

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta elektrotechnická

Katedra telekomunikační techniky

**Interferometry pro sledování pohybu
a polohy**



květen 2015

Vypracoval: Bc. Antonín Vála

Vedoucí Práce: Ing. Jan Šístek, Ph.D.



ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Student: **Bc. Antonín Vála**

Studijní program: **Inteligentní budovy**

Název tématu česky: **Interferometry pro sledování pohybu a polohy**

Název tématu anglicky: **Interferometers for Movement and Position Sensing**

Pokyny pro vypracování:

Navrhněte a prakticky ověřte alespoň dvě různá provedení optických interferometrů (vláknových či s paprsky), které jsou perspektivní pro bezdotykové sledování posunů, polohy či pohybu částí budov či jejich zařízení. Volte technicky jednodušší koncepce s použitím běžně dostupných komponent (laserových diod, budičů, fotodetektorů, vláken apod.). Ke každému interferometru vypracujte algoritmus, jak vyhodnotit sledovanou veličinu. Naznačte uplatnění navržených přístrojů.

Seznam odborné literatury:

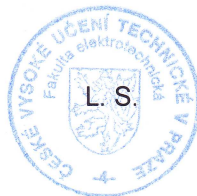
- [1] Hui, R., O'Sullivan, M.: *Fiber Optic Measurement Techniques*. Elsevier, 1st ed., 2009, ISBN 978-0-12-373865-3.
- [2] Culshaw, B., Kersey, A.: *Fiber-Optic Sensing: A Historical Perspective*. IEEE Journal of Lightwave Technology (ISSN 0733-8724), vol. 26 (2008), no. 9, pp. 1064-1078.
- [3] Lee, B.H., Kim, Y.H., Park, K.S., Eom, J.B., Kim, M.J., Rho, B.S., Choi, H.Y.: *Interferometric Fiber Optic Sensors*. Sensors 2012 (ISSN 1424-8220), no. 3, pp. 2467-2486.

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Jan Šístek, Ph.D. (K13117)**

Datum zadání diplomové práce: **15. ledna 2015**

Platnost zadání do¹: **31. srpna 2016**


Doc. Ing. Jan Holub, Ph.D.
vedoucí katedry




Prof. Ing. Pavel Ripka, CSc.
děkan

V Praze dne 15. 1. 2015

¹ Platnost zadání je omezena na dobu tří následujících semestrů.

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací.

V Praze dne: 11.5 2015

.....

Poděkování

Rád bych poděkoval svému vedoucímu práce Ing. Janu Šístkovi, Ph.D. za odbornou pomoc, trpělivost a ochotu, při vedení mé diplomové práce. Také bych rád poděkoval svým rodičům, kteří mě podporovali a poskytli mi během studia kvalitní zázemí.

Anotace:

Následující diplomová práce popisuje základní vlastnosti a principy optických senzorů pracujících na tzv. interferometrickém jevu pro měření polohy, vibrací či posunu objektu. Uvádí možné typy interferometrických senzorů a jejich využití ve stavebním průmyslu či civilních budovách. Na základě teoretických poznatků jsou v praktické části sestrojeny dva typy interferometrů k měření relativního posunutí objektu. Získané údaje ze senzoru jsou zpracovány výpočetním programem Matlab k vyhodnocení zmíněného posunutí.

Klíčová slova: senzor, interferometr, měření pohybu a polohy

Summary:

The following diploma thesis describes basic properties and principles of sensors based on interferometry. The sensors are suitable for position, vibration or displacement measurements and find use in civil engineering or intelligent buildings. Based on theoretical background two practical interferometers for displacement measurement are constructed. Data obtained from these sensors is processed in a MATLAB script that outputs the displacement.

Index terms: sensor, interferometer, movement and position sensing

Obsah:

Seznam symbolů a zkratek.....	ii
Úvod	1
I. Teoretická část	2
1. Teorie interferometrů	3
1.1 Interference.....	3
1.2 Vliv polarizace	5
1.3 Vliv koherence zdroje	8
1.4 Gaussovy svazky pro interferometry.....	9
1.5 Princip interferometru	10
1.6 Typy interferometrů	13
2. Výběr komponent pro interferometry	17
2.1 Zdroje	17
2.1.2 Laserové diody	18
2.2 Vlákná	20
2.3 Kolimační optika.....	21
2.4 Fotodetektory	22
3. Výběr interferometru podle aplikace.....	24
3.1 Relativní měření polohy	24
3.2 Absolutní měření polohy	24
4. Provedení konkrétních interferometrů.....	26
4.1 Interferometry ve stavebnictví či budovách.....	28
II. Praktická část	30
5. Návrh Michelsonova interferometru.....	31
5.1 Popis měřicí soustavy	32
5.2 Nastavení měřicí soustavy.....	34
5.3 Zjištění koherentní délky.....	35
5.4 Zjištění úhlové závislosti odrazivých materiálů.....	36
5.5 Algoritmus měření s interferometrem a vyhodnocení měření	38

5.6	Závěr měření s Michelsonovým interferometrem	42
6.	Návrh Fabry-Perotova interferometru	46
6.1	Popis měřicí soustavy	46
6.2	Vyhodnocení výsledků měření	49
6.3	Závěr měření s Fabry-Perotovými interferometry	50
Závěr	52
Literatura	53
Příloha A	55
Příloha B	56
Příloha C	57

Seznam symbolů

A	plocha smyčky
d	vzdálenost měřeného objektu od konce vlákna
E	intenzita elektrického pole
f	frekvence
H	intenzita magnetického pole
I	intenzita záření
j	imaginární číslo komplexního čísla
I_{NOR}	normovaná intenzita záření
I_{PD}	proud fotodiody
k	konstanta šíření
L	délka rezonátoru
L_S	koherentní délka
n	index lomu
N	počet maxim/minim
n_v	index rezonujícího vidu
P_{OPT}	optický výkon
R	poloměr křivosti
R_D	odpor určující transimpedanci zesilovače fotodetektoru
R_S	poloměr smyčky
t	čas
\hat{U}	komplexní amplituda vlny
$U_{výst}$	výstupní napětí fotodetektoru
v	rychlost šíření vlny
w	poloměr Gaussova svazku
w_0	poloměr Gaussova svazku v krčku
z_0	Rayleighova vzdálenost
α	měrný útlum
β	měrný fázový posun
λ	vlnová délka

$\Delta\lambda$	šířka spektra
φ	rozdíl fází
\mathfrak{R}	citlivost fotodetektoru
φ_i	fáze i-té vlny
ω	úhlová rychlost

Seznam zkratek

APC	šikmo broušený konektor (angl. Angled Physical Contact)
LCI	nízko koherentní interferometr (angl. Low Coherent Interferometer)
LD	laserová dioda
PZ	polopropustné zrcadlo
PC	rovně broušený konektor (angl. Physical Contact)
SFP	technický standard optických vložených transceiverů (angl. Small Form-factor Pluggable)
SOFO	optický vláknový senzor monitorující deformaci stavebních konstrukcí (fr. Surveillance d'Ouvrages par Fibres Optiques)

Úvod

S nezadržitelným rozvojem technologií v odvětví průmyslu, stavebnictví, strojírenství či jiných oborech stoupají nároky na stále přesnější měření pohybu či polohy určitého objektu. K tomuto účelu jsou vhodnými kandidáty optické senzory. To je především dáno velmi krátkou vlnovou délkou optického záření a přímočarostí šíření.

Mezi senzory s nejvyšším délkovým rozlišením patří senzory pracující na tzv. interferometrickém jevu, zkráceně interferometry. Senzory snímají měřenou veličinu bezdotykově a uplatní se především pro měření absolutní a relativní polohy, vibrací a pohybu. Další neméně důležitou vlastností těchto sensorů je možnost umístění sensorů ve zvláště nebezpečných prostředích, kde hrozí např. možnost výbuchu v důsledku elektrického zkratu apod.

Práce je rozdělena na dvě části, kde v první teoretické části bude čtenář seznámen se základními pojmy, funkcí a principy týkajícími se interferometrů. Následně budou představeny čtyři základní typy interferometrů měřících polohu, posun, vibrace či natočení. Rozebere a doporučí, jaké vhodné optické prvky použít pro realizaci interferometrů. V poslední kapitole této části budou představeny konfigurace interferometrů pro relativní a absolutní měření délky.

Druhá část je zaměřena na praktickou realizaci interferometrů, dle teoretického rozboru. Realizovány budou dva typy interferometrů pro měření posuvu, polohy či vibrací. Ke každému interferometru a druhu měření bude vypracován algoritmus pro vyhodnocení měřené veličiny.

I. Teoretická část

1. Teorie interferometrů

1.1 Interference

Interference je obecně jevem, kdy se harmonické vlny skládají na jednom vedení či se šíří podél stejné optické osy. Toto vlnění získáme součtem intenzit (E , H) obou dílčích vln. Podle vzájemného fázového rozdílu v daném místě vzniká lokální maximum, minimum, nebo je amplituda mezi těmito hodnotami.

Aby mohla vzniknout interference mezi dvěma optickými vlnami, je potřeba splnit následující podmínky:

- stejné frekvence obou optických vln,
- vlny musejí být monochromatické,
- šíření stejným směrem (či ve stejném vláknu).

Pak můžeme definovat komplexní amplitudy (E či H) dvou optických vln $U_{1,2}$ [2].

$$\widehat{U}_1(z) = U_1(0) \exp(-jkz) \quad (1.1)$$

Po substituci za konstantu šíření $k = \beta - j\alpha$ získáme,

$$\widehat{U}_1(z) = U_1(0) \exp[-j(\beta - j\alpha)z] \quad (1.2)$$

V obecném případě uvažujeme fázi vlny v počátku, proto předchozí rovnici upravíme do tvaru (platí i pro druhou interferující vlnu),

$$\widehat{U}_1(z) = U_1(0) \exp(j\varphi_{01}) \exp(-j\beta z) \exp(-\alpha z) \quad (1.3)$$

,kde

$U_{1,2}(0)$ = amplituda vlny v počátku,

k = konstanta šíření.

α = měrný útlum,

β = měrný fázový posun,

φ_{01} = fáze vlny v počátku.

První exponenciála tedy definuje fázi vlny v počátku, druhá fázi podél vlny a třetí pokles amplitudy.

Při interferenci se obě vlny skládají tak, že vzniká nová, opět harmonická vlna. V optice většinou snímáme intenzitu, která je výkonovou hustotou, tedy Poyntingovým vektorem, a proto je úměrná kvadrátu E (či H). Konstanta úměrnosti není pro interferenci podstatná. Intenzita I a velikost amplitudy U jsou funkcemi místa z , ale pro přehlednost toto nebude dále zapisováno. Hodnotu intenzity I lze vyjádřit jako [2].

$$I = |U|^2 = |U_1 + U_2|^2 = |U_1|^2 + |U_2|^2 + U_1^*U_2 + U_1U_2^* \quad (1.4)$$

, kde „*“ značí komplexně sdruženou hodnotu.

Za $|U_1|^2$ a $|U_2|^2$ můžeme dosadit intenzity původních vln [2].

$$I_1 = |U_1|^2 \quad (1.5)$$

$$I_2 = |U_2|^2$$

Po dosazení rovnice (1.5) do (1.4) můžeme celkovou intenzitu pomocí dílčích intenzit a fázového rozdílu φ mezi vlnami vyjádřit [2].

$$I = I_1 + I_2 + 2(I_1I_2)^{\frac{1}{2}} \cos(\varphi_2 - \varphi_1) = I_1 + I_2 + 2(I_1I_2)^{1/2} \cos(\varphi) \quad (1.6)$$

Vztah (1.6) nazýváme interferenční rovnicí. Budou-li intenzity obou vln stejně velké, tedy $I_1 = I_2 = I_0$ můžeme interferenční rovnici upravit do tvaru [2].

$$I = 2I_0(1 + \cos(\varphi)) = 4I_0 \cos^2\left(\frac{\varphi}{2}\right) \quad (1.7)$$

Ze zmíněného vyplývá, že při fázovém rozdílu $\varphi = 0$ je výsledná intenzita rovna $I = 4I_0$. V druhém extrémním případě, kdy $\varphi = \pi$ je výsledná intenzita $I = 0$. Bude-li fázový rozdíl superponujících vln jiný, nachází se hodnota výsledné intenzity v tomto rozmezí.

Nyní budou představeny různé případy pro:

a) Stejně velké amplitudy superponujících vln (obr. 1.1)

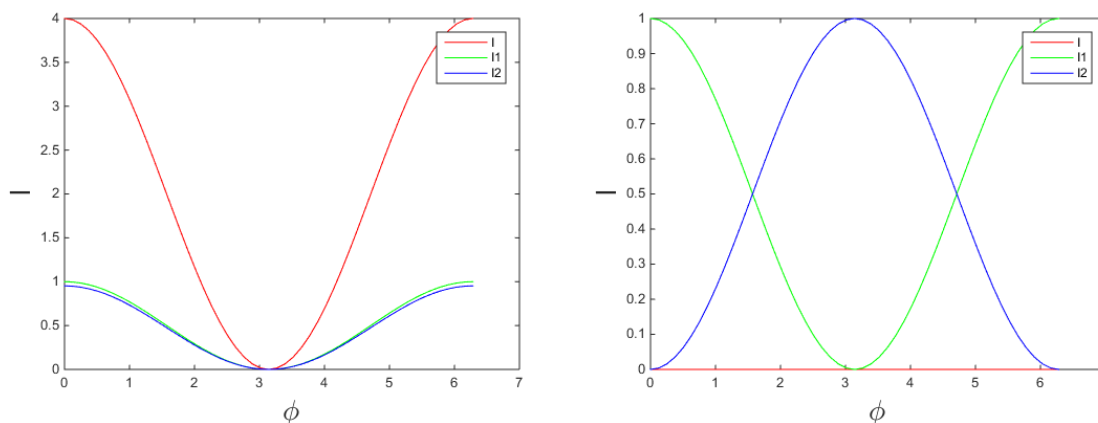
- $\varphi = 0$,

- $\varphi = \pi$.

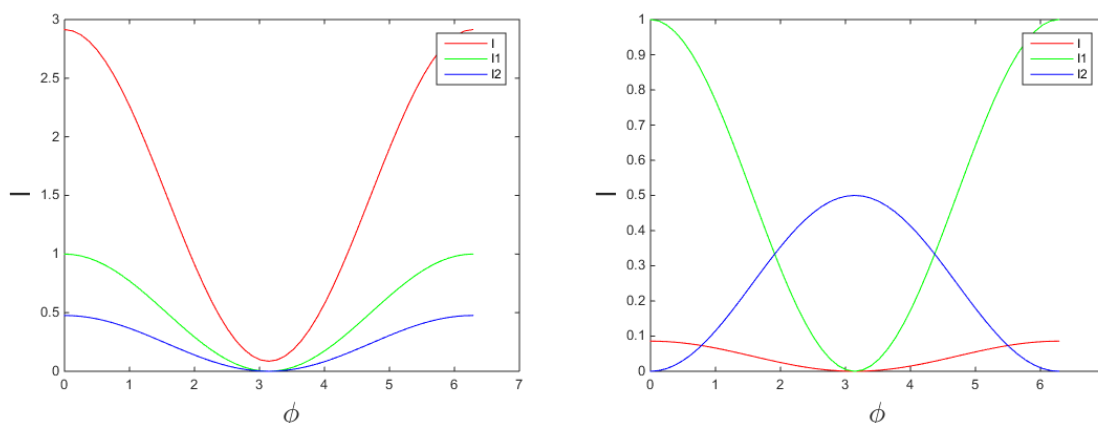
b) Různé amplitudy superponujících vln (obr. 1.2)

- $\varphi = 0$,

- $\varphi = \pi$.



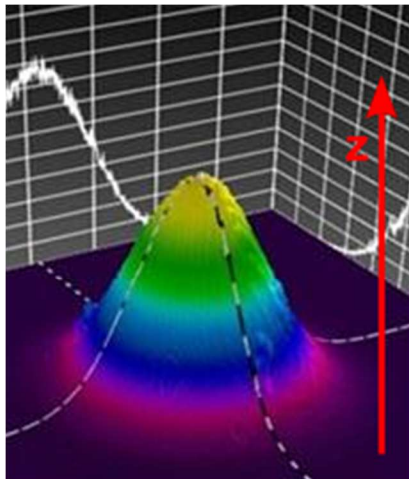
Obr. 1.1 Průběh intenzity jako funkce fáze podél vlny při shodných amplitudách interferujících vln: vlevo $\varphi = 0$, vpravo $\varphi = \pi$



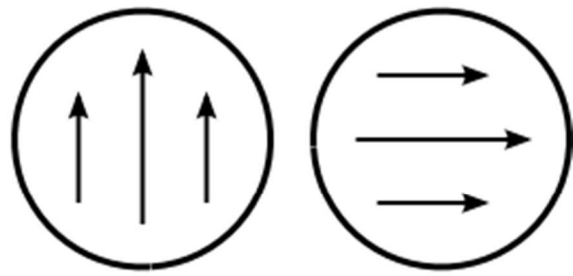
Obr. 1.2 Průběh intenzity jako funkce fáze podél vlny při rozdílných amplitudách ($I_1=1, I_2=0,5$) interferujících vln: vlevo $\varphi = 0$, vpravo $\varphi = \pi$

1.2. Vliv polarizace

V optice se používají kruhově symetrická vlákna. Jednovidová vlákna vedou pouze jeden dominantní vid LP_{01} . Avšak tento vid se může otáčet, má tedy dva možné polarizační stavy, viz obr. 1.3. Těmto dvou polarizačním stavům, které se jinak neliší, se říká degenerace vidu (zde dvojnásobná).



a)



Svisle
polarizovaný

Vodorovně
polarizovaný

b)

Obr. 1.3 a) rozložení výkonové hustoty vidu LP_{01} v příčném směru (převzato z[6])

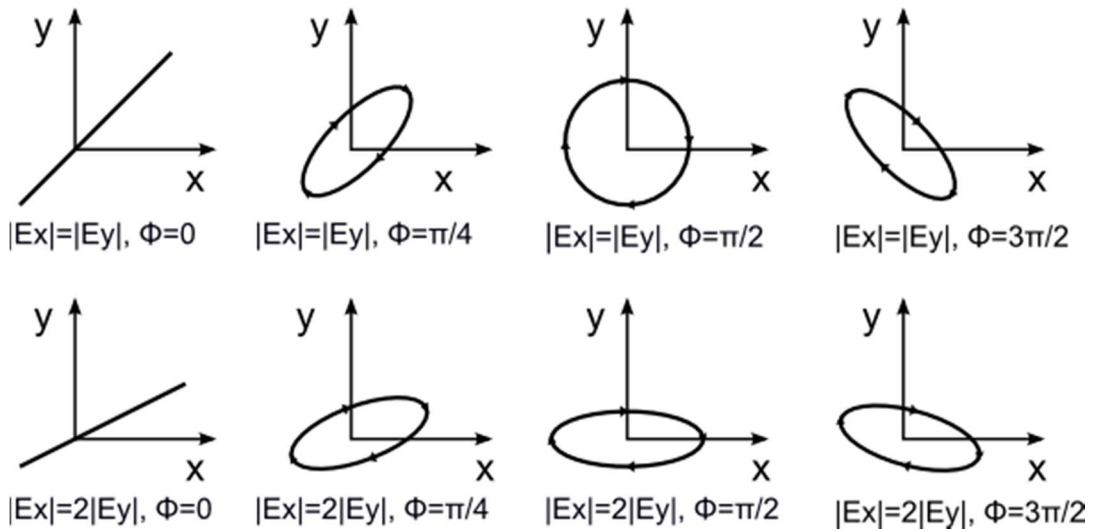
b) Zobrazení siločar vidu LP_{01}

Z hlediska interference je žádoucí, aby obě interferující vlny měly stejnou rovinu polarizace, pak je amplituda interference maximální. Je proto nutné používat lineárně polarizované zdroje, vlákna udržující rovinu polarizace (budou popsána v kap. 2), odbočnice zachovávající polarizaci apod.

V opačném případě se musí provést opatření, které zachová shodnou rovinu polarizace obou vln, např. zařazením polarizačních kontrolérů (prvků pro natáčení polarizace).

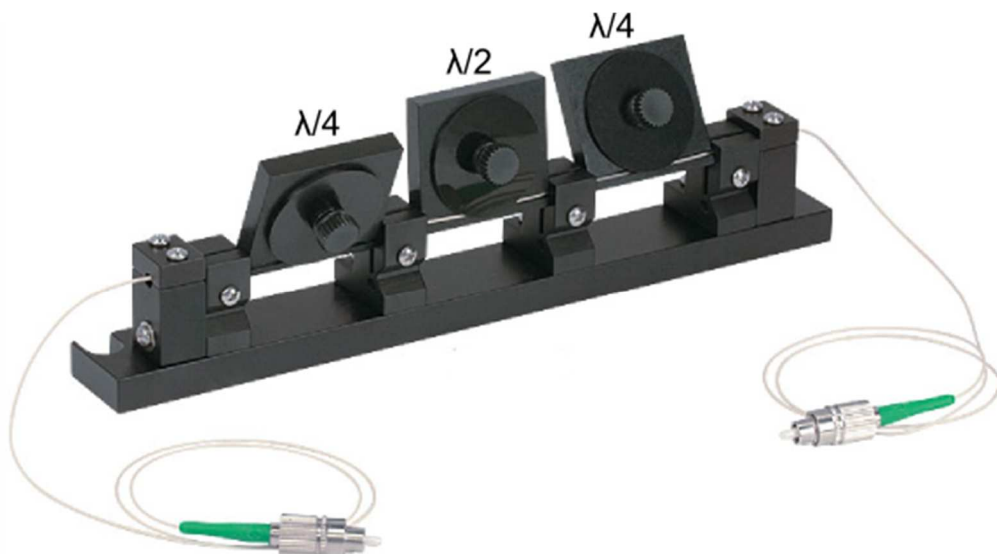
Nejjednodušší polarizační kontrolér vznikne z vlákna s dvojlomem. Dvojlom ve vlákne znamená, že vlna se šíří jinak rychle při jedné polarizaci a jinak při druhé polarizaci. Tento dvojlom lze snadno vytvořit mechanickým tlakem na vlákno z boku (např. vložení mezi destičky, na které je vyvíjen tlak, anebo stočením pár závitů vlákna do malé smyčky, čímž vznikne uvnitř vlákna mechanické napětí).

Pokud je vlna natočena obecně, tak jí lze rozložit do roviny paralelní s „rychlou osou“ (rovinou, kde je index lomu nižší) a do roviny paralelní s pomalou osou (tam je index lomu vyšší) a po průchodu dvojlomným vláknem dojde mezi složkami k fázovému posunu. Tímto posuvem se mění polarizační stav, ovšem nemusí již jít o lineární polarizaci, ale např. o obecný polarizační stav, kterým je polarizace eliptická. Některé případy polarizací uvádí obr. 1.4.



Obr. 1.4 Polarizační stavy polarizovaného světla (E_y = amplituda vlny v rychlé ose, E_x amplitudy vlny v pomalé ose, Φ = fázový posun) [5]

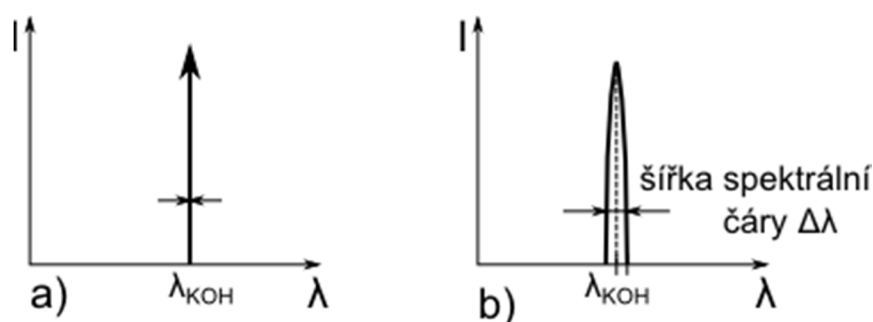
Polarizační kontroléry se většinou skládají ze tří pohyblivých částí, hovoříme o třístupňových polarizačních kontrolérech (obr. 1.5), kde je na první části kontroléru navinuta jedna smyčka optického vlákna. Ta pracuje stejně jako čtvrtvlnná ($\lambda/4$) destička v paprskové optice, převádí libovolnou vstupní polarizaci na polarizaci lineární. V druhé části kontroléru jsou navinuty dvě smyčky optického vlákna (ekvivalent půlvlnné destičky v paprskové optice), které otáčí polarizaci do požadovaného úhlu. Poslední část je opět tvořena jedním závitem smyčky, která převádí lineární polarizaci na požadovaný polarizační stav [14].



Obr. 1.5 Ukázka vláknového polarizačního kontroléru od firmy Thorlabs (převzato z [9])

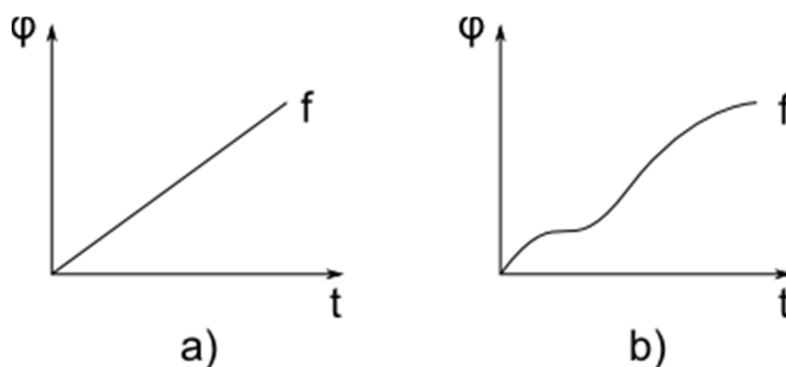
1.3. Vliv koherence zdroje

Optické senzory pracující na principu interference vyžadují zdroje s velmi úzkým spektrem, tedy vysoce koherentní. Je-li zdroj koherentní, nemění se frekvence záření a tím i fáze vyzářených paprsků je stejná. Vyzařuje v každém okamžiku monochromatické záření. Ideálním zdrojem koherentního záření je zdroj vyzařující záření s nekonečně úzkým spektrem λ_{KOH} . Oproti tomu, reálný zdroj generuje záření s konečnou šířkou spektrální čáry a amplitudou, jak ilustruje obr. 1.6. Vlnová délka takového zdroje se nachází v intervalu $\lambda_{KOH} \pm 1/2\Delta\lambda$.



Obr. 1.6 Spektrum záření: a) koherentní zdroj záření, b) reálný zdroj záření

Čím je spektrální čára širší, tím více dochází ke změně periody optické vlny. Fáze vlny v čase neroste rovnoměrně, ale kolísá (obr. 1.7).



Obr. 1.7 Průběh fáze v závislosti na čase: a) ideální zdroj – pevná frekvence záření, b) reálný zdroj – proměnlivá frekvence

Přičemž časovou změnu fáze lze vyjádřit jako úhlovou frekvenci ω .

$$\omega = \frac{d\varphi}{dt} \quad (1.8)$$

Stupeň koherence, jinými slovy jak moc je zdroj koherentní udává tzv. koherentní délka L_s , jejíž hodnota určuje největší délkový rozdíl mezi místy podél vlny, která jsou ještě korelovaná, tedy mají vzájemný fázový vztah. Je dána vztahem [5]

$$L_s = \frac{\lambda^2}{\Delta\lambda} \quad (1.9)$$

,kde

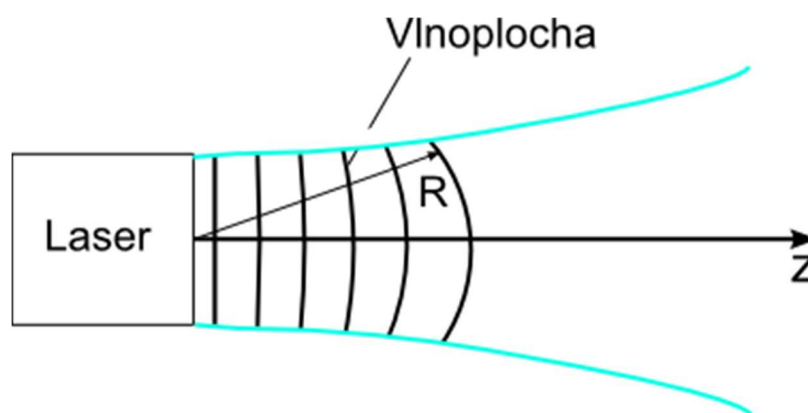
λ = střední vlnová délka,

$\Delta\lambda$ = šířka spektrální čáry.

Ze zmíněného vyplývá, že pro účinnou detekci interference musí být koherentní délka zdroje podstatně delší, než rozdíl optických délek ramen. Čím užší spektrální čára, tím menší odchylky (fluktuaace) a proto silnější interference. Naopak zcela nekoherentní zdroj (např. bíle světlo se širokým spektrem) nevytvoří prakticky žádnou interferenci mezi dvěma vlnami vyslanými v různých časech, výkony se sečtou, ale nelze sledovat fázový rozdíl.

1.4 Gaussovy svazky pro interferometri

Záření, které vystupuje z vysoce koherentního zdroje záření a které se šíří volným prostorem popisujeme tzv. Gaussovskými svazky. V praxi se jedná o nejrealističtější aproximaci šíření vlnoplochy. Vlnoplocha Gaussovského svazku se v blízkosti optického zdroje chová jako rovinná, poté s rostoucí vzdáleností od zdroje konvertuje do vlnoplochy kulové s poloměrem křivosti R (obr. 1.8) [1].

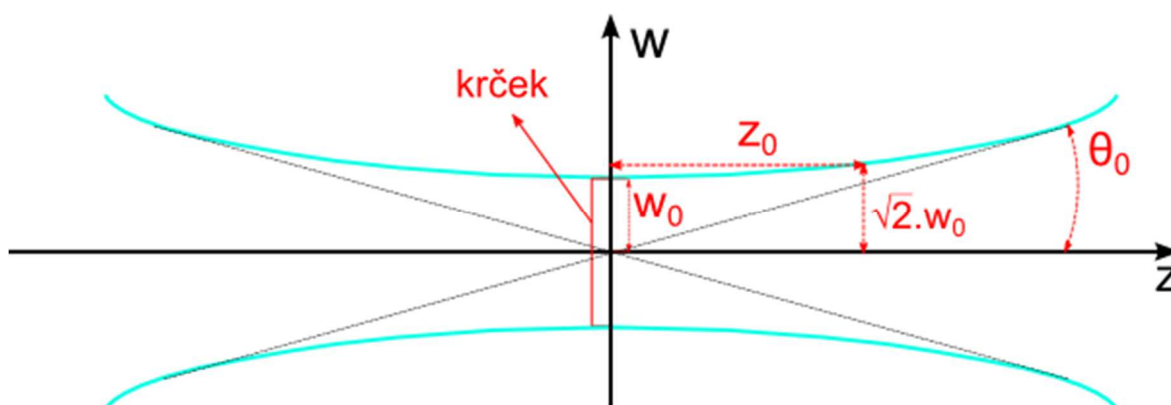


Obr. 1.8 Gaussovský svazek [1]

Je tedy zřejmé, že šířka svazku není konstantní. Místo s nejmenším poloměrem svazku w_0 nazýváme krčkem (vyústění paprsku ze zdroje či vlákna). Ten se dále vlivem divergence θ_0 a vzrůstající vzdálenosti rozšiřuje. Vzdálenost, na níž je plocha svazku dvakrát větší než v místě krčku, se nazývá Rayleighova vzdálenost z_0 viz obr. 1.9.

$$z_0 = \frac{\pi w_0^2}{\lambda} \quad (1.10)$$

$$w(z) = w_0 \sqrt{1 + \frac{z^2}{z_0^2}} \quad (1.11)$$



Obr. 1.9 Parametry Gaussovského svazku (šíření svazku ve směru osy z) [1]

Pro paprskový interferometr by bylo nejlepší, pokud by interferovaly dva svazky se stejnými šířkami a poloměry křivosti vlnoploch. Pokud tomu tak není, tak na stínítku vzniknou interferenční obrazce (nejčastěji kroužky či části kroužků).

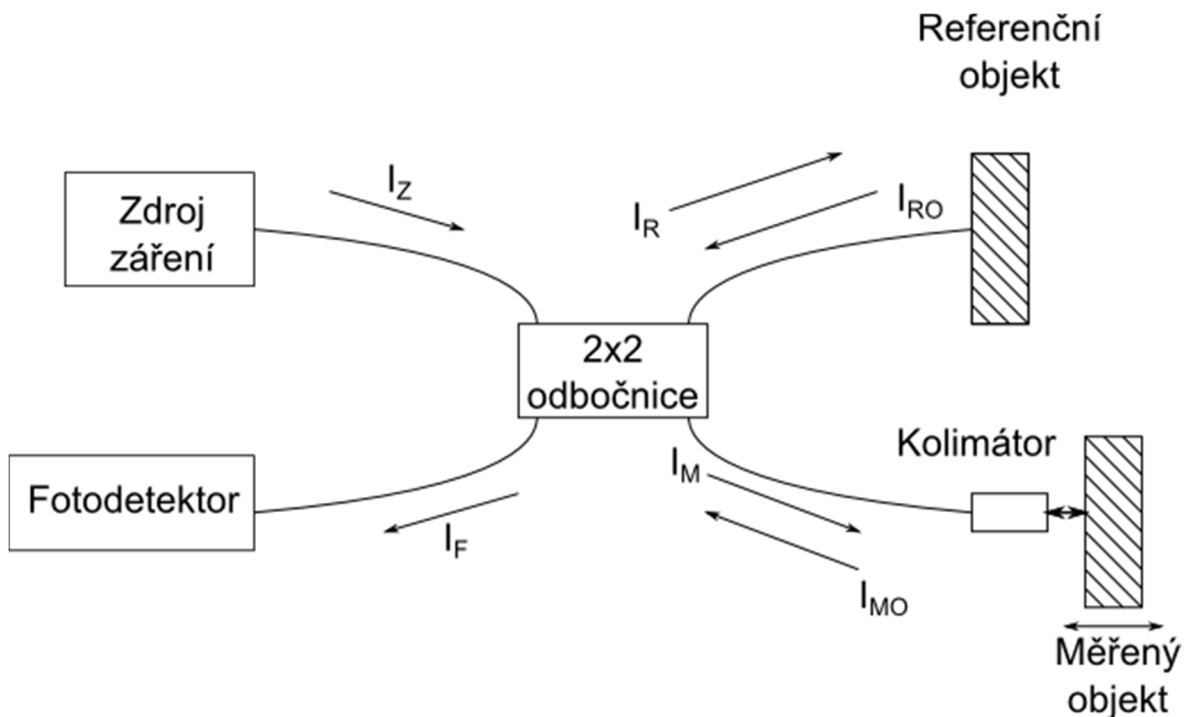
1.5 Princip interferometrů

V následujícím odstavci bude názorně popsán interferometr, který má nejcharakterističtější rysy interferometrů a to interferometr Michelsonův ve variantě s vlákny, jak ilustruje obr. 1.10.

Na začátku optické trasy je monochromatický zdroj světla, kterým je nejčastěji laserová dioda. Ta vyzařuje do optického vlákna světelnou vlnu o intenzitě I_Z , která je vláknem vedena k vláknové odbočnici. Zde je světelná intenzita rozdělena v poměru 50:50 do měřicího ramena I_M a referenčního ramena I_R .

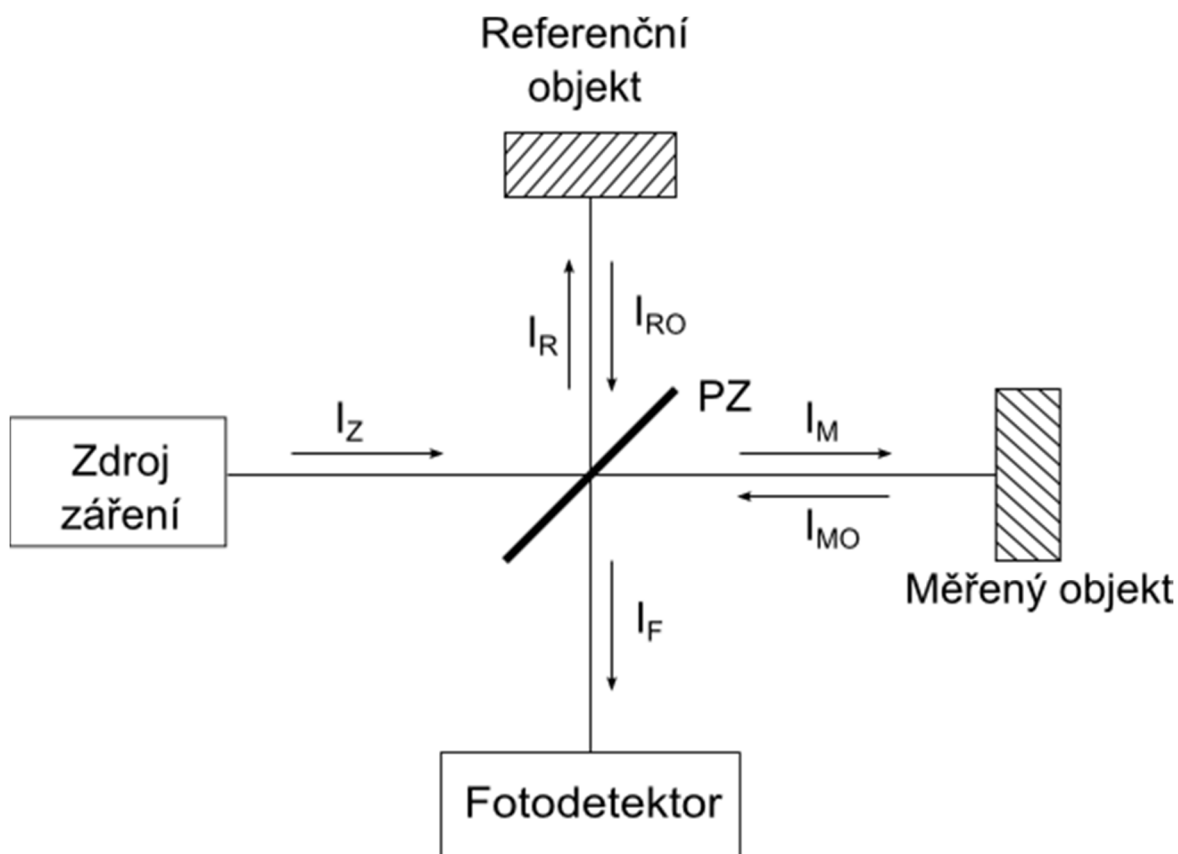
$$I_M = I_R = \frac{I_Z}{2} \quad (1.12)$$

Referenční rameno je zakončeno referenčním objektem, který lze realizovat odrazem na vlákně (zalomením vlákna či vláknovým zrcadlem) nebo pevně uloženým odrazivým materiálem např. zrcadlem, kde dochází k odrazu světelné vlny zpět k odbočnici I_{RO} . Měřicí objekt je tvořen opět zrcadlem, ale to je spojeno se sledovaným objektem, který se pohybuje. Na odbočnici se pak obě vlny skládají (interferují) s intenzitou I_F , podle vzájemného poměru amplitud a podle fázového rozdílu, jak bylo ukázáno v předcházející kapitole. Následně, je intenzita I_F sledována fotodetektorem, který jej převádí na proud. Hodnota (průběh) proudu lze vyhodnotit např. osciloskopem.



Obr. 1.10 Schéma Michelsonova interferometru – vláknová struktura [3]

Interferometr lze také realizovat formou paprsků šířících se přímočaře volným prostorem, krátce paprskově (obr. 1.11). Odbočnicí pak odpovídá polopropustné zrcadlo PZ, které odráží polovinu paprsku zdroje směrem k referenčnímu objektu a druhou polovinu vede přímo k objektu měřenému. Oba tyto objekty tvořené zpravidla plně odrazivými zrcadly odráží paprsky zpět k PZ, kde dochází po druhém průchodu zrcadlem k interferenci ve výstupní rovině. Tu můžeme sledovat na stínítku či měřit detektorem.



Obr. 1.11 Schéma Michelsonova interferometru v provedení s paprsky ve volném prostoru [3]

V obou těchto případech jsou odražené vlny od měřících a referenčních objektů obecně odlišné amplitudy a mezi sebou mají určitý fázový rozdíl φ . Tento fázový rozdíl je zapříčiněn oddálením či přiblížením měřeného objektu. Prodlužuje se dráha vlny (paprsku), čímž se se fáze jedné vlny vůči druhé mění. Známe-li vlnovou délku, lze z počtu změn (interferenčních maxim a minim) určit délkový posun. Je však možné měřit posun o necelou vlnovou délku a to sledováním intenzity, tedy průběhem mezi maximem a minimem.

1.6 Typy interferometrů

V této kapitole budou ukázány čtyři základní konfigurace interferometrů, které měří polohu námi zvoleného objektu. Jedná se především o měření posunu, vibrací nebo natočení objektu. Představené interferometry budou realizovány vláknově. Hlavními typy jsou:

- a) Michelsonův interferometr,
- b) Mach-Zenderův interferometr,
- c) Fabry-Perotův interferometr,
- d) Sagnacův interferometr.

Michelsonův interferometr

Princip Michelsonova interferometru byl vysvětlen v kapitole 1.5. Michelsonův interferometr snadno rozliší změnu délky o $\lambda/2$. Existují modifikace, které jeho citlivost zvětšují, např. vícenásobným odrazem světelného svazku. Také se používají interferometry tzv. diferenční, kdy se měří vzdálenost mezi dvěma rovnoběžnými zrcadly. V takovýchto případech se dostáváme na maximální rozlišení změny délky $\lambda/4$.

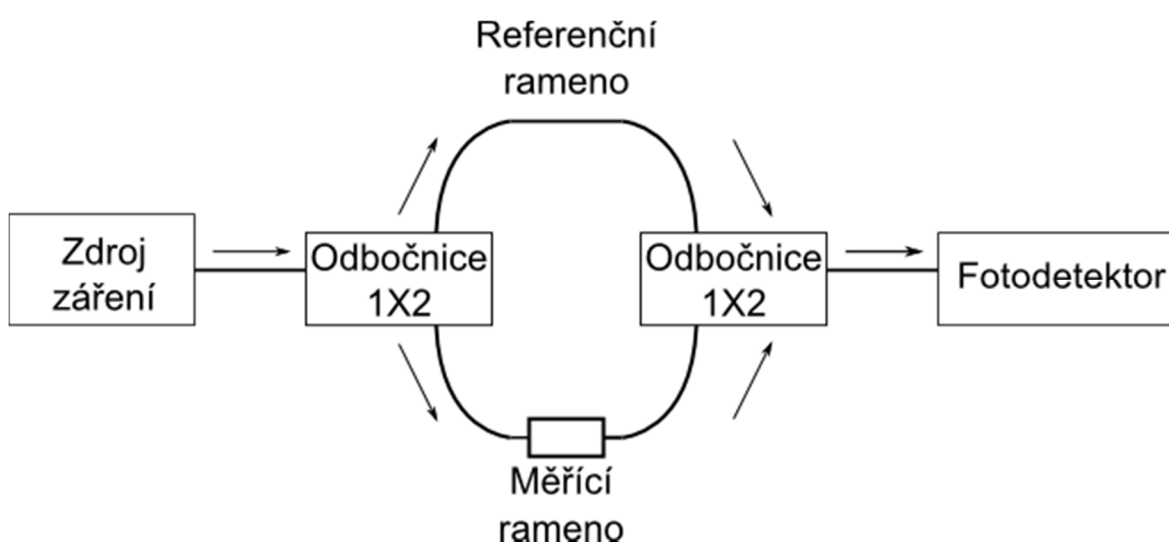
Mach-Zehnderův interferometr

Principiálně je funkce tohoto interferometru podobná Michelsonově interferometru. Rozdíl spočívá v tom, že vlny se v ramenech neodráží, ale prochází ke slučovači, kde následně interferují. Interferometr je opět citlivý na změnu délek ramen. Té je možné dosáhnout mechanicky (např. natahováním vlákna), elektromechanicky či čistě elektronicky. Schéma interferometru znázorňuje obr. 1.12.

Elektromechanického prodloužení vlákna, tedy i prodloužení optické dráhy v měřicím rameni, docílíme například použitím piezoelektrických materiálů. Tyto materiály vynikají schopností měnit svůj objem v závislosti na přiloženém elektrickém poli (piezoelektrický jev). Navineme-li cívku optického vlákna na tento

piezoelektrický materiál, bude se vlákno prodlužovat a stahovat dle měnících se rozměrů piezoelektrického materiálu.

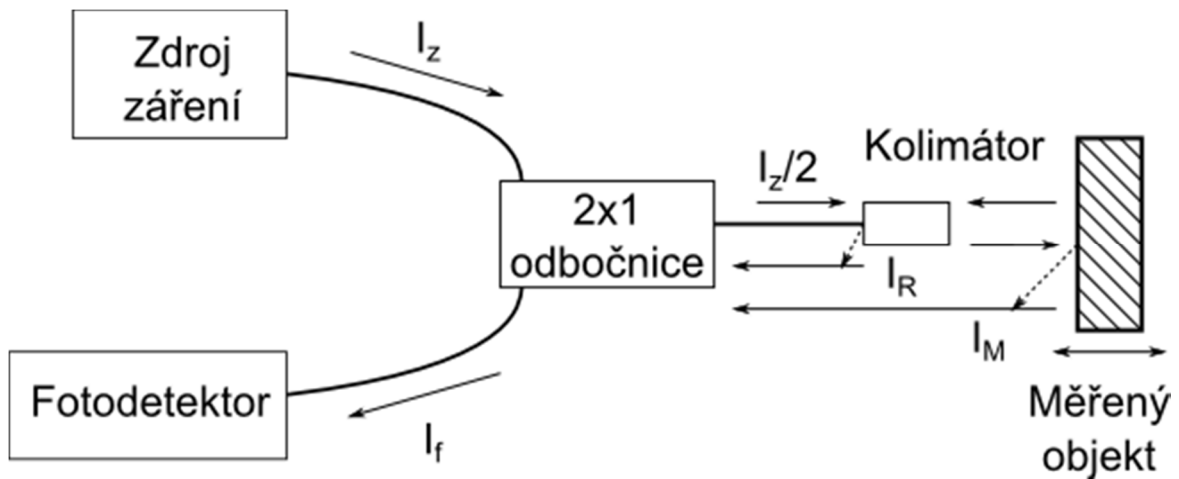
Jiným způsobem změny délky je použití materiálu s proměnným indexem lomu. Mění se tedy optická délka, nikoliv fyzická, hovoříme o elektrooptickém jevu. Ke změně optické délky (indexu lomu) dochází u materiálů reagujících na působení vnějšího stejnosměrného elektrického pole. Toto řešení se uplatní pouze v planární technologii, kde mezi materiály s vysokým koeficientem změny indexu lomu vlivem přiloženého napětí patří např. lithium niobát (LiNbO_3).



Obr. 1.12 Principiální schéma Mach-Zehnderova interferometru [3]

Fabry-Perotův interferometr

Tento interferometr lze odvodit z Michelsonova tak, že obě ramena (měřící a referenční) sloučíme. Jedno výsledné rameno má dvě místa, kde se vlna zpět odráží (obr. 1.13). Prvním místem je rozhraní vlákno-okolní prostředí, tento odraz se nazývá Fresnelův odraz a odpovídá 4% intenzity původního signálu. Pak se vlna rozbíhá a dopadá na měřený objekt, od něhož se odráží či rozptyluje, čímž vzniká druhá vlna. Opět fáze této vlny závisí na vzájemné poloze měřeného objektu a konce vlákna. Poté analogicky, jako v případě Michelsonova interferometru dochází v odbočnici k interferenci těchto dvou vln, jejíž míru intenzity vyhodnotíme pomocí fotodetektoru.



Obr. 1.13 Schéma Fabry-Perotova interferometru [3]

Z toho zapojení lze odvodit vztah pro rozdíl fází vln I_M a I_R [3]:

$$\varphi = \frac{2\pi n}{\lambda} 2d \quad (1.13)$$

,kde

n = index lomu prostředí mezi měřeným objektem a koncem vlákna,

d = vzdálenost měřeného objektu od konce vlákna.

Sagnacův interferometr

Sagnacův interferometr (obr. 1.14) má na rozdíl od interferometru Michelsonova obě ramena tvořena tímž vlákem, kterým ovšem jdou obě vlny protisměrně. Světelná vlna vyzářená zdrojem záření postupuje soustavou bez změny až k odbočnici, kde se rovnoměrně rozdělí na dvě. Tyto dvě vlny se šíří opačnými směry, jedním vlákem vytvářející smyčku nebo cívku o N závitech. Bude-li tato smyčka (cívka) v klidu, projdou obě vlny smyčkou za stejnou dobu t [1].

$$t = \frac{2\pi R_s}{v} \quad (1.14)$$

,kde

R_s = poloměr smyčky,

v = rychlost šíření vln.

Nastane-li situace, kdy se smyčka začne otáčet úhlovou rychlostí ω dojde k tzv. Sagnacovu efektu. Vlně, která se šíří ve směru otáčení smyčky, bude trvat delší dobu smyčku oběhnout. Naopak vlna šířící se protisměru otáčení oběhne smyčku rychleji. Časový rozdíl Δt , kdy paprsky dorazí do cíle lze vyjádřit jako [1].

$$\Delta t = \frac{4\omega A}{v^2} \quad (1.15)$$

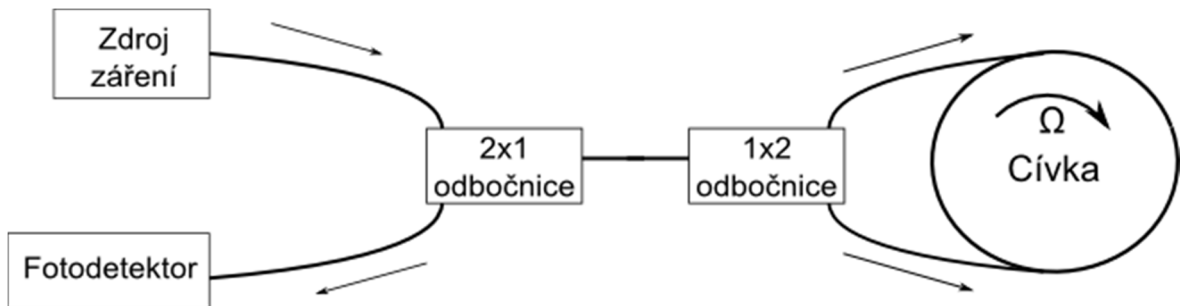
,kde

ω = úhlová rychlost,

A = plocha smyčky.

Fázový rozdíl jednotlivých vln vyjádříme jako [1].

$$\varphi = \omega \Delta t \quad (1.16)$$



Obr. 1.14 Princip Sagnacova interferometru [1]

Sagnacův interferometr se používá pro konstrukci optického gyroskopu.

2. Výběr komponent pro interferometry

Ve výše uvedené kapitole byl představeny základní typy interferometrů. Je důležité si uvědomit, že při postupu paprsku optickou soustavou (interferometrickým senzorem) dochází k celé řadě útlumů. Tyto útlumy mohou být způsobeny například nedokonalou odrazivostí zrcadel, rozptýlením části paprsku do volného prostoru, polarizací vln, špatným navázáním paprsku do vlákna apod. To má za následek snížení výkonu detekovaného interferovaného signálu na fotodetektoru a tedy špatného nebo v krajním případě nemožného odečtu interference. K docílení maximálních hodnot interference, je zapotřebí zvolit vhodné optické prvky.

2.1 Zdroje

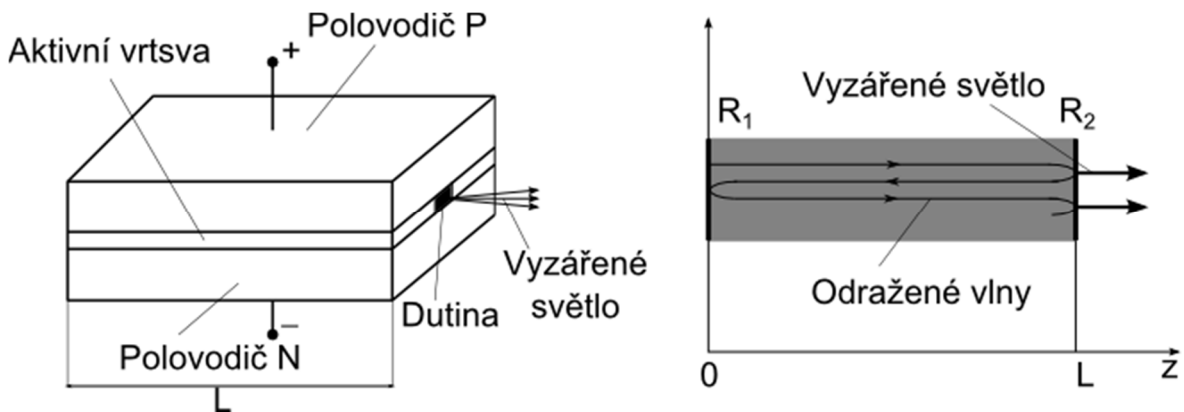
Aby bylo možné dosáhnout interference a jejího následného vyhodnocení, je nezbytné použití koherentních zdrojů záření, viz kap. 1.3. Polohy maxim a minim musí být v čase neměnné. Nejpoužívanějšími zdroji vysoce koherentního záření v optických aplikacích jsou Helium-neonový laser (HeNe) a polovodičové lasery známé jako laserové diody LD. Principiálně tyto zdroje pracují na stejném způsobu, tedy stimulované emisi fotonů z aktivního prostředí.

Laserová dioda má podstatně odlišné parametry od plynových či pevnolátkových laserů, zejména větší rozbíhavost svazku a větší šířka spektrální čáry. Větší rozbíhavost svazku může způsobit problém při navazování svazku do vlákna, toho lze vyřešit použitím tzv. "pigtail" laserových diod. Optické vlákno je od výrobce přímo napojeno na pouzdro LD a hermeticky uzavřeno.

K dosažení optimálních parametrů LD je zapotřebí použít speciálních budičů laserových diod. Budiče jsou integrované obvody, jež neustále korigují výkon dodávaný do diody v závislosti na jejím stáří, změně pracovní teploty apod.

2.1.1 Laserové diody (LD)

Doposud nejpoužívanějším typem je LD vyzářující z hrany. Dioda je tvořena přechodem PN a aktivní vrstvou, v níž je vytvořena dutina, která slouží jako vlnovod. Obdobně jako u laseru je docíleno stimulované emise fotonů a zesílení záření optickým rezonátorem. Rozlišujeme vertikální a horizontální rezonátory. V případě horizontálních rezonátorů dochází k odrazu světelných vln od odrazivých ploch na koncích dutiny s indexy odrazivosti R_1 a R_2 , viz obr. 2.1. Odražené vlny v aktivním prostředí (dutině rezonátoru) vyvolávají stimulovanou emisi. Hovoříme o diodách s Fabry-Perotovým rezonátorem FP.



Obr. 2.1 Vlevo- struktura laserové diody. Vpravo-dutina laseru s odrazivými plochami R_1 a R_2 [10]

Odražené vlny spolu v dutině rezonátoru interferují (destruktivně, konstruktivně) a zapříčiňují tak vzniku, ustáleného elektromagnetického pole do tzv. podélných a příčných vidů. Přičemž tyto vidy vznikají pouze na vlnových délkách λ_g .

$$\lambda_g = \frac{2L}{n_v} \quad (2.1)$$

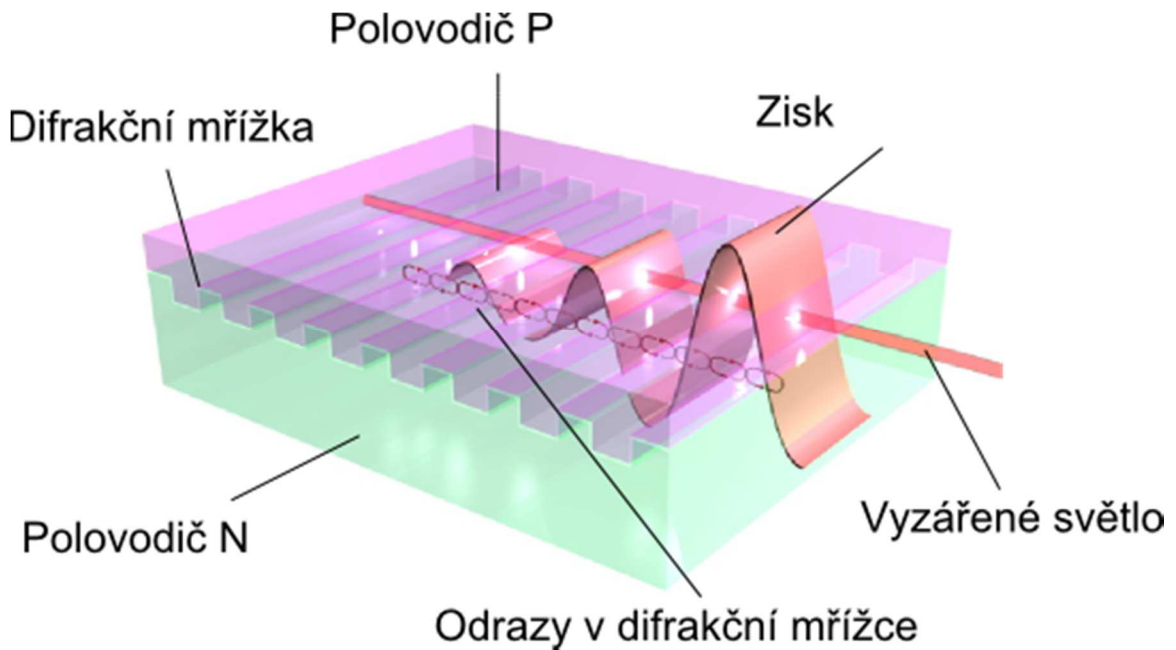
,kde

L = délka rezonátoru,

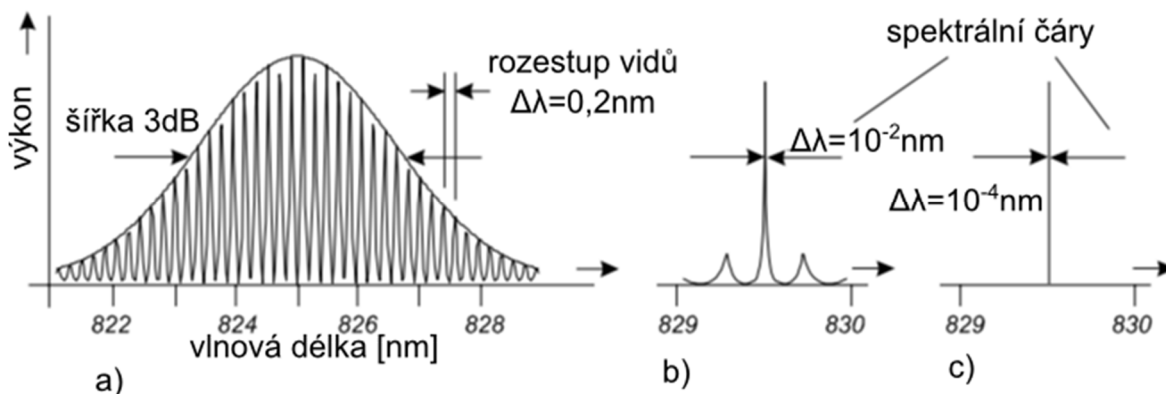
n_v = celé číslo (index rezonujícího vidu).

Ze zmíněného vyplývá, že spektrální šířka vyzářeného světla je závislá na počtu vidů rezonátoru. Snížení počtu vidů a tím i zúžení spektrální šířky LD, lze částečně dosáhnout zvýšením injekčního proudu.

Diody s užším spektrem využívají doplňkových rezonátorů. Mezi nejznámější představitelé patří diody DFB (Distributed FeedBack), které se hojně využívají především v telekomunikační technice (obr. 2.2). Rezonátor je realizován difrakčními mřížkami, které jsou naleptány přímo na povrch aktivní vrstvy. Odrazů je zde docíleno skokovou periodickou změnou indexu lomu tzv. Braggovým rozptylem. Oproti diodám s Fabry-Perotovým rezonátorem splňuje podmínku rezonance pouze jeden vid, čímž je zaručena minimální šířka spektra, jak ilustruje obr. 2.3.



Obr. 2.2 Struktura DFB diody (převzato z [11])



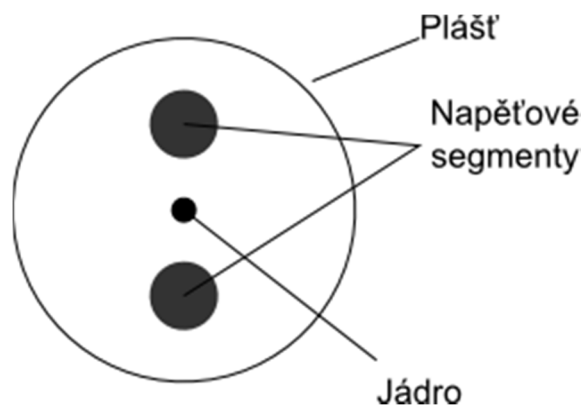
Obr 2.3. Spektra laserových diod:

a) dioda s malou selektivitou, b) dioda s Fabry-Perotovým rezonátorem, c) DFB laser (převzato z [12]).

2.2 Vlákna

U interferometrů používáme zásadně jednořadová vlákna. To z toho důvodu, že by každý vid interferoval s jinou periodou a měl by jinak rozložená maxima/minima. Navíc je třeba si uvědomit, že dominantní vid může být libovolně natočen, tedy mít libovolnou polarizaci, a k nejučinnější interferenci dochází jen při shodných polarizačních rovinách.

K udržení stálé roviny polarizace podél vlákna používáme speciální vlákna s uměle vytvořenou asymetrií (angl. PMF-Polarization Maintaining Fiber). Asymetrie lze dosáhnout eliptickým průřezem jádra nebo se symetrické jádro vystaví mechanickému pnutí pomocí tlakových segmentů, viz obr. 2.4. Tyto segmenty bývají zpravidla vyrobeny z materiálů s odlišnou roztažností, než má materiál optického vlákna a po vychladnutí vyvolají mechanické napětí a tím asymetrii indexu lomu v jádře vlnovodu.

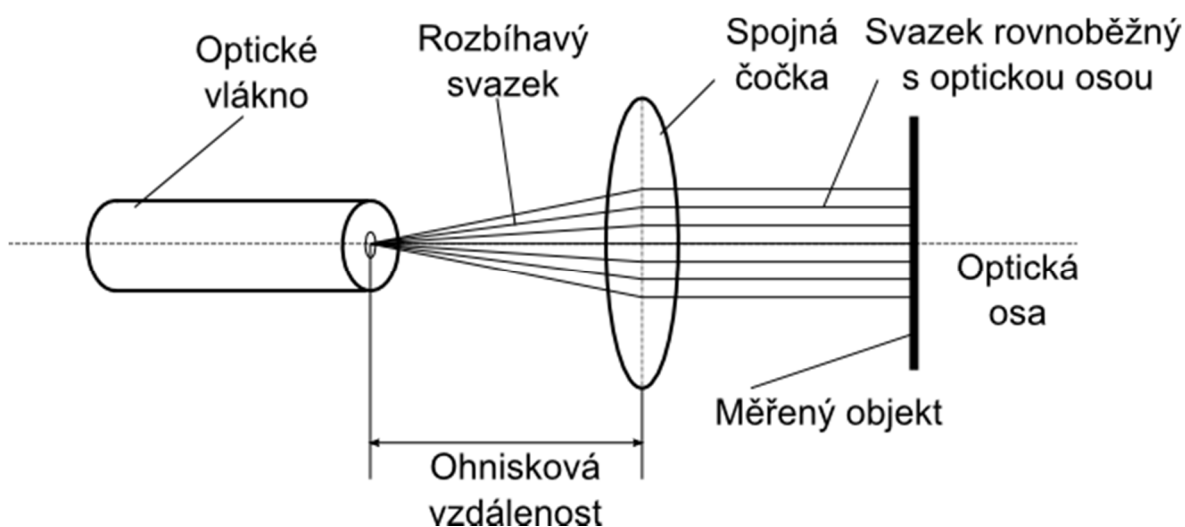


Obr. 2.4 Průřez vlákna zachovávající polarizaci optické vlny s napěťovými segmenty, typ PANDA

2.3 Kolimační optika

V případě použití vláken, kterými snímáme pohyby odrazivých předmětů, dochází na konci vlákna k rozbíhání (rozšiřování) vlny. V případě interferometru se zrcátkem by to znamenalo, že by měla odražená vlna podstatně větší průměr, než je průměr jádra vlákna a došlo by ke značným výkonovým ztrátám. Problém lze eliminovat tzv. kolimováním vystupujícího svazku pomocí kolimátoru.

Kolimátor představuje tenkou spojnou čočku umístěnou v pouzdře kolimátoru tak, aby se čelo optického vlákna nacházelo v ohniskové vzdálenosti čočky. Po průchodu svazku čočkou je zaručena minimální rozbíhavost svazku, viz obr. 2.5.



Obr. 2.5 Funkce kolimátoru jako spojné čočky k zamezení rozbíhavosti svazku vycházejícího z čela optického vlákna

2.4 Fotodetektory

V případě paprskové optiky lze použít v nejjednodušším případě stínítko a sledovat interferenční obrazce. U přesných měření použijeme fotodetektor se zesilovačem.

Nejběžnějším typem fotodetektorů je PIN fotodioda a lavinová fotodioda APD. Konstrukčně a materiálově jsou si tyto fotodiody podobné. Lavinová dioda navíc obsahuje vrstvu, kde dochází k násobení nosičů náboje, tím je zaručena větší citlivost. Výrobci příslušenství pro optické aplikace v dnešní době nabízí fotodiody PIN se zabudovaným zesilovačem v malém kompaktním pouzdře.

Typickým zapojením fotodiody je zapojení s transimpedančním zesilovačem, viz obr. 2.6. Dioda je polarizována závěrně a proud je úměrný optickému výkonu přes citlivost [A/W] [].

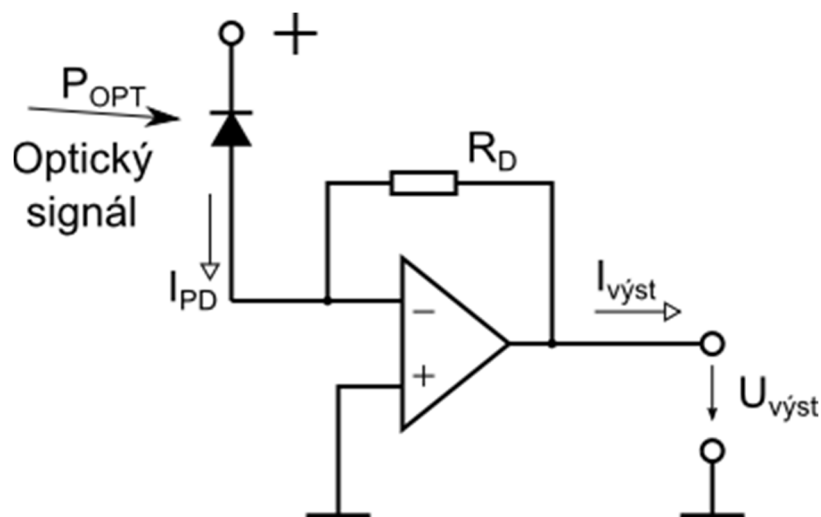
$$I_{PD}(t) = \mathfrak{R} \cdot P_{OPT}(t) \quad (2.2)$$

,kde

I_S = výstupní proud z fotodetektoru

\mathfrak{R} = citlivost fotodiody [A/W]

P_S = optický výkon dopadajícího na fotodetektor



Obr. 2.6 Zapojení diody s transimpedančním zesilovačem, odpor R_D určuje transimpedanci tohoto zapojení

Hodnotu výstupního napětí U_{vyst} lze určit jako

$$U_{vyst} = -R_D \cdot I_{PD} = -R_D \cdot \mathfrak{R} \cdot P_{OPT} \quad (2.3)$$

Snímá-li detektor optický svazek, pak vadí okolní světlo. Můžeme však zavést modulaci (přerušování) zdroje signálu a synchronní detekci. Pokud to není možné, lze před detektor umístit alespoň úzkopásmový filtr, který potlačí světlo mimo pásmo zdroje.

Zdroje, které nelze modulovat (typicky plynové lasery), lze přerušovat použitím tzv. chopperů, tedy rychle se otáčejících kotoučů s výřezy, které svazek světla přerušují, a opět zavedeme synchronní detekci.

3. Výběr interferometru podle aplikace

Doposud jsme předpokládali, že interferometry pracují pouze se zdroji vysoce koherentního záření. Existují však aplikace, kde interference od koherentního zdroje záření nemají žádoucí vlastnosti. Pak jde o tzv. nízko koherentní interferometry. Proč a kde se se tyto interferometry s nízko koherentními zdroji záření používají, bude vysvětleno v kap. 3.2.

3.1 Relativní měření polohy

Prakticky každý z představených interferometrů (s výjimkou Sagnacova) je schopen vyhodnocení změn polohy, tedy relativního měření. Jako nejjednodušší lze označit Fabry-Perotův, u kterého funkci referenčního i měřícího ramena zastává pouze jedno rameno. Odpadá problém počáteční konfigurace interferometru, kdy je zapotřebí nastavit stejnou délku měřícího a referenčního ramena, jak je tomu v případě ostatních interferometrů. Stejně délky ramen u těchto interferometrů lze docílit mikrometrickým posuvem, na který je připevněn referenční objekt. Při posuvu je sledována hodnota intenzity interferovaných vln fotodetektorem, pokud tato intenzita dosáhne maximální hodnoty, je délka ramen shodná, ovšem toto se opakuje po každé změně fáze o 2π radiánů, tedy měření je zatíženo jednoznačností. Z tohoto důvodu lze Fabry-Perotův interferometr označit jako nejvhodnější pro relativní měření délky.

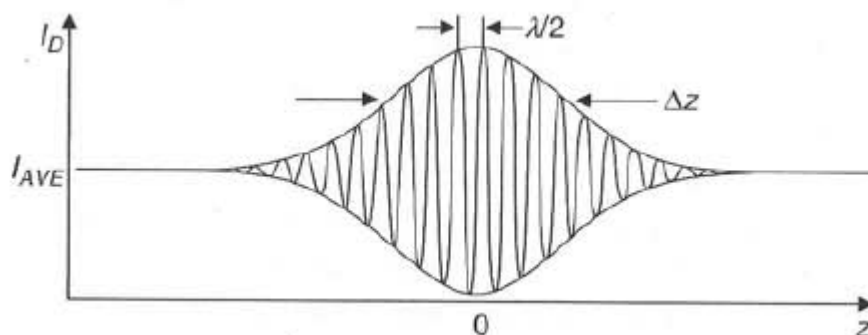
3.2 Absolutní měření polohy

Křivky detekovaného výkonu jako funkce fázového rozdílu jsou periodické. Není proto možno měřit absolutní polohu. Pokud však koherentní zdroj (laser) nahradíme zdrojem s velkou spektrální šířkou (nízko koherentní zdroj), docílíme aperiodického chování detekovaného výkonu při změně délek ramen. To by bylo normálně nevýhodou, při absolutním měření délky je to však velkou výhodou.

Proto, abychom dokázali vysvětlit princip absolutního měření vzdálenosti pomocí interferometru, lze použít jakýkoliv interferometr z doposud zmíněných. Nám opět

poslouží Michelsonův interferometr s nízko koherentním zdrojem světla. Ten se vyznačuje nejen velkou šířkou spektra, ale také krátkou koherentní délkou L_S , viz kapitola 1.3.

Při takto konfigurovaném Michelsonově interferometru lze na fotodetektoru pozorovat následující interferenci (obr. 3.1).



Obr 3.1 Interferenční signál detekovaný na fotodetektoru (převzato z [6])

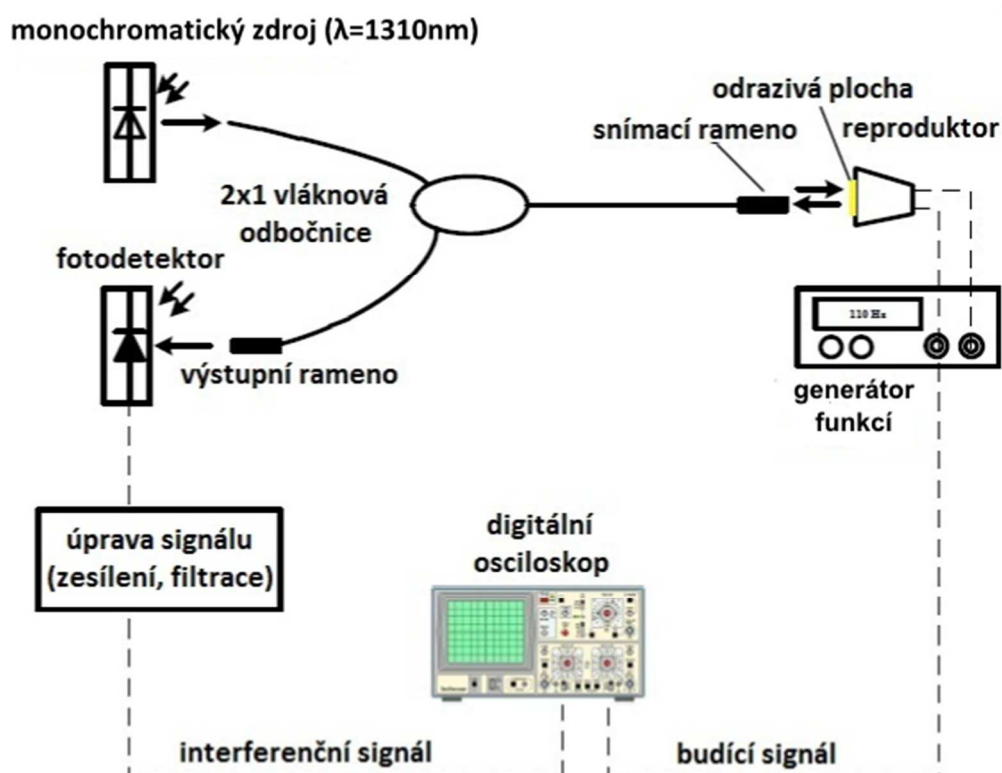
Na svislé ose je vynesena velikost intenzity interferovaného signálu I_D a na ose vodorovné rozdíl délek ramen z . Při stejné délce obou ramen $z=0$ dosahuje intenzita maximální hodnoty. Mění-li se délka ramen, střídají se opět minima a maxima, ovšem amplituda signálu (obalová křivka) klesá, a to tím rychleji, čím je zdroj méně koherentní. V tomto případě sledujeme právě obálku nikoli rychlé střídání extrémů. Z grafu je patrné, že interferometr dokáže rozlišit pouze určitou změnu vzdálenosti. Z toho vyplývá maximální citlivost interferometru měřící absolutní změnu polohy Δz [6].

$$\Delta z = \frac{L_S}{2} \quad (3.1)$$

Bude-li rozdíl délky měřícího a referenčního ramena delší než je polovina koherentní délky, je hodnota intenzity špatně rozeznatelná, proto se uvádí právě toto maximální rozlišení. Interferometr se používá pro měření vzdáleností ve spatně dostupných místech (dutiny, otvory), kdy nastavíme délku referenčního ramena na maximální interferenci a podle ní odvodíme délku ramena druhého.

4. Provedení konkrétních interferometrů

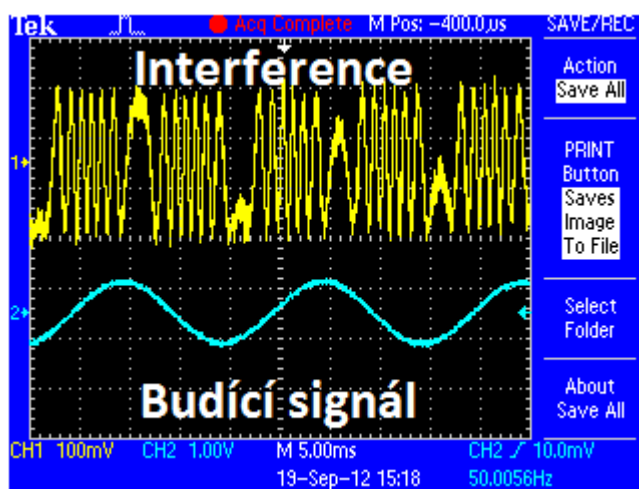
Učebnicovou ukázkou interferometru na měření relativního posunu najdeme v článku [3]. Je v něm popsána konfigurace vláknového Fabry-Perotova interferometru pro měření malých vibrací s následným vyhodnocením, viz obr. 4.1. Měřeným objektem v tomto případě byly kmity membrány reproduktoru, jehož buzení zajišťoval generátor funkcí. Autoři zkoušeli různá nastavení tohoto generátoru a tedy různá kmitání membrány.



Obr. 4.1 Schéma zapojení měřící úlohy (převzato z [3])

Nejdříve byl reproduktor napájen harmonickým signálem o velikosti amplitudy $U=1\text{V}$ a měnil se rozsah frekvence od $f=10\text{-}500\text{Hz}$. V druhém kroku byla konstantně nastavena hodnota frekvence na $f=50\text{Hz}$ a velikost amplitudy se měnila od $0,3\text{V}$ do 3V .

V obou těchto krocích byly hodnoty interferovaného signálu sledovány na osciloskopu. Průběh interference lze vidět na obrázku 4.2.



Obr. 4.2 Průběh signálu na osciloskopu (převzato z [3]):
 - modrý průběh budící signál membrány reproduktoru
 - žlutý průběh interferenční signál

Z počtu maxim/minim interferovaného signálu lze následně učit míru vychýlení d měřeného objektu dle vztahu [3].

$$d = \frac{N\lambda}{2} \quad (4.1)$$

,kde

N = počet maxim/minim interference,

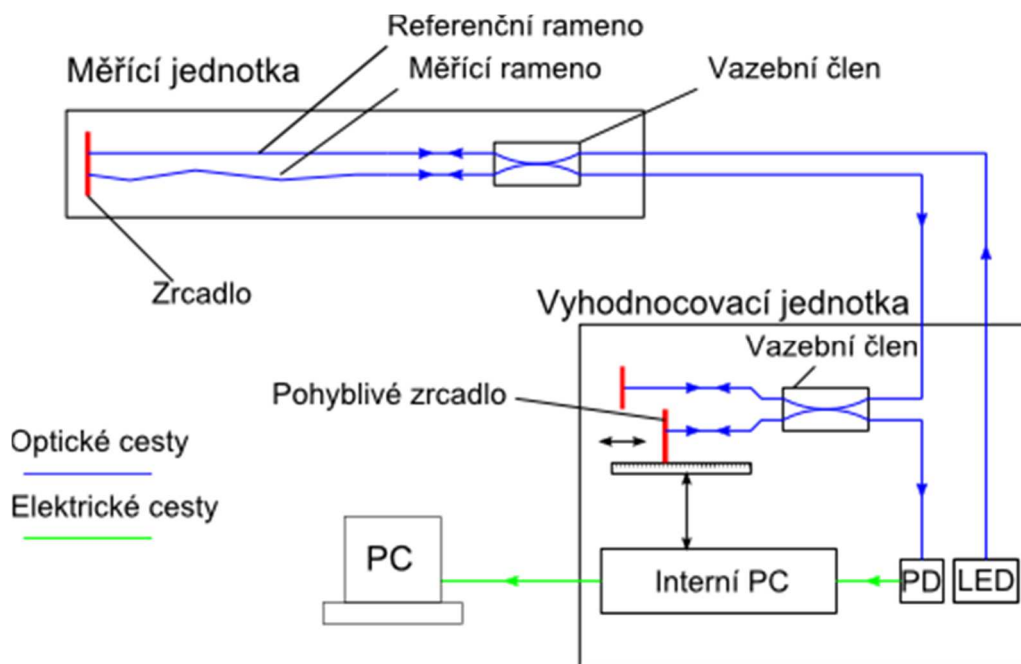
λ = vlnová délka.

V tomto měření bylo možné zaznamenat výchylky reproduktoru od $0,66\mu\text{m}$ do $15,06\mu\text{m}$. Dle laborantů by bylo možné dosáhnout lepších výsledků, avšak měření limitovaly mechanické vlastnosti reproduktoru. Ten díky svým malým rozměrům nedosáhl většího vychýlení a při vyšších frekvencích se amplituda kmitání snižovala.

4.1 Interferometry ve stavebnictví či budovách

V současné době se interferometrické senzory používají ve stavebnictví především jako senzory pro měření deformací konstrukcí (angl. Structural health monitoring). Nejpoužívanějším typem senzoru měřící deformaci konstrukcí, jehož princip vychází z Michelsonova interferometru s nízko koherentním zdrojem záření, je senzor SOFO (fr. Surveillance d'Ouvrages par Fibres Optiques), viz obr. 4.3 [7].

Senzor tvoří dvě hlavní části, měřící a vyhodnocovací jednotka. Z vyhodnocovací jednotky je nízko koherentním zdrojem světla (LED dioda) vyzařováno světlo, které je pomocí optických vláken přivedeno k měřící jednotce, kde dochází pomocí vazebního členu k jeho rozdělení do měřícího a referenčního ramena. Měřící rameno je pevně přikotveno k měřené konstrukci či je součástí konstrukce, např. zalito do betonu. Referenční rameno je položeno volně, avšak v těsné blízkosti druhého ramena za účelem teplotní kompenzace. Vlivem deformací konstrukce, chátání, tíhového zatížení, mechanického namáhání dochází zároveň k deformaci měřícího ramene, čímž je způsobena změna jeho délky. Ve vazebním členu dochází k interferenci signálů, která je vedena zpět do vyhodnocovací jednotky. Interference zde není rovnou vyhodnocena fotodetektorem, ale je kompenzována a porovnávána s nulovou hodnotou, která byla nastavena při instalaci senzoru. Kompenzace je docílena druhým Michelsonovým interferometrem (první Michelsonův interferometr je tvořen měřící jednotkou), kde dochází k posuvu jednoho z ramen tak, aby byla detekována stejná intenzita interference jako při instalaci senzoru. Vyhodnocuje se tedy změna polohy onoho ramena. Kompenzace je zde zavedena z důvodu zvýšení měřitelného rozsahu interferometru, neboť jak bylo řečeno v předchozí kapitole, nízko koherentními interferometry lze změřit maximální délku jen pár mikrometrů. S kompenzací tak lze dosáhnout maximálního měřitelného rozsahu 50mm [7].



Obr. 4.3 Schéma senzoru SOFO [8]

Výhodou senzoru je především vysoké rozlišení, téměř bezúdržbový provoz a dlouhodobá stabilita. Navíc výrobci umožňují připojit až 100 měřících jednotek pro jednu vyhodnocovací jednotku, čím lze zaručit monitorování celé stavební konstrukce či jednotky. Typickými aplikacemi těchto senzorů jsou mosty, památkové objekty, výškové budovy, tunely apod.

II. Praktická část

5. Návrh paprskového Michelsonova interferometru

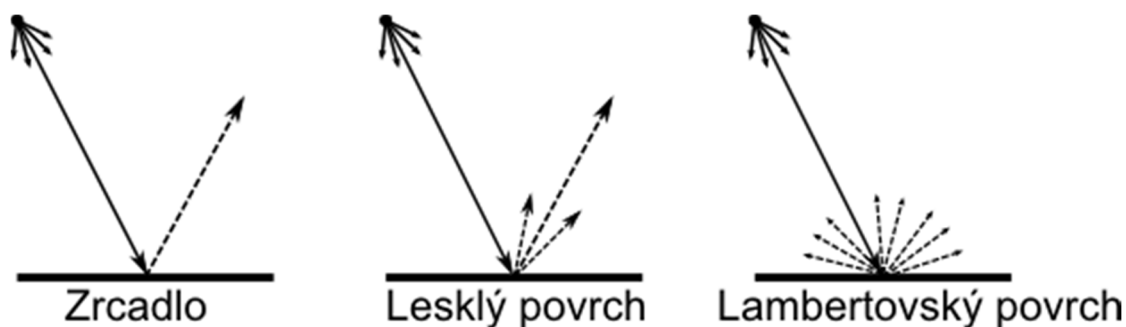
Toto první experimentální uspořádání má za úkol demonstrovat vlastnosti typického paprskového interferometru Michelsonova typu s využitím červeného HeNe laseru. Měřeným objektem bude zrcátko či odrazný cíl, který se bude pohybovat v řádu jednotek vlnových délek pomocí piezoposuvu. Tento posuv může simulovat prohýbání či deformace reálné stavební konstrukce. Je možné využití i pro měření vibrací malých amplitud.

V laboratorních podmínkách se staví interferometry se zrcátky v obou větvích. Tím je dosaženo vysokého odrazu, ovšem je třeba zrcátka přesně úhlově nastavit (obvykle dvěma mikrometrickými šrouby, jedním v rovině vodorovné, druhým v rovině svislé – v angl. jazyce tzv. kinematic mount). Takový úchyt s mikrometrickým úhlovým nastavením zobrazuje obr. 5.1.



Obr. 5.1 Kinematický úchyt zrcátka od firmy Thorlabs (převzato z [13])

V praxi, by při měření takové uspořádání vyžadovalo přesné nastavení, které však není možné, proto se nabízí myšlenka využít materiály s částečným rozptylem (extrémem je lambertovský rozptyl do celého poloprostoru), viz obr. 5.2.



Obr. 5.2 Úhlové závislosti odrazu a rozptylu různých typů materiálů

V kapitole 5.4 pak bude provedeno měření dvou vytipovaných materiálů na tuto úhlovou závislost. Vedle zrcadla byla použita páska z reflexní vesty (vynikající lambertovsky rozptylující materiál, který tedy není třeba směřovat) a také pocínovaný plech, který má vedle odrazu určitý, úhlově omezený rozptyl a proto také snižuje nároky na přesné směřování

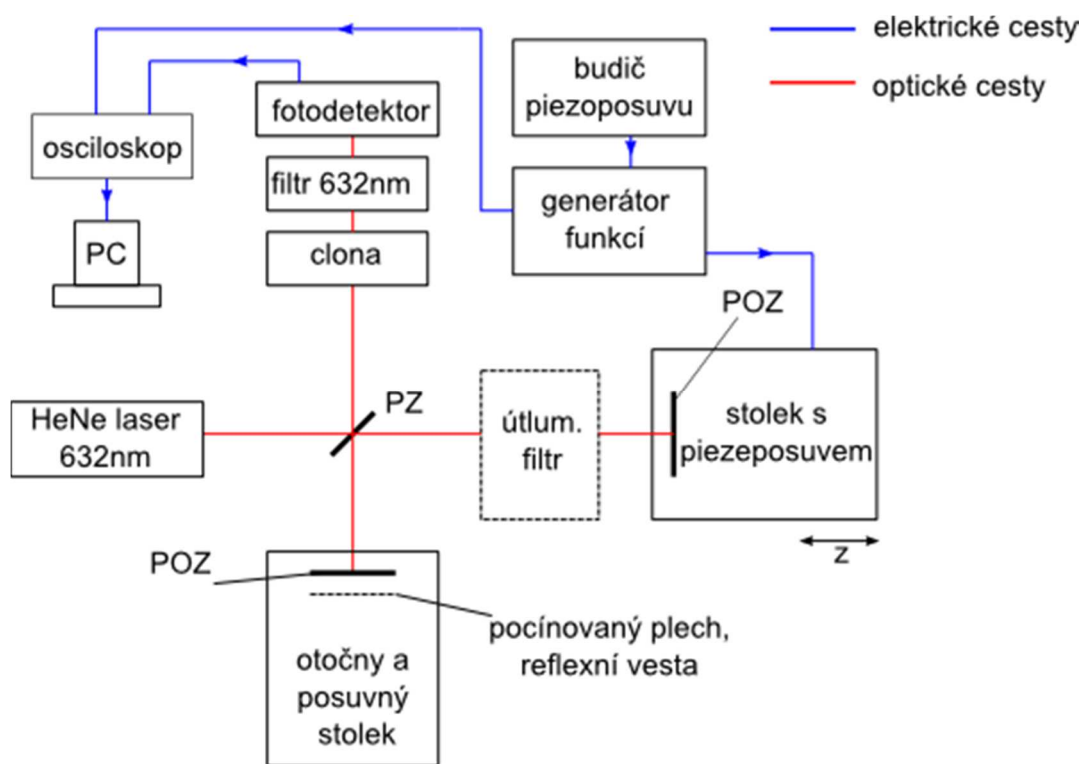
5.1 Popis měřící soustavy

Jako zdroj koherentního optického záření byl použit HeNe laser, vyzařující světlo o vlnové délce 632nm. Toto záření vstupuje do polopropustného zrcadla, kde se rozdělí do referenční a měřící větve. Referenční větev byla zakončena pevným zrcadlem, měřící větev byla zakončena zrcadlem umístěným na stolku s piezoposuvem (imitujícím např. prohýbání stavební desky apod.). Piezoposuv byl připojen ke generátoru funkcí přes budič. Používali jsme buzení pilovým signálem a signálem harmonickým.

Následně dochází k odrazu záření od obou zrcadel zpět k polopropustnému zrcadlu, kde spolu navzájem interferují a vzniklá interference je dále vedena směrem k fotodetektoru. Před fotodetektorem je umístěna nastavitelná clona, jejímž průřezem vybereme jen určitou část dopadajícího záření a spektrální filtr, který propustí pouze záření na vlnové délce HeNe laseru (632nm). Malým průřezem clony zamezíme průchodu nežádoucích odrazů do fotodetektoru, které vznikly průchodem záření měřící soustavou. Fotodetektorem je optický signál zpracován a transformován na signál elektrický, který je následně zobrazen na osciloskopu. Ke zpracování signálu je osciloskop připojen k počítači, kde lze data ukládat a vyhodnocovat.

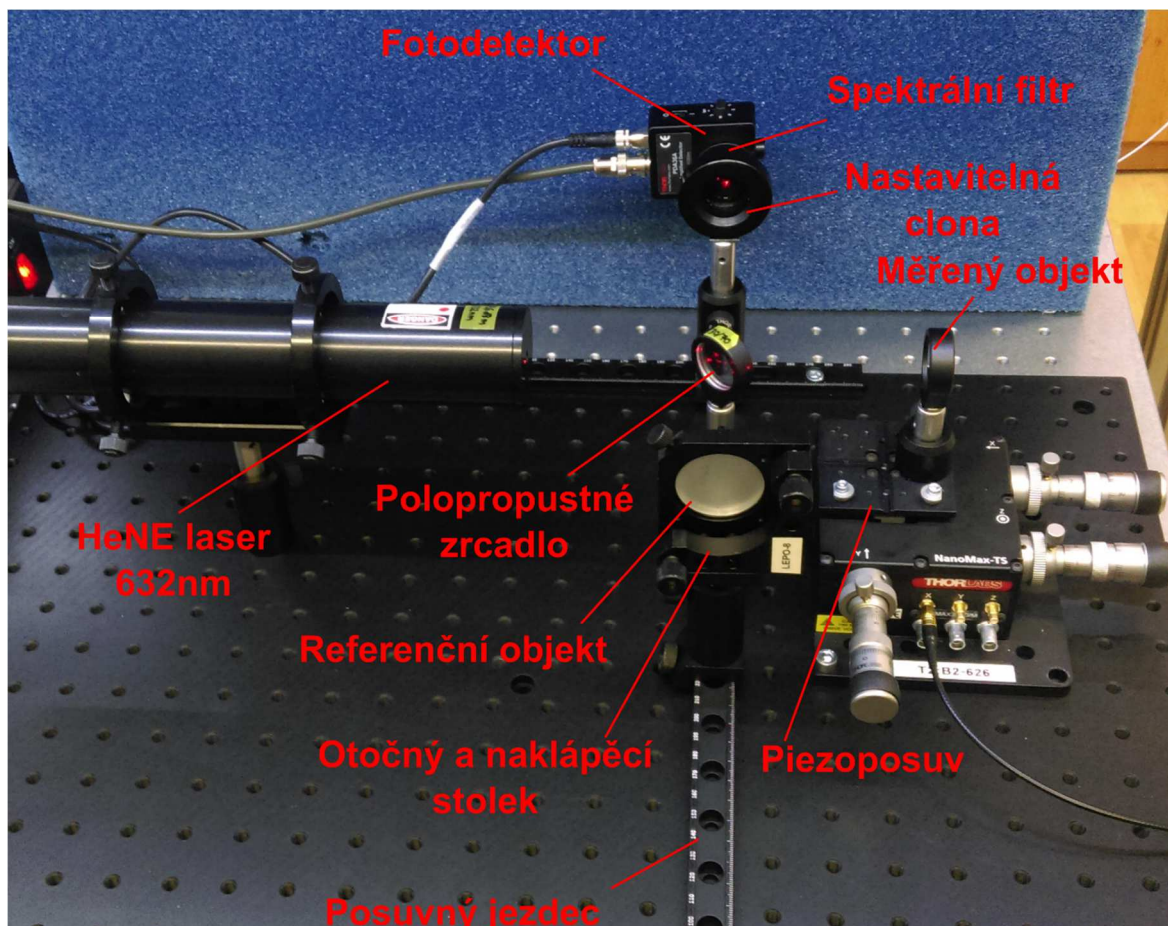
V dalším krocích, kdy je plně odrazivé zrcadlo referenční části nahrazeno pocínovaným plechem a páskou z reflexní vesty, je nutné do měřicího ramena umístit útlumový filtr. To je z toho důvodu, že oba tyto materiály rozptylují odražené záření do více směrů a k fotodetektoru dojde pouze část signálu. Intenzita záření měřicího ramena by byla několikanásobně větší a tím by docházelo téměř k nedetekovatelné interferenci.

Celá měřicí soustava, viz obr. 5.3, je umístěna na antivibračním stole, který omezuje vnější negativní vlivy, jako jsou např. otřesy budovy apod. Seznam použitých přístrojů a komponent je uveden v příloze A.



Obr. 5.3 Schéma zapojení měřicí soustavy; Červeně jsou označeny optické cesty, modře elektrické cesty. Čárkované komponenty jsou použity v druhém a třetím měření pro použití pocínovaného plechu a reflexní vesty jako referenčního objektu.

Ukázku reálného uspořádání měřicí soustavy Michelsonova paprskového interferometru uvádí obr. 5.4.



Obr. 5.4 Uspořádání měřicí soustavy s Michelsonovým interferometrem

5.2 Nastavení měřicí soustavy

Před každým měřením je velice důležité optické komponenty geometricky slícovat. Každý z komponentů je upevněn v držácích, pomocí nich lze hrubě nastavit výšku a otočení dané komponenty. Měřicí a referenční objekty jsou upevněny na stolcích, kterými lze pomocí mikrometrických šroubů jejich polohu a natočení nastavit velice přesně. Nastavení komponent probíhalo následovně:

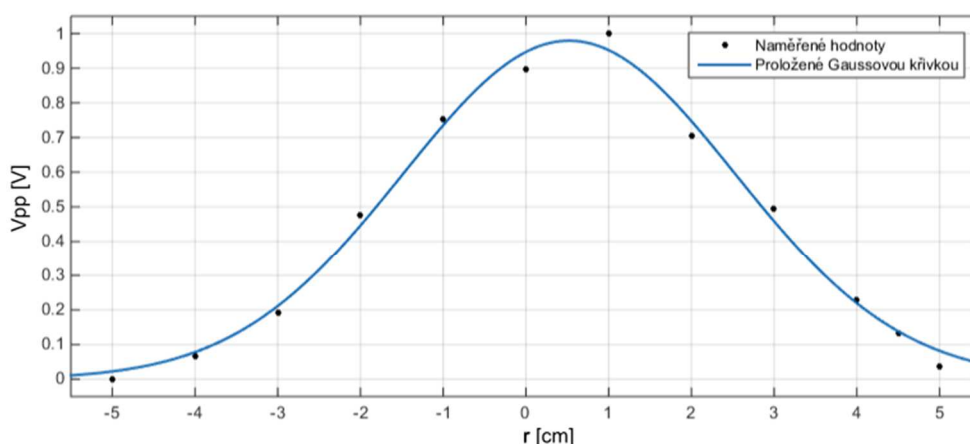
- 1) Nastavení přibližné (hrubé) výšky a polohy komponent.
- 2) Zastínění jednoho z ramen např. referenčního ramena.
- 3) Umístění stínítka místo fotodetektoru a zaznamenání dopadajícího záření na stínítko.
- 4) Zakrytí druhého ramene a nastavení polohy objektu tak, aby se místo dopadu paprsků na stínítko shodovalo s místem dopadu paprsků předchozích.

- 5) Odkrytí obou ramen, pokud byly místa dopadajících paprsků nastaveny správně, bylo možné vidět při buzení piezoposuvu blikání či pulzování záření na stínítku (interferenci záření).
- 6) Následně bylo možné polohu zrcadel doopravit tak, aby intenzita pulzujícího záření byla co nejsilnější.
- 7) V posledním kroku bylo vyměněno stínítko za fotodetektor osazeným spektrálním filtrem a clonou.

5.3 Zjištění koherentní délky

Jak je popsáno v teorii, má každý zdroj svoji konečnou koherentní délku. Pokud se budou délky ramen lišit o více než tuto hodnotu, bude interference slabá či nezatelná. Proto bylo nutno tuto veličinu zjistit předtím, než budeme demonstrovat chování samotného interferometru.

Z osciloskopu byly odečítány hodnoty mezivrcholového napětí (V_{pp}), které odpovídají amplitudě interferencí, v závislosti na změně délky ramen interferometru, viz obr. 5.5. Hodnota v 0 na vodorovné ose představuje stejnou délku obou ramen, směrem vlevo se vzdálenost PZ a referenčního objektu zkracuje, směrem doprava vzdaluje.



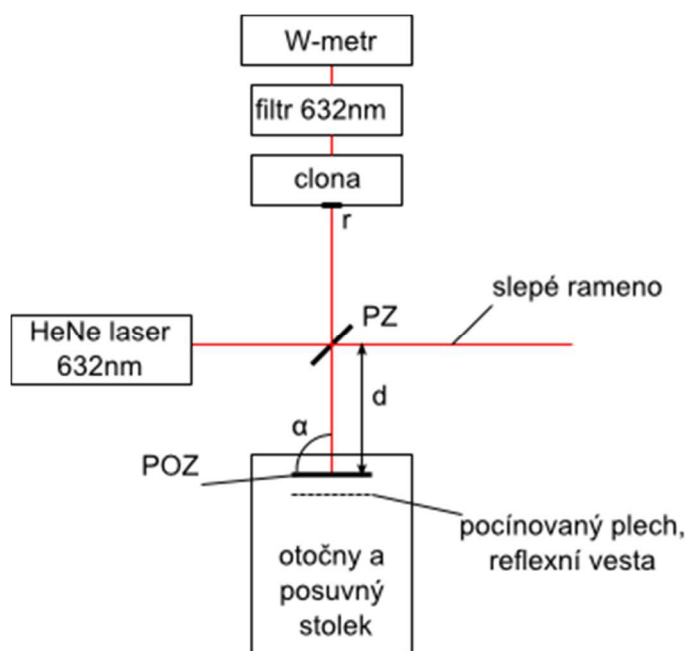
Obr. 5.5 Závislost detekované špičkové intenzity interferovaného signálu na rozdílu délek ramen interferometru

Měřením bylo zjištěno, že při rozdílu vzdálenosti obou ramen větším než 5cm nelze prakticky detekovat žádnou interferenci. Proto lze tuto hodnotu považovat za maximální délkový rozdíl ramen interferometru. Z toho vyplývá, že i koherentní délka zdroje $L_s=5\text{cm}$.

5.4 Zjištění úhlové závislosti odrazivosti materiálů

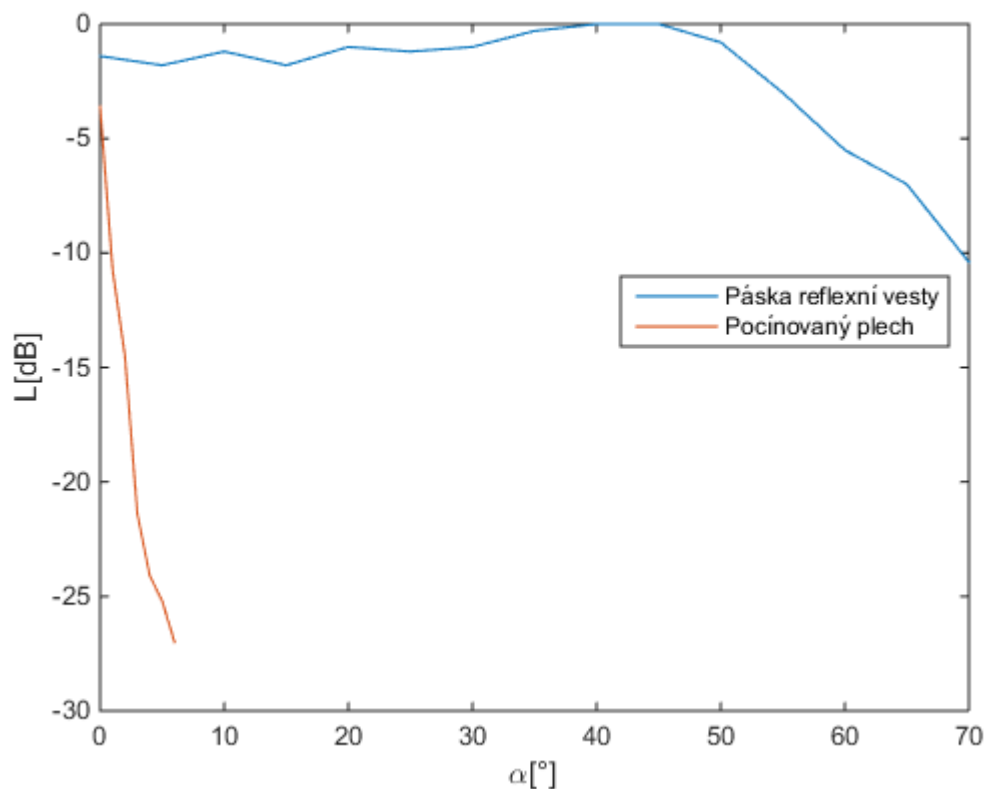
Pokud by v měřicím rameni bylo zrcátko, tak by docházelo k minimálnímu, téměř nulovému rozptylu odraženého záření. To, jak bylo výše zmíněno, může být nesnáží při směřování záření takového interferometru za použití v „terénu“. Zjednodušení realizace interferometru má dle našich předpokladů zajistit materiál s částečným či úplným rozptylem (do celého poloprostoru) záření. Jako materiál s částečným rozptylem byl vybrán pocínovaný plech a materiál z úplným rozptylem páska z reflexní vesty. Tímto měřením bude zjištěno, zdali se naše předpoklady shodují se skutečností, tedy zdali materiály rozptylují odražené záření a jak je toto rozptýlení závislé na úhlu dopadajících paprsků.

Měření bylo uskutečněno na zapojení Michelsonova interferometru se zastíněným měřicím ramenem a nahrazením fotodetektoru optickým wattmetrem, viz obr. 5.6.



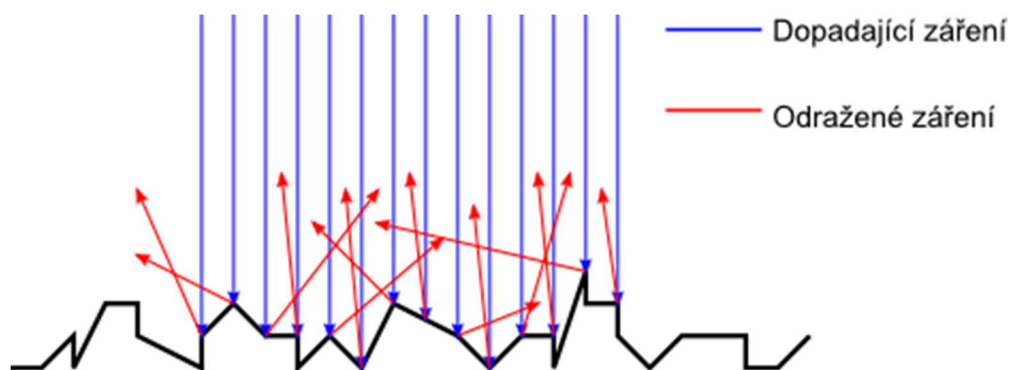
Obr. 5.6 Schéma zapojení pro měření úhlové závislosti odrazivosti materiálů

Vzdálenost referenčního objektu a PZ jsme nastavili na hodnotu $d=10\text{cm}$, průměr clony byl $r=1,8\text{mm}$. Pomocí otočného stolku jsme měnili úhel zrcadla vůči dopadajícímu záření (odklon od normály zrcátka) α a sledovali na wattmetru detekovaný útlum L , viz obr. 5.7.



Obr. 5.7 Změna detekovaného útlumu v závislosti na úhlu natočení objektu.

Z výsledků je patrné, že páska z reflexní vesty, je téměř lambertovská. Odráží záření do všech směrů se stejnou intenzitou a není téměř žádná závislost mezi úhlem natočení materiálu vůči dopadajícímu záření. To je dáno nehomogenní strukturou lambertovského povrchu, též v literatuře označovaný jako difúzní povrch, viz obr. 5.8.



Obr. 5.8 Řez lambertovským povrchem s vyznačeným přímě dopadajícím a všesměrově šířeným odraženým zářením

Tato vlastnost je výhodná, protože odpadá problémy při konfiguraci interferometru, kdy při použití zrcadla jako měřeného či referenčního objektu vyžaduje velice přesné nastavení. Naopak pocínovaný plech má vlastnosti lesklého povrchu, vykazuje částečný odraz a částečný, ovšem úhlově dosti omezený rozptyl. Kolísání detekovaného výkonu připisujeme nehomogenitám v použitém materiálu.

5.5 Algoritmus měření s interferometrem a postup vyhodnocení

Osciloskopem jsou zaznamenávány hodnoty intenzity interferovaného signálu a průběh budícího napětí piezoposuvu. Tato data jsou ukládána do počítače, kde k jejich následnému zpracování použijeme výpočetního prostředí programu Matlab. Výpočetní algoritmus je uveden, jako *Příloha B*. Postup výpočtu znázorňuje vývojový diagram, viz obr. 5.9.

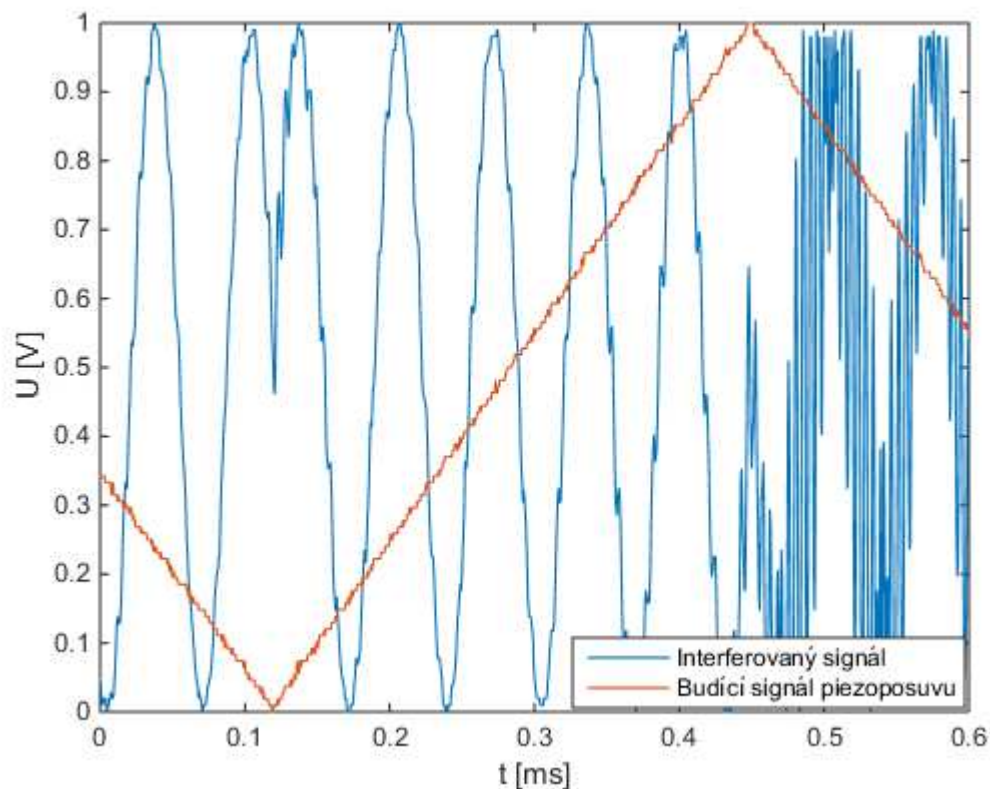


Obr. 5.9 Vývojový diagram výpočetního procesu v programu Matlab

..

Záznam průběhu signálu z detektoru

Průběh signálů z osciloskopu je v PC uložen do souboru, který je následně importován do programu Matlab v podobě sloupcových vektorů. Ukázkou vložených průběhů do výpočetního programu Matlab ilustruje obr. 5.10.



Obr. 5.10 Průběh signálu zaznamenaný osciloskopem, modrý průběh-interference, červený průběh-budící signál piezoposuvu

Úprava vstupních hodnot

Pro zjednodušení výpočtu fáze z interferenční rovnice (1.6), normujeme hodnoty intenzity interferovaného signálu dle lineární interpolace do rozsahu intenzity od 0 do 1. Tím lze interferenční rovnici upravit do následující tvaru.

$$I_{nor} = \cos^2\left(\frac{\varphi}{2}\right) \quad (6.1)$$

Vyhlazení signálu

Předtím, než budeme schopni vypočítat fázi interferovaného signálu, musíme tento signál vyhladit. To z toho důvodu že změřený signál má nepravidelný průběh hodnot oproti ideálnímu signálu (vliv nežádoucích vnějších vlivů). Nebylo by dále možné s těmito hodnotami pracovat, proto pomocí funkce „fastsmooth“ jež je ve výbavě programu Matlab, průběhy vyhladíme a zaručíme tak pravidelný průběh.

Výpočet fáze

Vyjádříme-li si φ z předchozího vztahu dostáváme rovnici 6.2.

$$\varphi = 2 \cdot \arccos(\pm \sqrt{I_{nor}}) \quad (6.2)$$

Kvůli periodickému charakteru funkce je výsledek nejednoznačný. Správný argument vybereme tak, aby byla dodržena kontinuita fáze.

Omezení výpočtu pro jeden směr posuvu

Tento krok je zařazen z důvodu zjednodušení výpočtu. Předpokládáme, že při vibračním pohybu piezoposuvu, který je buzený harmonickým signálem, bude druhá perioda stejná.

Výpočet vychýlení piezoposuvu

Výpočet vychýlení vychází ze vztahu 4.1, kdy jsme schopni zjistit, za znalosti vlnové délky světelného zdroje, o kolik se měřící rameno prodloužilo za jednu periodu interferovaného signálu. Počet period a tím i vychýlení piezoposuvu určíme z vypočtené fáze. Posuv piezoposuvu změřený interferometrem porovnáme s vychýlením piezoposuvu, jenž jsme určili pomocí jeho citlivosti [$\mu\text{m}/\text{V}$].

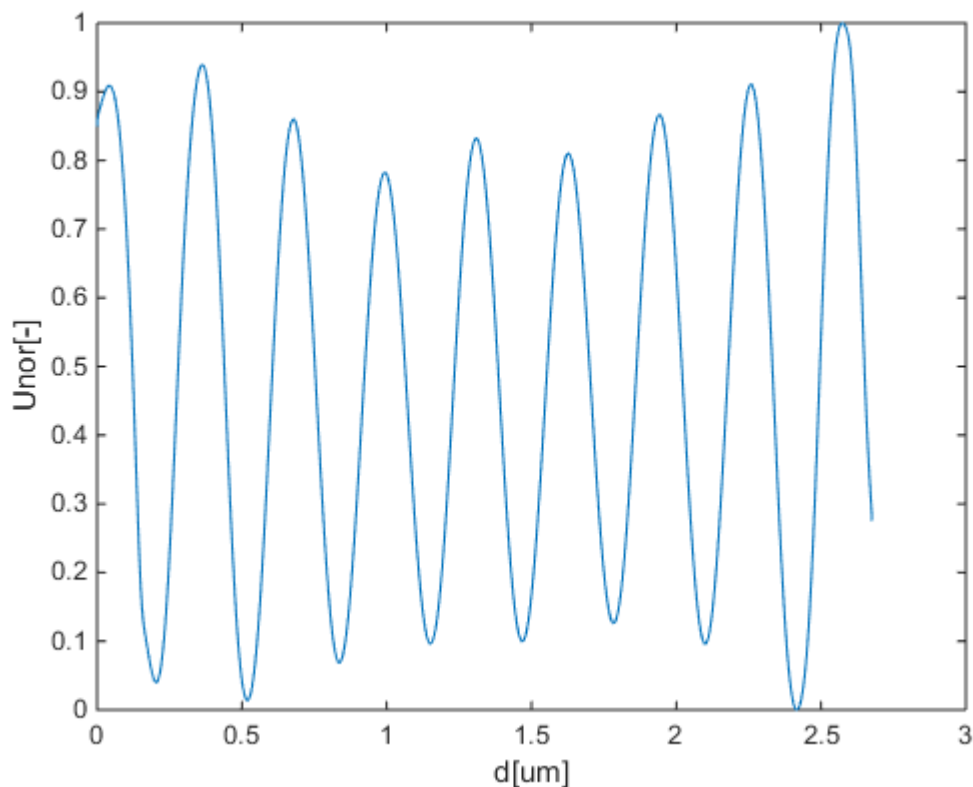
Stejným způsobem byly vyhodnoceny měření pro všechny druhy použitých odrazivých materiálů.

5.6 Závěr měření s Michelsonovým interferometrem

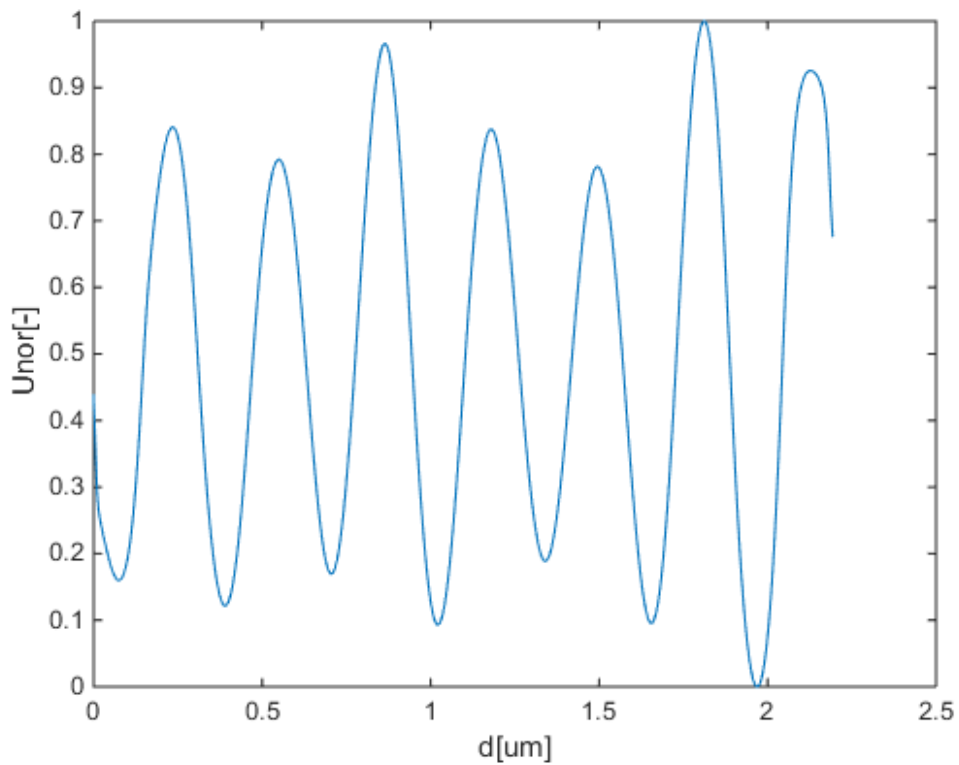
Michelsonovým interferometrem byly pro tři typy použitých odrazivých materiálů detekovány průběhy interferovaného signálu. Ukázkou interference, společně se zaznamenaným průběhem budícího signálu ilustruje obrázek 5.10 v předchozí kapitole. Po průchodu naměřených dat algoritmem, lze interference vyhodnotit v závislosti na míře posunu piezoposuvu, viz obr. 6.11-6.13. Přičemž hodnota napětí U_{nor} odpovídá normované intenzitě interference a posuvu pouze jedním směrem.

Na obrázcích si lze všimnout, že při použití pásky z reflexní vesty (obr. 5.11) a pocínovaného plechu (obr. 5.12) amplituda interference, oproti zrcadlu (obr. 5.13), kolísá. Tato změna amplitudy je dána nehomogenitami použitých materiálů. Nehomogenity jsou samozřejmě nežádoucí, ale interference je stále detekovatelná a v našem případě je pro výpočet posuvu mnohem důležitější znát její fázi, než její hodnotu.

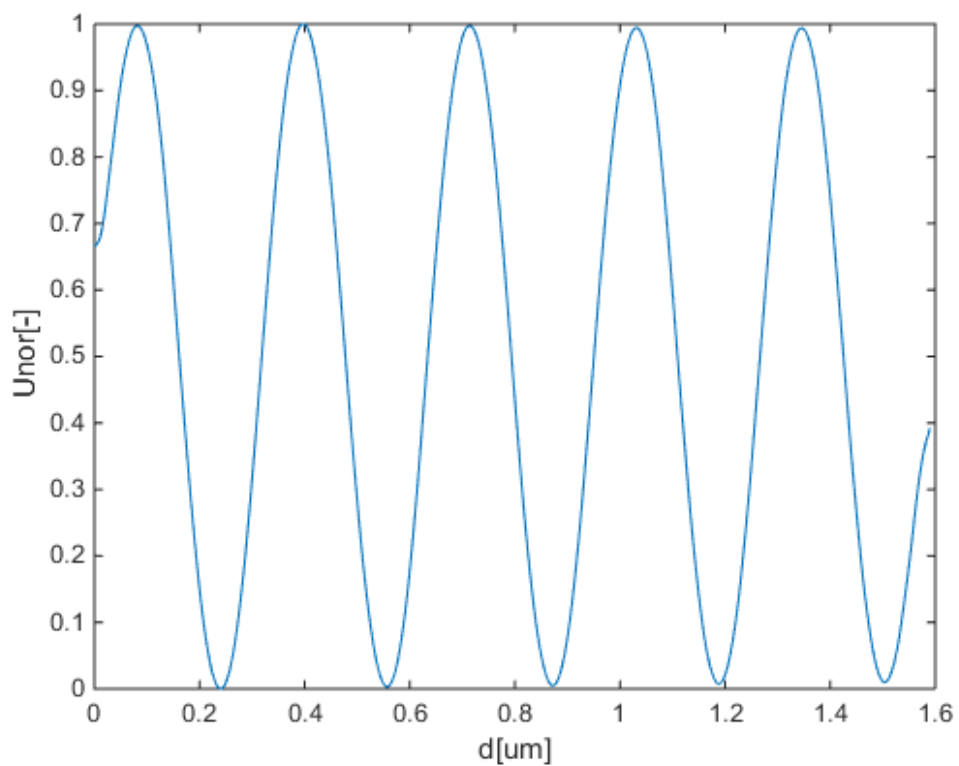
Z důvodu nastavení různých amplitud a charakteru budícího signálu (pilový či harmonický), pro každé měření, dochází k detekování různého posuvu piezoposuvu.



Obr. 5.11 Průběh interference, materiál: pásek reflexní vesty, budící signál piezoposuvu: *pila*



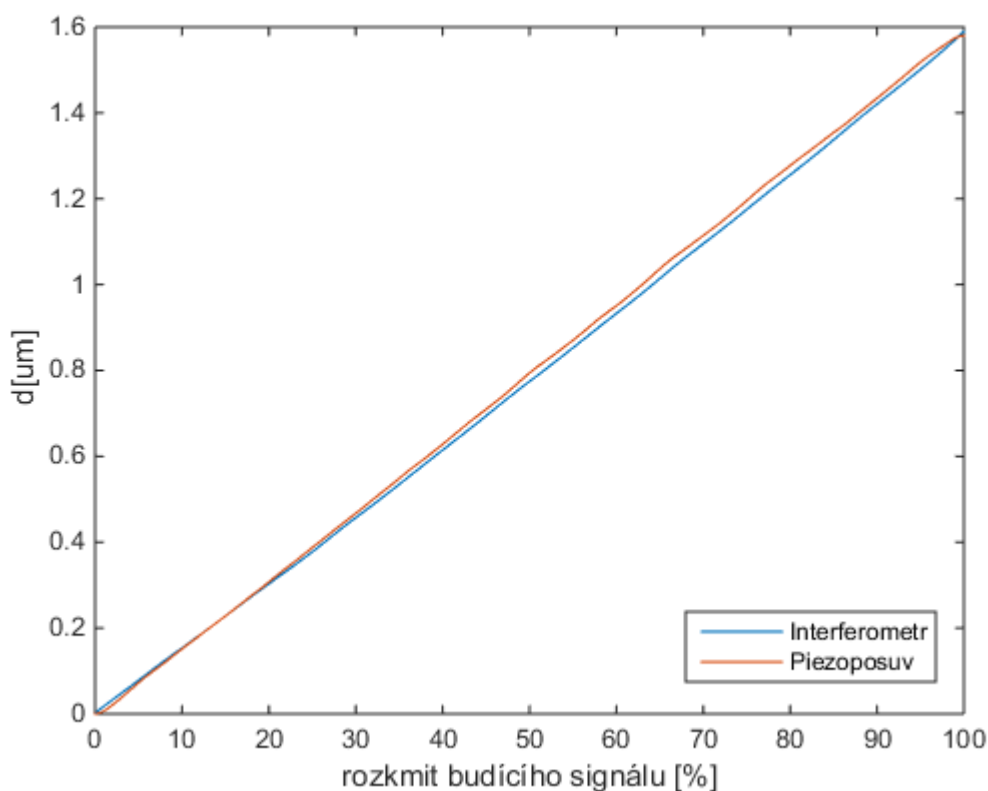
Obr. 5.12 Průběh interference, materiál: pocínovaný plech, budící signál piezoposuvu: harmonický



Obr. 5.13 Průběh interference, materiál: zrcátko, budící signál piezoposuvu: harmonický

Pro ověření, zdali je postup výpočtu algoritmu správný, zobrazíme společně vypočtený posun měřený interferometrem s posunutím piezoposuvu, které jsme určili na základě jeho citlivosti [$\mu\text{m}/\text{V}$]. Tato hodnota není udána výrobcem, proto jsme ji museli dopočítat ze změřených průběhů. Oba tyto průběhy jsou zobrazeny na obr. 5.14, kde červený průběh vyznačuje posunutí piezoposuvu a modrý průběh změřený posuv pomocí interferometru.

Z průběhů je patrné, že interferometrem změřené posunutí téměř odpovídá posunutí piezoposuvu. Nepatrný rozdíl těchto průběhů připisujeme hysterezi piezoposuvu. Ta je v počátku grafu zanedbána, neboť je měření omezeno pouze pro jeden směr a počítáme, že v počátku došlo k nulovému posunutí.



Obr. 5.14 Vyhodnocené posunutí piezoposuvu (modrý průběh-změřeno interferometrem, červený průběh-určení posuvu na základě citlivosti piezoposuvu)

Stejných výsledků dosáhneme i u ostatních dvou odrazivých materiálů, proto pro ověření funkce interferometru je zde uveden jen jeden příklad změřeného posunutí piezoposuvu.

Ze zjištěných údajů lze konstatovat, že takto konfigurovaný interferometr je schopný velice přesně měřit posunutí či vibrace objektu. I přesto, že je tento senzor citlivý na vnější nepříznivé vlivy, jako je náhlá teplotní změna, změna tlaku vzduchu v okolí senzoru apod., lze dosáhnout kvalitních výsledků.

6. Návrh Fabry-Perotova interferometru

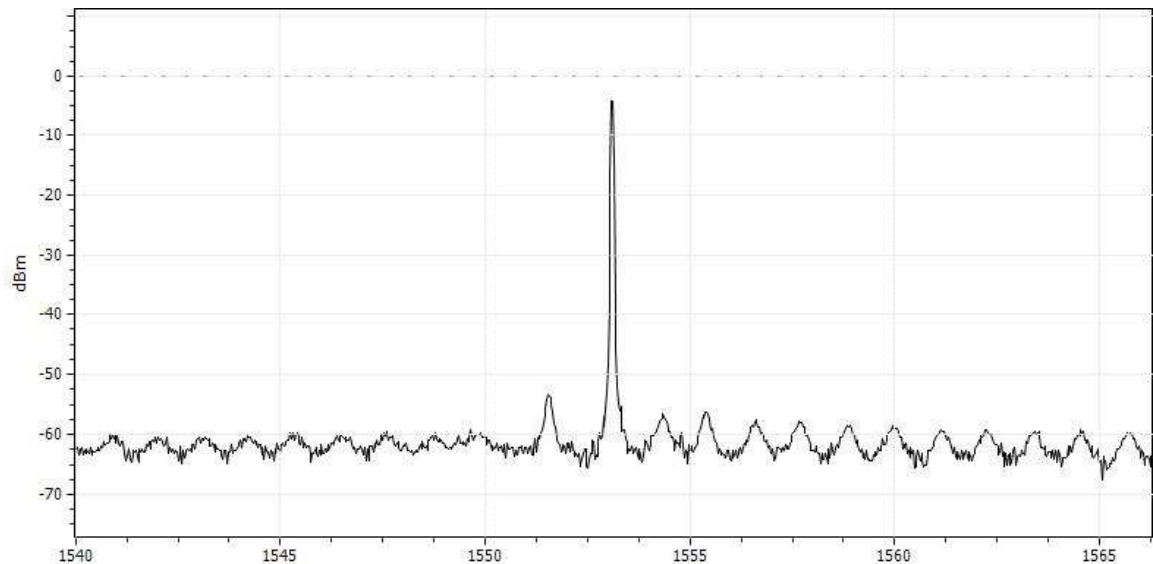
Předcházející kapitola představila typický interferometr s paprsky, proto bude jako druhý experiment ukázán poměrně jednoduchý, avšak plně funkční vláknový Fabry-Perotův interferometr.

Jak bylo zmíněno v kapitole 1.6, je Fabry-Perotův interferometr speciálním případem interferometru, kde funkci měřicího a referenčního ramena zastává pouze jedno rameno. Referenčního objektu u tohoto interferometru zastává konec vlákna ramene, kde díky Fresnelovu odrazu dochází k odrazu referenční vlny směrem k detektoru. Obdobně jako v předchozím měření bude posuv či vychýlení měřeného objektu zastávat piezoposuv.

6.1 Popis měřicí soustavy

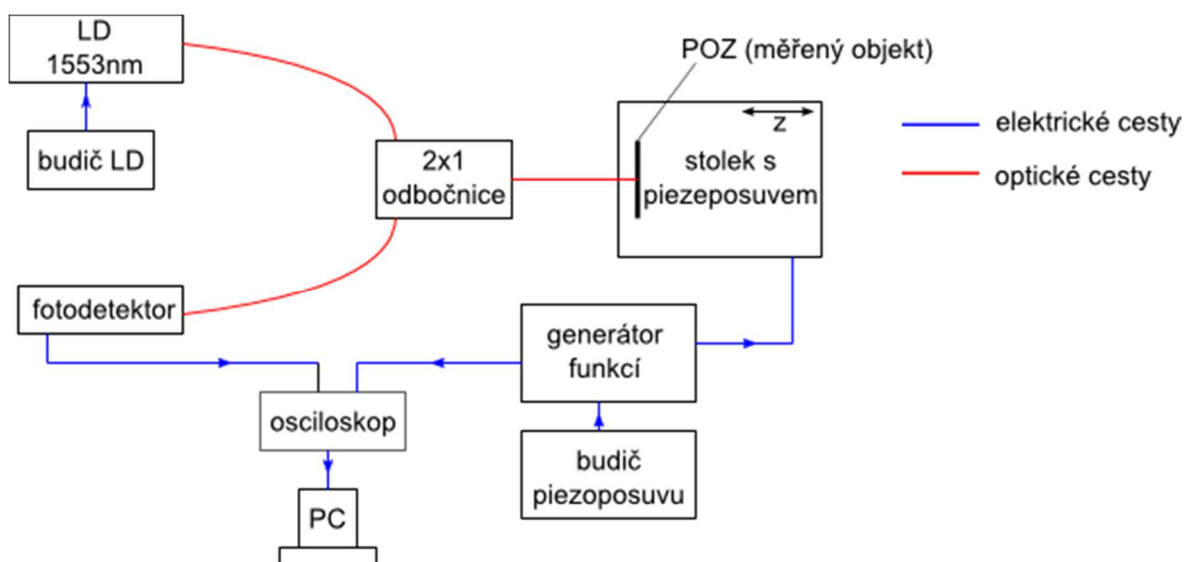
Aby bylo dosaženo nízké ceny dle zadání, byla použita laserová dioda typu DFB vymontovaná z modulu SFP (tyto moduly jsou masově používány pro datové komunikace a jejich cena je proto nízká). Moduly SFP jsou optické vláknové vysílače i přijímače v malém kompaktním pouzdře. V naší experimentální úloze byl použit SFP modul PHY1040s vyzařující na vlnové délce $\lambda=1550\text{nm}$, určený pro přenosové rychlosti 1,25Gb/s.

Namísto vnitřního budiče je použit samostatný budič Thorlabs LD1100, který vyniká přesnou stabilizací výkonu. Ukázkou spektra diody s tímto budičem uvádí obr. 6.1.



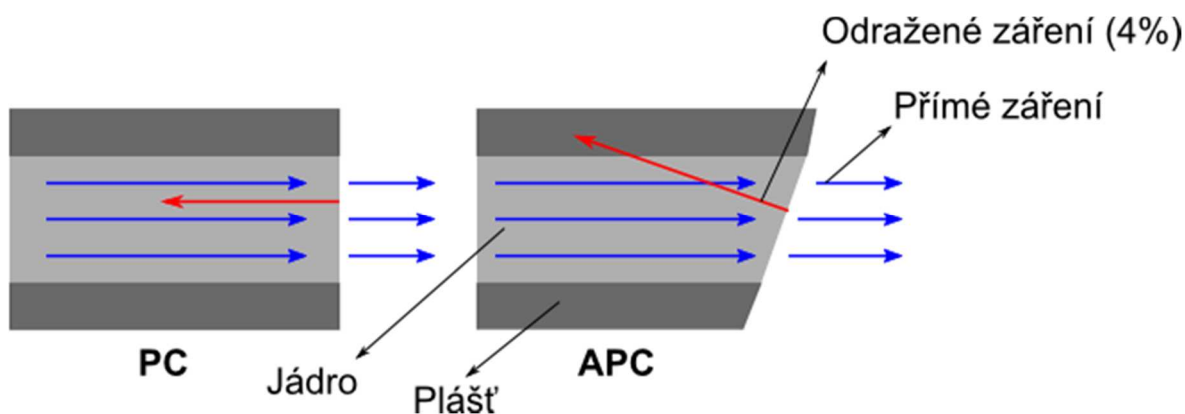
Obr. 6.1 Spektrum laserové diody

Budičem diody byla tedy napájena laserová dioda (LD) typu DFB vyzařující na vlnové délce $\lambda=1553\text{nm}$, pouzdro diody je osazené konektorem, proto lze záření velice snadno navázat do vlákna. K druhému konci vlákna je připojena 3dB odbočnice, odkud je polovina paprsku vedena do slepého ramena (nepotřebné rameno) a polovina svazku do ramena přímého, které plní funkci referenčního a měřícího ramena. Konec tohoto ramena je pevně upevněn na výškově a uhlově posuvném stojánku, tak aby vystupující záření z konce vlákna dopadalo kolmo na měřený pohybující objekt (zrcadlo). Následně jsou paprsky vzniklé Fresnelovým odrazem a odrazem od zrcadla navázány do vlákna, odkud postupují dále směrem k odbočnici. Záření se zde opět rozdělí v poměru 50/50 směrem ke zdroji, kde působí spíše nepříznivě (rozladění diody- nutno korigovat budičem diody) a směrem k detektoru, jímž vyhodnotíme intenzitu interferovaného záření. Fotodetektor společně s budičem piezoposuvu je připojen k osciloskopu, kde lze data zobrazit a uložit pro následné zpracování. Schéma měřícího obvodu je na obr. 6.2. Seznam použitých součástek a vybavení je v Příloze B.



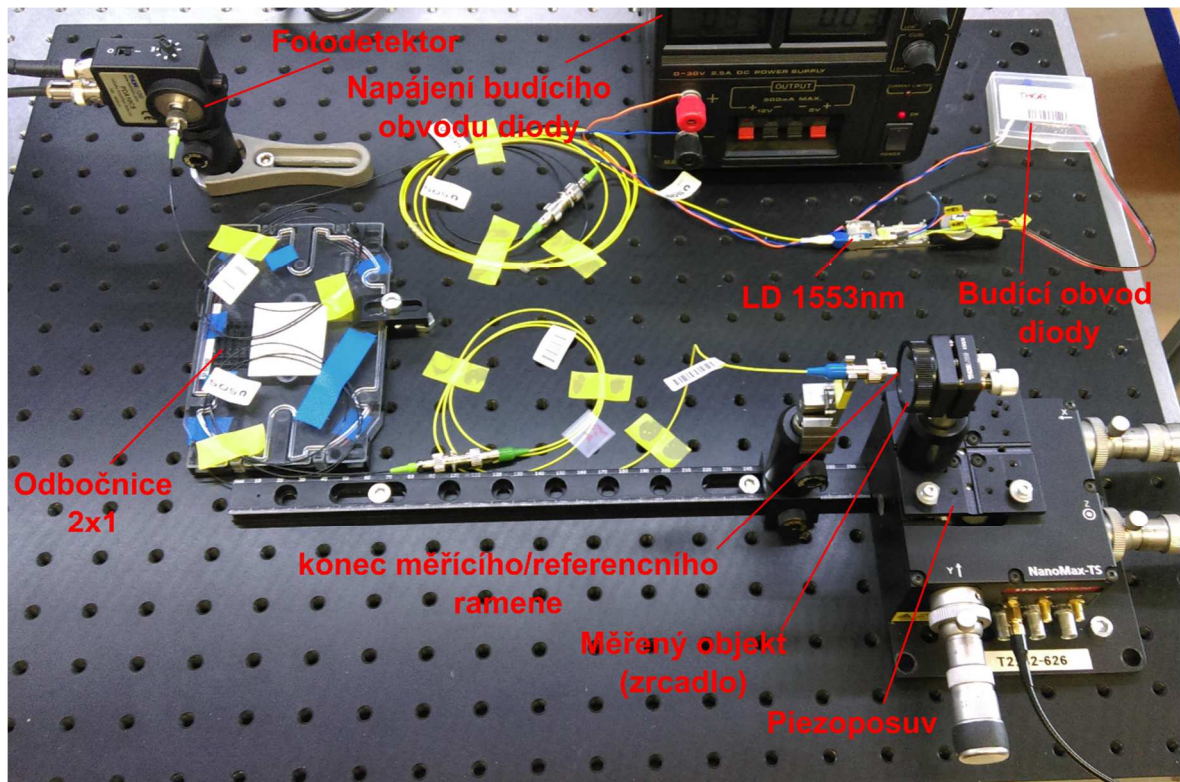
Obr. 6.2 Schéma zapojení vláknového Fabry-Perotova interferometru

Z důvodu nežádoucích odrazů v místě spojů optických vláken byly použity konektory typu APC (angl. Angled Physical Contact), viz obr. 6.3. Konektory mají kontaktní plochu (feruli) zbrúšenou pod úhlem přibližně 8% čímž je zaručeno, že se vzniklé odrazy odrazí do pláště vlákna a nedojde tak k ovlivnění signálu.



Obr. 6.3 Rozdíl mezi rovně a šikmo broušeným konektorem, vlevo: rovně broušené čelo konektoru (PC), vpravo: šikmo broušené čelo konektoru (APC)

Realizovanou měřicí soustavu s Fabry-Perotovým interferometrem ilustruje obr. 6.4.



Obr. 6.4 Ukázka měřící soustavy s Fabry-Perotovým interferometrem

6.2 Vyhodnocení získaných dat

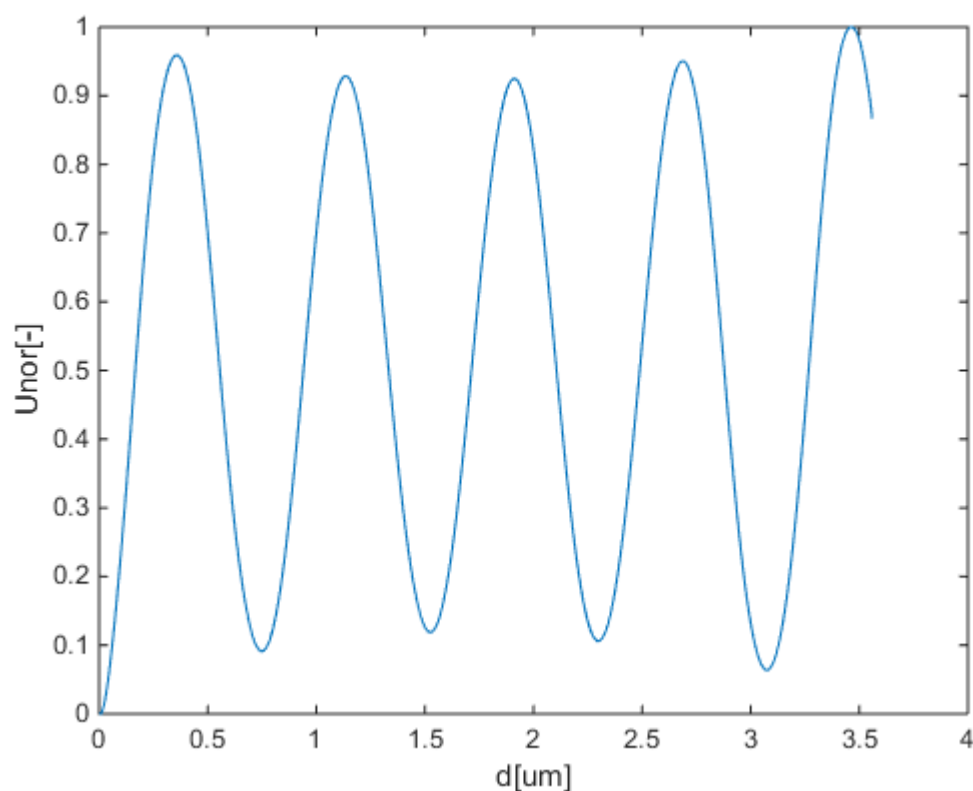
Protože se jedná o vláknový zdroj v telekomunikačním pásmu 1550nm, lze pro měření koherentních vlastností použít spektrální analyzátor. Není tedy nutné zjišťovat koherentní délku jako v předchozím měření, ale lze jí určit ze získaných dat ze spektrálního analyzátoru. Tím bylo změřeno, že střední vlnová délka je $\lambda=1553\text{nm}$ a šířka spektrální čáry $\Delta\lambda=0,033\text{nm}$. Na základě znalostí těchto hodnot, lze pomocí vztahu 1.9 určit koherentní délku zdroje L_s .

Po dosazení hodnot do rovnice zjistíme, že koherentní délka zdroje $L_s=7,3\text{cm}$. To je přibližně o 2cm více než v případě použití HeNe laseru v předchozím měření. Laserová dioda je tedy „více“ koherentním zdrojem. Z výpočtu také vyplývá, že měřený objekt nesmí překročit vzdálenost 7,3cm od konce vlákna měřicího ramene, nedetekovali bychom žádnou interferenci.

Algoritmus pro vyhodnocení posuvu měřeného objektu je shodný s algoritmem předešlého měření. Proto budou uvedeny jen výsledky měření.

6.3 Závěr měření s Fabry-Perotovým interferometrem

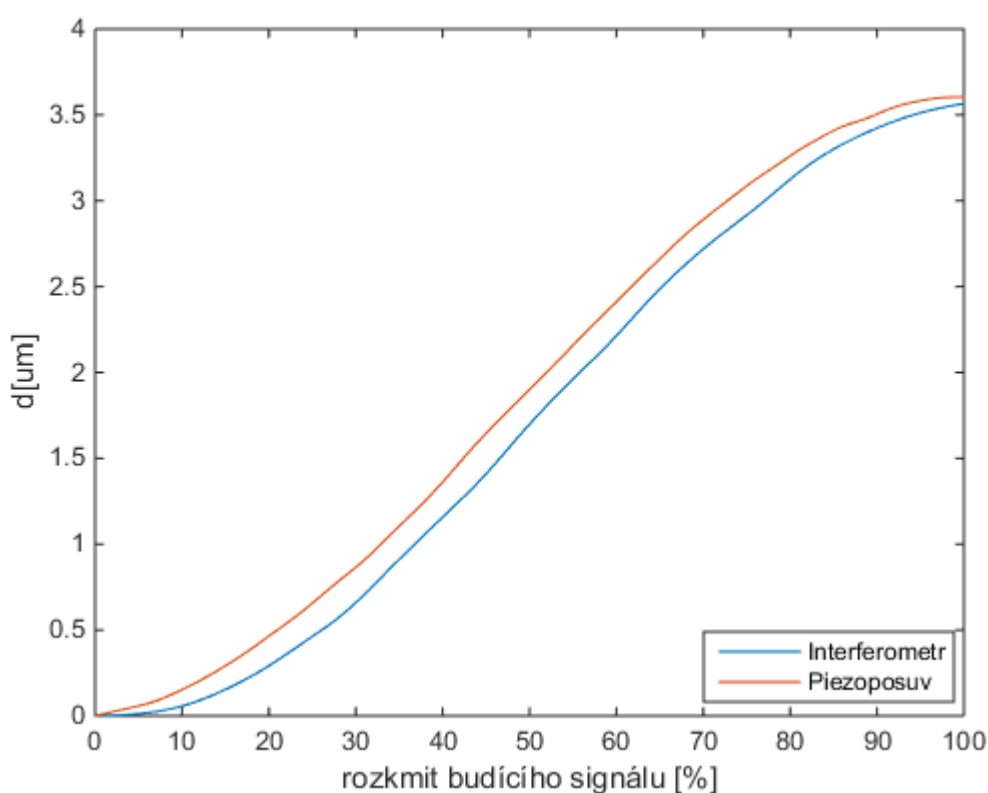
I přesto, že se jedná o jiný typ interferometru, než v předchozím měření a nešíří se zde paprsky volným prostorem, ale vlny jsou vedeny optickými vlákny, je detekován stejný průběh interference v závislosti na posunu piezoposuvu, viz obr. 6.5. Odrazivým materiálem je zrcadlo, proto amplitudy dosahují téměř shodných hodnot. Hodnota napětí U_{nor} odpovídá normované hodnotě intenzity pro pohyb jedním směrem.



Obr. 6.5 Detekovaný průběh interference, pro plně odrazivé zrcadlo, jako referenční objekt

Pro ověření funkčnosti interferometru opět porovnáme výstupní data interferometru s posunem piezoposuvu, viz obr. 6.6. Jako v případě měření s Michelsonovým interferometrem, červený průběh reprezentuje posuv piezoposuvu a modrý průběh posun změřený interferometrem.

Značně větší odstup průběhu je i v tomto případě způsoben hysterezí. Frekvence budícího signálu piezoposuvu byla přibližně 5x větší, než u Michelsonova interferometru, piezoposuv nebyl schopný rychle reagovat na změny směru posuvu, tím je i částečně svázaná setrvačnost piezoposuvu.



Obr. 6.6 Vyhodnocené posunutí piezoposuvu (modrý průběh-změřeno interferometrem, červený průběh-určení posuvu na základě citlivosti piezoposuvu)

Nastavení a práce s tímto interferometrem, byla oproti paprskovému Michelsonovu interferometru mnohem snazší, především odpadl problém s geometrických nastavením komponent. Proto je tento typ interferometru, především pak jeho vláknová podoba vhodnější pro použití v reálných podmínkách. I cena takového interferometru je až 3x menší, než paprskového Michelsonova interferometru.

Závěr

Cílem diplomové práce bylo vysvětlit a popsat chování bezdotykových optických senzorů pracujících na principu interference, které lze využít ve stavebnictví či civilních budovách pro měření vychýlení nebo posuvu např. stavebních konstrukcí, objektů apod. Pro toto měření byly představeny čtyři základní typy interferometrických senzorů, Michelsonův, Fabry-Perotův, Mach-Zehnderův a Sagnacův interferometr. Následně byly shrnuty a zdůvodněny podmínky, za kterých lze dosáhnout korektních a hodnotných výsledků těchto senzorů. Především se jedná o použité komponenty interferometrických senzorů (zdroje, vlákna apod.) a vlastností světelného záření, jako je vliv koherence či polarizace. Na základě těchto znalostí byly v praktické části sestaveny dva typy interferometrů pro měření relativního posuvu zvoleného objektu. Pro vyhodnocení dané veličiny změřené interferometry byl vytvořen algoritmus ve výpočetním prostředí programu Matlab. Při realizaci těchto interferometrů byl kladen důraz na cenu komponent a jejich dostupnost na trhu.

Měřením oběma interferometry bylo docíleno shodných výsledků. Avšak pro použití interferometrů v reálných podmínkách doporučujeme vláknový Fabry-Perotův interferometr. Jeho konstrukce a nastavení je velice jednoduché, navíc obě interferující vlny se šíří po téměř stejné dráze, jedním vláknem. Teplotní roztažnost, náhodné natočení polarizace působí na obě vlny shodně. Proto, lze u tohoto typu interferometru docílit hodnotnějších výsledků měření interference.

Použití těchto senzorů je téměř neomezené, jediným úskalím se zdá být maximální možné detekované vychýlení či posuv objektu, který nesmí přesáhnout koherentní délku zdroje.

Literatura

- [1] Novotný K., Martan T., Šístek J.: *Systémy pro optické komunikace*. Praha, ČVUT, 2007. ISBN 978-80-01-02810-0.
- [2] Saleh B., Teich M.: *Základy fotoniky*. New York, John Wiley & Sons, 1991. ISBN 80-85863-01-4.
- [3] Pullteap S.: *Development of an optical fiber based interferometer for small vibration measurements*. 11th International Conference on Optical Communications and Networks (ICOON), 2012, str.1-4, 28-30, Chonburi. ISBN 978-1-4673-4957-4.
- [4] Yin, Shizhuo, Ruffin, Paul B., Francis T S.: *Fiber optic sensors*. Boca Raton, CRC Press, 2008. ISBN 978-1-4200-5365-4.
- [5] Hui, R., O'Sullivan, M.: *Fiber Optic Measurement Techniques*. 1st ed., Elsevier, 2009. ISBN 978-0-12-373865-3.
- [6] CVUT-Katedra elektromagnetického pole.: *Laboratorní úloha předmětu A01M17MVK: Jednovidové vlákno ve vícevidovém režimu*. 2012/2013
- [7] Inaudi D.: *SOFO Sensor for Static and Dynamic Measurements*. Nottingham, 2004 [online]. Dostupné z: http://www.fig.net/nottingham/proc/ts_06_2_inaudi.pdf. Citované 5. 5. 2015.
- [8] Dušek M., Mazanec M.: *Fyzikální principy optických a optovláknových snímačů*. Říčany, 2012 [online]. Dostupné z: http://www.crr.vutbr.cz/system/files/brozura_06_1206.pdf. Citované 5. 5. 2015.
- [9] Thorlabs: *Manual Fiber Polarization Contoller*. [online]. Dostupné z: https://www.thorlabs.com/newgrouppage9.cfm?objectgroup_id=343 . Citované 5. 5. 2015.
- [10] Novotný K.: *Optická komunikační technika*. Praha, ČVUT, 2007. ISBN 978-80-01-03920-5.
- [11] Adachi Ch., Nakatomi H.: *Organic Laser Diode*. Fukuoka 2015 [online]. Dostupné z: http://www.cstf.kyushu-u.ac.jp/~adachilab/lab/?page_id=3910. Citované 5. 5. 2015.
- [12] Profile Optische Systeme: *Basic notes Laser diodes*. Karlsfeld [online]. Dostupné z: http://imedea.uib-csic.es/~salvador/coms_optiques/addicional/profile/profileLD.pdf. Citované 5.5.2015.
- [13] Thorlabs: *Optomechanical Components*. [online]. Dostupné z: <https://www.thorlabs.com/thorproduct.cfm?partnumber=KM100>. Citované 5. 5. 2015.

- [14] Jeong J.: *Polarization Control and Measurements for optical Fibers*. Irvine, 2004 [online]. Dostupné z: <http://assets.newport.com/webDocuments-EN/images/14068.PDF>. Citované 5. 5. 2015

Příloha A-Seznam použitého vybavení při realizaci Michelsonova interferometru

Typ	Popis
Agilent DSO 3102A	Osciloskop
Thorlabs MAX373 D/M	Stolek s piezoposuvem
Thorlabs MDT 693A	Budič piezoposuvu
Agilent DSO 3102A	Generátor funkcí
Výuková sada Leok, P=3dB, $\lambda=632\text{nm}$	HeNe laser
Thorlabs FL 632,8nm	Spektrální filtr
Thorlabs BSS10	Polopropustné zrcadlo
Thorlabs BB1-E02	Plně odrazivé zrcadlo
Thorlabs	Útlumový filtr 10dB
Thorlabs PDA 36A	Detektor se zesilovačem
Thorlabs	Opto-mechanické komponenty (natáčecí a posuvné stolky, upínací materiál apod.)

***Příloha B–Seznam použitého vybavení při realizaci Fabry-
Perotova interferometru***

Typ	Popis
Agilent DSO 3102A	Osciloskop
Thorlabs MAX373 D/M	Stolek s piezoposuvem
Thorlabs MDT 693A	Budič piezoposuvu
Agilent DSO 3102A	Generátor funkcí
PHY 1040-01	SFP modul
LD 1100	Budič diody
PDA10CS	Fotodetektor
Thorlabs BB1-E02	Plně odrazivé zrcadlo
50/50 2x1	Odbočnice

Příloha C- Algoritmus pro vyhodnocení měření vychýlení piezoposuvu

```
% vyčištění předešlých hodnot
clear all

% nahraní dat
interferometr=load('MI_interference.txt');
piezo=load('MI_budic.txt');

%definování x-ove a y-ove souřadnice interferometru
yi = interferometr(:,1); % y= amplituda
xi = interferometr(:,2); % x= čas

% definování x a y souřadnice piezoposuvu
yp=piezo(:,1); % y= amplituda
xp = piezo(:,2); % x= čas

% *****PIEZOPOSUV*****

cit= 187.5*10^(-9); % citlivost piezoposuvu, buď udána
výrobcem,
%nebo spočtená 1845.2*10-9 (FB-interferometr), 187.5*10^(-
9)(Michelsonův)

yup=fastsmooth(yp,17,3,1); % 15- vybere 15 hodnot, 3-proloží
hodnoty pseudo-Gaussovou křivkou, 1-postupné vyhlazování)

pos2=yup*cit; % vypočet posunu přes citlivost

%nalezneme maximim a minimum funkce
minp= min(yup);
maxp=max(yup);

% určení pozic maximální a minimální hodnoty- jedem směr
posunu
nalezenimin=find(yup==minp);
nalezenimax=find(yup==maxp);
nalezenimin1=nalezenimin+1; % z důvodu velkého zašumění
budícího signálu a následného vyhlazení došlo k malému posunu
minima proto je nutné tento posun kompenzovat. Pro
Michelsonův interferometr +1, pro FB +27
```

```

%*****Interferometr*****
%*****
l=632*10^(-9); %vlnová délka laseru 632 , diody 1553
delka=l/2; % za jednu periodu interferovaného signálu se
měřený objekt posuneo hodnotu délka

% nalezneme maximální a minimální hodnoty průběhu yi pro
normování průběhu, od 0-1 (lineární interpolace)

mini= min(yi);
maxi=max(yi);

% normujeme průběh dle lineární interpolace
Inor=(1/(maxi-mini))*(yi-mini);

%vypočteme fáze interference
f1=2*(acos(sqrt(Inor)));
f2=2*(acos(-1*(sqrt(Inor))));

%vyhladíme
Ivyh=fastsmooth(yi,15,3,1);

%pro střídání fází po půl periodě použijeme cyklus for
s následujícími parametry

[m,n]=size(Ivyh); % pro stavení kroku cyklu for použijeme
délku vektoru Ivyh

for i= 1:m-1
    if Ivyh(i)> Ivyh(i+1)
        fc(i)=(f1(i));

    else
        fc(i)=(f2(i));

    end
end

%transponujeme předešlý vektor
ft=fc';

%pomocí funkce unwrap zaručíme skokovou změnu fáze o 2PI
f=unwrap(ft);

%fázi omezíme jen pro jeden směr posunu
faze=f(nalezenimin1:nalezenimax);

%od nulové hodnoty
faze0=faze()-faze(1);

```

```

%průběh fáze vyhladíme
fazicka=fastsmooth (faze0,25,3,1);

%vypočteme posun
posinter2=fazicka*(delka/(2*pi));

%posun přepočteme na um
posinterum=posinter2*1000000;

%posun piezoposuvu omezíme pro jeden směr (od 0) a opět
přepočteme na um
pospiezo=pos2(nalezenimin1:nalezenimax);
pos3=pospiezo()-pospiezo(1);
pospiezoum=pos3*1000000;

%omezení intenzity interference pro "jeden směr" a její
normování

Ivyhor=Ivyh(nalezenimin1:nalezenimax);
minIvyhor= min(Ivyhor);
maxIvyhor=max(Ivyhor);
Ivyhnor1=(1/(maxIvyhor-minIvyhor))*(Ivyhor-minIvyhor);

%hodnota maximálního posunu změřené interferometrem a
vypočtené z
%citlivosti piezoposuvu
posun_pieozo=max(pospiezoum)
posun_interferometer=max(posinterum)

%výpočet x-souřadnice pro rozkmit budícího signálu
proc=0:100/(nalezenimax-nalezenimin1):100;

%Grafy
figure(1)

plot(posinterum,Ivyhnor1)
xlabel ('d[um]')
ylabel ('Unor[-]')

figure (2)
plot(proc,posinterum)
hold on
plot(proc,ospiezoum)
hold off
legend ('Interferometr', 'Piezoposuv')
xlabel('rozkmit budícího signálu [%]')
ylabel('d[um]')

```

