3. Praktická realizace optického interferometru	9
3.1 Michelsonův interferometr	9
3.2 Sagnacův interferometr	13
4. Aktuální stav problematiky	14
4.1 Myšlenka vláknového interferometru v oblasti senzorové techniky	14
4.2 Interferometr jako optický mikrofon	15
5. Realizace vláknového interferometru	16
5.1 Interferometr ve volném prostoru versus vláknový interferometr	16
5.2 Základní předpoklady	16
5.3 Komponenty, přístrojové vybavení	17
5.3.1 Zdroj záření	19
5.3.2 Řídící jednotka laseru, vazební člen	20
5.3.3 Obvody detekce	21
5.3.4 Speciální detekční jednotka	23
5.3.5 Ostatní komponenty	23
6. Realizovaná měření	25
6.1 Měření známé frekvence reproduktoru	25
6.1.1 Naměřené výsledky	26
6.1.2 Závěry z měření známé frekvence reproduktoru	31
6.2 Vliv teplotní stabilizace na spektrum DFB laseru	31
6.2.1 Závěry z měření vlivu teplotní stabilizace DFB laseru	33
6.3 Teplotní stabilizace laseru a její vliv na interferometr	33
6.3.1 Závěry z měření teplotní stabilizace laseru	36
6.4 Interferometr jako optický mikrofon	36
6.4.1 Závěry z měření na optickém mikrofonu	40

6.5	Optimalizace optického mikrofonu.....	41
6.5.1	Optický mikrofon na bázi Fizeau interferometru.....	41
7.	Závěr	43
	Seznam obrázků	45
	Seznam tabulek	47
	Seznam použitých zkratk	48
	Použitá literatura	49
	Příloha A.....	I

1. Úvod

Tato práce se zabývá sestavením a následným měřením s interferometry typu Michelson, a Sagnac. V následujících kapitolách budou popsány pouze tyto dva typy optovláknových interferometrů.

1.1 Cíle práce

Cílem práce je systematický rozbor možností uspořádání již sestaveného optovláknového interferometrického systému. Finálním výsledkem je optimalizace práce interferometru pro aplikace u senzorického měření stacionárních, stochastických neelektrických signálů na modelu periodických vibrací membrány, primárně pak dosažení vysoké citlivosti na měřenou veličinu, eliminace nežádoucích signálů pro vymezení falešných poplachů, zvýšení opakovatelnosti výsledků či přesné měření frekvence a amplitudy vibrací v podmínkách in-situ. Součástí práce je vyzkoušení vlivu geometrických parametrů soustavy na výsledky, jako jsou např. volba typu uspořádání (Michelson, Sagnac, Mach-Zehnder interferometr), délka ramen interferometru, počet konektorů, umístění polarizátorů, dále pak vlnová délka a kvalita použitého zdroje záření či nastavení bloku detekce interferenčních proužků. Zpracování výsledků lze provádět v libovolném programovém vybavení.

2. Fyzikální princip optovláknových interferometrů

Optické interferometry – jak ty ve volném prostoru, tak i ty optovláknové, jsou založeny na principu interference dvou vln. V následujících kapitolách je stručně popsán princip interference dvou vln dle [1] [2] [3], vznik a význam interferenčních proužků, a také vlastnosti světelné vlny, jakými jsou koherence a polarizace.

Vzájemná interference dvou vln v interferometru je úměrná měřené veličině a je reprezentovaná tzv. proužky, které jsou výsledkem superpozice dvou vln.

2.1 Interference dvou vln

Skládají-li se dvě monochromatické vlny s komplexními amplitudami $U_1(r)$ a $U_2(r)$ se stejnou vlnovou délkou a polarizací, jejich superpozice je monochromatická vlna o stejné vlnové délce:

$$U(r) = U_1(r) + U_2(r) \quad (2-1)$$

Optická intenzita monochromatické vlny je dána:

$$I(r) = |U(r)|^2 \quad (2-2)$$

Podle vztahu (2-2) dostáváme optickou intenzitu monochromatické vlny, která je dána kvadrátem modulu její komplexní amplitudy a nemění se v čase. Pro intenzity skládaných vln a výsledné vlny lze psát:

$$I = |U|^2 = |U_1 + U_2|^2 = |U_1|^2 + |U_2|^2 + U_1^* \cdot U_2 + U_1 \cdot U_2^* \quad (2-3)$$

Jak je patrné, závislost na r byla pro zjednodušení vypuštěna. Dosadíme-li do předchozího vztahu:

$$U_1 = I_1^{\frac{1}{2}} \cdot \exp(j\varphi_1) \quad (2-4)$$

$$U_2 = I_2^{\frac{1}{2}} \cdot \exp(j\varphi_2) \quad (2-5)$$

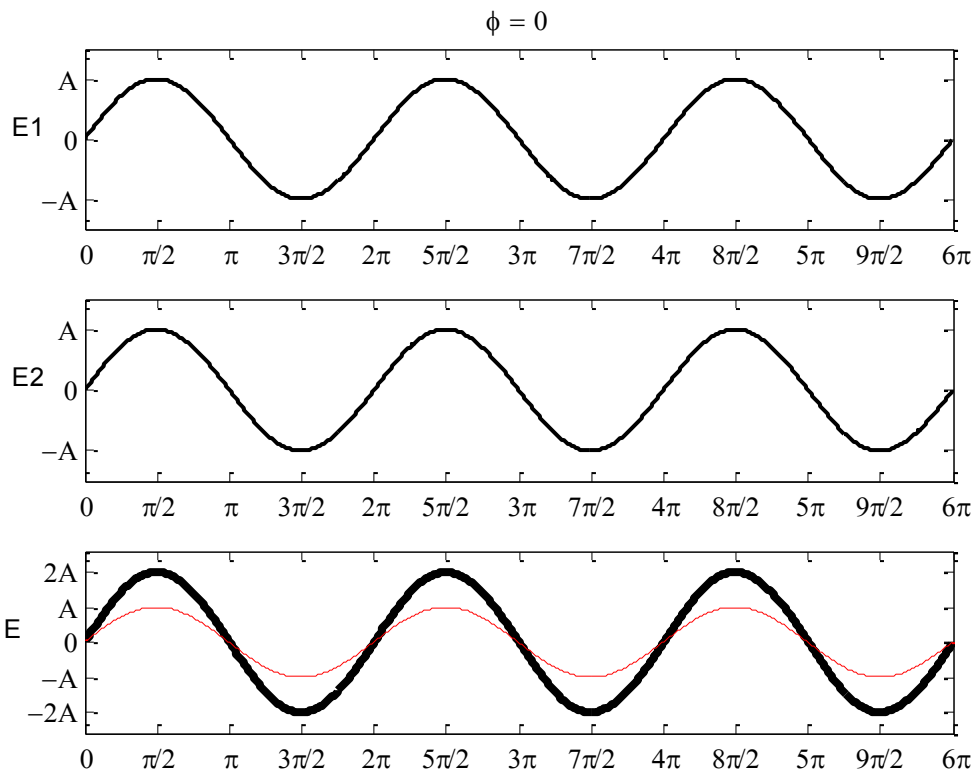
kde φ_1 a φ_2 jsou fáze obou vln, výsledkem bude tzv. interferenční rovnice:

$$I = I_1 + I_2 + 2(I_1 I_2)^{\frac{1}{2}} \cos \varphi \quad (2-6)$$

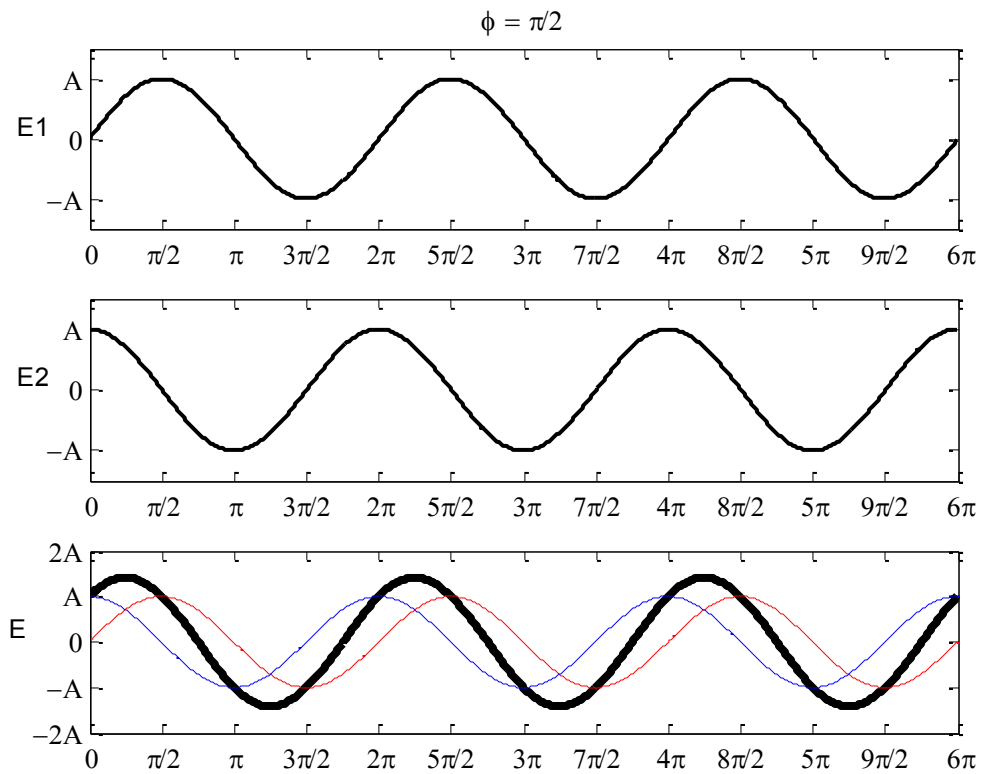
kde $\varphi = \varphi_2 - \varphi_1$.

Nutno podotknout, že intenzita součtu dvou vln není součtem jejich intenzit. Z interferenční rovnice je patrný člen $2(I_1 I_2)^{1/2} \cos \varphi$, který je roven právě interferenci mezi dvěma vlnami. Tento člen může být kladný nebo záporný, což odpovídá konstruktivní nebo destruktivní interferenci. Je-li například $I_1 = I_2 = I_0$, pak $I = 2I_0(1 + \cos \varphi) = 4I_0 \cos^2(\varphi/2)$, takže pro $\varphi = 0$ bude výsledná intenzita čtyřnásobná oproti intenzitě každé ze dvou superponujících vln. Pro $\varphi = \pi$ se obě superponující vlny navzájem vyruší a tudíž bude výsledná intenzita I rovna nule. Při fázovém rozdílu mezi superponujícími vlnami rovnému $\pi/2$ nebo $3\pi/2$ vymizí interferenční člen a potom $I = 2 I_0$. To nám říká, že celková intenzita je pak součtem intenzit interferujících vln. Díky silné závislosti intenzity světla I na fázovém rozdílu φ je pak možné určit fázový rozdíl měřením intenzity světla. Tohoto principu je využíváno v některých starších optických přístrojích [3] [4] [5] [6].

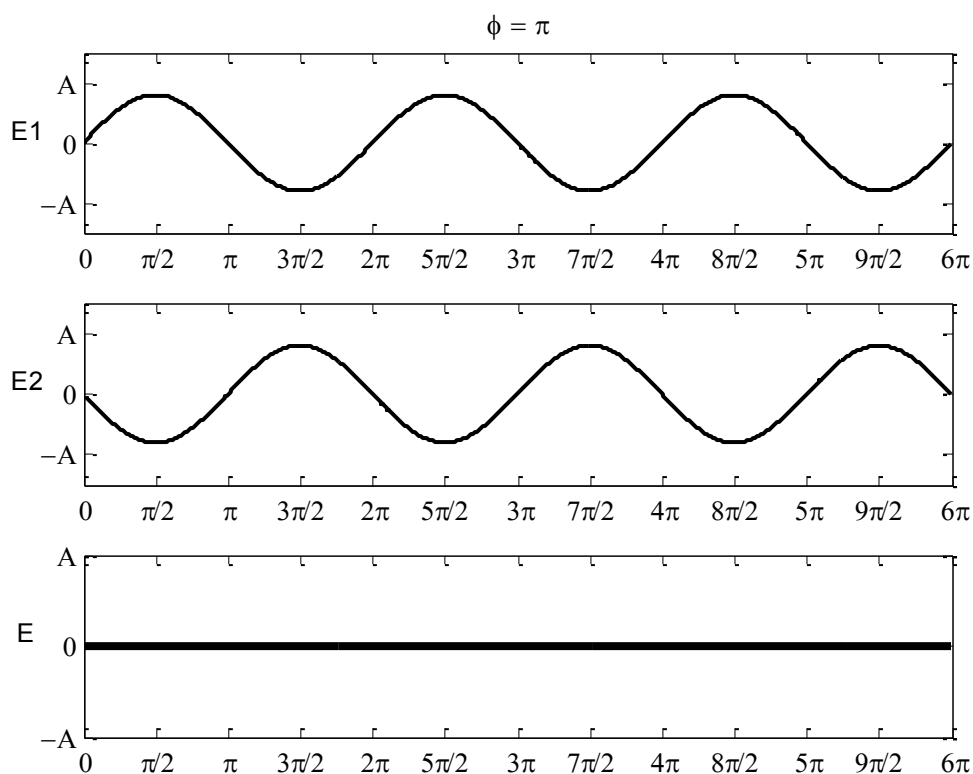
Praktické znázornění konstruktivní interference, konstruktivní interference s fázovým posuvem mezi vlnami a destruktivní interference dvou vln se sinusovým průběhem můžeme pozorovat na Obr. 2.1.1, Obr. 2.1.2 a Obr. 2.1.3.



Obr. 2.1.1 Znáznornění konstruktivní interference dvou vln bez fázového rozdílu [Vlastní tvorba]



Obr. 2.1.2 Znáznornění konstruktivní interference dvou vln s fázovým rozdílem $\pi/2$ [Vlastní tvorba]



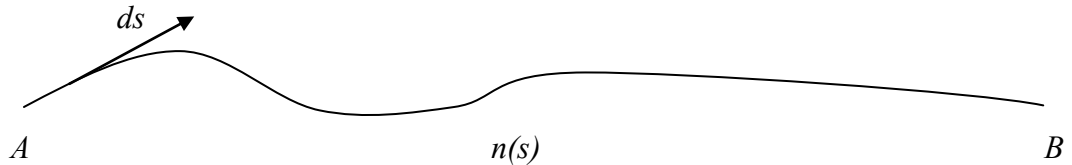
Obr. 2.1.3 Destructivní interference dvou vln [Vlastní tvorba]

2.2 Interferenční proužky

Nejjednodušší experiment, kde je možné demonstrovat princip interference, prezentoval v roce 1801 Thomas Young. Pomocí tzv. dvouštěrbínového experimentu s dvěma světelnými svazky demonstroval vlnovou povahu světla. Pokud je dvojice štěrbin dostatečně úzká a obě vlny koherentní (viz kap. 2.3), objeví se na stínítku střídavě světlé a tmavé proužky [2]. Světlé proužky jsou produktem konstruktivní interference a tmavé destruktivní interference vln.

2.2.1 Parametry pozorovatelnosti proužků

Jedním z parametrů určujících pozorovatelnost interferenčních proužků je z anglického OPL (Optical Path Length) – délka optické trasy. Ta je úměrná času, který světlo urazí z bodu A do bodu B. Známe si princip určení OPL pomocí následující křivky představující vlákno o koncích A a B [9]:



$$\text{OPL} = \int_A^B n(s) ds \quad (2-7)$$

$$\text{OPL} = nt \quad (2-8)$$

kde n je index lomu přenosového media a t je jeho průměr.

Zavádí se i další pojem OPD (opět z anglického Optical Path Difference) – rozdíl mezi optickými trasami dvou paprsků.

$$\text{OPD} = \text{OPL}_1 - \text{OPL}_2 \quad (2-9)$$

$$(\Phi_1 - \Phi_2) = \frac{2\pi}{\lambda} \text{OPD} \quad (2-10)$$

Pro možnost pozorování interferenčních proužků musí být splněno několik základních podmínek.

Mezi nejdůležitější patří, že světlo v jednom svazku vyzařované zdrojem (např. DFB laser) musí být jak časově, tak prostorově koherentní. Také polarizační vlastnosti obou paprsků musí být shodné. Koherenci a jejími vlastnostmi se zabývá následující kapitola [8].

2.3 Koherence

Koherence je vzájemná souvislost fáze a amplitudy vlnění vycházejících buďto ze dvou různých míst na povrchu zářícího tělesa, nebo z jednoho místa, avšak s určitým časovým odstupem (koherence časová). Koherentní vlnění je vlnění o stejné frekvenci, stejném směru kmitání a se stejnou fází (nebo se stejným fázovým rozdílem). Zavádíme pojem koherenční délka, která udává, na jaké vzdálenosti od zdroje si oba svazky „drží“ stejný fázový rozdíl. Časová koherence je prvním důležitým předpokladem pro pozorování interferenčních proužků.

Časová koherence je nepřímo úměrná spektrální šířce pásma světelného zdroje optického záření. Je dána Fourierovou transformací spektrálního rozložení zdroje záření. Uvedme nyní krátký příklad viz [8]:

Obecně pro zjednodušení simulací je laser často modelován jako čistě monochromatický zdroj záření, což znamená, že jeho šířka spektrální čáry je rovna nule. Fourierova transformace zdroje s nulovou šířkou pásma je konstantní, takže časová koherence takového monochromatického zdroje je rovna nekonečnu. Nekonečná časová koherence pak znamená, že světlo v jednom paprsku může být zpožděno vzhledem k druhému paprsku jakoukoli hodnotou OPL (jakýmkoliv časem) a oba paprsky budou přesto interferovat.

Časová koherence zdroje je obvykle dána tzv. koherenční délkou (L_c) a koherenčním časem (t_c):

$$L_c = \frac{\lambda_c^2}{\Delta\lambda} t_c = \frac{L_c}{c} \quad (2-11)$$

Typ zdroje	λ_c (nm)	$\Delta\lambda$	L_c
HeNe laser	632,8	< 0,04 pm	> 10 m
Hg lampa	546	~ 0,1 nm	~ 3 mm
SLD	680	12 nm	38 μ m
LED	660	25 nm	17 μ m
Žárovka	550	~ 300 nm	~ 1 μ m
DFB laser	1300	< 0,02 pm	až desítky km

Tab. 2.3.1 Koherenční parametry vybraných světelných zdrojů [8]

Středová vlnová délka λ_c a šířka spektrální čáry $\Delta\lambda$ jsou měřeny pro FWHM (Full Width at Half Maximum). Zdroj světelného záření může produkovat proužky po dobu, kdy OPD mezi dvěma paprsky je menší, než je koherenční délka. Pokud rozsah OPD mezi dvěma paprsky je větší, než je koherenční délka, pak interferenční proužky nemohou být pozorovány. Pokud je OPD jdoucí k nule, viditelnost interferenčních proužků dosahuje maxima.

Prostorová koherence dvou paprsků je také důležitým faktorem pro pozorování interferenčních proužků [8]. Pokud je zdroj záření skutečně bodovým zdrojem, oba paprsky jsou pak identické kromě OPD. Model monochromatického bodového zdroje nám dává dva paprsky, ve kterých jakákoliv pozice prvního paprsku bude interferovat s jakoukoliv pozicí druhého paprsku. Avšak tyto bodové zdroje v praxi neexistují a reálné paprsky mají méně než ideální prostorovou koherenci.

U „nizkokoherenčních“ interferometrů, které používají LED zdroje záření a mají koherenční délku v řádu několika desítek centimetrů, je třeba se problémem koherenční délky zabývat. Avšak v dnešní době má většina dostupných laboratorních laserů koherenční délku v řádech několika desítek až stovek metrů, tudíž pro laboratorní účely se tento problém většinou neřeší.

Nelze však opomenout skutečnost, že laboratorní modely by měly co nejlépe odpovídat reálnému měření, kde koherenční délku nelze opomenout.

2.4 Polarizace

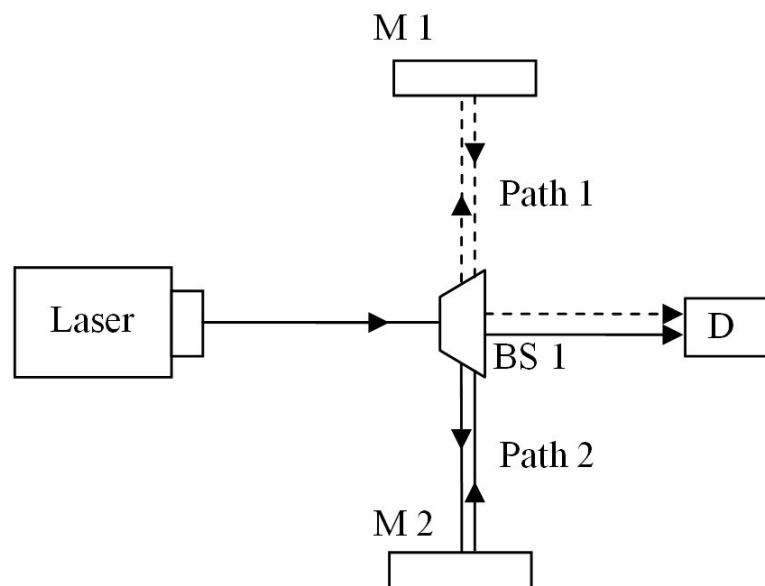
Aby spolu mohly dva světelné paprsky interferovat, je nutné, aby nebyly vůči sobě ryze ortogonální. Pokud je například první paprsek polarizován lineárně k ose x, druhý paprsek lineárně k ose y, nebudou interferovat. Bez ohledu na koherenci, dva paprsky, navzájem ortogonální, spolu nebudou interferovat [11]. Pokud ovšem budou paprsky mít polarizaci shodnou, jejich schopnost interferovat bude maximální, tudíž viditelnost interferenčních proužků bude také maximální. Viditelnost interferenčních proužků mezi dvěma lineárně polarizovanými paprsky bude závislá na $|\cos(\alpha)|$, kde α je úhel mezi dvěma stavy polarizace.

3. Praktická realizace optického interferometru

Princip funkce interferometru je založen na měření dráhového rozdílu vln, kde je vstupní vlna rozdělena pomocí děliče světla na dvě vlny, které urazí různé vzdálenosti. Interferometr využívá zrcadel ke změně jejich směru tak, aby se použitím druhého (nebo stejného) děliče světla vlny opět spojily [10] [13] [14]. Následně detekuje intenzitu jejich superpozice.

3.1 Michelsonův interferometr

V roce 1881 přišel jako první s objevem interferometru americký fyzik Albert Abraham Michelson. V roce 1887 pak s kolegou E. W. Morleyem prezentovali slavný pokus, kde za použití zdroje záření a několika odrazných zrcadel realizovali interferometr. Znázornění Michelsonova interferometru je na Obr. 3.1.1.



Obr. 3.1.1 Michelsonův interferometr [Vlastní tvorba]

Michelsonův interferometr se skládá ze zdroje záření, vazebního článku (Beam Splitter), tzv. ramen interferometru (zakončených zrcátky) a detektoru. Ze zdroje záření – např. DFB laseru se navazuje do optického vlákna vstupní světelný svazek. Tento svazek doputuje až do vazebního článku, kde se rozdělí do dvou ramen interferometru.

Obě ramena by měla mít shodnou délku, případně je dostatečné, aby rozdíl délek ramen byl celistvým násobkem vlnové délky. Tento rozdíl však nesmí být větší,

než je koherenční délka zdroje. V takovém ideálním případě bude zaručeno, že mezi oběma vlnami nebude fázový posun a dodatečný fázový posun jako následek zaznamenání měřené veličiny bude mít největší účinek. Interferometr má největší citlivost a maximální kontrast. Ramena jsou zakončena zrcátky (M_1 a M_2), od kterých se vstupní svazky odrazí a putují zpět do tzv. vazebního článku, kde se sloučí.

Výstupní svazek je vyveden na detektor (D), na jehož detekční plochu dopadají tzv. interferenční proužky. Detektor zpravidla měří intenzitu osvětlení vektorového součtu paprsků slučujících se ve vazebním článku. Jak již bylo řečeno, ramena interferometru musí mít stejnou délku, nebo jejich rozdíl délek musí být násobkem vlnové délky. Při jakékoliv změně délky jednoho nebo druhého ramene dojde k rozdílu drah svazků v ramenech interferometru a v závislosti na tomto rozdílu budou na detektoru vznikat interferenční minima a maxima.

Po průchodu rameny interferometru spolu svazky interferují v Beam Splitteru. Zde dochází tedy k jejich superpozici. Aniž bychom omezili obecnost řešení, můžeme předpokládat, že intenzita elektrického pole osciluje pouze ve směru osy y. Předpokládejme také, že svazky (vlny) se šíří ve směru osy x, tedy zpět do Beam Splitteru dorazí vlny šířící se stejným směrem [12] [15] [19].

$$E_1 = E_{01} \cdot \sin(k \cdot L_1 + \omega t) \quad (3-1)$$

$$E_2 = E_{02} \cdot \sin(k \cdot L_2 + \omega t) \quad (3-2)$$

$$E_3 = E_1 + E_2 \quad (3-3)$$

Vzhledem k tomu, že vlny E_1 a E_2 jsou tvořeny, když vstupní vlna E_0 prochází děličem světla, který nezavádí žádný fázový rozdíl mezi vlnami, jsou obě vlny totožné:

$$E_3 = E_{01} \cdot \sin(k \cdot L_1 + \omega t) + E_{02} \cdot \sin(k \cdot L_2 + \omega t) \quad (3-4)$$

Jak fotodetektor D na výstupu interferometru, tak i lidské oko nejsou schopny zaznamenat změny intenzity elektrického pole, ale jen změny intenzity světla I, která je spojena s elektrickým polem:

$$I = E^2 \quad (3-5)$$

$$I = (E_{01} \cdot \sin(k \cdot L_1 + \omega t) + E_{02} \cdot \sin(k \cdot L_2 + \omega t))^2 \quad (3-6)$$

$$I = E_{01}^2 \cdot \sin^2(k \cdot L_1 + \omega t) + 2E_{01}E_{02} \cdot \sin(k \cdot L_1 + \omega t) \sin(k \cdot L_2 + \omega t) + E_{02}^2 \cdot \sin^2(k \cdot L_2 + \omega t)$$

Pro zjednodušení vztahů lze použít následující pravidlo:

$$2 \cdot \sin \alpha \cdot \sin \beta = \cos(\alpha - \beta) + \cos(\alpha + \beta) \quad (3-7)$$

pak platí:

$$I = E_{01}^2 \cdot \sin^2(k \cdot L_1 + \omega t) + E_{01}E_{02} \cdot \cos(k(L_1 - L_2)) + E_{01}E_{02} \cdot \cos(k(L_1 + L_2) + 2\omega t) + E_{02}^2 \cdot \sin^2(k \cdot L_2 + \omega t) \quad (3-8)$$

Výraz pro výslednou intenzitu světla, která je vnímána fotodetektořem (nebo pro viditelné spektrum lidským okem), se skládá ze čtyř částí. Pouze druhý člen tohoto rozkladu není závislý na čase t . Všechny ostatní členy oscilují s úhlovou frekvencí ω . K vyjádření úhlové frekvence ω použijme známou formuli:

$$\omega = 2\pi\nu = 2\pi \frac{c}{\lambda} \quad (3-9)$$

kde ν je frekvence světla, λ je vlnová délka a c rychlost světla.

Pro příklad uveďme He-Ne laser s vlnovou délkou $\lambda = 1300$ nm. Předpokládejme, že rychlost světla je přesně $c = 300 \cdot 10^6$ m/s, pak frekvence záření vyzařovaného laserem bude:

$$\nu = \frac{300 \cdot 10^6}{633 \cdot 10^{-9}} = 2,3 \cdot 10^{14} \text{ Hz} \quad (3-10)$$

Sinus prvního a čtvrtého členu kmitá právě na této frekvenci, sinus třetího členu dokonce osciluje na dvojnásobku této frekvence. Ani fotodetektor, natož lidské oko nejsou schopny detekovat takto vysokou frekvenci. V dnešní době totiž nejmodernější a nejrychlejší fotodetektory dokážou zaznamenat frekvence až do $2 \cdot 10^9$ Hz. To je důvod, proč fotodetektor vnímá pouze průměrné hodnoty. Kvadrát sinu, obsažený v prvním a čtvrtém členu, osciluje mezi hodnotami 0 a 1 (jeho střední hodnota je tedy 0,5). Kosinový člen osciluje mezi hodnotami -1 a 1, takže jeho střední hodnota je proto 0. Nyní můžeme určit výslednou intenzitu světla na detektoru:

$$I = \frac{1}{2} E_{01}^2 + \frac{1}{2} E_{02}^2 + E_{01} E_{02} \cos(k \Delta L) \quad (3-11)$$

$$\Delta L = L_1 - L_2 \quad (3-12)$$

Jak lze odvodit z tohoto vzorce, intenzita bude maximální, pokud kosinus bude roven 1. Tento jev nastane vždy, když jeho argument bude nulový nebo celočíselným násobkem 2π . Intenzita je naopak minimální, pokud je kosinus roven -1. Vztahy pro maximální a minimální intenzitu jsou tedy následující:

$$I_{\max} = \frac{1}{2} E_{01}^2 + \frac{1}{2} E_{02}^2 + E_{01} E_{02} = \frac{1}{2} (E_{01} + E_{02})^2 \quad (3-13)$$

$$I_{\min} = \frac{1}{2} E_{01}^2 + \frac{1}{2} E_{02}^2 - E_{01} E_{02} = \frac{1}{2} (E_{01} - E_{02})^2 \quad (3-14)$$

Připomeňme ještě konstantu k , tedy vlnové číslo:

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} \quad (3-15)$$

kteřá je konstantou pro stabilní vlnovou délku.

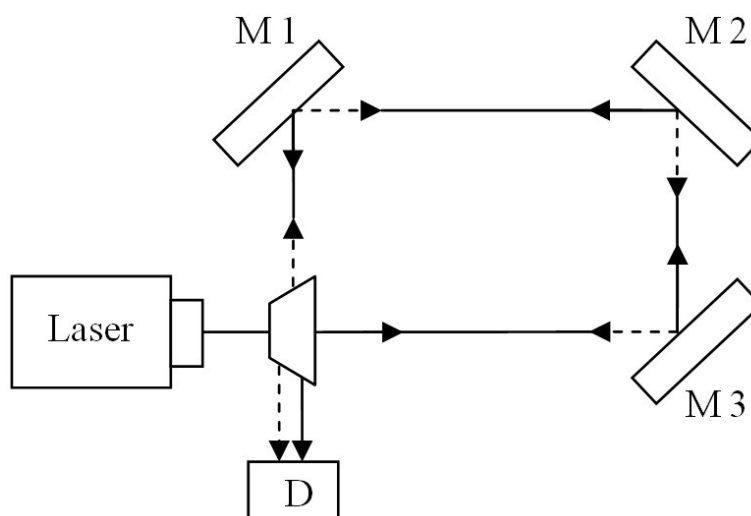
Intenzita světla na fotodetektoru je, jak vidno z (3-11), závislá na ΔL . Pokud obě ramena interferometru mají stejné délky, čili L_1 a L_2 jsou shodné, pak dva svazky putující zpět do vazebního členu budou konstruktivně interferovat a pozorovaná intenzita světla na fotodetektoru bude maximální. Pokud bude rozdíl mezi cestami svazků být jen $\lambda/2$, pak:

$$k \cdot \Delta L = \frac{2\pi \lambda}{\lambda} \frac{\lambda}{2} = \pi \quad (3-16)$$

Kosinus (3-11) je potom roven -1 a intenzita světla na fotodetektoru bude minimální. Rozdělme počáteční elektrickou intenzitu na dvě velikostně stejné (E_{01} a E_{02}). V tomto případě i intenzita světla je nulová, protože obě vlny interferují destruktivně. Mějme na mysli, že vlnová délka použitého laseru je 1300 nm, což vede pro náš případ k fázovému posuvu $\lambda/2 = 0,00000065$ m. To znamená, že takovýto typ Michelsonova interferometru lze pomyslně využít i například pro měření délky [18].

3.2 Sagnacův interferometr

Tento typ interferometru je pojmenován pro francouzském fyzikovi G. Sagnacovi, který se svým objevem přišel v roce 1913. Znárodnění Sagnacova interferometru je prezentováno na Obr. 3.2.1.



Obr. 3.2.1 Sagnacův interferometr [Vlastní tvorba]

Vstupní svazek je rozdělen na dva dílčí svazky, které putují navzájem v protisměru stejnou optickou dráhou. Zrcadla M1, M2 a M3, viz Obr. 3.2.1, lze interpretovat jako smyčku optického vlákna o délce řádově několika metrů (dle aplikace a požadovaných vlastností). Se zvyšující se délkou smyčky interferometru se zvyšuje jeho citlivost. Dráhy, které svazky urazí, jsou totožné.

4. Aktuální stav problematiky

4.1 *Myšlenka vláknového interferometru v oblasti senzorové techniky*

Jednou z perspektivních cest, kam se do budoucna ubírat u optických senzorů jsou optovláknové interferometry. Na rozdíl od interferometrů pracujících ve volném prostoru, vláknové interferometry lze použít i mimo laboratorní podmínky, kde mohou sloužit jako například senzory zabudované v zemi pro detekci nášlapu nebo jako velmi účinné odposlechové senzory. Optovláknové interferometry v laboratorních podmínkách nejsou tak přesné jako interferometry ve volném prostoru. U praktických aplikací jsou použitelné pouze vláknové interferometry, a to z důvodu extrémních požadavků na mechanickou stabilitu interferometru ve volném prostoru a zabezpečení optické dráhy. Systém skládající se z optických vláken, kde právě ramena interferometru jsou z optických vláken složena, je proto nejvhodnější. V případě interferometru ve volném prostoru se myšlenka rozmístění zrcadel mimo laboratorní podmínky jeví jako nerealizovatelná [26].

Myšlenka interferometru není nová, přesto v dnešní době není mnoho prací nebo odborných (vědeckých) článků zaměřených na popis postupu konstrukce interferometru. Většina odborných článků na toto téma se omezuje na prezentaci teoretického principu fungování a směřuje spíše k analýze výsledků [27]. Cílem této realizace bylo poskytnutí poznatků ohledně praktické implementace interferometrického systému pro konkrétní aplikaci a nalezení minimálního řešení, které by mohlo být zajímavou alternativou pro komerční perimetrické systémy [28]. V úvahu tak přichází tři konstrukčně nejjednodušší interferometry – Sagnacův, Michelsonův a Mach-Zehnderův interferometr. Vzhledem k tomu, že pro realizaci Mach-Zehnderova interferometru jsou oproti Michelsonově interferometru potřeba dva vazební členy a laboratoř doktora Luckiho disponovala pouze jedním, omezil se počet zkoumaných realizací na dva. Tyto dva typy interferometrů byly detailně prozkoumány.

4.2 Interferometr jako optický mikrofon

Myšlenka optického mikrofonu na bázi interferometru je poměrně novinkou v oblasti senzorové techniky. Vzhledem k flexibilitě optických vláken nachází využití tam, kde by klasické mikrofony nemohly být aplikovány [35]. V dnešní době je mikrofonů na bázi optických vláken využíváno například pro klasifikaci typů vozidel, tedy monitoring provozu na určeném úseku vozovky či letišť [34]. Důvodem jejich využití je odolnost vůči elektromagnetickému záření, jejich obrovské citlivosti a také absence nutnosti složité instalace do zemského povrchu [36]. Není také potřeba žádného elektrického zdroje v místě senzoru.

Interferometr jako senzor je vhodný ale i například jako senzor náslapu v budově vylepšený o optický mikrofon, který by hlas dotyčného zaznamenal.

Zvuková vlna nemá takové účinky jako mechanické vibrace vlákna způsobené otřesy vlivem chůze nebo jeho deformace vlivem narušení. Zvuk tak způsobí mnohem menší změnu délky optické dráhy ΔL , a tak vyžaduje vyšší kontrast proužků, zejména pro aplikace jako odposlech, kdy se může jednat o velmi slabé signály.

Optické mikrofony prvně převádí změny akustického tlaku (zvuk) na změny optického signálu. Přenos lze uskutečnit na delší vzdálenosti bez ovlivnění elektromagnetickým polem. Praktické realizace ukazují, že optický mikrofon lze realizovat dvěma způsoby, a to na bázi modulace intenzity světla a na bázi modulace fáze. Na rozdíl od modulace intenzity světla je modulace fáze méně ovlivněna fluktuacemi optického výkonu, které se projevují jako ztráty u zdroje záření [33] [34].

5. Realizace vláknového interferometru

5.1 Interferometr ve volném prostoru versus vláknový interferometr

Optická vlákna sice do značné míry eliminují problém mechanické stability ramena interferometru, na druhou stranu v optickém vlákně se může projevit celá řada jevů, které neovlivňují šíření paprsku ve volném prostoru. Mezi ně se teoreticky řadí polarizace. Nezanedbatelnou otázkou je útlum vlákna, útlum a odrazy konektorů. Zejména odrazy mohou způsobit vznik parazitních interferencí. U interferometru ve volném prostoru se paprsek šíří z bodu A do bodu B nejkratší možnou drahou, u vláknového interferometru optická draha kopíruje umístění vlákna a zavity mohou být problematické v případě, kdy se délka ramena blíží limitu koherenční délky [9].

Problémem je nemožnost vizuální kontroly interferenčních proužků u optovláknových systémů. U interferometrů pracujících ve volném prostoru lze použít lasery pracující ve viditelném spektru a vizuálně kontrolovat vznik, rozložení, hustotu a směr interferenčních proužků. U optovláknového interferometru se pracuje s vlněním mimo viditelnou oblast [16]. Světlo interferenčních proužků dopadá na fotodiodu a signál zobrazený na osciloskopu je konstantní v čase, stejně jako v případě, kdy na fotodiodu dopadá laserový paprsek, který neinterferuje. Tato situace je často chybně interpretována jako absence interference nebo překročení koherenční délky [21].

5.2 Základní předpoklady

V průběhu realizace jsem čelil četným otázkám, které značně ovlivňují možnost posunutí režimu práce interferometru a jejich odpovědi jsou nutné proto, aby se například dalo do budoucna uvažovat o masové výrobě senzoru na bázi Michelsonova nebo Sagnacova interferometru. Při optimalizaci sestaveného Michelsonova interferometru pro účely senzoru bylo potřeba zvážit několik faktorů [38] [24].

Prvním bodem byla úvaha, zda lze vůbec optovláknový interferometr vylepšit tak, aby jeho vlastnosti byly lepší (přesnější), než tomu je u interferometru pracujícím ve volném prostoru. Při využití interferometru jako perimetrického senzoru se nabízí právě volba mezi „Free Space“ interferometrem a optovláknovým interferometrem. Interferometry ve volném prostoru pracují většinou na lidským okem viditelných vlnových délkách.

Další otázkou bylo, zda a jak se posunout u optovláknového interferometru do oblasti vlnových délek O nebo C pásma, a také jak následně ověřit nastavení interferometru, délek jeho ramen (Michelsonův interferometr), když vizuální kontrola interferenčních proužků nebyla možná.

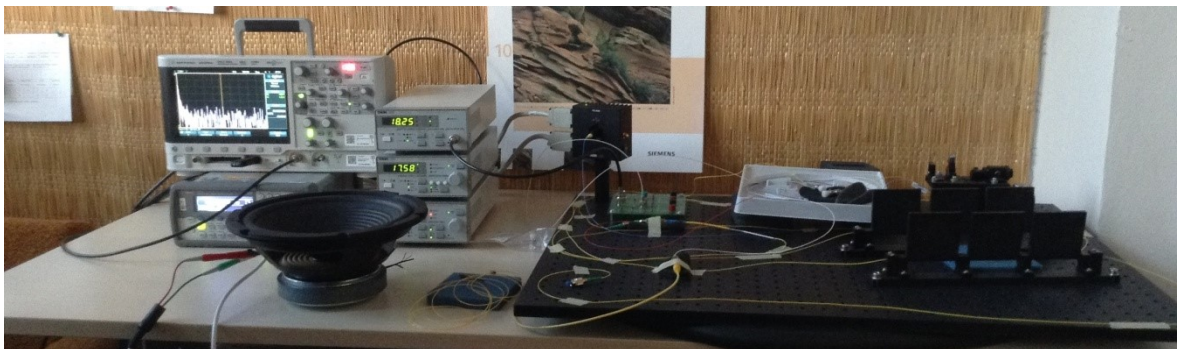
Klíčovým faktorem pro funkčnost interferometru je zajištění mechanické stability celého systému. Proto se nabízela otázka, zda lze optovláknový interferometr zprovoznit i bez zajištění jeho mechanické stability. Jak ukázala měření, viz kap. 6, provozuschopnost interferometru bez zajištění mechanické stability byla velmi omezená.

Sestavený Michelsonův interferometr byl poskládán z komponent, jakými jsou DFB laser, optická vlákna, polarizátory, obvody detekce. Bylo třeba zvážit, do jaké míry ovlivní provedené experimenty kvalita použitých komponent a jaké požadavky musí splňovat obvody detekce. S tím souvisí i případné vyřazení některých komponent ze sestavy tak, aby se celý interferometr stal jednodušším a komplexnějším. Ovšem zmíněné „odlehčení“ měřicí soustavy je také limitováno. Především mírou, kam až lze zajít, aby byl interferometr stále schopný detekovat měřenou veličinu a také poměrem cena/výkon komponent.

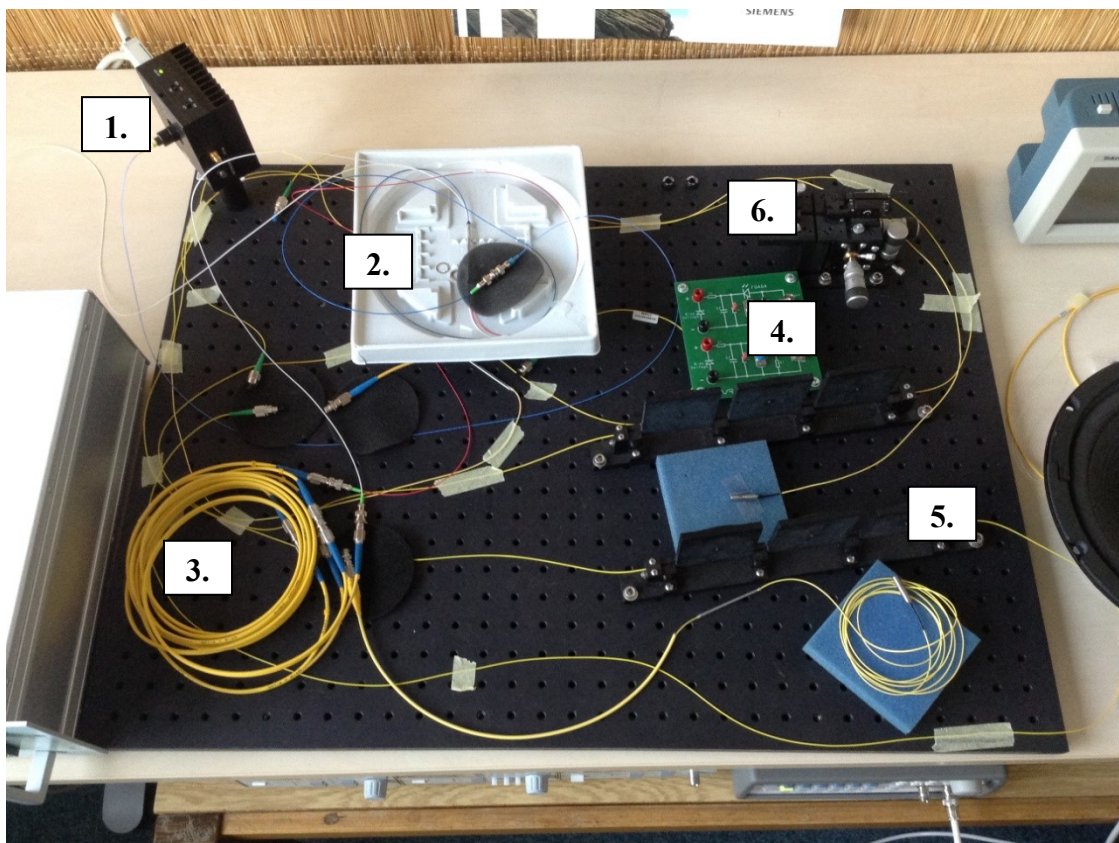
V závislosti na tom, že realizace byla omezená pouze na interferometry typu Michelson a Sagnac, otázkou před vlastním měřením bylo, který z těchto interferometrů je vhodnější pro perimetrické systémy a který je vhodnější pro realizaci optického mikrofonu.

5.3 Komponenty, přístrojové vybavení

Kromě několika optických vláken, potřebných pro propojení jednotlivých komponent mezi sebou, nebo pro vytvoření smyčky u interferometru typu Sagnac, byly použity následující komponenty, viz Obr. 5.3.1, Obr. 5.3.2 a Obr. 5.3.3.

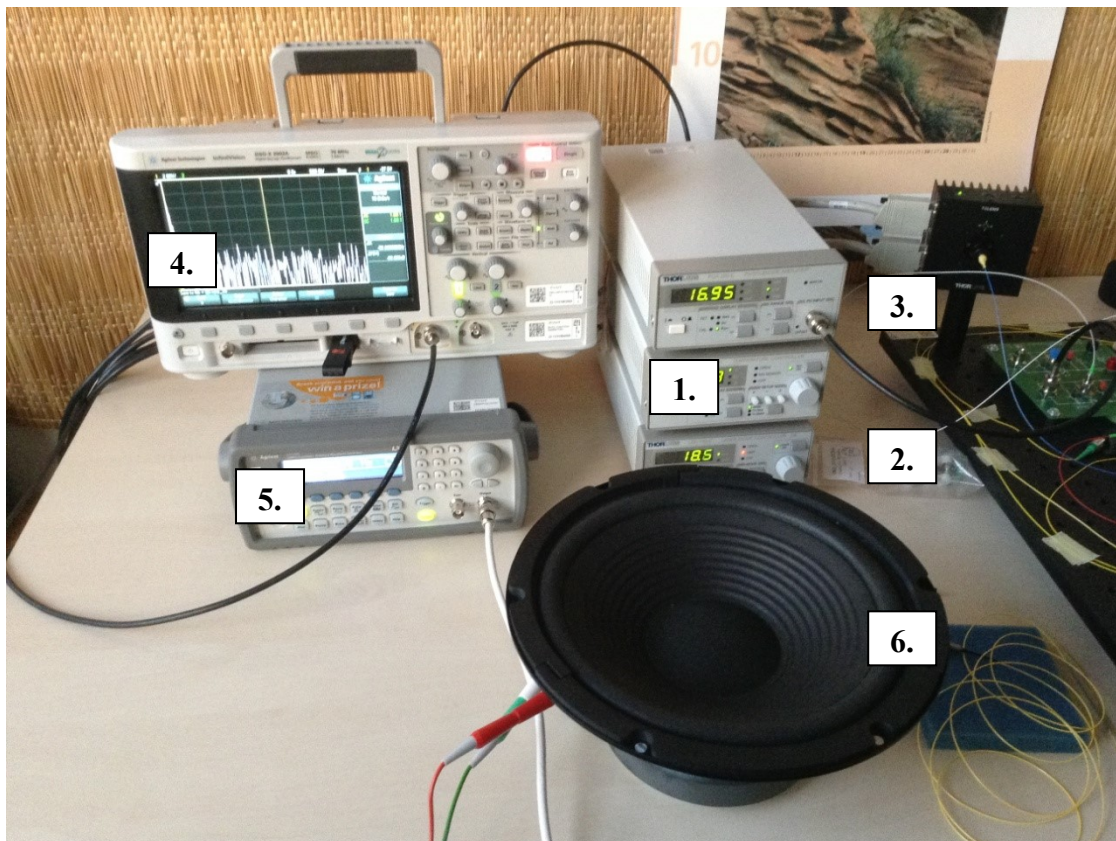


Obr. 5.3.1 Základní pohled na měřicí pracoviště



Obr. 5.3.2 Komponenty na optické lavici

1. Zdroj záření – polovodičový DFB laser
2. Vazební člen interferometru (Beam Splitter, Coupler)
3. Vláknová smyčka - Sagnac, případně vlákno zakončené zrcátkem – Michelson
4. Fotodioda
5. Polarizátor
6. Mikroposuvný rotátor



Obr. 5.3.3 Přístrojové vybavení laboratoře

- | | |
|-------------------------------------|-------------------------|
| 1. Kontrolní jednotka proudu laseru | 4. Osciloskop |
| 2. Teplotní stabilizátor laseru | 5. Frekvenční generátor |
| 3. Zesilovač k fotodiodě | 6. Reproduktor |

5.3.1 Zdroj záření

Jako zdroj záření byl použit polarizaci udržující koherentní DFB laser pracující na vlnové délce 1300 nm. DFB laser obecně je charakterizován úzkou spektrální čarou (úzkým spektrem vyzařovaných frekvencí), relativně dlouhou koherenční délkou (viz Tab. 2.3.1). Teplotní stabilizace, která je pro tyto lasery nutná, byla zajištěna externí jednotkou od společnosti Thorlabs. Ta umožňuje volitelně nastavit pracovní teplotu laseru, a zkoumat vliv teploty na spektrum laseru resp. chování celého interferometru. Laserový chip je umístěn ve speciálním držáku (Obr. 5.3.4) zaručujícím jeho mechanickou stabilitu. Díky modulárnímu charakteru pracoviště je možná výměna laseru za jiný.



Obr. 5.3.4 DFB laser umístěný ve speciálním držáku

5.3.2 Řídící jednotka laseru, vazební člen

Námi použitý laser není vybaven zabudovanou řídicí jednotkou proudu, a proto byl použit externí kontrolér proudu opět od společnosti Thorlabs. U komerčně dostupných výrobků může být právě tento kontrolér integrován s laserem v jednom pouzdře.



Obr. 5.3.5 Kontrolér proudu laserové diody

Jako vazební člen (Beam Splitter/Coupler) byl použit 50/50 vazební člen (Obr. 5.3.7), který dělí optický svazek amplitudově (ne frekvenčně). Existuje několik druhů vazebních členů. Pro naše účely byl vybrán polarizaci udržující vazební člen – značen jako „PM“ (průchod vazebním členem ovlivňuje fázi). Vazební člen byl zakončen konektory typu „APC“, tedy takzvanými „zkosenými“ konektory za účelem minimalizace zpětných odrazů.

Pro správnou funkci laseru, kdy by měl být chlazen na konstantní teplotu, bylo třeba zařadit také jednotku teplotní stabilizace, viz Obr. 5.3.6.



Obr. 5.3.6 Teplotní kontrolér

Teplota přeladuje pracovní vlnovou délku a změny vyzařovaného výkonu, které se mohou promítnout do celkové přesnosti měření. V praxi je však měřicí odchylka způsobena přeladěním pracovní vlnové délky zanedbatelná a kontrolér teploty lze odstranit.



Obr. 5.3.7 50/50 Vazební člen

5.3.3 Obvody detekce

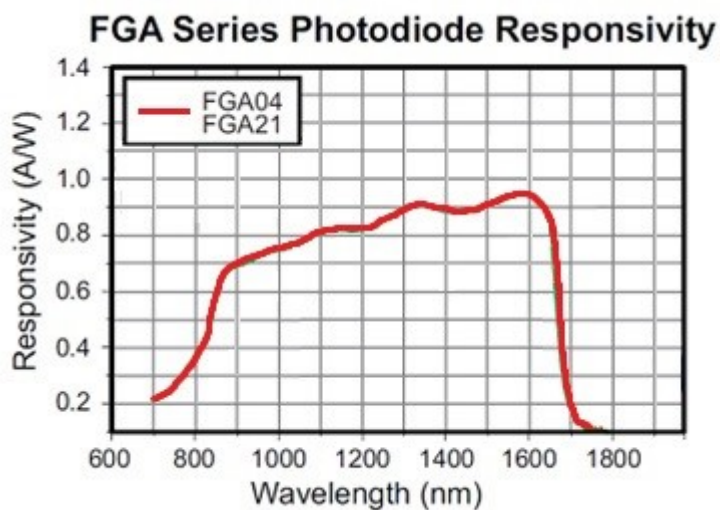
Pro detekci optického výkonu interferogramu lze použít čítače proužků, fotodiody připojené na zesilovače nebo přímo integrované s operačním zesilovačem, nebo speciální jednotky vyvinuté na míru [9]. Mezi parametry, které bylo třeba zohlednit během sestavování obvodů detekce, patří minimální přijatý výkon, pracovní vlnová délka, citlivost fotodiody na dané vlnové délce, zpracování v reálném čase, možnost ukládání naměřených dat, možnost ukládání časového vývoje měřeného signálu a případně další funkce jako je Fourierova transformace pro určení frekvence změn.

Pro realizaci měření na optovláknovém interferometru byl zvolen laboratorní přípravek pro měření interferogramů s fotodiodou Thorlabs FGA 04. Tato fotodioda pracuje v telekomunikačních pásmech O a C. Diodu tvoří kombinace materiálů InGaAs a její pracovní pásmo je 800 – 1800 nm. Doba náběhu fotodiody je 100 ps. Na diodu lze připojit FC/PC konektor.



Obr. 5.3.8 Fotodioda Thorlabs FGA04

Na fotodiodu je připojeno optické vlákno vycházející z vazebního členu interferometru. Výstupem je elektrický signál, který je zesílen. Výstup z přípravku je připojen na osciloskop.



Obr. 5.3.9 Pracovní oblast použité fotodiody

Jako zesilovač k fotodiodě byl použit model PDA200C, výroby Thorlabs. Tento zesilovač měří změny v interferogramu, které jsou reprezentovány změnami ve výkonu. Použitý zesilovač umožňuje měřit výkon na fotodiodě až do jednotek μW .



Obr. 5.3.10 Zesilovač k fotodiodě

Mezi nevýhody použití přípravku s fotodiodou s následným zobrazením frekvenčního spektra na osciloskopu patří například omezená možnost zpracování dat. Pouze některé osciloskopy umožňují zpracování dat v reálném čase a ukládání dat na externí disk ve formátu, který by byl vhodný pro následné výpočty v prostředí Matlab nebo MS Excel. Část celé práce proto byla změřena pomocí přípravku s fotodiodou a osciloskopem. Většina měření ovšem probíhala na speciálním zařízení od společnosti Safibra, které nahradilo obvody detekce.

5.3.4 Speciální detekční jednotka

Jednotka obsahuje celou řadu senzorů, jako jsou FFT spektrum, FFT filtr, FFT band a jiné. Data z hardwarového modulu jsou odesílána sériovou komunikací přes USB v paketech, které obsahují 1024 vzorků signálu. Pakety však neobsahují žádnou časovou ani pořadovou značku. Jedinou informací pro zařazení paketu je čas jeho přijetí a nastavená vzorkovací perioda [17].



Obr. 5.3.11 Detekční jednotka GuardSense

Klíčovým senzorem pro tuto práci byl senzor FFT spektrum. Senzor tohoto typu slouží k zobrazení frekvenčního spektra.

5.3.5 Ostatní komponenty

V závislosti na použitých optických vláknech reprezentujících ramena Michelsonova interferometru se do měřicí soustavy mohou nebo nemusí zahrnout polarizátory. Před optimalizací měřicího pracoviště byly polarizátory použity. Následně po zahrnutí polarizací udržujících vláken byla přítomnost polarizátorů bezpředmětná. Pro ilustraci jsou zobrazeny na Obr. 5.3.12.



Obr. 5.3.12 Optovláknový polarizátor

Každé rameno Michelsonova interferometru musí být zakončeno zrcátkem. Laboratoř doktora Luckiho je vybavena tzv. Farradayovými zrcátky. Zrcátka jsou teoreticky určena pro konkrétní vlnovou délku, v praxi jsou širokopásmová [31], a pokud jsou určena pro vlnovou délku 1550 nm, s největší pravděpodobností budou mít vysokou odrazivost také na vlnové délce 1300 nm, což bylo prověřeno měřením na OTDR reflektometru.

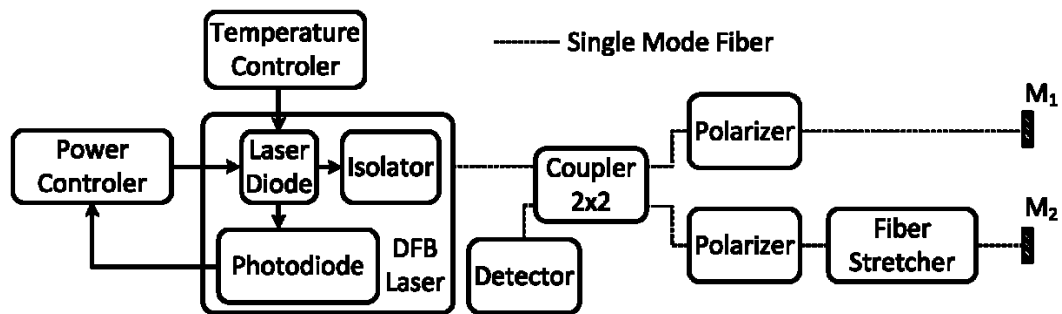


Obr. 5.3.13 Optovláknové dielektrické zrcátko

6. Realizovaná měření

6.1 Měření známé frekvence reproduktoru

Cílem měření známé frekvence bylo ověření přesnosti detekce frekvence kmitání membrány reproduktoru (frekvence nastavené na generátoru průběhů), které se přenáší na optické vlákno Sagnac smyčky nebo ramena Michelsonova interferometru.

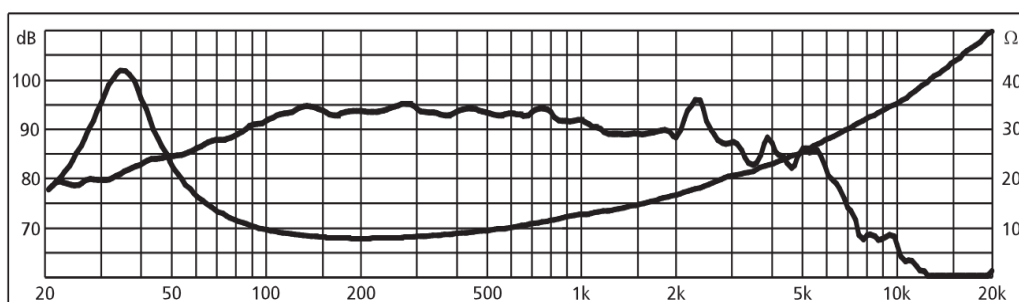


Obr. 6.1.1 Realizované zapojení Michelsonova interferometru pro měření známé frekvence reproduktoru

Měřicí rameno Michelsonova interferometru, zakončené Farradayovým zrcátkem, bylo přiloženo na pevnou vzdálenost od kraje reproduktoru. Vzdálenost byla 5 cm a měla by být pevná. V principu by však měl být detektor schopen měřit na různých vzdálenostech. Pro měření frekvence reproduktoru totiž není klíčový koeficient přenosu energie, který klesá se vzdáleností. Amplituda akustické vlny může být přijata s útlumem. Důležité ale je, aby nebyla různě tlumena.



Obr. 6.1.2 Měření známé frekvence reproduktoru – měřící pracoviště



Obr. 6.1.3 Charakteristika zisku a impedanční charakteristika použitého reproduktoru

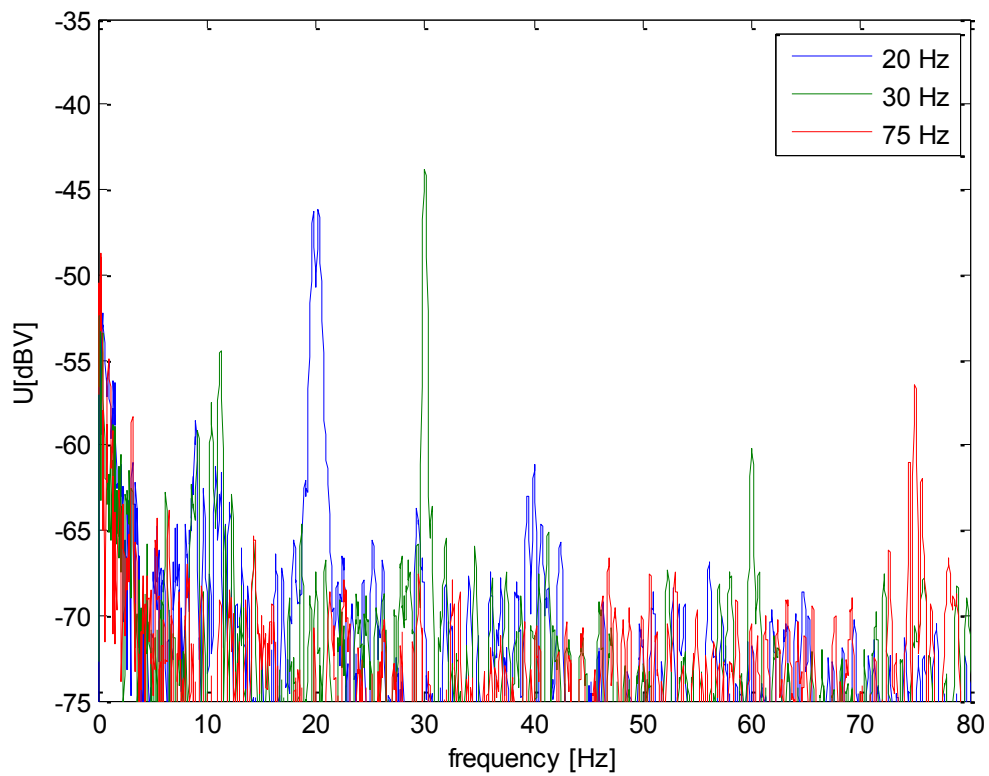
Charakteristika reproduktoru ukazuje rezonanci v oblasti nízkých frekvencí (33 Hz) a pracovní pásmo >20 Hz a <20 kHz, které pokrývá celé řečové pásmo v telefonní technice (300 Hz do 3400 Hz), proto jej lze považovat za dobrý model zdroje zvuku.

6.1.1 Naměřené výsledky

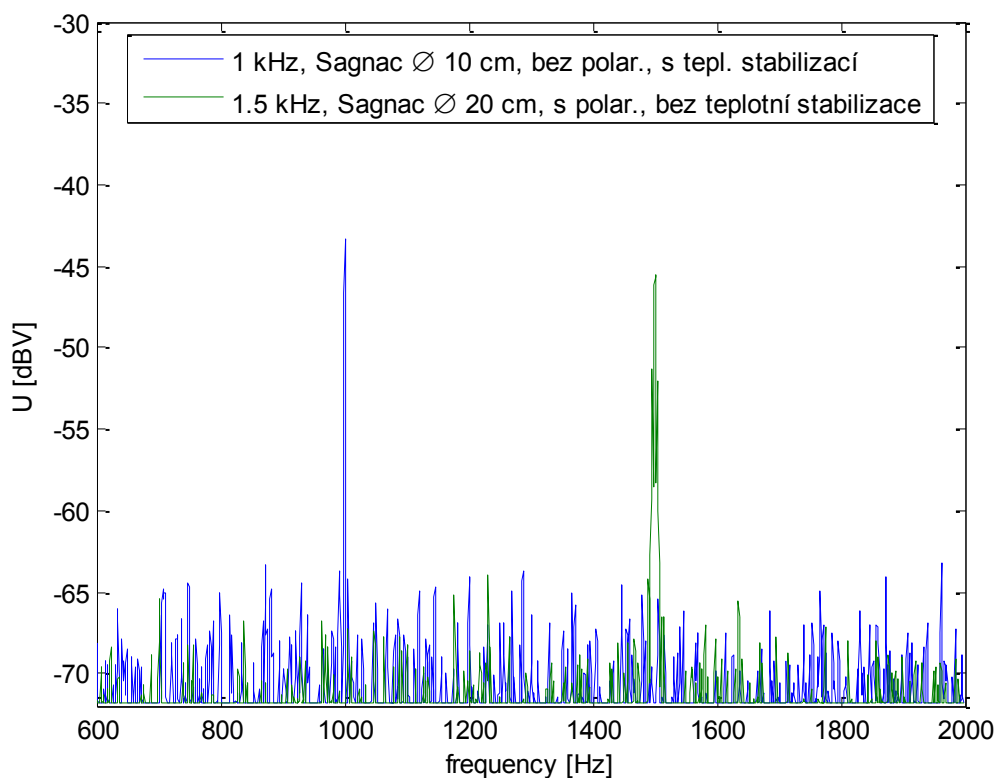
Počet proužků v interferogramu je úměrný výchylce membrány. Výchylka membrány způsobí příchod dalších proužků a periodické změny výkonu na fotodiodě. Amplituda detekované frekvence roste se zvyšujícím se počtem přicházejících proužků.

V našem případě je kontrast interferometru přijatelný a je v řádu několika μW (podobně jako absolutní hodnoty výkonu měřeného na výstupu, který je také v řádu několika μW). Větší kontrast lze dosáhnout laděním délky ramena piezostretcherem.

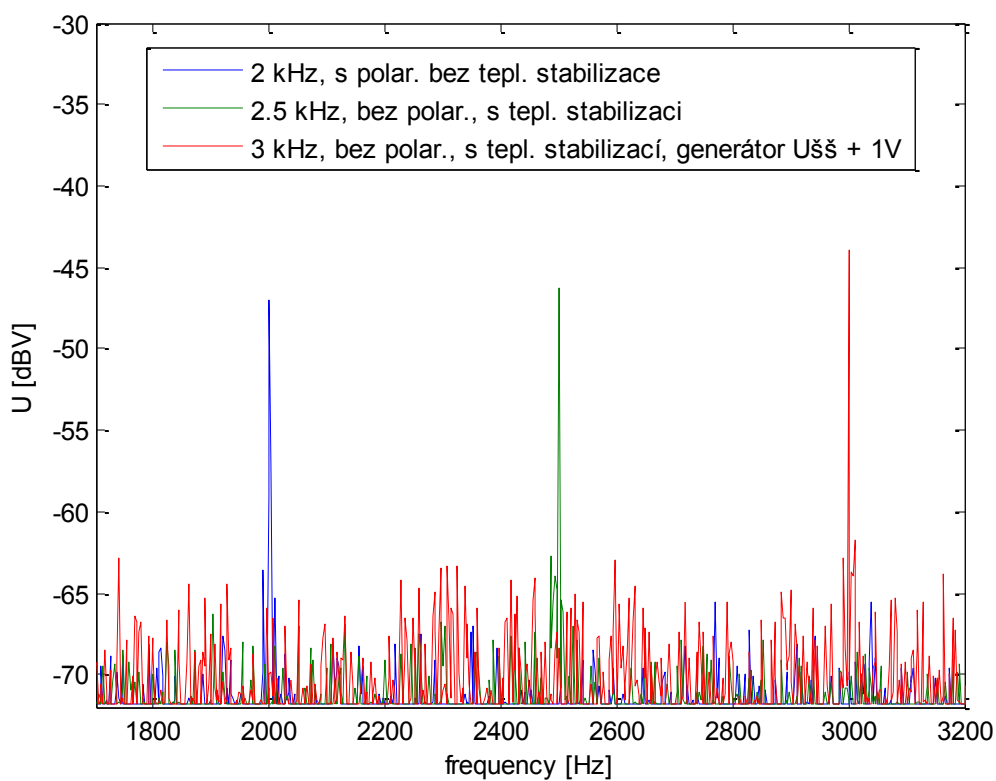
Signál přijatý na fotodiodě, následně zesílený v zesilovači za fotodiodou, byl zobrazen na osciloskopu Agilent [7].



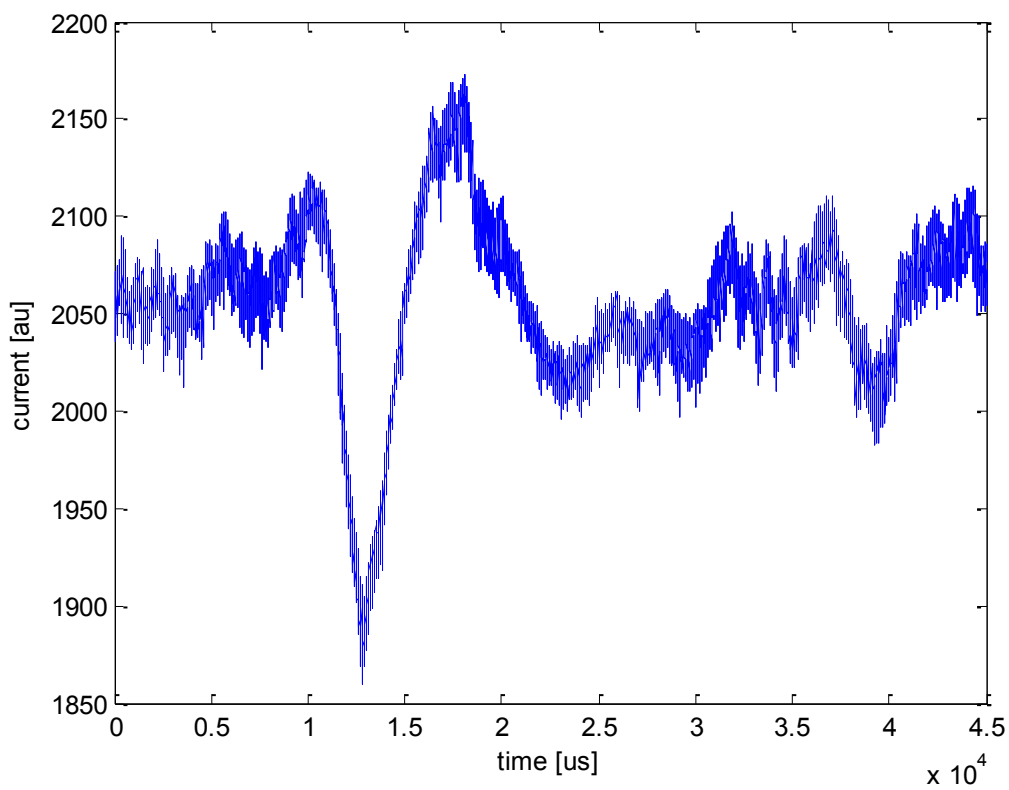
Obr. 6.1.4 Detekce známé frekvence - oblast nízkých frekvencí (zapojení Michelson)



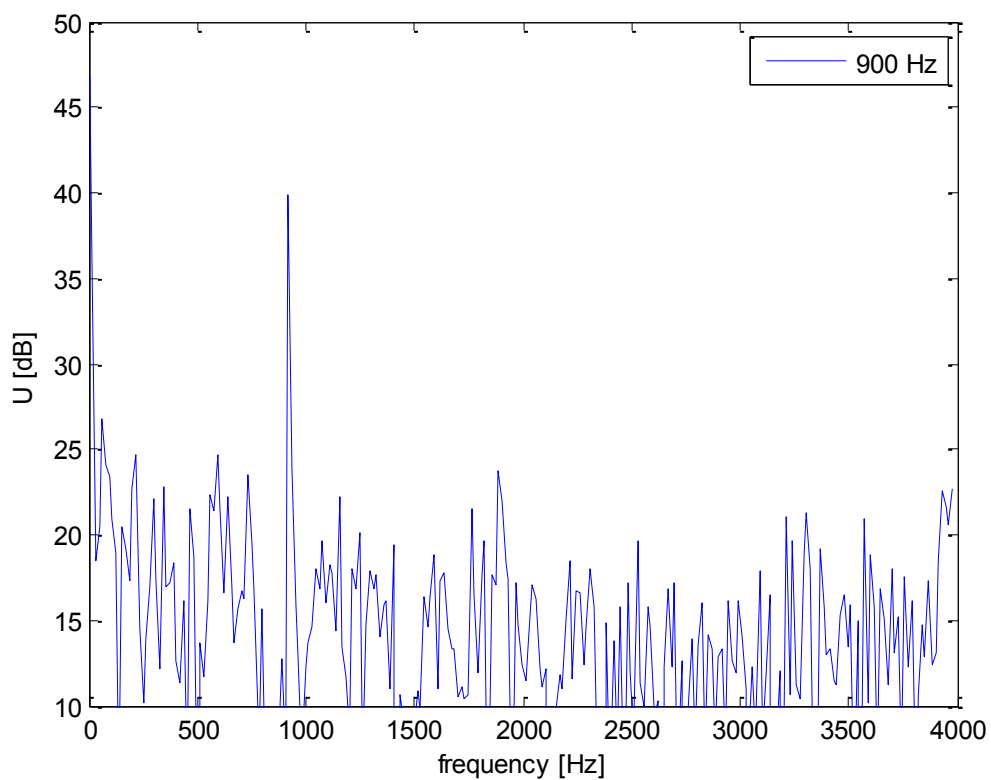
Obr. 6.1.5 Detekce známé frekvence - varianty Sagnacova interferometru



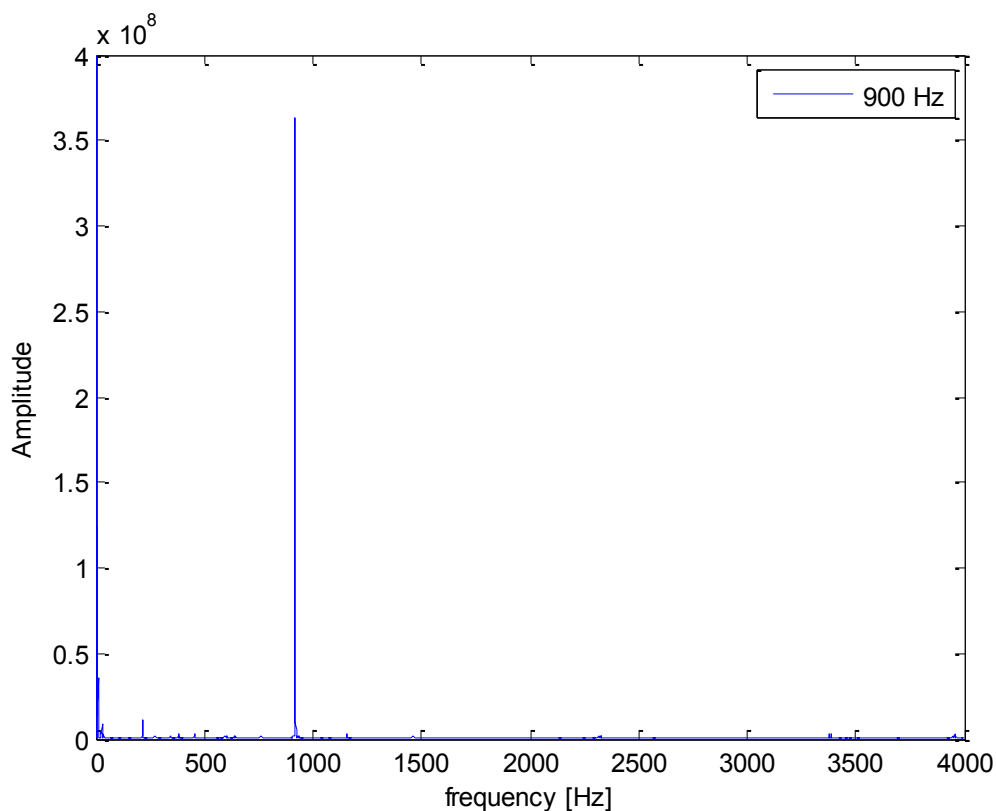
Obr. 6.1.6 Detekce známé frekvence – varianty Michelsonova interferometru



Obr. 6.1.7 Zaznamenaný signál na detekční jednotce - 900 Hz



Obr. 6.1.8 Spektrum nahrávky 900 Hz zpracované detekční jednotkou



Obr. 6.1.9 Spektrum nahrávky 900 Hz pro aplikaci algoritmu pro potlačení šumu v prostředí Matlab

Frekvenční změna znamená, že měřená amplituda je periodická, tím pádem bude daný počet nových proužků na fotodiodu přicházet a odcházet pravidelně [9].

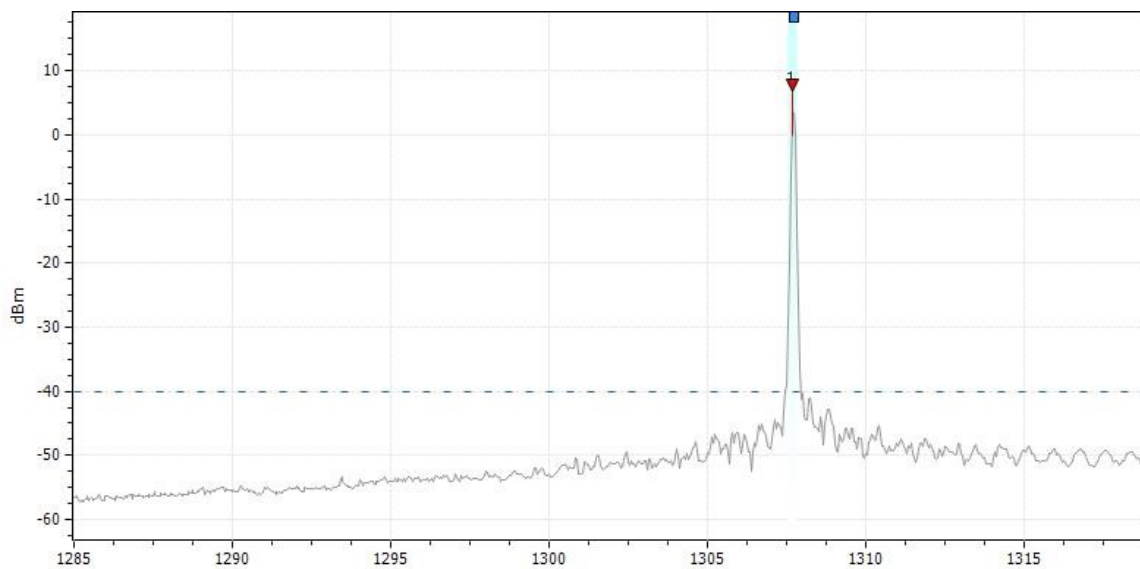
Výška spektrální čáry říká, „jak moc se změní výkon na fotodiodě“ a je úměrná počtu proužků. Z měření je patrné (Obr. 6.1.4), že interferometr je náchylný na rušení na nižších frekvencích, kde může generovat falešné popluchy. Nejvyšší měřená amplituda pro danou amplitudu budícího signálu generátoru je v okolí rezonance (33 Hz). Nárůst citlivosti (v našem případě schopnost detektoru odlišit měřenou frekvenci od šumu) lze pozorovat na vyšších frekvencích > 1 kHz, kde interferometr nejlépe pracuje v režimu optického mikrofonu. Pro toto měření byla také použita speciální detekční jednotka, viz Obr. 6.1.7 a Obr. 6.1.8. Na Obr. 6.1.7 je signál zaznamenaný fotodiodou v detekční jednotce při známé frekvenci 900 Hz. Na Obr. 6.1.8 a Obr. 6.1.9 jsou pak spektra této nahrávky, a to před a po aplikaci algoritmu pro potlačení šumu v prostředí Matlab.

6.1.2 Závěry z měření známé frekvence reproduktoru

Pro toto měření byl použit laboratorní přípravek s fotodiodou FGA 04 a osciloskop Tektronix namísto detekční jednotky. Ta sice dokáže zaznamenat časový vývoj spektra, ale pro zpracování tohoto měření stačil záznam v daném okamžiku, což osciloskop umožňoval. V tomto měření se kladl důraz na ověření schopnosti detekce známé frekvence, čili nebyla potřeba zpětná reprodukce. Veškerá data byla ukládána do .csv formátu, se kterým bylo možno následně pracovat v prostředí Matlab. Tímto měřením bylo ověřeno, že veškeré frekvenční změny lze pomyslně měřit pro různé konfigurace interferometru (různá délka Sagnac smyčky, různá délka ramena Michelsonova interferometru, různá intenzita zvuku (amplituda výchylky membrány), s teplotní stabilizací a s vynecháním teplotní stabilizace laseru, s kontrolou polarizace a s vynecháním polarizátorů, měřené v oblasti různých frekvencí a další), viz Obr. 6.1.4, Obr. 6.1.5 a Obr. 6.1.6. Senzor byl tedy schopen detekovat známou frekvenci za různých podmínek. Vždy bylo docíleno detekce harmonického signálu, průběhy se lišily ve velikosti šumu na pozadí, případně velikostí spektrální čáry odpovídající měřené frekvenci. Z Obr. 6.1.4 je vidět, že pro harmonické frekvence od 0 do 100 Hz je spektrální čára měřené frekvence sice rozlišitelná vůči šumu, ale v porovnání s Obr. 6.1.5 a Obr. 6.1.6 není její výška optimální. Přesnější měření lze provádět na frekvencích od 1 kHz, kde spektrální čára odpovídá přesně měřené frekvenci.

6.2 Vliv teplotní stabilizace na spektrum DFB laseru

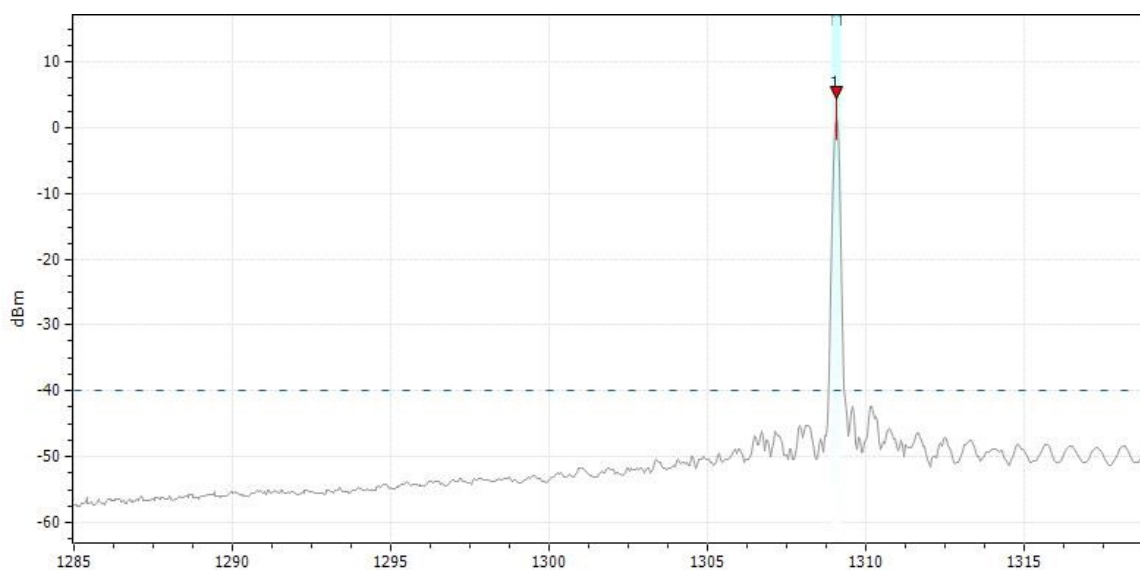
DFB lasery se vyznačují úzkým spektrem vlnových délek, ve kterém vyzařují. Pro měření ale bylo třeba u použitého DFB laseru ověřit, zda změny teploty na chipu laseru nějak zásadně ovlivní jeho vlastnosti (například přeladění pracovní vlnové délky). Přestože výrobce uvádí u námi použitého laseru pracovní vlnovou délku 1300 nm, ve skutečnosti to přesně 1300 nm není, ale je zde malá odchylka řádově v nm.



Obr. 6.2.1 Spektrum DFB laseru při teplotě 18°C

Teplota [°C]	Vlnová délka [nm]
18	1307,712
22	1308,718
26	1309,066
30	1310,023

Tab. 6.2.1 Závislost vlnové délky DFB laseru na teplotě



Obr. 6.2.2 Spektrum DFB laseru při teplotě 26°C

6.2.1 Závěry z měření vlivu teplotní stabilizace DFB laseru

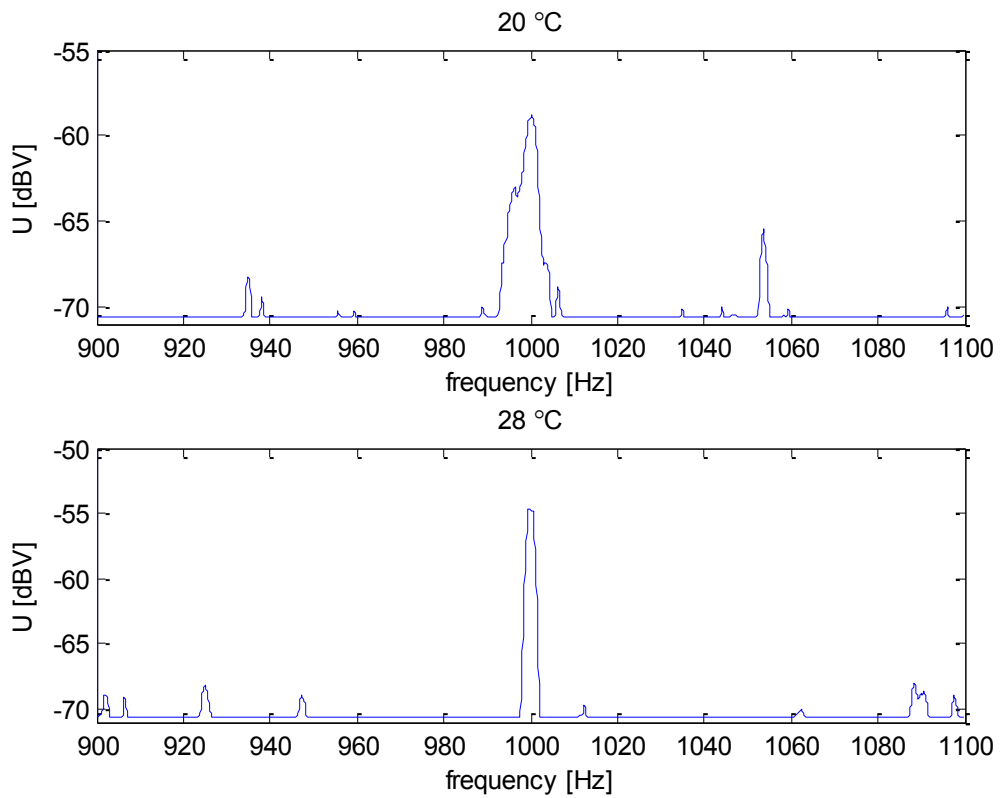
Z Obr. 6.2.1 a naměřených dat viz Tab. 6.2.1 lze pozorovat, že vlnová délka, na které laser pracuje při teplotě 18°C je 1307,712 nm. Oproti tomu při teplotě 30°C se pracovní vlnová délka posunula na 1310,023 nm.

Z výsledků tedy vyplývá, že se zvyšující se teplotou se pracovní vlnová délka laseru posunula o 3 nm směrem k delším vlnovým délkám. Žádný zásadní vliv tedy změny teplot na chipu laseru na jeho chování mít nebudou, vliv je zhodnocen v další kapitole. Laserový chip přesto musí být chlazen, aby nedošlo k jeho přehřátí a poruše.

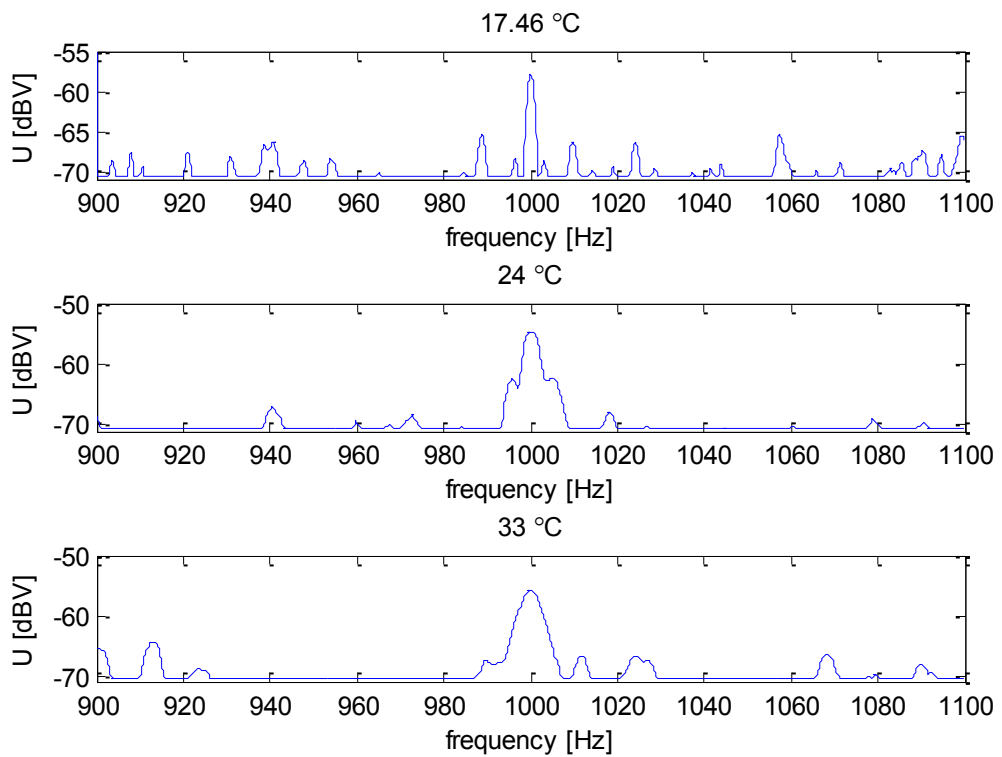
6.3 Teplotní stabilizace laseru a její vliv na interferometr

Teplota laseru ovlivňuje jeho vlnovou délku a mění se tím tedy i amplituda. Čím vyšší teplota, tím vyšší vliv bude mít spontánní emise laseru. Pokud tedy zvýšíme teplotu, tak se zmenší délka „Vg“ a vlnová délka bude delší. Pokud je minimální měřitelná amplituda rovna polovině vlnové délky (650 nm), teplotní přeladění o 3 nm vnáší odchylku asi o 1,5 nm pro amplitudy v řádu stovek nm. V praxi je tak zanedbatelné nejen u měření frekvence, ale také u měření amplitudy.

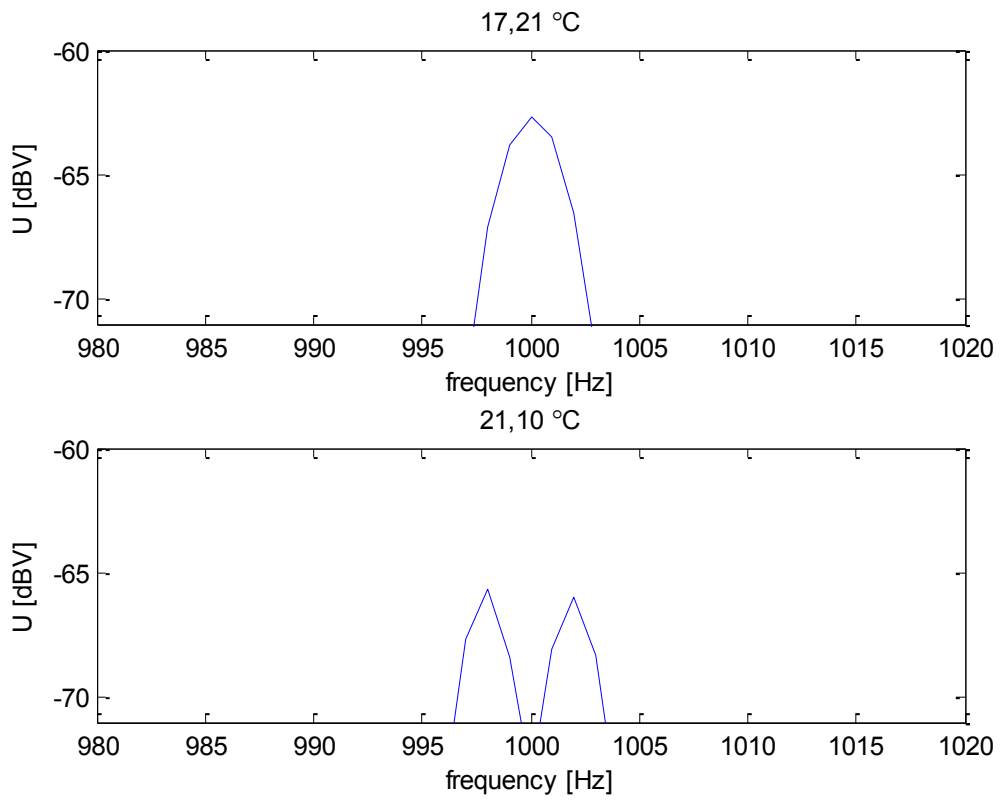
Teplotní stabilizace proto není nutná. Může být nutná pro zajištění správné pracovní teploty laseru a prodloužení životnosti laserového čipu, pokud nepracuje v laboratorních podmínkách.



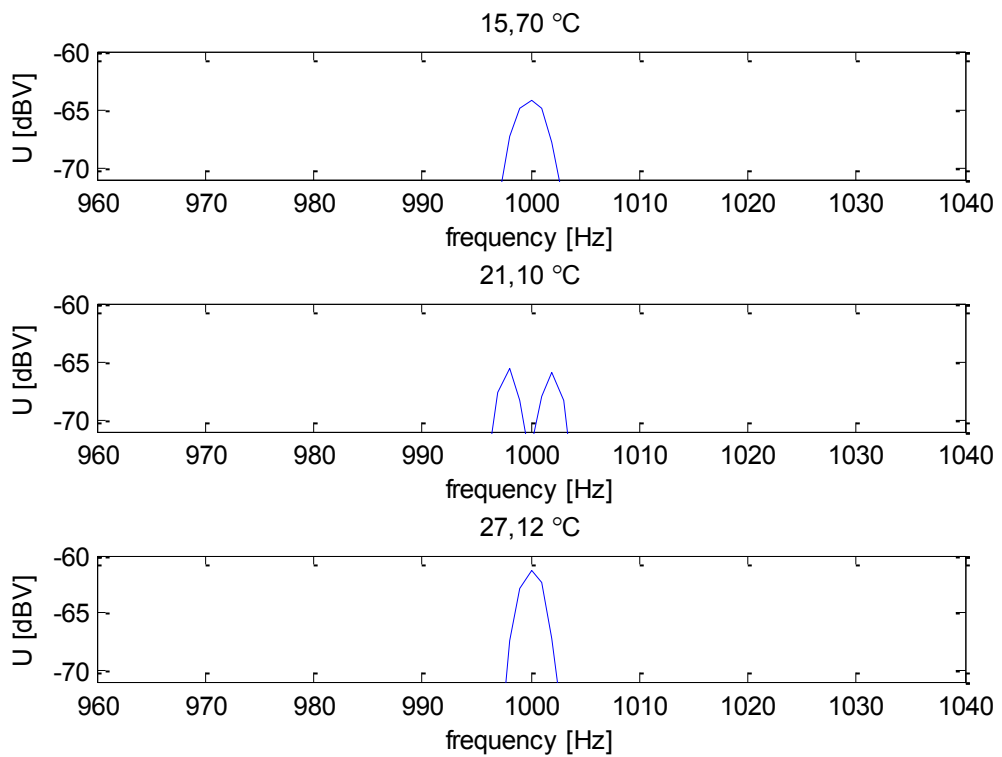
Obr. 6.3.1 FFT spektrum interferogramu pro různou pracovní teplotu laseru – Michelson 1/2



Obr. 6.3.2 FFT spektrum interferogramu pro různou pracovní teplotu laseru – Michelson 2/2



Obr. 6.3.3 FFT spektrum interferogramu pro různou pracovní teplotu laseru – Sagnac 1/2



Obr. 6.3.4 FFT spektrum interferogramu pro různou pracovní teplotu – Sagnac 2/2

6.3.1 Závěry z měření teplotní stabilizace laseru

Co způsobí změna pracovní teploty? V první řadě přeladí laser o několik nanometrů. Jiná vlnová délka znamená jiný počet period vlny pro danou optickou dráhu a příchod jiného počtu interferenčních proužků do interferogramu. Počet proužků odpovídá amplitudě vibrací (výchylce membrány), která je tím pádem měřená s jistou nepřesností. Jeden proužek odpovídá polovině vlnové délky, v našem případě 650 nm. Interferometr tedy teoreticky pozná výchylku membrány o 650 nm. Přeladění o 3 nm, typické u DFB laserů bez teplotní stabilizace, způsobí nepřesnost o 1,5 nm. Jelikož v praxi měřené výchylky jsou spíše stovky mikrometrů až milimetry a rušení okolního prostředí jsou mnohem větší výchylky než 1,5 nm, vliv teploty je zanedbatelný.

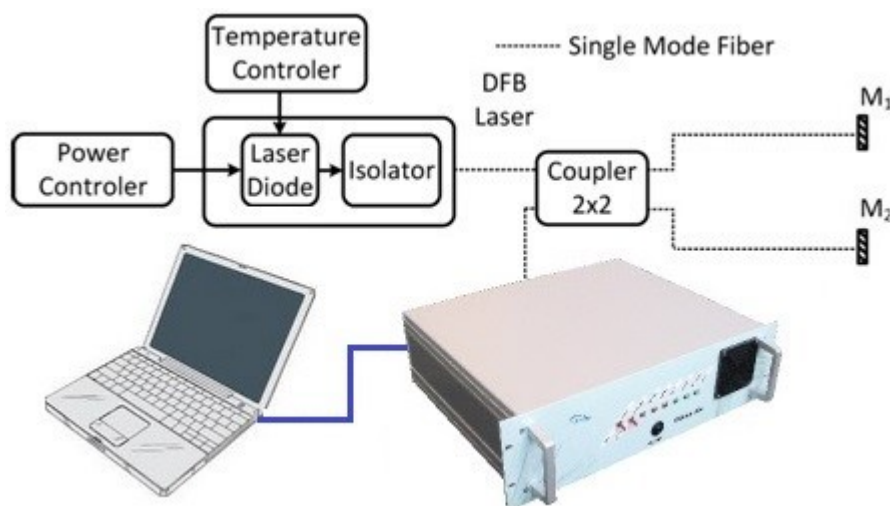
Měření známé frekvence reproduktoru provedená pro různou pracovní teplotu laserového čipu ukazují, že vliv teploty na měření frekvence, tedy na práci optického mikrofonu, jsou marginální. Je sice patrné, že na Obr. 6.3.2 (17,46 °C) je mimo měřenou frekvenci 1 kHz i mnoho dalších FFT maxim na jiných frekvencích. Ty měly ale čistě náhodný charakter ve všech měřeních, tudíž jejich přítomnost v daném měření byla náhodná. Změny výšky FFT maxim na měřené frekvenci 1 kHz jsou pravděpodobně způsobeny především mechanickou nestabilitou interferometru, která se ukázala i pro ostatní měření jako klíčová. Teplotní stabilizace tedy není nutná, dokud fluktuační výkonu na fotodiodě jsou menší, než je kontrast interferometru.

6.4 Interferometr jako optický mikrofon

Vzhledem k tomu, že obě konstrukce interferometrů (Michelsonův, Sagnacův) projevily dobrou funkčnost při měření známé harmonické frekvence s teplotní stabilizací a také bez teplotní stabilizace, zkusil jsem proto, bez pozměnění komponent, aplikovat na rameno Michelsonova interferometru/smyčku Sagnacova interferometru řečový signál (promluvu).

Pro analýzu kvality reprodukce zvuku existují referenční nahrávky, programy pro zpracování (Praat, Wave Studio). Publikovatelná analýza výsledků vyžaduje detailnější nastudování zvukové techniky. V závislosti na tom, že hlavním cílem byla výzkum možnosti laboratorní realizace optovláknového interferometru jako optického mikrofonu, zvolil jsem prvně cestu subjektivního vyhodnocování vlastních nahrávek (mluvené slovo) a zpracování v prostředí Matlab.

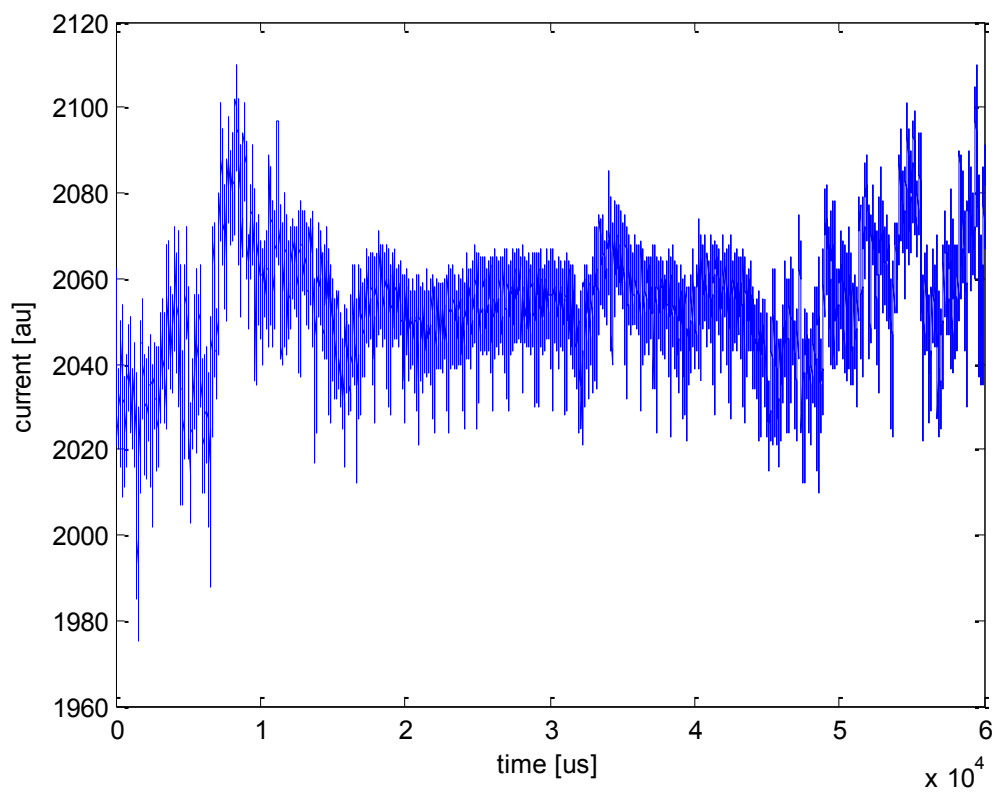
Nejpodstatnější rozdíl mezi měření známé frekvence reproduktoru a záznamem řečového signálu spočívá v tom, že u měření známé frekvence je měřena jedna frekvence v daném okamžiku a je známá. U promluv se zaznamenává multifrekvenční spektrum, které je nutno ukládat jako funkce času. Časový vývoj signálu na fotodiodě je nezbytný pro subjektivní vyhodnocení reprodukce projevu. Z toho důvodu byla využita jednotka GuardSense právě s možností takovýto záznam uložit v přijatelném formátu.



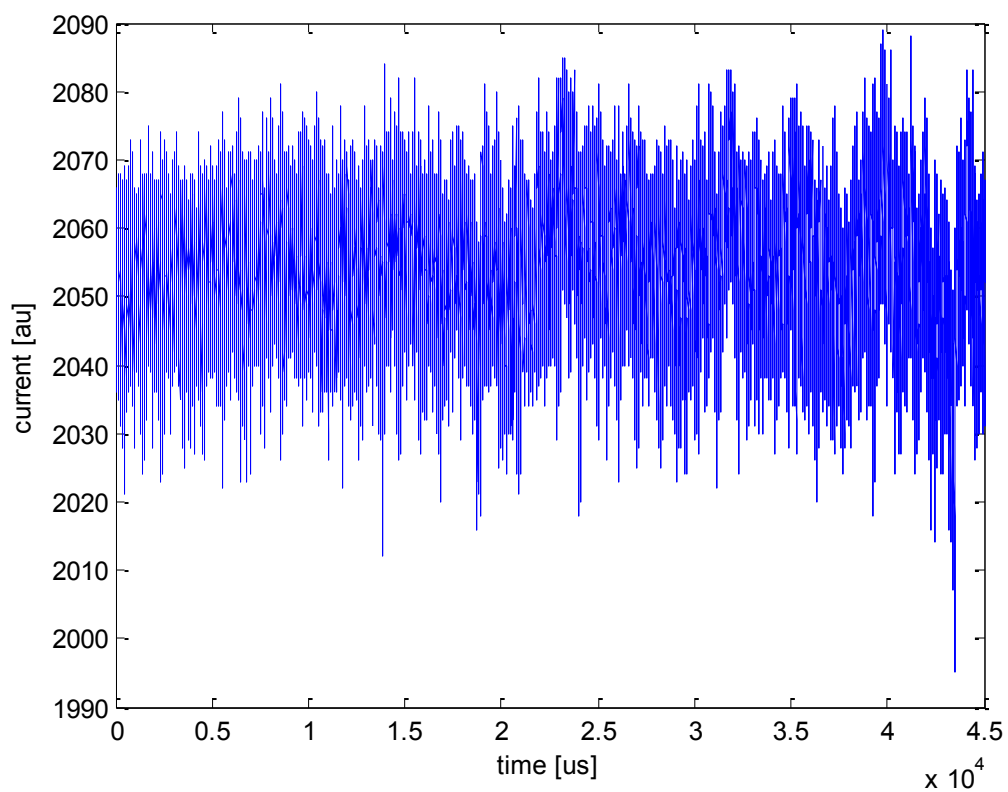
Obr. 6.4.1 Realizované pracoviště pro měření na optickém mikrofonu

Byla provedena měření hlasových nahrávek, reprodukce a subjektivní vyhodnocení kvality nahrávek pro různé varianty uspořádání Sagnac a Michelson interferometrů.

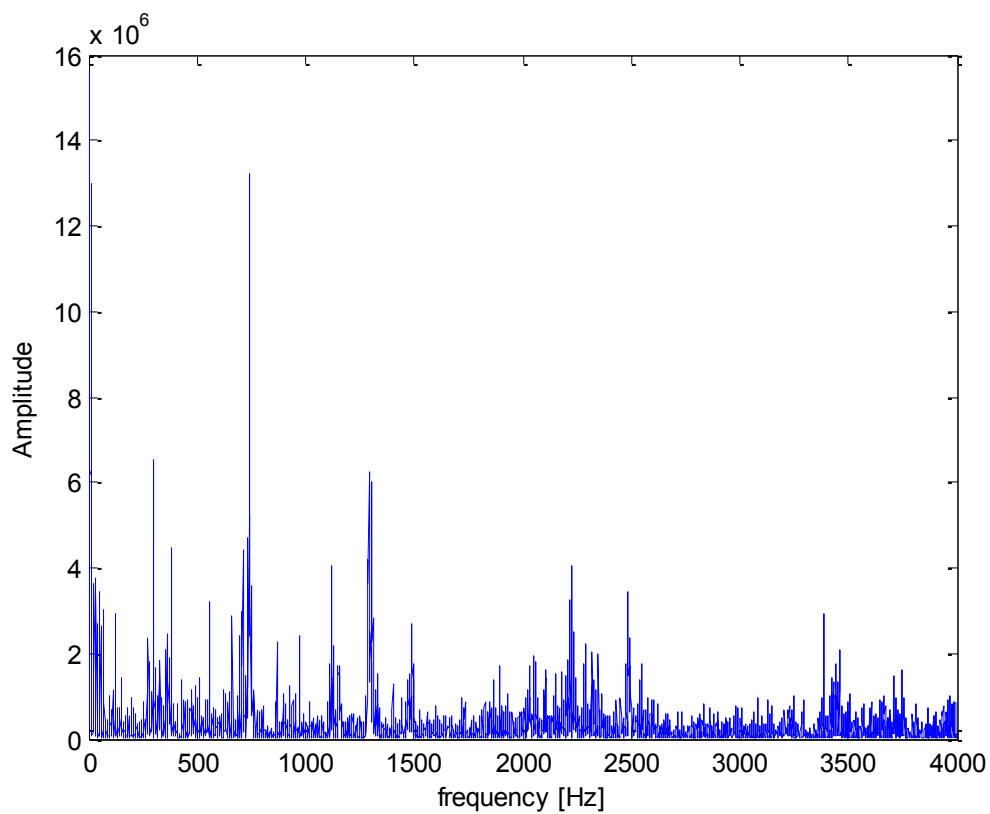
První měření bylo provedeno, jak je zmíněno výše, se zapojením interferometru typu Michelson. Délka promluvy byla zhruba 10 vteřin.



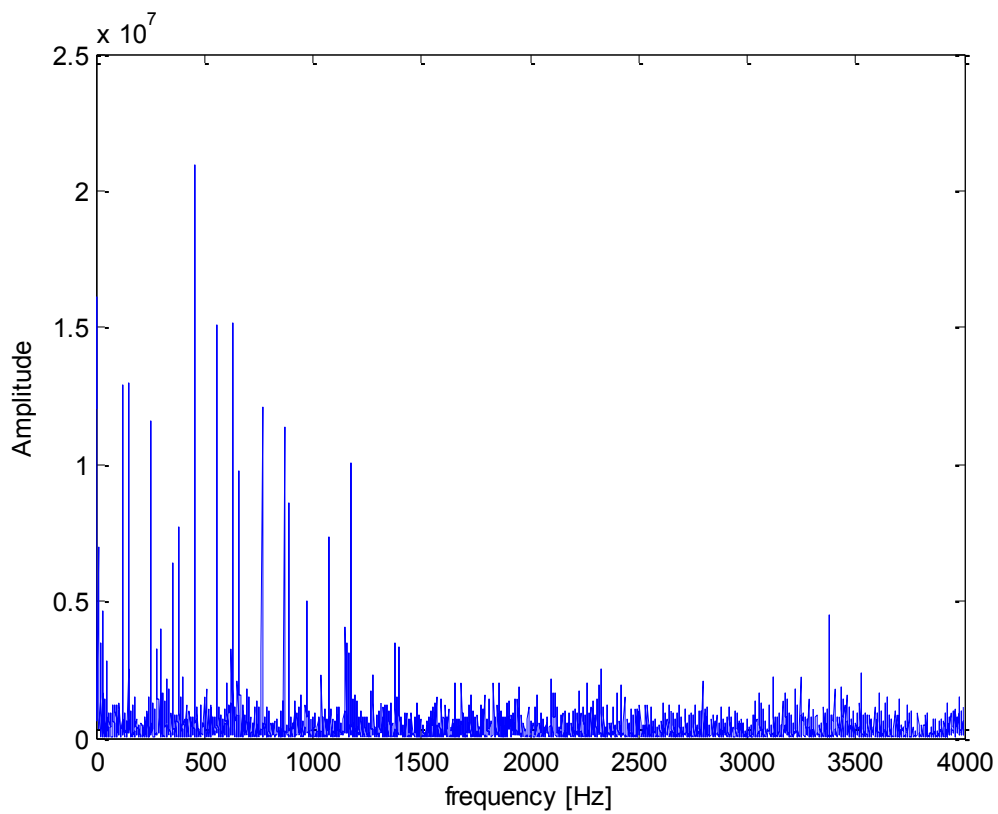
Obr. 6.4.2 Zaznamenaná promluva na detekční jednotce- zapojení Michelson



Obr. 6.4.3 Zaznamenaná promluva na detekční jednotce - zapojení Sagnac



Obr. 6.4.4 Spektrum zaznamenané promluvy na detekční jednotce pro zapojení Michelson



Obr. 6.4.5 Spektrum zaznamenané promluvy na detekční jednotce pro zapojení Sagnac

6.4.1 Závěry z měření na optickém mikrofonu

Jak již bylo zmíněno, během měření jsem zkoušel modifikovat a upravovat interferometr za účelem dosažení co nejpřesnějšího záznamu promluvy. Důraz byl kladen především na mechanickou stabilitu celé soustavy, odizolování optické lavice od měřících přístrojů apod. Neméně důležitá byla také čistota všech konektorů spojujících optická vlákna popřípadě použité patchcordy. Proto při každém přestavění/modifikaci měřicí soustavy a s tím spojenému rozpojování konektorů, se tyto konektory musely vyčistit.

Problémem při měření na optickém mikrofonu je, že pokud byl interferometr „rozladěn“, to znamená, že na fotodiodě nebyl dostatečný kontrast proužků, zvukový záznam byl velice zašuměn. Co se týče šumu, který je např. na Obr. 6.4.2 patrný, potýkal jsem se s problémem zjištění původu tohoto zdroje šumu. Na Obr. 6.4.4 je onen neznámý šum patrný na frekvencích blízkých nule. Šum na těchto nízkých frekvencích se dle zvukové reprodukce jevil jako periodický a výrazně svou hlasitostí převyšoval zaznamenanou promluvu. V praxi může být tento šum mnohem hůře interpretovatelný z důvodu parazitních interferencí a například rušením mechanickými vibracemi optické lavice, které se může vyznačovat většími amplitudami než ty měřené na objektu.

Vzhledem k tomu, že se laboratoř doktora Luckiho nachází v bezprostřední blízkosti výtahu, nabídla se zde otázka, zda parazitní periodické frekvence, které se objevily ve zvukovém záznamu, nějak s tímto výtahem nesouvisí, a zda v tomto případě lze použít interferometr pro detekci pohybu výtahu.

Laboratoř je umístěna v 7. patře bloku B3, budovy FEL, přímo vedle výtahové šachty. Jedná se o poslední patro, kam výtah jezdí, v 8. patře se nachází strojovna výtahu. Zvuk vycházející směrem od výtahu je nápadně podobný zvuku, který byl zachycen optickým mikrofonem a následně reprodukován. Nejedná se ale jen o zvuk, ale samozřejmě i o vibrace vycházející směrem od výtahu. Pokud bychom přijatý signál vhodně filtrovali, bylo by možné detekovat pouze frekvence znamenající pohyb výtahu.

Dle [37] a [39] jsou dnes známé realizace optovláknových interferometrů jako senzorů za účelem perimetrické ochrany objektů, detektorů nášlapu a chůze v budovách apod. Interferometrický senzor, kterým vlastně sestavený optický mikrofon je, se chová jako senzor mikrovibrací. V našem případě vibrace vytvořené motorem výtahu se přenesly přes podlahu na optickou lavici i na smyčku Sagnac interferometru/rameno Michelson interferometru. Pokud porovnáme vibrace způsobené akustickou vlnou vycházející z úst mluvčího na optický mikrofon a vibrace přenesené na optický stůl z blízkého výtahu,

dojdeme k závěru, že druhý typ vibrací svou úrovní výrazně převyšuje vlny akustické.

Nízkofrekvenční vibrace na Obr. 6.4.4 a periodický „hluk“ v pořízeném zvukovém záznamu dle mého názoru odpovídají výtahu, který byl v době záznamu v provozu. Prokázalo se tak, že senzor je velmi citlivý. Aniž by to bylo prvotním účelem měření, optovláknový interferometr dokázal zaznamenat nejen akustické vlny (nahlas čtený text), ale i vibrace v blízkém okolí měřicího pracoviště. Lze tedy konstatovat, že by byl optovláknový interferometr, zapojený jako optický mikrofon, vhodný jako senzor/detektor přítomnosti osob například na patře.

6.5 Optimalizace optického mikrofonu

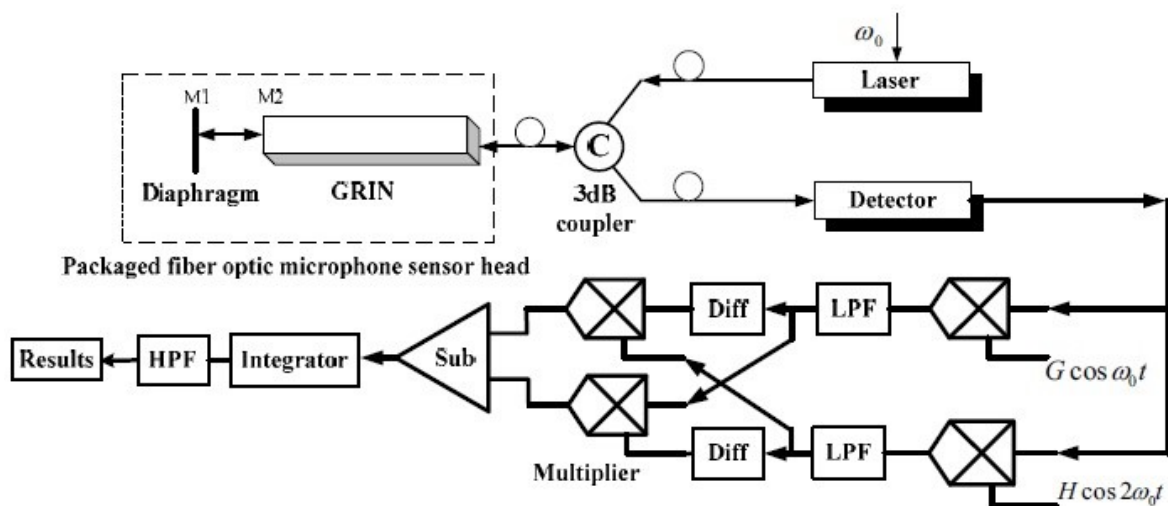
6.5.1 Optický mikrofon na bázi Fizeau interferometru

Vývoj senzorové techniky každým rokem přináší preciznější, přesnější a výkonnější zařízení. V posledních letech je trendem v této oblasti vývoj tzv. MEMS mikrosenzorů (Micro Electro Mechanical System). Využití senzorů na bázi MEMS lze pozorovat v celé škále odvětví, jako je strojírenství, telekomunikace, medicína a jiné [40]. Senzor tohoto typu lze také aplikovat pro realizaci optického mikrofonu na bázi interferometru [35].

Optický mikrofon na bázi modulace fáze se skládá z mikro-silikonové membrány (MEMS senzor) pro detekci změn akustického tlaku, optovláknového systému (interferometr) a demodulátoru. Schéma takového systému je znázorněno na Obr. 6.5.1.

Hlavu senzoru tvoří Fizeau interferometr s přímou vazbou, principiálně popsany v [42] a [43], GRIN (Gradient Index) čočka a mikro-silikonová membrána. Za detektorem dochází k demodulaci přijatého signálu a k aplikaci pokročilých algoritmů.

Tento senzor byl, viz [35] testován nejprve na detekci harmonické frekvence, kde překvapivě dosahoval podobných výsledků, jako tomu je v této práci viz kap. 6.1. Senzor dokáže zaznamenat harmonickou frekvenci na 2 kHz. Díky aplikaci zpracování signálu lze ovšem pozorovat odstranění šumu pro usnadnění reprodukce.



Obr. 6.5.1 Struktura systému na bázi Fizeau interferometru [35]

V porovnání s měřením viz kap. 6.4 je způsob detekce změn akustického tlaku (hlava senzoru) rozdílný. Pokud pomineme využití MEMS mikro-silikonové membrány a GRIN čočky, jako poměrně snadná optimalizace se nabízí přidělat měřící rameno interferometru (Michelson), případně smyčku Sagnac interferometru na membránu vytvořenou např. solární fólií. To by vedlo k výraznému zefektivnění přenosu akustických vln na senzor [41] [44]. Zároveň by se tím eliminoval kontakt smyčky/ramena interferometru s optickou lavicí, která v našem případě nebyla dokonale odizolována od vnějších rušivých elementů. Další možností by bylo zapojit interferometr jako Mach-Zehnder interferometr [22] [41].

7. Závěr

Práce byla zaměřena pouze na dva typy optovláknových interferometrů, a to na typy Michelson a Sagnac. U těchto dvou typů interferometrů bylo zkoumáno, jak změny především jejich fyzických parametrů ovlivní měření, které byly realizovány.

Po úvodních měřeních, kde byla funkčnost interferometru ověřena (nejprve jako detektor harmonické frekvence), byly postupně aplikovány změny jeho parametrů. Jako velmi podstatnou změnu lze uvést odstranění polarizátorů, které se vzhledem k použití polarizaci udržujících vláken jeví jako nepodstatné a zaváděly pouze útlum (tímto se z interferometru odstranily 4 konektory). Prakticky žádné měření se také neobešlo bez kompletního rozmontování a opětovného sestavení interferometru a vyčištění všech konektorů, spojek. Jejich čistota se jeví jako klíčová pro kvalitu detekce signálu na fotodiodě.

Při úvodních měřeních byl Michelsonův (i Sagnacův) interferometr zkoumán, jak již bylo zmíněno, jako detektor harmonické frekvence. Rozsahy frekvencí bylo díky multifunkčnímu generátoru možné volit v celém rozsahu lidským uchem slyšených frekvencí (závislé na věku). Nejlepších výsledků bylo dosaženo mezi 1 a 3 kHz, kde úroveň výkonu detekované frekvence byla zhruba o 20 dB vyšší oproti šumu na pozadí. Směrem k nižším frekvencím takových hodnot dosaženo nebylo, SRN v těchto místech bylo okolo 7 dB, avšak na osciloskopu, který byl pro analýzu použit, bylo i tak možné subjektivně rozpoznat detekované frekvence. Post-zpracování dat bylo provedeno, a to pro všechna měření, v programu Matlab.

Dalším zkoumaným jevem byl vliv teplotní stabilizace na celý interferometrický systém. Nejprve byla prověřena teplotní závislosti laseru a to, zda laser s teplotou mění a hlavně o kolik, vyzařované spektrum vlnových délek. Data byla analyzována spektrometrem od společnosti EXFO, který byl pro toto měření plně dostačující. Pomocí programu od stejné společnosti bylo možné zpětně analyzovat a vyhodnotit grafy a zavést je do této práce. Prokázalo se, že laser se s teplotou přeladí maximálně o 3 nm. Na funkci interferometru jako detektoru harmonických frekvencí to nemělo kritický vliv. To stejné se dá říci o teplotní závislosti interferometru, kde dle Obr. 6.3.1 - Obr. 6.3.4 nedocházelo ve spektru k žádným zásadním změnám.

Velký vliv na měření ovšem měla mechanická stabilizace celé soustavy a její oddělení od vnějších rušivých elementů. Ukázalo se, že interferometr je extrémně náchylný

na jakékoliv mikrovibrace, jako jsou například větráky použitých přístrojů, kroky po místnosti, apod. Vzhledem k omezenému prostoru a absenci optického stolu byla soustava odizolována jen částečně. Optická lavice byla proto umístěna na pneumatickém odpružení za účelem omezení přenosu vibrací. Veškeré konektory byly položeny na molitanových plátcích, apod. I tato optimalizace vedla k rapidnímu zlepšení funkčnosti interferometru.

Jako hlavní a poslední měření pak bylo měření na optovláknovém senzoru, kde bylo zkoumáno jeho využití jako optického mikrofону. Myšlenka mikrofónu složeného pouze z optického vlákna zakončeného buď zrcátkem, nebo MEMS mikro membránou byla velmi zajímavá. Nejprve byla vyzkoušena aplikace stejného zapojení interferometru jako při předešlých měřeních harmonické frekvence. Aplikována byla různě dlouhá ramena Michelsonova interferometru, různé délky smyčky Sagnacova interferometru (i různé průměry smyčky). Ukázalo se, že nejkvalitnější záznam byl pořízen interferometrem v zapojení Sagnac. Reprodukovaná promluva byla v tomto případě nejlépe srozumitelná, i když silně zašuměná. Příčinu tohoto dominantního šumu lze přičíst, motoru resp. strojovně výtahu, která je hned vedle přes zeď kanceláře/laboratoře, kde měření probíhala. Z šachty výtahu, byť nemusí být slyšet, vychází vibrace a zvuky, které dle mého názoru přenesly na interferometr. Proto by se interferometr dal například použít jako detektor/senzor pohybu v budově. Výtah, aniž by byl slyšet vytvořil při svém chodu vibrace, které byl interferometrický senzor schopen detekovat.

Pro lepší reprodukci výsledné promluvy by pak stačilo nahrát pouze záznam „ticha“, resp. pouze těchto parazitních vibrací a s výslednou promluvou jej porovnat a „odečíst“. Zde se dostáváme do bodu post-zpracování přijatého signálu na detektoru. Post-zpracování se ukazuje jako směr, kam by se výzkum optovláknových senzorů (v tomto případě mikrofónů) měl ubírat do budoucna. Pouze reprodukovat zaznamenanou promluvu detekční jednotkou není bez použití správně navržených filtrů (dolní propusti, pásmové propusti) a dalších metod signal processingu (např. NMLS, Noise shaping a jiných metod) optimální. Tyto operace by vedly ke zjevné optimalizaci optického mikrofónu pro záznam lidské promluvy. Jako další optimalizace se nabízí upravení „hlavy“ senzoru. V našem případě tvořilo „hlavu“ senzoru pouze vlákno (zakončené zrcátkem, smyčka). Pokud by bylo vlákno upevněné k membráně (například solární fólie), došlo by k lepšímu přenosu změn akustického tlaku na vlákno.

Seznam obrázků

Obr. 2.1.1 Znáznornění konstruktivní interference dvou vln bez fázového rozdílu [Vlastní tvorba].....	4
Obr. 2.1.2 Znáznornění konstruktivní interference dvou vln s fázovým rozdílem $\pi/2$ [Vlastní tvorba].....	4
Obr. 2.1.3 Destruktivní interference dvou vln [Vlastní tvorba].....	5
Obr. 3.1.1 Michelsonův interferometr [Vlastní tvorba].....	9
Obr. 3.2.1 Sagnacův interferometr [Vlastní tvorba].....	13
Obr. 5.3.1 Základní pohled na měřicí pracoviště.....	17
Obr. 5.3.2 Komponenty na optické lavici.....	18
Obr. 5.3.3 Přístrojové vybavení laboratoře.....	19
Obr. 5.3.4 DFB laser umístěný ve speciálním držáku.....	20
Obr. 5.3.5 Kontrolér proudu laserové diody.....	20
Obr. 5.3.6 Teplotní kontrolér.....	21
Obr. 5.3.7 50/50 Vazební člen.....	21
Obr. 5.3.8 Fotodioda Thorlabs FGA04.....	22
Obr. 5.3.9 Pracovní oblast použité fotodiody.....	22
Obr. 5.3.10 Zesilovač k fotodiodě.....	22
Obr. 5.3.11 Detekční jednotka GuardSense.....	23
Obr. 5.3.12 Optovláknový polarizátor.....	24
Obr. 5.3.13 Optovláknové dielektrické zrcátko.....	24
Obr. 6.1.1 Realizované zapojení Michelsonova interferometru pro měření známé frekvence reproduktoru.....	25
Obr. 6.1.2 Měření známé frekvence reproduktoru – měřicí pracoviště.....	26
Obr. 6.1.3 Charakteristika zisku a impedanční charakteristika použitého reproduktoru.....	26

Obr. 6.1.4 Detekce známé frekvence - oblast nízkých frekvencí (zapojení Michelson)	27
Obr. 6.1.5 Detekce známé frekvence - varianty Sagnacova interferometru	28
Obr. 6.1.6 Detekce známé frekvence – varianty Michelsonova interferometru	28
Obr. 6.1.7 Zaznamenaný signál na detekční jednotce - 900 Hz	29
Obr. 6.1.8 Spektrum nahrávky 900 Hz zpracované detekční jednotkou	29
Obr. 6.1.9 Spektrum nahrávky 900 Hz pro aplikaci algoritmu pro potlačení šumu v prostředí Matlab	30
Obr. 6.2.1 Spektrum DFB laseru při teplotě 18°C	32
Obr. 6.2.2 Spektrum DFB laseru při teplotě 26°C	32
Obr. 6.3.1 FFT spektrum interferogramu pro různou pracovní teplotu laseru – Michelson 1/2	34
Obr. 6.3.2 FFT spektrum interferogramu pro různou pracovní teplotu laseru – Michelson 2/2	34
Obr. 6.3.3 FFT spektrum interferogramu pro různou pracovní teplotu laseru – Sagnac 1/2	35
Obr. 6.3.4 FFT spektrum interferogramu pro různou pracovní teplotu –Sagnac 2/2	35
Obr. 6.4.1 Realizované pracoviště pro měření na optickém mikrofonu	37
Obr. 6.4.2 Zaznamenaná promluva na detekční jednotce- zapojení Michelson	38
Obr. 6.4.3 Zaznamenaná promluva na detekční jednotce - zapojení Sagnac	38
Obr. 6.4.4 Spektrum zaznamenané promluvy na detekční jednotce pro zapojení Michelson.....	39
Obr. 6.4.5 Spektrum zaznamenané promluvy na detekční jednotce pro zapojení Sagnac ..	39
Obr. 6.5.1 Struktura systému na bázi Fizeau interferometru [35]	42

Seznam tabulek

Tab. 2.3.1 Koherenční parametry vybraných světelných zdrojů [8]	7
Tab. 6.2.1 Závislost vlnové délky DFB laseru na teplotě.....	32

Seznam použitých zkratek

APC	<i>Angle Polished Connector</i>
BS	<i>Beam Splitter</i>
DFB	<i>Distributed Feedback Laser</i>
FC/PC	<i>Fiber Connector/Physical Contact</i>
FFT	<i>Fast Fourier Transform</i>
FWHM	<i>Full Width at Half Maximum</i>
GRIN	<i>Gradient Index</i>
InGaAs	<i>Indium Gallium Arsenide</i>
LED	<i>Light Emitting Diode</i>
M	<i>Mirror</i>
MEMS	<i>Micro Electro Mechanical System</i>
MS	<i>Microsoft</i>
OPD	<i>Optical Path Difference</i>
OPL	<i>Optical Path Length</i>
USB	<i>Universal Serial Bus</i>

Použitá literatura

- [1] HARIHARAN, P.: Basics of Interferometry. 2nd ed. Boston: Elsevier Academic Press, c2007, xxi, 226 p. ISBN 978-012-3735-898.
- [2] ARNDT, Marcus a Anton ZEILINGER. UNIVERSITY OF VIENNA, Austria: Hledáme hranice kvantového světa I. Praha: AGA & Štefánikova hvězdárna v Praze, 2009.
- [3] SALEH, Baaha E. Základy fotoniky: Svazek 3. 1. vyd. Praha: MATFYZPRESS, 1995. 336 s. ISBN 80-858-6305-7.
- [4] VANDERGRIFF, Linda J. Nature and Properties of Light. FUNDAMENTALS OF PHOTONICS. s. 38.
- [5] SALEH, Baaha E. Základy fotoniky: Svazek 1. 1. vyd. Praha: MATFYZPRESS, 1994. 257 s. ISBN 80-85863-01-4.
- [6] SALEH, Baaha E. Základy fotoniky: Svazek 2. 1. vyd. Praha: MATFYZPRESS, 1994. 238 s. ISBN 80-85863-02-2.
- [7] AGILENT TECHNOLOGIES, Inc. Agilent Infiniti Vision 2000 X-Series Oscilloscopes: Users Guide. Third edition. Malaysia, June 2011.
- [8] Fundamentals of Interferometry: Two-Beam Interference Equation. Interferometric Optical Testing. s. 10.
- [9] LUCKI, M.; BOHÁČ L.; ZELENÝ, R.: Fiber Optic and Free Space Michelson Interferometer - Principle and Practice. In Optical Sensors - New Developments and Practical Applications. Rijeka: In Tech, 2014, p. 1-22. ISBN 978-953-51-1233-4.
- [10] MEHRA, R.; Jitendra KUMAR TRIPATHI: All Optical Switching Operation in a Semiconductor Optical Amplifier based Mach-Zehnder Interferometer. International Journal of Computer Applications. s. 5.
- [11] SHIH-CHU HUANG, R.; Jitendra Kumar TRIPATHI: Automatic Polarization Compensation Tracking Method for Maximum Visibility of Fiber Interferometric Sensors. Journal of Light wave Technology. 2009, vol. 27, issue 18, s. 4040-4048. DOI: 10.1109/JLT.2009.2021778.
- [12] KAI CHENG, XIANGNIAN SHANG a XIAOLONG CHENG: The digitization of Michelson Interferometer. Proceedings of 2011 International Conference on

- Electronics and Optoelectronics. IEEE, 2011, V3-142-V3-145. DOI: 10.1109/ICEOE.2011.6013322.
- [13] KEZMAH, Marko, Denis DONLAGIC a Borut LENARDIC: Low cost security perimeter based on a Michelson interferometer. 2008 IEEE Sensors. IEEE, 2008, s. 1139-1142. DOI: 10.1109/ICSENS.2008.4716642.
- [14] KERSEY, A.D., M.J. MARRONE, A. DANDRIDGE a A.B. TVETEN. Optimization and stabilization of visibility in interferometric fiber-optic sensors using input-polarization control. Journal of Light wave Technology. Vol. 6, Issue 10, s. 1599-1609. DOI: 10.1109/50.7922.
- [15] AMARAL, L. M. N., O. FRAZAO, J. L. SANTOS a A. B. LOBO RIBEIRO. Fiber-Optical Inclinometer Based on Taper Michelson Interferometer. IEEE Sensors Journal. IEEE, 2011, vol. 11, issue 9, s. 1811-1814. DOI: 10.1109/JSEN.2011.2105264.
- [16] YU, Miao. UNIVERSITY OF MARYLAND, USA. Fiber Optic Sensor Technology. Orlando, FL, 2008, 52 s.
- [17] SAFIBRA. User and Configuration Guide for the Guardsense: Version for GuardSense Unit. Říčany, 2013.
- [18] LANGANGEN, Ø., A. VASKINN a B.-S. SKAGERSTAM. Interference of Light in a Michelson-Morley Interferometer: A Quantum Optical Approach. International Journal of Optics. 2012, vol. 2012, s. 1-10. DOI: 10.1155/2012/408067.
- [19] DICKMANN, Prof. Dr. Klaus. Experiment 10 Michelson Interferometer. Münster, 2011. FH Münster University of Appl. Sciences Dept. Engineering Physics.
- [20] XUEWEN SHU, K. SUGDEN a I. BENNION. All-fiber michelson-gires-tournois interferometer as multi-pass band filter. Proceedings of the Light wave Technologies in Instrumentation and Measurement Conference, 2004. IEEE, 2004, s. 144-147. DOI: 10.1109/LTIMC.2004.1371012.
- [21] MARETT, Doug. Construction of an All-Fiber-Optic Michelson Interferometer. In: 2012.
- [22] BULA M. Konstrukce vláknového Machova-Zehnderova interferometru se dvěma děliči s proměnnými dělicími poměry. Olomouc, 2012. Přírodovědecká fakulta Univerzity Palackého v Olomouci, Společná laboratoř optiky. Vedoucí práce Mgr. Karel Lemr, Ph.D.

- [23] SMITH, Martin D., William N. MACPHERSON, Robert R. J. MAIER, Francesco BALDINI, Jiri HOMOLA a Robert A. LIEBERMAN. Differential length measurement using low coherence coupled tandem interferometry. 87740T. DOI: 10.1117/12.2017591.
- [24] VERMA, Sunil, Yogesh M. JOSHI a K. MURALIDHAR. OPTICAL INTERFEROMETERS: PRINCIPLES AND APPLICATIONS IN TRANSPORT PHENOMENA. Laser Materials Development and Devices Division, Raja Ramanna Centre for Advanced Technology, Indore 452013, India, 2011.
- [25] FERREIRA, L. A., J. L. SANTOS a F. FARAHI. Polarization-induced noise in a fiber-optic Michelson interferometer with Faraday rotator mirror elements. Applied Optics.1995, vol. 34, issue 28, s. 6399. DOI: 10.1364/AO.34.006399.
- [26] LEE, Byeong Ha, Young Ho KIM, Kwan Seob PARK, Joo Beom EOM, Myoung Jin KIM, Byung Sup RHO a Hae Young CHOI. Interferometric Fiber Optic Sensors. Sensors. 2012, vol. 12, issue 12, s. 2467-2486. DOI: 10.3390/s120302467.
- [27] LUCKI, M. - BOHÁČ, L. - ZELENÝ, R. - DAVIDKOVÁ ANTOŠOVÁ, M.: Precise optical differential thermometer sensor based on interferometric measurement of thermal expansit coefficient. In Optical Sensing and Detection III. Bellingham: SPIE, 2014, vol. 3, . ISBN 9781628410891.
- [28] HLADIK J., ŠAŠEK L., BOHÁČ L., “The Fiber-optic Sensor for Perimeter Guarding,” 23rd Conference and Exhibition on Optical Communications 2011, Prague, 2011.
- [29] Experiments in Optics: Michelson Interferometry and Measurement of the Sodium Doublet Splitting. Athens, Georgia, 2011.
- [30] KASHYAP, R. a B. NAYAR. A single-mode fiber Michelson interferometer sensor. Journal of Light wave Technology. 1983, vol. 1, issue 4, s. 619-624. DOI: 10.1109/JLT.1983.1072153.
- [31] FRIGO, N.J., A. DANDRIDGE a A.B. TVETEN. Technique for elimination of polarisation fading in fiber interferometers. Electronics Letters. 1984, vol. 20, issue 8, s. 319. DOI: 10.1049/el:19840216.
- [32] KOTIYAL, Saurabh, Himanshu THAPLIYAL a Nagarajan RANGANATHAN. Mach-Zehnder Interferometer Based All Optical Reversible NOR Gates. 2012 IEEE Computer Society Annual Symposium on VLSI. IEEE, 2012, s. 207-212. DOI: 10.1109/ISVLSI.2012.72.

- [33] GOOBAR, E. A Michelson interferometer with balanced detection for the characterization of modulation and noise properties of semiconductor lasers. *IEEE Journal of Quantum Electronics*. vol. 29, issue 4, s. 1116-1130. DOI: 10.1109/3.214498.
- [34] FURSTENAU, N., H. HORACK a W. SCHMIDT. Extrinsic Fabry-Perot interferometer fiber-optic microphone. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*. vol. 47, issue 1, s. 138-142. DOI: 10.1109/19.728806
- [35] SUO, Zhiquan, Yue DENG a Donghai QIAO. Silicon Micro-machined Optical Microphone Based on Fizeau Interferometry and PGC Demodulation. 2012 International Conference on Industrial Control and Electronics Engineering. IEEE, 2012, s. 1053-1056. DOI: 10.1109/ICICEE.2012.278.
- [36] FURSTENAU N., BEYER T., GOETZE W., HORACK H., SCHMIDT W. and WERNER A.: "Interferometric vibration and acoustic sensor systems for airport ground traffic monitoring," *Proc. SPIE*, vol. 2838, pp. 188–198,1996.
- [37] WANG, A., H. XIAO, J. WANG, Z. WANG, W. ZHAO a R.G. MAY. Self-calibrated interferometric-intensity-based optical fiber sensors. *Journal of Light wave Technology* vol. 19, issue 10, s. 1495. DOI: 10.1109/50.956136.
- [38] LIN, Wentai, Chunxi ZHANG, Lijing LI a Sheng LIANG. Review on Development and Applications of Fiber-Optic Sensors. 2012 Symposium on Photonics and Optoelectronics. IEEE, 2012, s. 1-4. DOI: 10.1109/SOPO.2012.6270996.
- [39] ZHU, Qianxia a WEI YE. Distributed fiber-optic sensing using double-loop Sagnac interferometer. 2014 9th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications. IEEE, 2014, s. 499. DOI: 10.1109/ICIEA.2014.6931215.
- [40] CHORNG-PING CHANG. Optical MEMS technology for telecommunication. *Proceedings. 7th International Conference on Solid-State and Integrated Circuits Technology*, 2004. IEEE, 2004, s. 1981-1986. DOI: 10.1109/ICSICT.2004.1435228.
- [41] KRUGER, Ludi a Hendrik J. THERON. Optical fiber Mach-Zehnder Microphone. 2007 SBMO/IEEE MTT-S International Microwave and Optoelectronics Conference. IEEE, 2007,s. 389-391. DOI: 10.1109/IMOC.2007.4404287.

- [42] TRAN, T.A.; MILLER, W.V., III; MURPHY, K. A.; VENGSARKAR, A.M.; CLAUS, R.O., Stabilized extrinsic fiber-optic Fizeau sensor for surface acoustic wave detection. *Lightwave Technology [J]*, 1992, PP:1499-1506.
- [43] RAO Y. J.; JIANG J.; ZHOU C. X.: Spatial-frequency multiplexed fiber optic Fizeau strain sensor system with optical amplification. *Sensors and Actuators [J]*, 2005, PP: 354-359.
- [44] HUANGA S. C.; LIN W. W.; TSAI M. T.; CHEND M. H.: “Fiber optic in-line distributed sensor for detection and localization of the pipeline leaks”, *Sensors and Actuators A*, vol.135, pp. 570–579, 2007.
- [45] OKANDAN, Murat, Neal HALL, Baris BICEN, Caesar GARCIA a F. Levent DEGERTEKIN. Optical Microphone Structures Fabricated for Broad Bandwidth and Low Noise. 2007 IEEE Sensors. IEEE, 2007, s. 1472-1475. DOI: 10.1109/ICSENS.2007.4388692.
- [46] 17TH MICROOPTICS CONFERENCE, October 30-November 2. Damping Ratio in a Glass-Based Guided-Wave Optical Microphone without a Damping Structure: 17th Micro optics Conference: Oct. 30 - Nov. 2, 2011, Sendai, Japan. Piscataway, N.J: IEEE, 2011. ISBN 978-145-7713-446.
- [47] LUCKI, M.; DAVIDKOVÁ ANTOŠOVÁ, M.: Optoelektronické senzory nové generace. *Elektroinstalátér*. 2014, roč. 20, č. 2/2014, s. 58-60. ISSN 1211-2291.

Příloha A

Tento kód slouží k výpočtu a vykreslení spektra zaznamenaného signálu na detekční jednotce. Soubor k načtení je ve formátu .csv

```
clc;
clf;
clearall;

Fs=8000; %vzorkovací frekvence [Hz]

%% -----Základní nahrání souboru s daty z detekční jednotky----- %%

sample=xlsread('Guardsense_Sagnac_patchcord','Vycisteno, sagnac, klid, proml','C1:C64000');
l=length(sample);

% načtení „šumu“
e=zeros(1,l);

% a=dir(fullfile('Noise/'));
% b=a(3).name;
% dir=['Noise\' b];
% e=Import_Measured_Data2(dir,3);
le=length(e);

if le>1
    e=e(1:l);
else
    sample=sample(1:le);
end
% Přepsání vzorku, který budeme zpracovávat a následně reprodukovat
% wavwrite(values(100:200000),round(Fs),'record');
% audiowrite('Pure_A_440Hz.wav',sample,round(Fs));

% soundsc(e);
% pause;
% soundsc(sample);

%% -----Fourierova transformace----- %%

fft_sample=abs(fft(sample,Fs).^2);
fft_sample=fft_sample(4:end);%Nebereme v úvahu první vzorek
lf=length(fft_sample);
[Y,X]=max(fft_sample); %Získání maximální hodnoty FFT
X=X/lf*Fs;
f=[0:lf-1]/lf*Fs;

fft_half_sample=fft_sample(1:end/2);
f_half=f(1:end/2);

figure(1);
% a = '900 Hz, Ušš = 2V';
plot(f_half,fft_half_sample);
% title('Fourierova transformace přijatého signálu');
xlabel('frequency [Hz]');
ylabel('Amplitude');
% ylim([0 400000000]);
```

```
% legend (a);
```

```
%% Uvodni deklarace a load
```

Tato část kódu slouží k vykreslení grafů pro měření známé frekvence reproduktoru:

```
R = 2004; % od tohoto radku v .csv doku chci nacistat
```

```
C = 0; % zacina nacistani od zero sloupce
```

```
oo = [2:0:2000];
```

```
a = '20 Hz'; b = '33 kHz'; z = '3 kHz';
```

```
d = '75 Hz'; e = '100 Hz'; f = '300 Hz';
```

```
g = '500 Hz'; h = '750 Hz'; n = '1 kHz, Sagnac \oslash 10 cm, bez polar., s tepl. stabilizací';
```

```
o = '1.5 kHz, Sagnac \oslash 20 cm, s polar., bez teplotní stabilizace'; p = '2 kHz'; q = '2.5 kHz';
```

```
z = '3 kHz';
```

```
A = csvread('scope_20.csv',R,C);
```

```
B = csvread('scope_33.csv',R,C);
```

```
D = csvread('scope_75.csv',R,C);
```

```
E = csvread('scope_100.csv',R,C);
```

```
F = csvread('scope_300.csv',R,C);
```

```
G = csvread('scope_500.csv',R,C);
```

```
H = csvread('scope_750.csv',R,C);
```

```
N = csvread('scope_1k0.csv',R,C);
```

```
O = csvread('scope_1k5.csv',R,C);
```

```
P = csvread('scope_2k.csv',R,C);
```

```
Q = csvread('scope_2k5.csv',R,C);
```

```
Z = csvread('scope_3k.csv',R,C);
```

```
%%
```

```
figure(1)
```

```
plot(E(:,1),E(:,2),F(:,1),F(:,2),H(:,1),H(:,2)));
```

```
% title('Overeni detekce harm. signalu');
```

```
grid on
```

```
xlabel('frequency [Hz]');
```

```
ylabel('U [dBV]');
```

```
% xlim([30 5001]);
```

```
ylim([-73 -40]);
```

```
legend(e,f,h);
```

```
figure(2)
```

```
plot(A(:,1),A(:,2),B(:,1),B(:,2),D(:,1),D(:,2)));
```

```
% title('Overeni detekce harm. signalu');
```

```
grid on
```

```
xlabel('frequency [Hz]');
```

```
ylabel('U [dBV]');
```

```
% xlim([30 5001]);
```

```
ylim([-80 -40]);
```

```
legend(a,b,d,e,f,g,h,n,o,p,q,z);
```

```
figure(3)
```

```
% vykres = semilogx(N(:,1),N(:,2),O(:,1),O(:,2));
```

```
plot(N(:,1),N(:,2),O(:,1),O(:,2))
```

```
% title('Overeni detekce harm. signalu');
```

```
% set(vykres,'Linewidth',2) % volitelne nastaveni tloustky car v grafu
```

```
% grid on
```

```
xlabel('frequency [Hz]');
```

```
ylabel('U [dBV]');
```

```
xlim([600 2000]);
```

```
ylim([-72 -30]);
```

```

legend(n,o,'Location','best');

figure(4)
% vykres = semilogx(N(:,1),N(:,2),O(:,1),O(:,2),P(:,1),P(:,2),Q(:,1),Q(:,2),Z(:,1),Z(:,2),'black');
plot(P(:,1),P(:,2),Q(:,1),Q(:,2),Z(:,1),Z(:,2))
% title('Overeni detekce harm. signalu');
% set('Linewidth',2) % volitelne nastaveni tloustky car v grafu
% grid on
xlabel('frequency [Hz]');
ylabel('U [dBV]');
xlim([1700 3200]);
ylim([-72 -30]);
pp = '2 kHz, s polar. beztepl. stabilizace'; qq = '2.5 kHz, bez polar., s tepl. stabilizaci';
zz = '3 kHz, bez polar., s tepl. stabilizaci, generátor Ušš + 1V';

legend(pp,qq,zz,'Location','best');

```