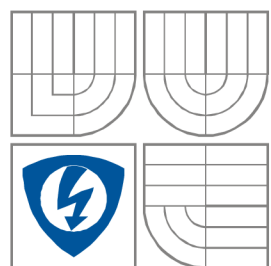


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A
KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ

ÚSTAV TEORETICKÉ A EXPERIMENTÁLNÍ
ELEKTROTECHNIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF THEORETICAL AND EXPERIMENTAL
ELECTRONICS

Dynamický laserový interferometr

Dynamic laser interferometer

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S PROJECT

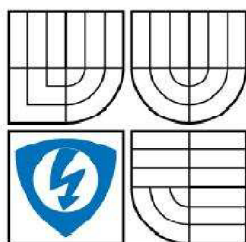
AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Libor Chovaneček

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

doc. Ing. Pavel Fiala, Ph.D.

BRNO, 2009



VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

Ústav radioelektroniky

Bakalářská práce

bakalářský studijní obor
Elektronika a sdělovací technika

Student: Libor Chovaneček
Ročník: 3

ID: 98088
Akademický rok: 2008/2009

NÁZEV TÉMATU:

Dynamický laserový interferometr

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Seznamte se s metodami laserové interferometrie. Provedte základní shrnutí vlastností laserového interferometru z dostupné literatury. Navrhněte úlohu snímání pohybu vybraného předmětu pomocí laserového interferometru, popište omezení při vyhodnocení okamžité rychlosti pohybu předmětu.

Úlohu snímání pohybu realizujte.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] BARTUŠEK, K., REZ, J., GESCHEIDTOVÁ, E., STEINBAUER, M. Měření v elektrotechnice - návody k laboratorním cvičením. Skriptum. Brno: FEKT VUT v Brně, 2006. ISBN 80-214-3265-9

[2] GESCHEIDTOVÁ, E., REZ, J., STEINBAUER, M. Měření v elektrotechnice. 1 vyd. Brno: Brno: Nakladatelství VUTIM, 2002. ISBN 80-214-1990-3

Termín zadání: 9.2.2009

Termín odevzdání: 5.6.2009

Vedoucí práce: doc. Ing. Pavel Fiala, Ph.D.

prof. Dr. Ing. Zbyněk Raida
Předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

Anotace

Tématem této bakalářské práce je dynamický laserový interferometr. Práce se nejprve zaměřuje na teorii, kde vysvětluje pojem interference a popisuje princip fungování interferometru na konkrétních typech interferometrů. Jsou zde uvedeny lasery používané v interferometrech. Další část práce se zaměřuje na sestavení interferometru s popisem konkrétních částí. Uvádí také dvě metody na zpracování signálu. Poslední část se zabývá ověřením správné funkce měřicího systému.

Klíčová slova: Interference, laser, interferometr

Annotation

The theme of this bachelor's project is dynamic laser interferometer. The project is firstly focused on theory, where it explains the term of interference and principle of operation of interferometer on specific types of interferometers. Different types of lasers used in interferometers are mentioned there. The next part of this paper is focused on assemblage of interferometer with description of particular parts. There are mentioned two methods of signal processing. The last part deals with confirmation of proper functioning of measuring system.

Keywords: Interferometry, laser, interferometer

Prohlášení

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma Dynamický laserový interferometr jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením tohoto projektu jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

V Brně dne 5. června 2009

.....
podpis autora

Poděkování

Děkuji vedoucímu bakalářské práce doc. Ing. Pavlovi Fialovi, Ph.D. a Ing. Petrovi Drexlerovi, Ph.D. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé bakalářské práce.

V Brně dne 5. června 2009

.....
podpis autora

Obsah

1 Úvod	7
2 Interference.....	8
2.1 Interference světla	10
2.1.1 Důkaz interference světla	11
3. Interferometry.....	13
3.1 Laser	13
3.1.1 Lasery v interferometrech	13
3.2 Interferometry.....	14
3.2.1 Michelsonův interferometr	14
3.2.2 Mach-Zehnderův interferometr	15
3.2.3 Sagnacův interferometr	16
4. Dynamická interferometrie	18
4.1 Sestavení laserového interferenčního systému.....	18
4.2 Popis jednotlivých částí měřicí soustavy	18
5. Zpracování dat.....	21
5.1 Počítání průchodů přes nulu	21
5.1.1 Výběr vhodného čítače	24
5.2 Určení posuvu pomocí funkce arkus tangens.....	24
5.3 Komunikace osciloskop – počítač.....	25
5.3.1 Popis jednotlivých bloků komunikačního programu.....	26
6. Ověření činnosti měřicího systému	30
7. Závěr.....	34
8. Použité informační zdroje	35

Seznam obrázků

Obrázek 2.1: Příklad interference a) rovinných vln b) kruhových vln.	8
Obrázek 2.2: Příklad dvou postupných příčných vln.	8
Obrázek 2.3: Vznik interferenčního maxima.	9
Obrázek 2.4: Vznik interferenčního minima.	10
Obrázek 2.5: Nákres Youngova pokusu.	11
Obrázek 2.6: a) Newtonova skla b) Newtonovy kroužky.	12
Obrázek 3.1: Ukázka koherenční zrnitosti.	13
Obrázek 3.2: Michelsonův interferometr.	15
Obrázek 3.3: Mach-Zehnderův interferometr.	16
Obrázek 3.4: Sagnacův interferometr.	16
Obrázek 4.1: Schéma měřicí sestavy.	18
Obrázek 4.2: Schéma interferometru.	19
Obrázek 4.3: Měřicí laserový interferenční systém.	20
Obrázek 5.1: Znázornění posuvu předmětu na periodě výstupního signálu.	21
Obrázek 5.2: Ukázka výstupních signálů.	21
Obrázek 5.3: Ukázka výstupních signálů převedených na signály obdélníkové.	22
Obrázek 5.4: Zapojení komparátoru.	22
Obrázek 5.5: Blokové schéma pro počítání průchodů přes nulu.	23
Obrázek 5.6: Určení posuvu pomocí funkce arkus tangens.	24
Obrázek 5.7: Blokové schéma měřicího systému pro určení posuvu pomocí arkus tangens.	25
Obrázek 5.8: Program pro komunikaci mezi osciloskopem Agilent a počítačem.	26
Obrázek 5.9: Vývojový diagram bloku NewInstrument (@oscilloscope).	27
Obrázek 5.10: Vývojový diagram bloku MATLAB Skript.	28
Obrázek 6.1: Nerozbalená fáze pro rozmítaný signál 500Hz – 1500Hz.	30
Obrázek 6.2: Rozbalená fáze pro rozmítaný signál 500Hz – 1500Hz.	30
Obrázek 6.3: Detail nerozbalené fáze pro rozmítaný signál 500Hz – 1500Hz.	31
Obrázek 6.4: Detail rozbalené fáze pro rozmítaný signál 500Hz – 1500Hz.	31
Obrázek 6.5: Vstupní signál 340Hz a výstupní signál z měřicího systému.	32
Obrázek 6.6: Závislost výchylky membrány na frekvenci vstupního signálu.	33

Seznam tabulek

Tabulka 3.1: Lasery v interferometrech.	14
Tabulka 4.1: Základní parametry měřicí sestavy.	18
Tabulka 4.2: Základní parametry laseru.	19
Tabulka 5.1: Pravdivostní tabulka klopných obvodů.	23
Tabulka 6.1: Naměřené výchylky membrány pro různé frekvence.	32

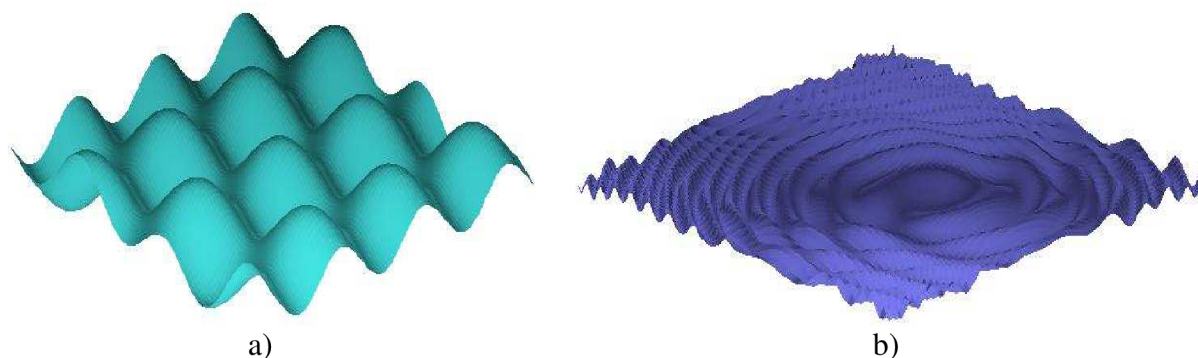
1 Úvod

Interferenci světla můžeme pozorovat při spojení dvou nebo více světelných svazků, které pocházejí z jednoho zdroje světla a urazí dráhy různých délek. Společným působením světelných svazků nastane jejich vzájemné zesílení nebo zeslabení.

Jelikož je interferenční jev závislý na délkách optických drah, na indexech lomu prostředí, na úhlu svíraném interferujícími paprsky a na vlnové délce, lze pomocí interference měřit délky, indexy lomu, úhly a vlnové délky. Měření délek se využívá pro stanovení rozměru koncových měrek, drsnosti a tvaru povrchů strojních součástí, jakosti povrchů optických elementů a jakosti zobrazení optických přístrojů, měření vibrací, deformací apod.

2 Interference

Pokud se prostředím šíří více vlnění z různých zdrojů, šíří se každé vlnění tak, jako by žádná jiná vlnění v daném prostředí neexistovala. Jedná se o princip nezávislosti šíření vln. Avšak v místech, kde se tyto vlnění vzájemně setkají, vznikne jedno výsledné vlnění. Tento jev, při kterém dojde ke skládání dvou nebo více vlnění, nazýváme interference vlnění. Výsledné kmitání bodu v daném místě je určeno superpozicí okamžitých výchylek jednotlivých vlnění. V důsledku toho může při interferenci vlnění dojít v některých místech ke zvětšení (zesílení) amplitudy, v jiných místech naopak k jejímu zmenšení (zeslabení) [1].



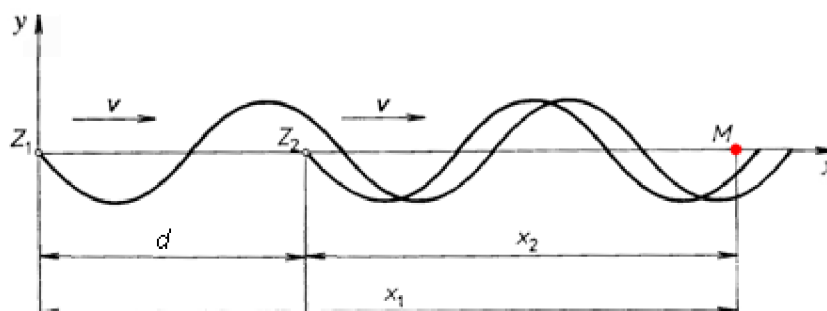
Obrázek 2.1: Příklad interference a) rovinných vln b) kruhových vln [2]

Nejjednodušší příklad interference nastává při skládání dvou postupných příčných vln se stejnou amplitudou výchylky y_m , která se šíří stejnou rychlostí v . Budeme tedy tato vlnění uvažovat. Zdroje vlnění Z_1 a Z_2 mají různou polohu, ale kmitají se stejnou počáteční fází. Vzhledem k bodu M můžeme složky vlnění popsat rovnicemi [1]

$$y_1 = y_m \sin 2\pi \left(\frac{t}{T} - \frac{x_1}{\lambda} \right), \quad (2.1)$$

$$y_2 = y_m \sin 2\pi \left(\frac{t}{T} - \frac{x_2}{\lambda} \right), \quad (2.2)$$

kde λ je vlnová délka vlny, T je perioda vlny, x_1 je vzdálenost zdroje Z_1 od bodu M a x_2 je vzdálenost zdroje Z_2 od bodu M.



Obrázek 2.2: Příklad dvou postupných příčných vln [3]

Okamžitou výchylku výsledného vlnění získáme superpozicí obou vln

$$y = y_1 + y_2, \quad (2.3)$$

kteřá po dosazení má následující tvar

$$y = y_m \left[\sin 2\pi \left(\frac{t}{T} - \frac{x_1}{\lambda} \right) + \sin 2\pi \left(\frac{t}{T} - \frac{x_2}{\lambda} \right) \right] = 2y_m \cos \frac{\pi(x_2 - x_1)}{\lambda} \sin 2\pi \left(\frac{t}{T} - \frac{x_2 + x_1}{2\lambda} \right). \quad (2.4)$$

Pokud označíme d jako dráhový rozdíl vlnění, který určuje vzdálenost dvou bodů, v nichž mají obě vlnění stejnou fázi, bude rovnice pro okamžitou výchylku výsledného vlnění ve tvaru

$$y = 2y_m \cos \pi \frac{d}{\lambda} \sin 2\pi \left(\frac{t}{T} - \frac{d}{2\lambda} \right). \quad (2.5)$$

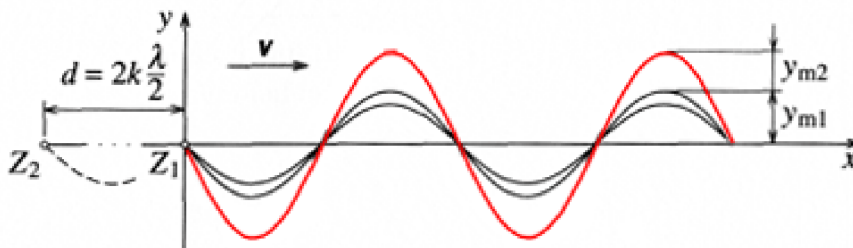
V této rovnici je výraz $2y_m \cos(\pi d / \lambda)$ konstantní, nezávislý na čase, ale závislý na dráhovém rozdílu d . Má význam amplitudy, můžeme jej tedy označit Y_m a rovnici výsledného postupného vlnění zapíšeme ve zjednodušeném tvaru

$$y = Y_m \sin 2\pi \left(\frac{t}{T} - \frac{d}{2\lambda} \right). \quad (2.6)$$

Dráhový rozdíl je funkcí fázového rozdílu vlnění $\Delta\varphi$. Ten se dá určit jako rozdíl fází obou vlnění v určitém okamžiku [1]

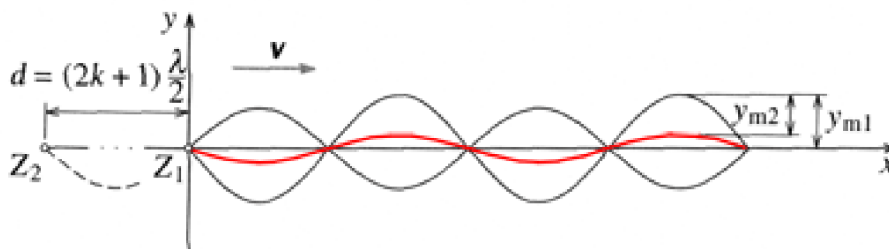
$$\Delta\varphi = 2\pi \left(\frac{t}{T} - \frac{x_2}{\lambda} \right) - 2\pi \left(\frac{t}{T} - \frac{x_1}{\lambda} \right) = \frac{2\pi}{\lambda} (x_1 - x_2) = \frac{2\pi}{\lambda} d. \quad (2.7)$$

Z rovnice 2.7 vyplývá, že fázový rozdíl je přímo úměrný dráhovému rozdílu vlnění. Pokud je dráhový rozdíl roven sudému počtu půlvln, tedy $d = 2k \frac{\lambda}{2} = k\lambda$, kde $k = 0, 1, 2, \dots$ setkávají se interferující vlnění v každém bodě se stejnou fází a vzniklé vlnění má amplitudu výchylky rovnou součtu amplitud dílčích složek: $y_m = y_{m1} + y_{m2}$. Vzniká interferenční maximum, jedná se tak o interferenci konstruktivní.



Obrázek 2.3: Vznik interferenčního maxima [3]

Pokud je dráhový rozdíl roven lichému počtu půlvln, tedy $d = (2k + 1)\frac{\lambda}{2}$, kde $k = 0,1,2,..$ setkávají se interferující vlnění s opačnou fází a vzniklé vlnění má amplitudu výchylky rovnou absolutní hodnotě rozdílu amplitud dílčích složek: $y_m = |y_{m1} - y_{m2}|$. Vzniká interferenční minimum, jedná se o interferenci destruktivní [1].



Obrázek 2.4: Vznik interferenčního minima [3]

2.1 Interference světla

Jestliže má světlo vlnovou podstatu, může také interferovat. Ostatně o tom, že světlo je vlnění, nás přesvědčí právě interference. Projevy interference světla jsou obecně známé a jistě se s nimi setkal každý. U světla monochromatického, tj. světlo jedné frekvence, se interference projeví vznikem světlých a tmavých ploch, u světla bílého se projeví barevným rozkladem.

Pro pozorování interferenčního obrazce je důležitá koherence světla. Koherentní vlnění (z latinského slova cohaere = souviset) jsou taková vlnění, která si zachovávají konstantní rozdíl fáze během času, dostatečného pro pozorování. Takové světelné zdroje je možno získat optickými prostředky (zrcadla, hranoly, vrstvy proměnné tloušťky), kterými z jediného zdroje světla získáme rozdělení dva svazky paprsků, které se po proběhnutí různé dráhy setkají s určitým dráhovým rozdílem Δl . U přirozeného světla však tento dráhový rozdíl musí být velmi malý (řádově 0,01mm). Pro lepší pozorování interferenčních jevů je vhodnější použít světlo laseru, který umožní pozorování interference při větších dráhových rozdílech (až několik metrů).

Pro určení dráhového rozdílu koherentních světelných vlnění musíme vědět, že optickým prostředím o indexu lomu $n > 1$ se vlnění šíří menší rychlostí. Proto zavádíme veličinu optická dráha l , která definuje vzdálenost, kterou by urazilo světlo ve vakuu za stejnou dobu jako v daném optickém prostředí. Pokud světlo urazí skutečnou dráhu s , je optická dráha v prostředí o konstantním indexu lomu rovna [1]:

$$l = ns . \quad (2.8)$$

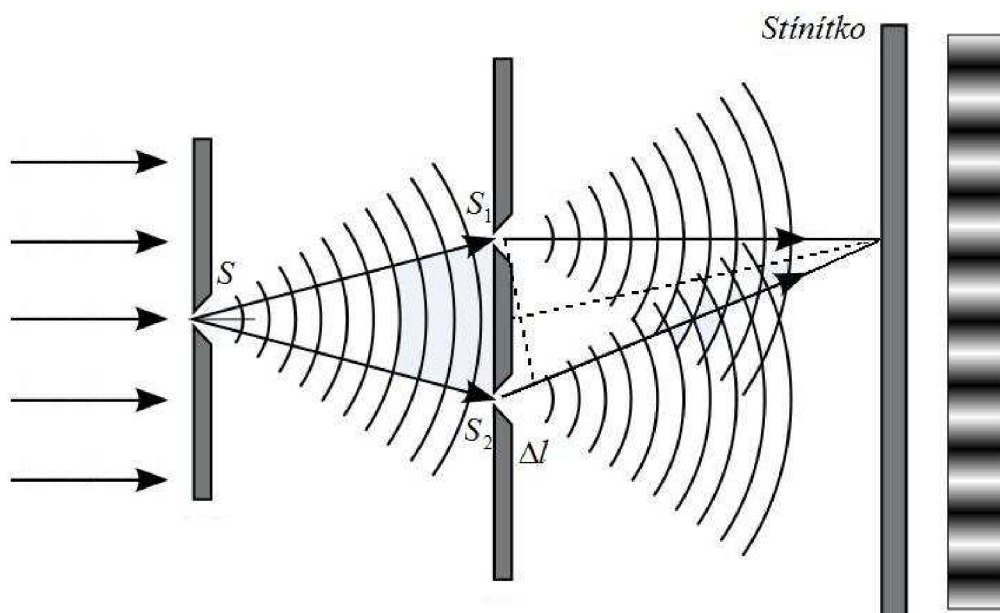
Interferenční maxima vznikají, jestliže je splněna podmínka $\Delta l = n\Delta s = 2k\frac{\lambda}{2}$, interferenční minima při splněné podmínce $\Delta l = (2k + 1)\frac{\lambda}{2}$, kde $k = 0,1,2,..$ [1].

2.1.1 Důkaz interference světla

Youngův pokus

Když v roce 1801 anglický lékař a fyzik Thomas Young experimentálně prokázal, že světlo je vlna, ovlivnil řešení sporu, v němž se střetly názory na podstatu světla. Na konci 17. století totiž většina fyziků předpokládala, že světlo je proud částic. Dále dokázal určit střední vlnovou délku slunečního světla, kterou stanovil na hodnotu 570nm. Tato hodnota je velmi blízká dnes uznávané hodnotě 555nm.

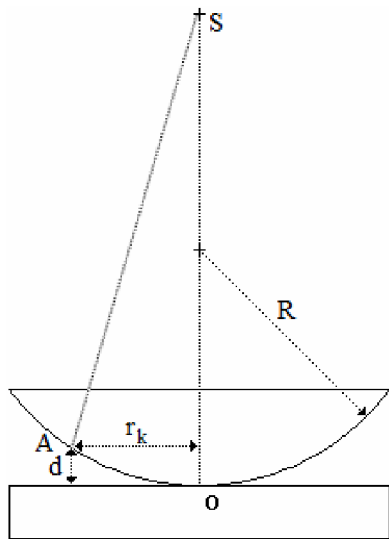
Při pokusu světlo z monochromatického zdroje osvětluje štěrbinu S . Světlo se z této štěrbinu, která má vlastnost bodového zdroje, šíří všemi směry a dopadá na dvojici štěrbin S_1 a S_2 . Pokud je vzdálenost těchto štěrbin malá, jsou světelná vlnění za štěrbinami koherentní a my pozorujeme na dostatečně vzdáleném stínítku interferenci. Vzniká interferenční obrazec v podobě soustavy světlých a tmavých proužků [4].



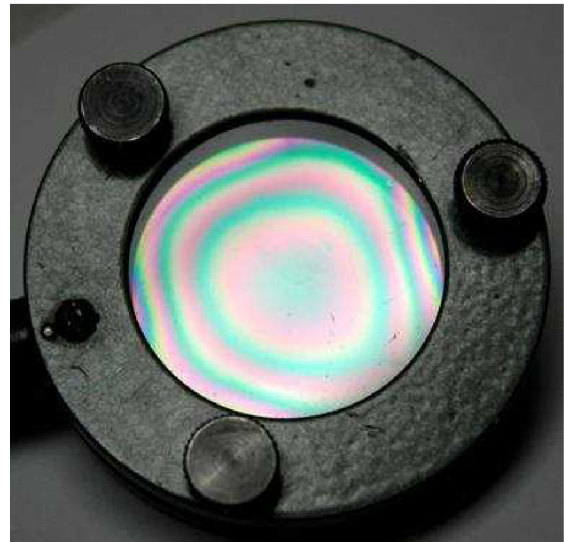
Obrázek 2.5: Nákres Youngova pokusu [5]

Newtonova skla

Newtonova skla jsou tvořena planparalelní deskou (deska s rovnoběžnými rovinnými plochami), ke které je přiložena ploskovypuklá čočka s velkým poloměrem křivosti. V okolí místa dotyku desky s čočkou vzniká tenká vrstvička vzduchu. Při dopadu světla dochází k interferenci světla odraženého od obou rozhraní tenké vrstvy vzduchu. Interferenční obrazec (zde Newtonovy kroužky) pro monochromatické světlo tvoří světlé a tmavé kroužky, pro světlo bílé to jsou kroužky duhových barev. Dráhový rozdíl odražených paprsků je způsoben tím, že při odrazu na opticky řidším prostředí se fáze vlnění nezmění, ale při odrazu vlny na opticky hustším prostředí se fáze mění v opačnou, což znamená změnu dráhového rozdílu o polovinu vlnové délky [1].



a)



b)

Obrázek 2.6: a) Newtonova skla b) Newtonovy kroužky [6]

3. Interferometry

3.1 Laser

Slovo laser je zkratkou anglického výrazu “Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation“, což v překladu znamená “zesilování světla stimulovanou emisí záření“. Laser se od běžných světelných zdrojů liší tím, že jeho světelný paprsek má malou rozbíhavost a energie je soustředěna do úzkého svazku (průměru až $10^{-6} m$). Atomy laseru vyzařují světlo koordinovaně, což způsobí koherenci světelného záření. Navíc je jeho světlo monochromatické, takže je vhodné pro sledování interference [1], [4].

O koherenci laserového světla se můžeme jednoduše přesvědčit. Pokud posvítíme laserem na drsný odrazivý povrch, jednotlivé vlny laseru se odrazí pod jiným úhlem a začnou spolu interferovat. Tomuto jevu se říká koherenční zrnitost.



Obrázek 3.1: Ukázka koherenční zrnitosti [7]

Použití laseru k měřicím účelům navíc předurčuje jeho vlastnost, kterou je přesně známá, velmi malá vlnová délka, která umožňuje přesná měření s velkým rozlišením.

3.1.1 Lasery v interferometrech

Mnoho let se v interferometrech jako světelný zdroj používala dírka osvětlená rtuťovou žárovkou. Tento světelný zdroj však měl dvě hlavní nevýhody. První byla nízká intenzita světelného záření a druhá spočívala v omezené prostorové a časové koherenci. Tyto problémy byly odstraněny až s vynálezem laseru a ten se tak stal téměř ideálním světelným zdrojem pro interferometry.

Některé typy laserů používaných v interferometrech jsou uvedeny v tabulce 3.1. Nejrozšířenějšími lasery v interferometrech jsou Helium-Neonové ($He - Ne$) lasery, především kvůli jejich ceně. Jejich typická vlnová délka činí 630 a 540nm. Argonové (Ar^+) lasery vyžadují vodní chlazení, ale používají se v aplikacích, kde je zapotřebí vysoký výkon nebo mnohočetných vlnových délek. Lasery oxidu uhličitého (CO_2) mohou pracovat na vlnových délkách 9 000 až 10 600nm, jsou tak vhodné pro měření velkých vzdáleností. Dye lasery umožňují měnit výstupní vlnovou délku pomocí vhodné barvy, která slouží jako aktivní médium uvnitř dutiny rezonátoru laseru [8].

Tabulka 3.1: Lasery v interferometrech [8]

Typ Laseru	Vlnová délka [μm]	Výkon
He-Ne	3.39, 1.15, 0.63, 0.61, 0.54	0.5 – 25mW
Ar ⁺	0.51, 0.49	0.5 – jednotky W
CO ₂	~10.6, ~9.0	jednotky W – jednotky kW
Dye	~1.08, ~0.41	~10 - ~100mW
Diode	~0.87, ~0.75, ~0.67	jednotky mW – jednotky W
Rubín	0.69	0.6 – 10 J
Nd:YAG	1.06	0.1 – 0.15 J

Pevnolátkové lasery mají aktivní prostředí tvořené pevnou, opticky propustnou látkou. Touto látkou mohou být krystaly, oxidy, granáty, alumináty, fluoridy, oxysulfidy, fosfáty, silikáty, tungstáty, molybdáty, vanadáty, beryláty, sklo a keramika. Nejpoužívanější materiál je rubín a yttriumaluminiový granát s příměsí neodymu (Nd:YAG). Tento laser pracuje v pulzním i kontinuálním režimu, přičemž pulzní Nd:YAG laser se používá také v lékařství v oční mikrochirurgii a kontinuální jako skalpel v chirurgii [9].

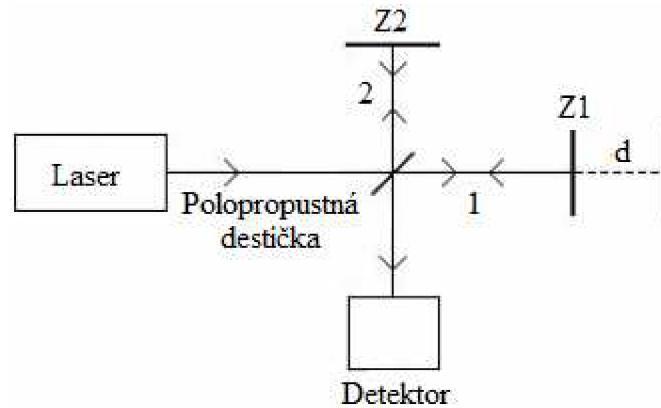
3.2 Interferometry

Existuje více typů interferometrů odlišných v tom, s jakou pracují frekvencí. Jsou to např. akustické interferometry, pracující s frekvencí v řádech Hz až MHz. Požívají se k měření vlastností zvukových vln v plynech a kapalinách. Dále existují rádiové interferometry, které pracují s frekvencí v řádech MHz až desítek GHz. Tyto interferometry nacházejí uplatnění v astronomii. Nás však budou nejvíce zajímat optické interferometry, neboť s pracovní frekvencí v řádu 10^{14} Hz patří k nejpřesnějším přístrojům pro měření délky a změny vzdálenosti.

Dále se interferometry mohou dělit na lineární a nelineární. „Lineární interferometr je optické zařízení, které rozděljuje vlnu na dvě vlny, které jsou v interferometru rozděleny, fázově zpožděny, je měněn směr, následně opět sloučeny a je detekována intenzita záření při jejich superpozici. Nelineární interferometr je optické zařízení, které při fázovém zpoždění využívá optické nelineární jevy jako závislost indexu lomu $n = f(I)$ na intenzitě záření I “ [10].

3.2.1 Michelsonův interferometr

V roce 1881 americký fyzik polského původu Albert Abraham Michelson navrhl a sestavil interferometr. Původně ho navrhl jako prostředek ke studování éteru, který byl v té době předmětem rozličných názorů [11]. Princip interferometru je znázorněn na Obrázku 3.2.



Obrázek 3.2: Michelsonův interferometr

Interferometr se skládá ze 3 aktivních částí: dvou na sebe kolmých zrcadel (pohyblivé a pevné) a polopropustné skleněné destičky umístěné mezi těmito zrcadly v linii 45° .

Paprsek z monochromatického zdroje světla dopadá na polopropustnou destičku pod úhlem 45° . Zde se paprsek rozdělí na dva paprsky o stejné intenzitě. Paprsek 1 projde destičkou a dopadá kolmo na pohyblivé zrcadlo Z_1 , paprsek 2 se od destičky odrazí a dopadá kolmo na pevné zrcadlo Z_2 . Paprsky se na obou zrcadlech odrážejí a vrací se zpět na polopropustnou destičku, kde se opět dělí. Část paprsků se vrací do zdroje, část paprsků postupuje k detektoru s fotocitlivými prvky, kde se detekuje interference paprsků [12].

Posunem zrcadla Z_1 se změní velikost dráhy paprsku 1. Jelikož paprsek projde dráhu d dvakrát (tam a zpět), posunutím Z_1 o $1/4 \lambda$ směrem k polopropustné destičce se optická dráha paprsku zmenší o $1/2 \lambda$. Tím se také změní interferenční obrazec a to tak, že kroužky maxima budou na místě minima. Posuneme-li zrcadlo Z_1 o dalších $1/4 \lambda$ směrem k polopropustné destičce, kroužky maxima a minima se dostanou do své původní polohy.

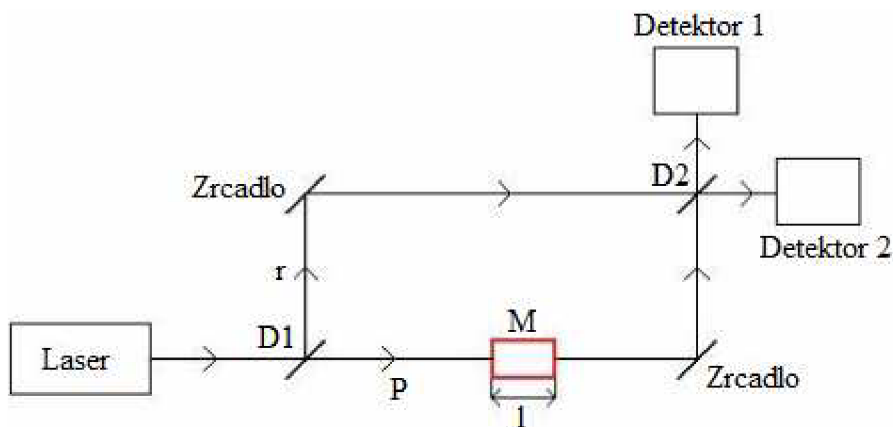
Pomalým posunem zrcadla Z_1 o vzdálenost d se počet kroužků změní o N , potom můžeme vlnovou délku laseru λ vyjádřit vztahem:

$$\lambda = \frac{2d}{N} \quad (3.1)$$

Změnou počtu kroužků rozumíme počet změn z minima na maximum a následně opět na minimum nebo opačně [11].

3.2.2 Mach-Zehnderův interferometr

Tento interferometr zkonstruovali v roce 1891 Ludwig Mach a Ludwig Zehnder. Jeho schéma je zobrazeno na Obrázku 3.3.



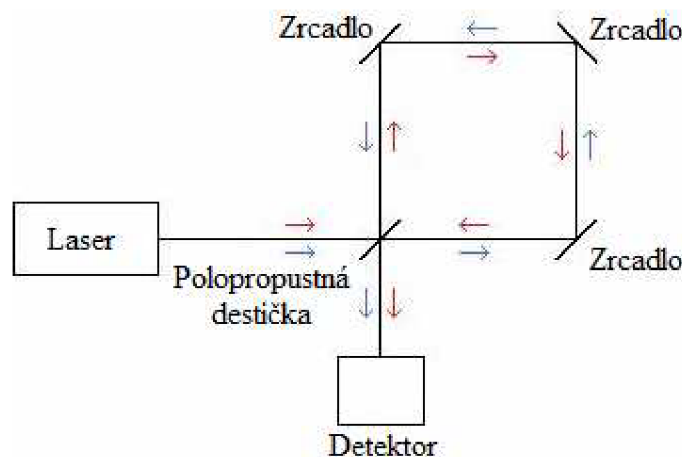
Obrázek 3.3: Mach-Zehnderův interferometr

Mach-Zehnderův interferometr je nejpoužívanějším zařízením pro výzkum transparentních objektů. Světelný paprsek z monochromatického světelného zdroje dopadá na polopropustnou deštičku D_1 a rozdělí se na dva paprsky – předmětový p a referenční r. Předmětový paprsek lze upravit čočkami na paralelní svazek o větším průměru, který prochází měřícím prostorem M o délce l . Původně rovinná vlnoplocha se transparentním předmětem deformuje. Podobně lze čočkami upravit paprsek referenční. Poté oba paprsky dopadají na polopropustné zrcadlo D_2 , kde se rozdělí na dvě větve, na nichž jsou detektory s fotocitlivými prvky.

Mach-Zehnderův interferometr se používá k přesným měřením transparentních objektů, avšak není tak citlivý jako Michelsonův interferometr, u kterého prochází předmětový svazek měřeným prostorem dvakrát. Měřící prostor lze umístit do dostatečné vzdálenosti od optických prvků a od referenčního svazku, a proto lze toto zařízení používat i pro výzkum objektů generujících do okolí tepelné záření. Nevýhodou tohoto interferometru je nutnost použít vysoce kvalitní čočky, zrcadla a polopropustné deštičky [13].

3.2.3 Sagnacův interferometr

Sagnacův interferometr vynalezl francouzský fyzik Georges Sagnac v roce 1913. Princip interferometru je zobrazen na Obrázku 3.4.



Obrázek 3.4: Sagnacův interferometr

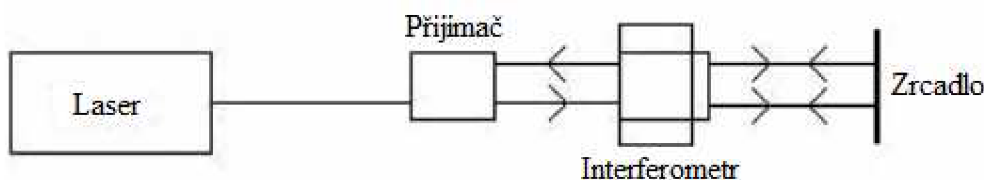
Světelný paprsek z monochromatického světelného zdroje dopadne na polopropustnou destičku, kde se rozdělí na dva paprsky. Jeden paprsek projde přes tuto destičku a poté se odrazí od zrcadel ve směru hodinových ručiček. Druhý paprsek se od polopropustné destičky odrazí a dále se odrazí od zrcadel proti směru hodinových ručiček. Dráhy, které paprsky urazí, jsou stejné a tedy tyto paprsky spolu interferují se stejnou fází. Pokud se však interferometr bude otáčet, paprsek jdoucí v opačném směru než je otáčení urazí menší vzdálenost, než paprsek jdoucí ve směru otáčení. Paprsky spolu budou interferovat s jinou fází [14].

4. Dynamická interferometrie

Klasické fázově posuvné interferometry potřebují k získání měřených dat několik stovek milisekund. To je dostatečná doba na to, aby se ve výsledku měření projevily i vlivy prostředí jako vibrace nebo vzdušná turbulence. Dynamické interferometry potřebují k získání měřených dat méně než jednu milisekundu, což výrazně omezuje vlivy vnějšího prostředí.

4.1 Sestavení laserového interferenčního systému

V této části se budeme zabývat realizací laserového interferometru pro měření délek. Konkrétně se bude jednat o Michelsonův interferometr, jehož schéma je zobrazeno na Obrázku 4.1 a jeho parametry jsou uvedeny v tabulce 4.1. Do optické dráhy laserového svazku vložíme přijímač, interferometr a odrazné zrcátko, které se vhodným způsobem připevní k předmětu, jehož polohu budeme měřit. Na zrcátku se laserový svazek odrazí a přes interferometr projde do přijímače.



Obrázek 4.1: Schéma měřicí sestavy

Tabulka 4.1: Základní parametry měřicí sestavy [15]

Vlnová délka ve vakuu	632, 990 796 nm
Stabilita vlnové délky	2×10^{-8}
Rozsah měření (úroveň změny polohy)	0 ÷ 500 mm *)
Rozlišení	1,25 nm ($\lambda/512$)
Nejistota měření	1 μ m/m
Dynamika snímaného pohybu	< 0,001 ÷ 1 m/s
Šířka pásma přijímače	> 200 kHz

*) při max. náklonu odražeče $0,1^\circ$

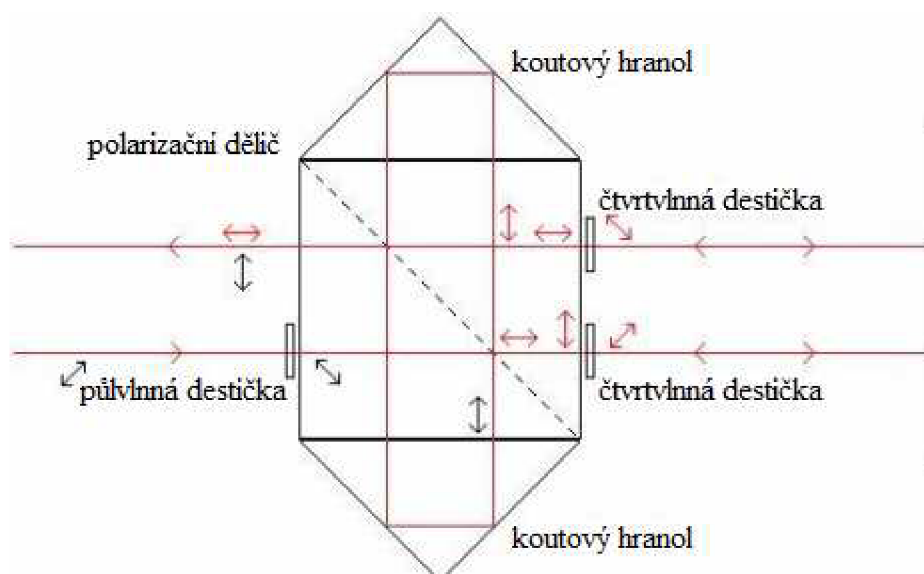
4.2 Popis jednotlivých částí měřicí soustavy

Laser – typ LS 10.1. Jednofrekvenční lineárně polarizovaný He-Ne laser se stabilizací vlnové délky a se zabudovaným rozšiřovačem svazku. Parametry laseru jsou uvedeny v tabulce 4.2.

Tabulka 4.2: Základní parametry laseru [15]

Výkon laseru	1 mW
Vlnová délka ve vakuu	632, 990 796 nm
Stabilita vlnové délky	2×10^{-8}
Průměr svazku	6 mm
Polarizace	lineární
Bezpečnostní třída	2

Interferometr - je tvořen hranolovým polarizačním děličem (propouští horizontálně polarizovaný paprsek, paprsek vertikálně polarizovaný odráží), dvěma koutovými hranoly, jednou půlvlnnou destičkou na vstupu do interferometru (stáčí rovinu polarizace paprsku o 90°) a dvěma čtvrtvlnnými destičkami na výstupu interferometru (stáčí rovinu polarizace paprsku o 45°). Interferometr v této sestavě je určen pro měření délek se zrcadlem jako odražečem. Schéma interferometru je zobrazeno na Obrázku 4.2.



Obrázek 4.2: Schéma interferometru [15]

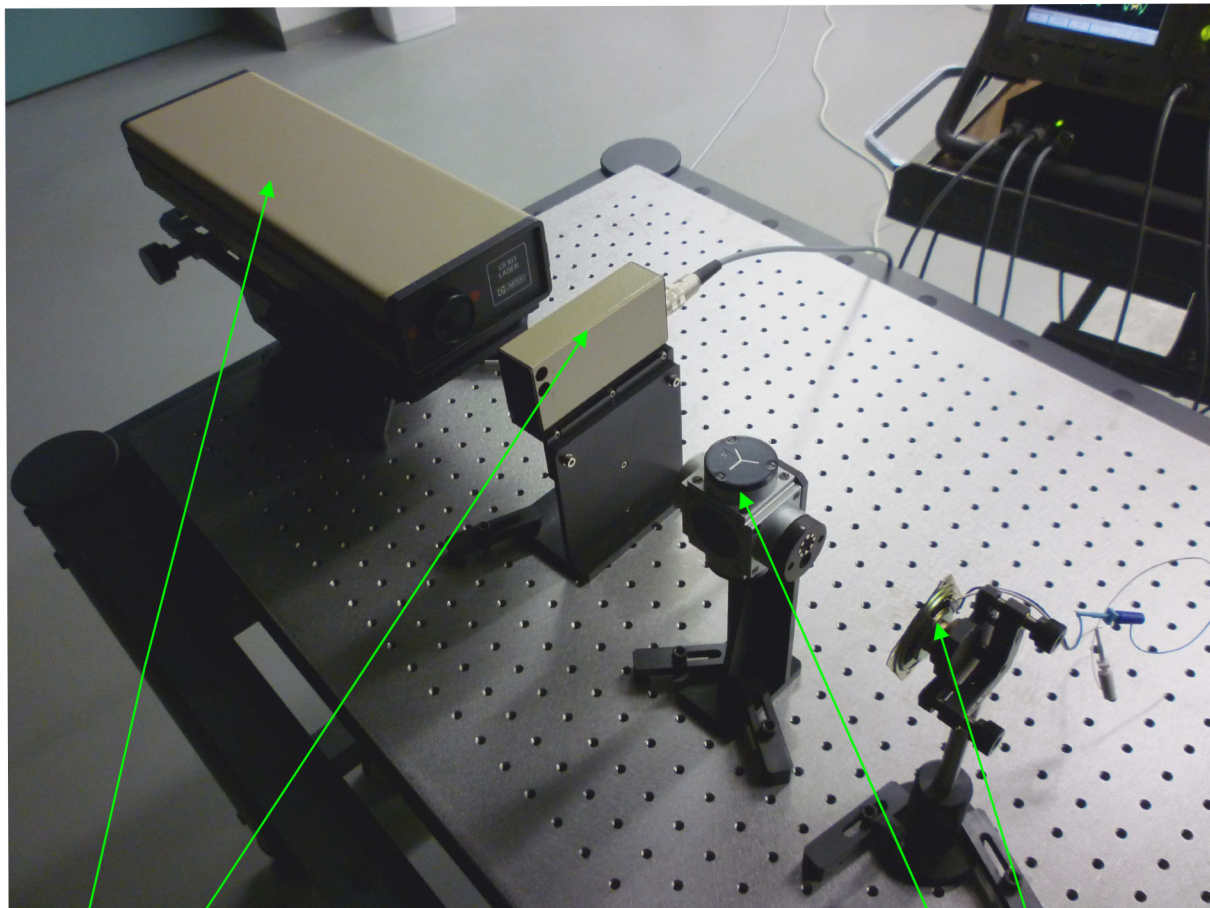
Na vstupu do interferometru je lineárně polarizovaný paprsek v úhlu 45° . Na výstupu jsou pak paprsky dva (referenční a měřicí) ve vzájemně kolmé polarizaci. K samotné interferenci dochází až v přijímači.

Zrcadlo – přesné rovinné odrazné zrcadlo. Upíná se na předmět, jehož poloha má být měřena. Slouží k reflexi laserového svazku zpět do interferometru. Měříme jeho změnu vzdálenosti vzhledem k interferometru.

Přijímač – typ LS 40.1. Odklání laserový svazek o 90° a následně zpracovává světelný interferenční signál a převádí ho na signál elektrický. Svazek přicházející do přijímače je optickými elementy rozdělen na 4 části z nichž každá je po průchodu polarizátory samostatně detekována a fázově posunuta. Po dalším zpracování a zesílení se na výstupu získávají dva signály fázově posunuté o 90° .

Napájecí zdroj – typ LS 11.1. Samostatná jednotka spojená s laserovou hlavicí kabelem. Napájecí napětí je 230V/33VA. Součástí zdroje je diodová indikace správné funkce servosystému stabilizace s tlačítkem RESET pro znovuzapojení zpětné vazby v případě výskytu chyby [15].

Celý měřicí systém je zobrazen na Obrázku 4.3.



Obrázek 4.3: Měřicí laserový interferenční systém

Laser

Přijímač

Interferometr

Reproduktor s odrazným
zrcátkem

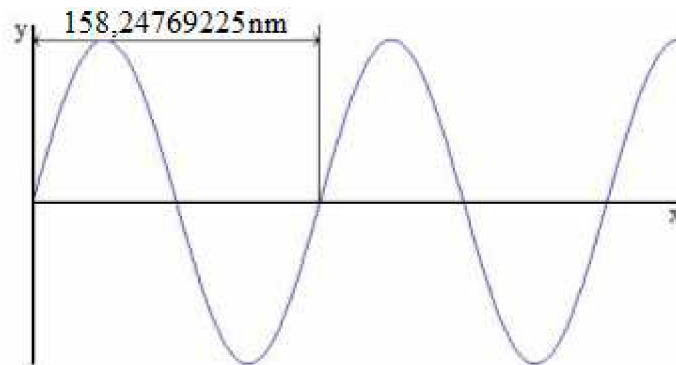
5. Zpracování dat

Zhotovený měřicí interferenční systém má sloužit k dynamickému měření výkyvů membrány reproduktoru, které způsobují akustické vlny. Proto odrazné zrcátko měřicího systému přichytíme na membránu reproduktoru. Naměřená data budou použita k rekonstrukci zdrojového signálu, který byl pouštěn do reproduktoru. Jak již zde bylo uvedeno, na výstupu z měřicího systému jsou dva signály fázově posunuté o 90° viz. Obrázek 5.2.

Jestliže se výchylka membrány pohybuje v rozmezí jedné periody výstupního signálu, je tato výchylka přímo určena změnou fáze výstupního signálu. Je-li výchylka větší než jedna perioda, musíme zjistit, ve které periodě se nalézá - dvě různé výchylky určené stejnou změnou fáze mají tyto fáze v jiných periodách výstupního signálu. Zpracování signálů lze provést více způsoby.

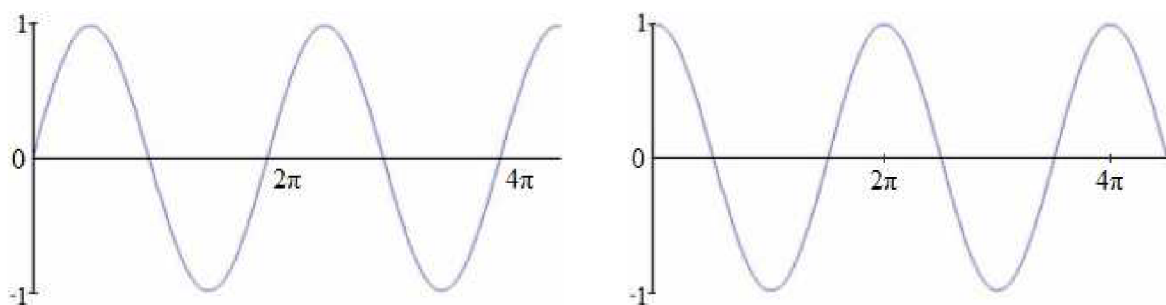
5.1 Počítání průchodů přes nulu

Jedním ze způsobů zpracování signálů je počítání průchodů signálu přes nulu. Víme-li, že vlnová délka laseru je $632,990796\text{nm}$, potom perioda výstupních signálů činí čtvrtinu této délky, neboť laserový paprsek prochází měřenou oblastí čtyřikrát. Jedna perioda tedy znamená posuv o $158,24769225\text{nm}$.

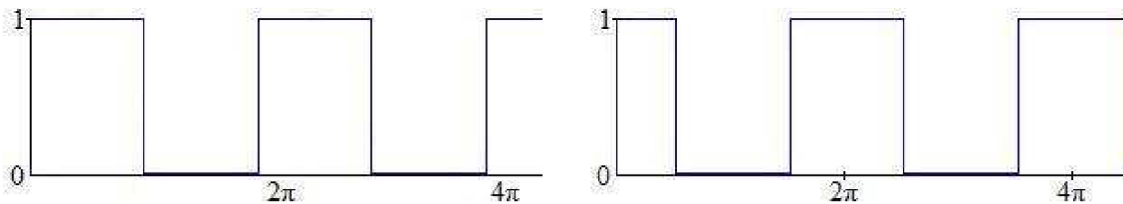


Obrázek 5.1: Znázornění posuvu předmětu na periodě výstupního signálu

Výstupní sinusové signály převedeme na signály obdélníkové, abychom mohli detekovat nástupné nebo sestupné hrany viz. Obrázek 5.3.

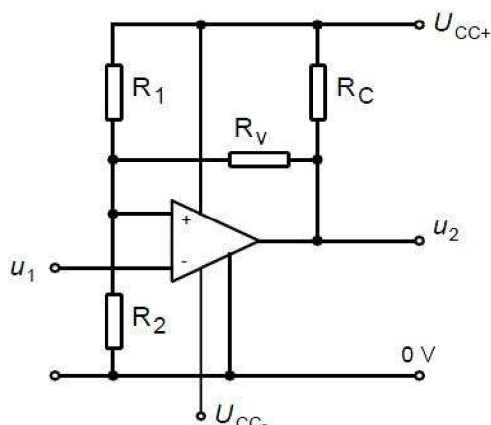


Obrázek 5.2: Ukázka výstupních signálů



Obrázek 5.3: Ukázka výstupních signálů převedených na signály obdélníkové

K získání obdélníkových signálů jsme použili komparátor s komparačním zesilovačem, jehož zapojení je znázorněno na Obrázku 5.4. Konkrétně jsme použili integrovaný obvod LM319N, který obsahuje dva komparátory.



Obrázek 5.4: Zapojení komparátoru [16]

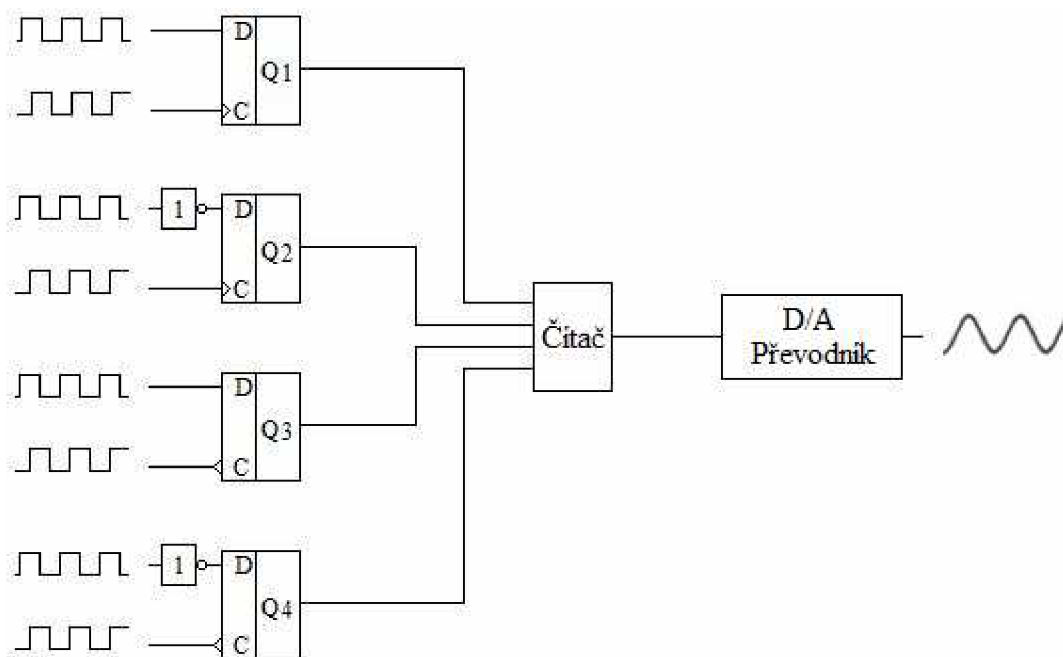
V tomto zapojení má komparátor invertující charakter a hodnoty rezistorů se určí podle rovnic

$$U_{1HL} = \frac{R_2}{R_2 + R_1 + (R_V + R_C)} U_{CC+}, \quad (5.1)$$

$$U_{1LH} = \frac{R_2 + R_V}{R_2 + R_V + R_1} U_{CC+}. \quad (5.2)$$

Napájecí napětí komparátoru U_{CC} je rovno 12V. Úroveň LH jsme stanovili na 50mV, úroveň HL na 200mV. Pro takto zvolené úrovně jsou hodnoty rezistorů následující: $R_1 = 120\text{k}\Omega$, $R_2 = 1\text{k}\Omega$, $R_C = 120\text{k}\Omega$, $R_V = 1\text{k}\Omega$, přičemž hodnoty rezistorů R_2 a R_V jsme si zvolili a zbývající hodnoty dopočítali.

Výstupní obdélníkové signály můžeme přivést na klopné obvody typu D, které detekují nástupné nebo sestupné hrany signálu a určují tak, zda se předmět posunul směrem k měřicímu systému nebo od něj.



Obrázek 5.5: Blokové schéma pro počítání průchodů přes nulu

Klopné obvody pracují podle pravdivostní tabulky, která je uvedena v tabulce 5.1. V ní jsou uvedeny čtyři možné případy. První situace nastane, když signál na vstupu C bude mít náběžnou hranu a signál na vstupu D bude v log. 1. Jedná se tak o posuv dopředu a tuto změnu zaznamená první klopný obvod. Druhá situace nastane, pokud na vstupu C bude opět náběžná hrana, ale na vstupu D bude log. 0. Tento případ značí posuv dozadu a je detekován na druhém klopném obvodu. Třetí situace je popsána sestupnou hranou na vstupu C a log. 1 na D, která znamená posuv dozadu. Tuto situaci zaznamená třetí klopný obvod. Čtvrtá situace nastane, pokud se na vstupu C objeví sestupná hrana a na vstupu D bude log. 0. Situace značí posuv dopředu a je zaznamenána čtvrtým klopným obvodem. Vidíme tedy, že první a čtvrtý klopný obvod zaznamenávají posuv dopředu, zatímco druhý a třetí obvod zachycují posuv dozadu. Při posuvu daným směrem značí jeden impuls z klopného obvodu posuv o 79,1238nm.

Tabulka 5.1: Pravdivostní tabulka klopných obvodů

Stav	Vstupy		Výstupy			
	C	D	Q1	Q2	Q3	Q4
1	1	1	1	0	0	0
2	1	0	0	1	0	0
3	0	1	0	0	1	0
4	0	0	0	0	0	1

Z klopných obvodů jde signál na vstup čítače s předdefinovanou hodnotou, který počítá posuvy dopředu i dozadu. Z něj signál putuje na D/A převodník, na jehož výstupu se poté objeví výsledný analogový signál.

Výhodou této metody je zpracování signálu v reálném čase, nízká cena a variabilita použitých součástek, kdy místo klopných obvodů můžeme použít programovatelné logické obvody nebo mikrokontrolér. Metoda se hodí převážně pro měření větších vzdáleností, pro které není měřicí krok 79,1238nm příliš velký. V našem případě se však membrána

reproduktoru vychyluje pouze v délce několika málo period výstupního signálu, proto použijeme druhou metodu.

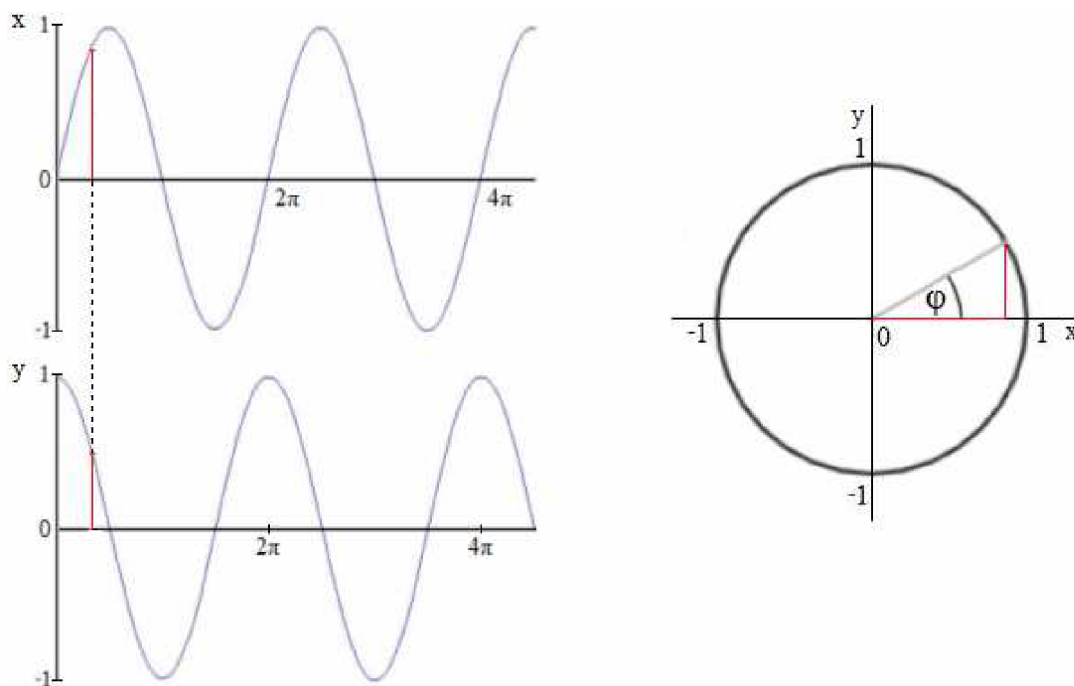
5.1.1 Výběr vhodného čítače

Abychom mohli určit o kolik period se předmět posunul, je potřeba vhodně zvolit n-bitový čítač a jeho pracovní frekvenci. Zvolíme-li například 16-bit čítač, znamená to 65536 různých stavů, tj. např. 32767 pro posuv dopředu a 32768 pro posuv dozadu. Takový čítač tedy můžeme použít pro měření posuvu do vzdálenosti 2,59 mm. Osmibitový čítač lze využít pro měření posuvu do 10 μ m. Stejný počet bitů jako u čítače použijeme u D/A převodníku.

Pro určení vhodné pracovní frekvence musíme znát přibližnou délku pohybu předmětu. Víme-li, že se membrána reproduktoru vychýlí při frekvenci $f = 1\text{kHz}$ např. o 0,1mm, znamená to posuv o tuto vzdálenost za dobu $T = 1/f = 1\text{ms}$. Jelikož jeden přichodící impuls vyjadřuje posunutí o 79,1238nm, bude k posuvu o 0,1mm zapotřebí 1264 impulsů, což znamená pracovní frekvenci čítače 1,264MHz. Pokud by posuv o tutéž vzdálenost vyvolala dvojnásobná frekvence $f = 2\text{kHz}$, bude zapotřebí také čítač s dvojnásobnou pracovní frekvencí.

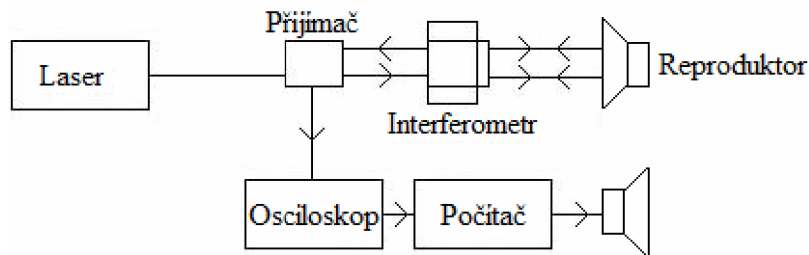
5.2 Určení posuvu pomocí funkce arkus tangens

Jedná se o metodu, při které jsou měřená data nejprve vcelku stažena z měřícího systému (např. pomocí osciloskopu) a teprve poté zpracována. Metoda spočívá v určení fáze výstupních signálů pomocí cyklometrické funkce arkus tangens, jak je naznačeno na Obrázku 5.6. Jeden signál chápeme jako hodnoty na ose x, druhý jako hodnoty na ose y.



Obrázek 5.6: Určení posuvu pomocí funkce arkus tangens

Pokud se bude měřený předmět pohybovat, bude narůstat nebo klesat fáze φ výstupních signálů podle toho, jestli se předmět pohybuje dopředu nebo dozadu. V okamžiku zastavení předmětu se zastaví také nárůst, resp. pokles fáze φ . Změna fáze o jeden stupeň značí posuv předmětu o 0,4396nm.

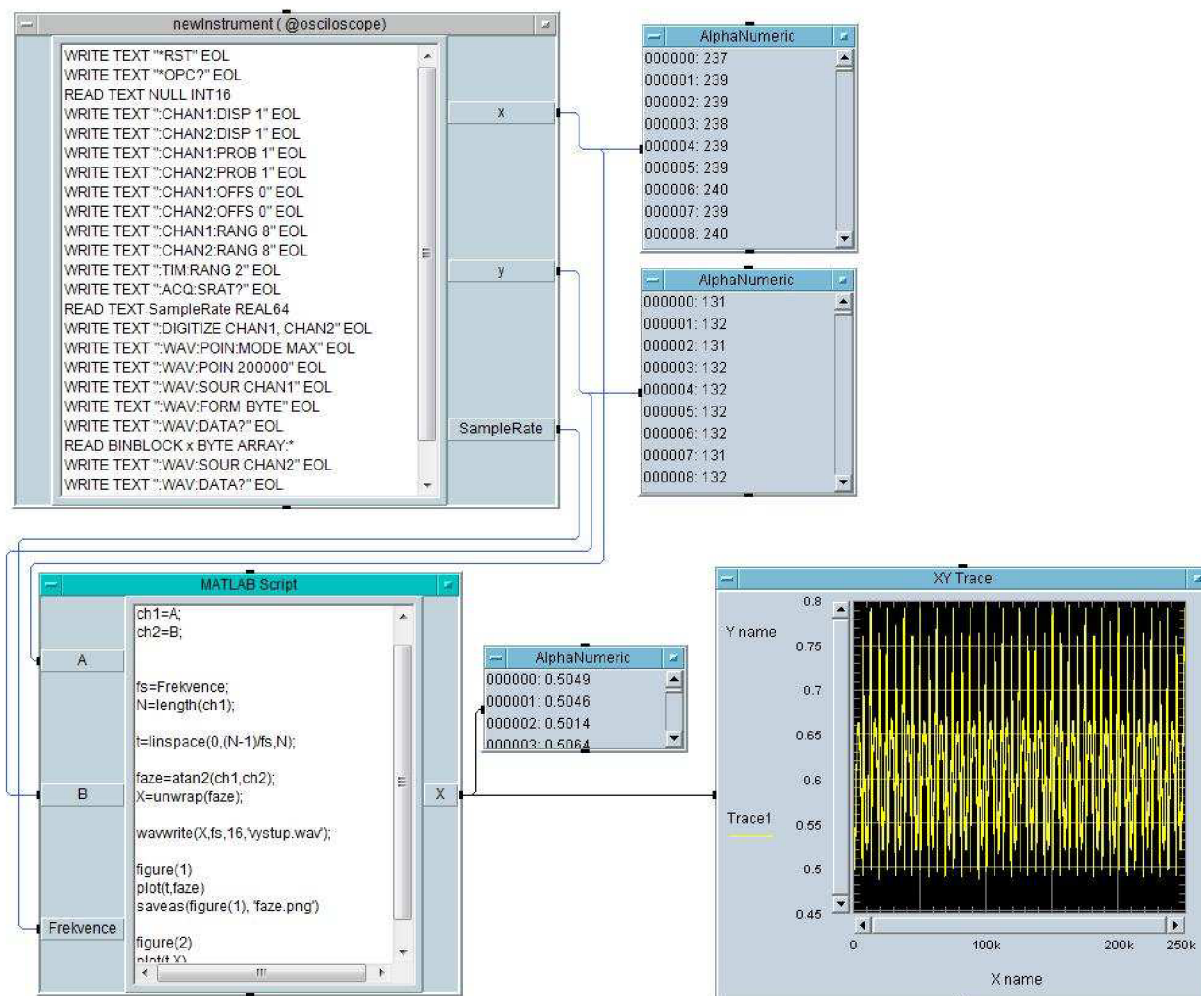


Obrázek 5.7: Blokové schéma měřicího systému pro určení posuvu pomocí arkus tangens

Nevýhoda této metody spočívá v omezené paměti osciloskopu, do které se ukládají průběhy výstupních signálů.

5.3 Komunikace osciloskop – počítač

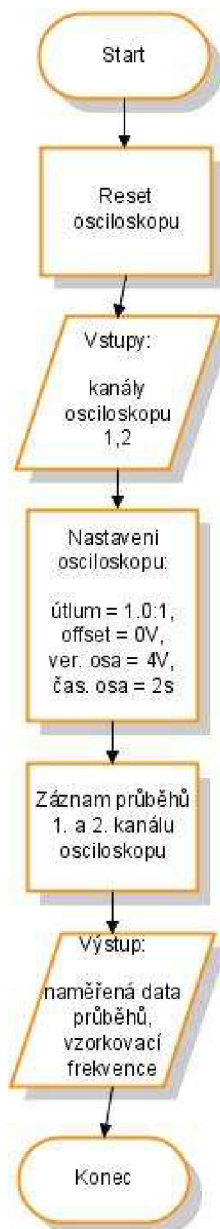
Pro zpracování naměřených dat v počítači potřebujeme program pro komunikaci mezi osciloskopem a počítačem. Protože jsme používali osciloskop firmy Agilent, vytvořili jsme komunikační program v programu Agilent VEE, který naměřená data také zpracovává viz. Obrázek 5.8.



Obrázek 5.8: Program pro komunikaci mezi osciloskopem Agilent a počítačem

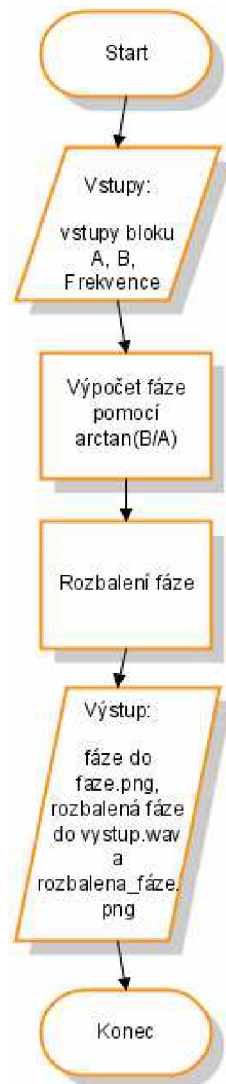
5.3.1 Popis jednotlivých bloků komunikačního programu

NewInstrument (@oscilloscope) – blok představuje reálný osciloskop Agilent 6052A. Osciloskop se v něm resetuje, dále zapne první a druhý kanál, nastaví útlum sondy 1.0:1, offset na 0V, citlivost vertikální osy na 1V/dílek a časovou osu na 2s (nejdelší možná doba snímání). Poté se snímá průběh prvního kanálu do maximálního počtu 250 000 bodů. Totéž se provede s druhým kanálem. Data se získanými průběhy se odešlou na výstupy x a y, ze kterých je můžeme zobrazit na alfanumerických displejích. Na výstup Samplerate se odešle frekvence, kterou byl signál vzorkován.



Obrázek 5.9: Vývojový diagram bloku NewInstrument (@oscilloscope)

MATLAB Skript – blok obsahuje program v MATLABu, který data z výstupů x a y předchozího bloku zpracuje. Zpracování spočívá ve výpočtu fáze pomocí arkus tangens jednotlivých bodů výstupů x a y. Poté se vypočtená fáze rozbalí, tj. registrují se průchody fáze přes 0, při kterých se přičte nebo odečte 2π podle směru výchylky membrány reproduktoru. Zpracovaná data se uloží na disk počítače do souborů `vystup.wav`, `faze.png` a `rozbalena_faze.png`.



Obrázek 5.10: Vývojový diagram bloku MATLAB Skript

MATLAB kód:

```

% vytvoreni promenne ch1 s hodnotami vstupu A
ch1=A;

% vytvoreni promenne ch2 s hodnotami vstupu B
ch2=B;

% vytvoreni promenne fs s hodnotami vstupu Frekvence
fs=Frekvence;

% vytvoreni promenne N obsahujici delku vektoru ch1
N=length(ch1);

% vytvoreni promenne t o N bodech mezi 0 a (N-1)/fs
t=linspace(0, (N-1)/fs, N);

% vypocet arkus tangens z hodnot vektoru ch1 a ch2
faze=atan2(ch1, ch2);
  
```

```
% rozbaleni faze
X=unwrap(faze);

% zapis rozbalene faze do vystup.wav
wavwrite(X,fs,16,'vystup.wav');

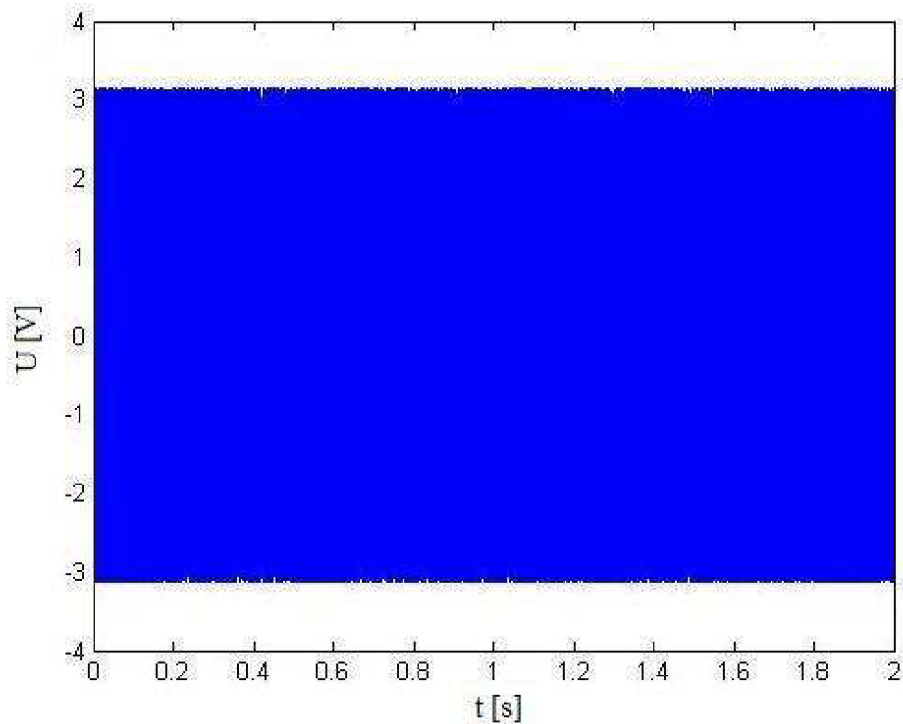
% ulozeni prubehu faze do faze.png
figure(1)
plot(t,faze)
saveas(figure(1),'faze.png')

% ulozeni prubehu rozbalene faze do rozbalena_faze.wav
figure(2)
plot(t,X)
saveas(figure(2),'rozbalena_faze.png')
```

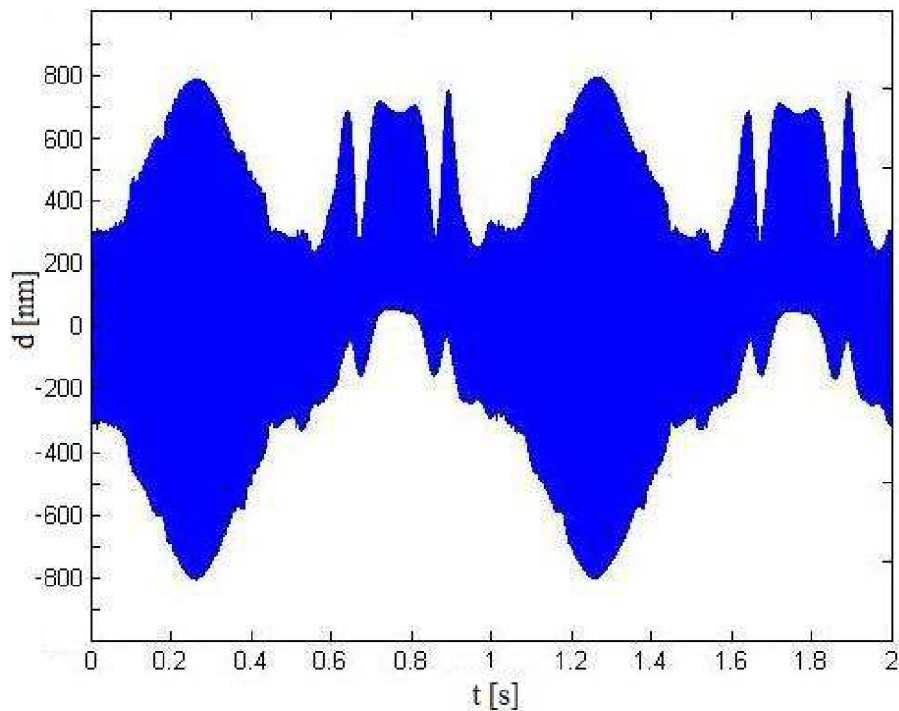
K vytvoření a odladění programu jsme použili osciloskop Agilent 6052A, funkční generátor HP 33120A a počítač s nainstalovaným SW Agilent VEE Student 9.0 a Matlab R2007b.

6. Ověření činnosti měřícího systému

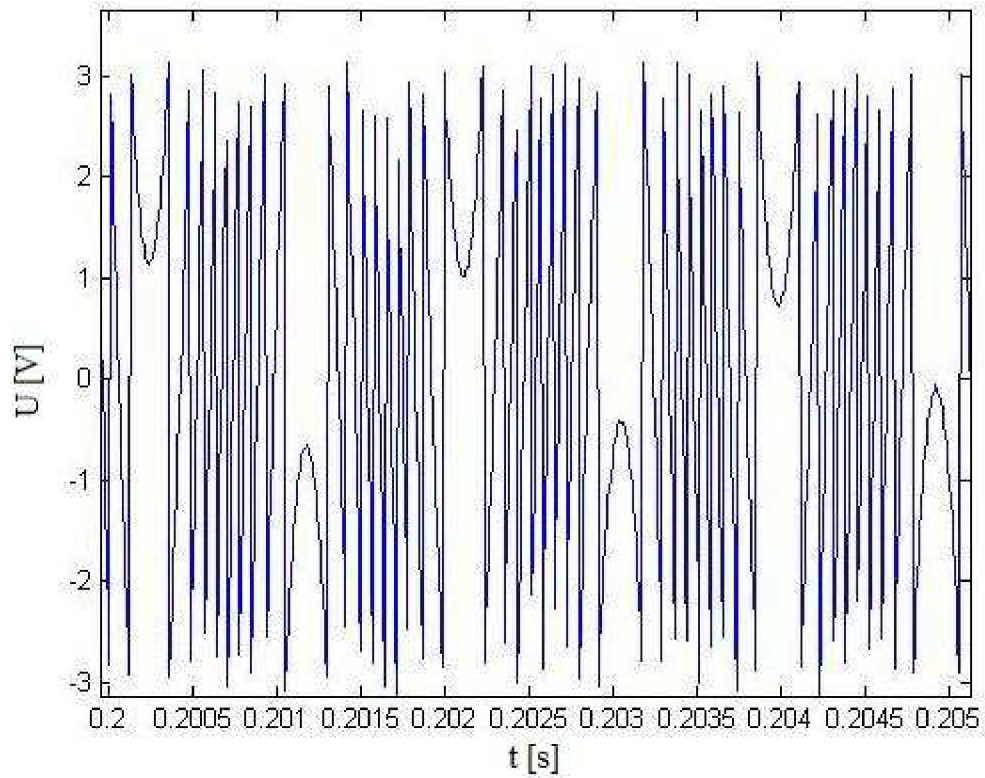
Pro ověření správné činnosti laserového měřícího systému jsme využili aplikace DataCapture a MATLABu, který nám umožní zobrazit detaily grafů naměřených průběhů. Do reproduktoru jsme nejprve pouštěli signál rozmítaný mezi 500Hz – 1500Hz. Doba rozmítání činila 1s. Naměřené průběhy jsou zobrazeny na Obrázku 6.1 až 6.4.



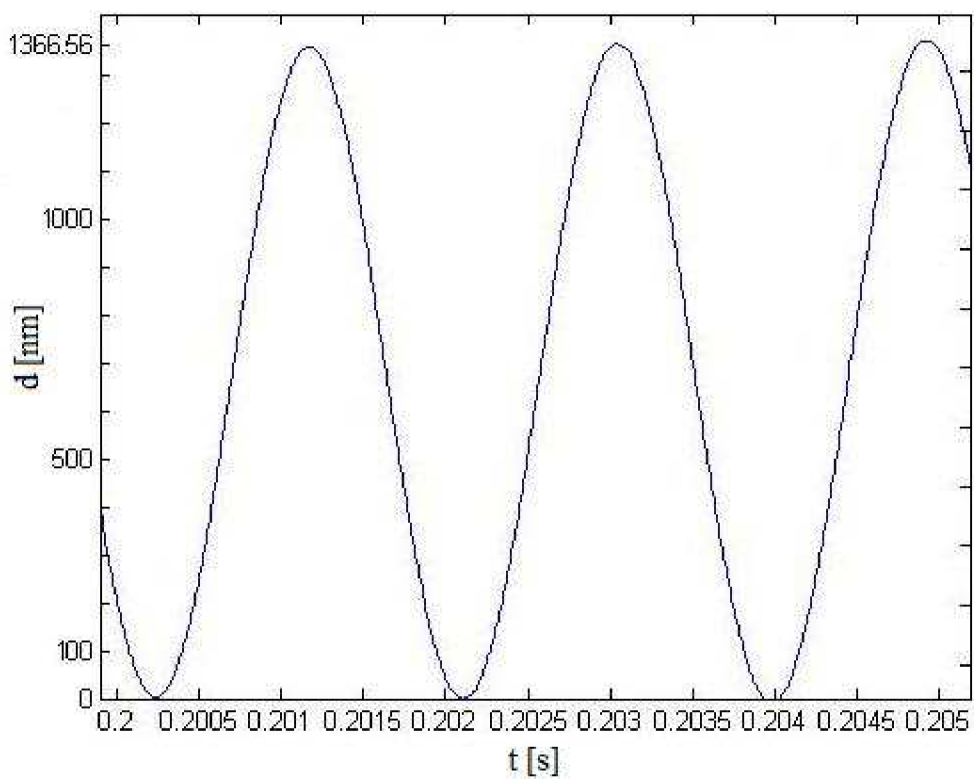
Obrázek 6.1: Nerozbalená fáze pro rozmítaný signál 500Hz – 1500Hz



Obrázek 6.2: Rozbalená fáze pro rozmítaný signál 500Hz – 1500Hz

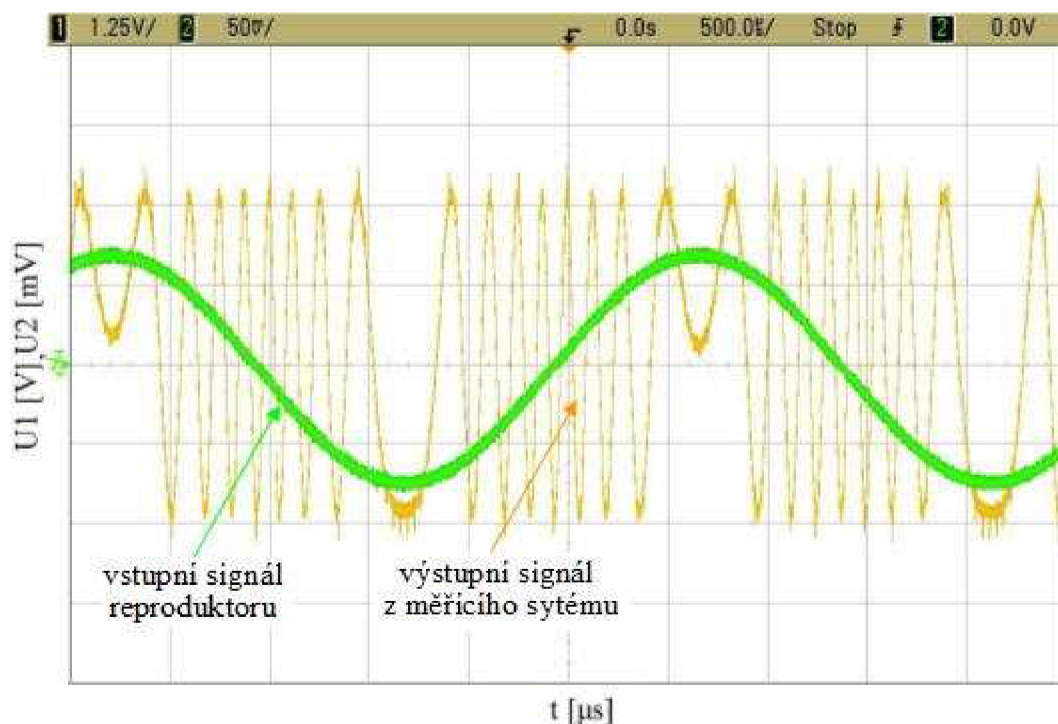


Obrázek 6.3: Detail nerozbalené fáze pro rozmítaný signál 500Hz – 1500Hz



Obrázek 6.4: Detail rozbalené fáze pro rozmítaný signál 500Hz – 1500Hz

Z Obrázku 6.2. vyplývá, že výchylka membrány reproduktoru d je funkcí frekvence signálu, který použijeme do reproduktoru. Na Obrázku 6.3. a Obrázku 6.4. vidíme, že výchylka membrány je přibližně devět period výstupního signálu. Poté, co se membrána vychýlí do své maximální hodnoty, se opět vrací do původní polohy. Pro určení závislosti výchylky membrány na frekvenci vstupního signálu jsme provedli měření na vybraných frekvencích. Výsledky jsou zobrazeny v Tabulce 6.1 a na Obrázku 6.6.

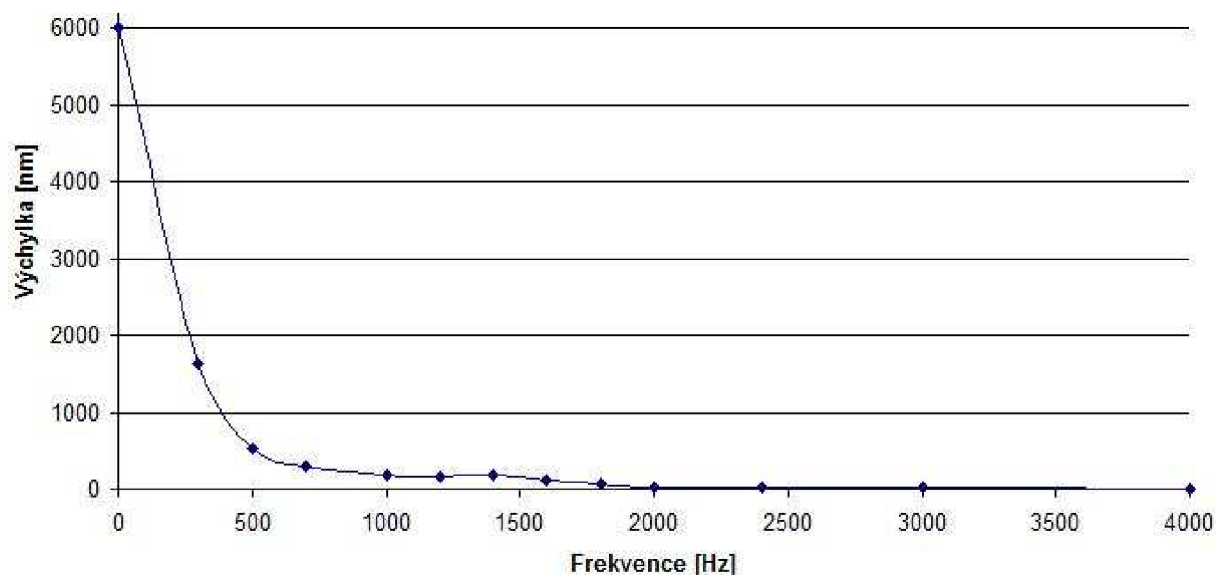


Obrázek 6.5: Vstupní signál 340Hz a výstupní signál z měřicího systému

Na Obrázku 6.5 je zobrazen vstupní signál reproduktoru s frekvencí 340Hz a výstupní signál z měřicího systému. Z obrázku je patrné, že při růstu amplitudy vstupního signálu narůstá také výchylka membrány reproduktoru. Naopak při poklesu amplitudy vstupního signálu klesá výchylka membrány.

Tabulka 6.1: Naměřené výchylky membrány pro různé frekvence

Frekvence [Hz]	1	300	500	700	1000	1200	1400
Výchylka membrány [nm]	6013,5	1644,6	527,8	310,3	189,4	165	179,9
Frekvence [Hz]	1600	1800	2000	2400	3000	4000	
Výchylka membrány [nm]	112,7	69,8	19,9	13,5	11,9	2,9	



Obrázek 6.6: Závislost výchylky membrány na frekvenci vstupního signálu

Z grafu na Obrázku 6.6. vidíme, že maximální výchylka membrány byla dosažena při frekvenci 1Hz a činila $6\mu\text{m}$. Poté výchylka prudce klesá přibližně do 500Hz. Od této frekvence se výchylka zmenšuje jen pozvolna, přičemž při 1400Hz se dokonce o málo zvětší. Od frekvence 1600Hz se v naměřených datech projevoval šum, který při frekvencích nad 4kHz zastínil užitečný signál. Pokud bychom chtěli měřit výchylku nad touto frekvencí, museli bychom zvětšit napětí vstupního signálu, které v našem případě činilo $1V_{pp}$.

Použité přístroje při měření: osciloskop Agilent 6052A, funkční generátor HP 33120A.

7. Závěr

V první části bakalářské práce jsem se zabýval samotnou interferencí. Uvedl jsem několik vzorců týkajících se interference a napsal podmínky pro vznik konstruktivní a destruktivní interference. Poté jsem přešel k interferenci světla, kde jsem uvedl podmínky jejího vzniku a také jsem dokázal její vznik na Youngově pokusu a Newtonových sklech. Dále jsem se věnoval laserům, kde jsem uvedl pár typů, které se používají v interferometrech. Další kapitolou byly interferometry, ve které jsem popsal Michelsonův, Mach-Zehnderův a Sagnacův interferometr. V další části práce jsem se zabýval sestavením laserového interferometru. Uvedl jsem parametry měřícího systému a popsal jeho jednotlivé části. Poté jsem se zabýval metodami zpracování dat, kde jsem popsal určení posuvu pomocí metody počítání průchodů přes nulu a metody s využitím funkce arkus tangens. Byl vytvořen komunikační program mezi osciloskopem a počítačem, který slouží ke stažení a zpracování naměřených dat. Tento program jsme vytvořili pomocí softwaru Agilent VEE. V poslední části práce bylo zapotřebí ověřit správnou činnost laserového měřícího systému. Ověření jsme provedli na měření výkyvu membrány reproduktoru pro různé frekvence v rozmezí 1Hz- - 4000Hz. Z měření vyplývá, že výchylka membrány roste při zvyšování amplitudy vstupního signálu, který pouštíme do reproduktoru. Obdobná situace nastává i při poklesu amplitudy vstupního signálu, při které výchylka membrány klesá. Dále bylo zjištěno, že největší výchylku způsobují signály s frekvencí do 500Hz. Při vyšších frekvencích nad 4kHz je výchylka tak mála, že se ztrácí v šumu. Není ji tedy možno měřit. Pro větší výchylku by musela být zvětšena amplituda vstupního signálu.

8. Použité informační zdroje

- [1] SVOBODA, E a kol. Přehled středoškolské fyziky. Praha: Prometheus, 2003. 497 stran. ISBN: 80-7196-116-7.
- [2] WIKIPEDIE. Interference [online]. [cit. 19.10.2008]. Dostupný z WWW: <<http://cs.wikipedia.org/wiki/Interference>>.
- [3] MATEMATICKO-FYZIKÁLNÍ WEB. Interference vlnění [online]. [cit. 11.8.2008]. Dostupný z WWW: <<http://mfweb.wz.cz/fyzika/140.htm>>.
- [4] HALLIDAY, D., RESNICK, R., WALKER, J. Fyzika, část 4, Elektromagnetické vlny, Optika, Relativita. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2006, s. 890-1032. ISBN: 80-214-1868-0.
- [5] WIKIPEDIE. Double-slit experiment [online]. [cit. 22.12.2008]. Dostupný z WWW: <http://en.wikipedia.org/wiki/Young%27s_Experiment>.
- [6] ENCYKLOPEDIE FYZIKY. Newtonova skla [online]. [cit. 1.10.2008]. Dostupný z WWW: <<http://fyzika.jreichl.com/index.php?sekce=browse&page=551>>.
- [7] SPOLEČNÁ LABORATOŘ OPTIKY. Užití korelace polí koherentní zrnitosti pro měření v mechanice [online]. [cit. 7.6.2007]. Dostupný z WWW: <<http://jointlab.upol.cz/slo/view.php?cisloclanku=2007060001>>.
- [8] HARIHARAN, P. Optical interferometry, 2nd ed. San Diego, USA: Academic Press, 2003. 308 stran.
- [9] MM PRŮMYSLOVÉ CENTRUM. Lasery, laserové technologie a stroje s laserem [online]. [cit. 4.12.2007]. Dostupný z WWW: <<http://www.mmspektrum.com/clanek/lasery-laserove-technologie-a-stroje-s-laserem>>.
- [10] JEŘÁBEK, V. Optické interferometry – příklady [online]. České vysoké učení technické v Praze, Fakulta elektrotechniky, 2008. 31 stran. [cit. 22.11.2008]. Dostupné z WWW: <<http://www.micro.feld.cvut.cz/home/X34NFS/cviceni/Mach-Zehenderuv%20interferometr%20a%20prikklady.ppt>>.
- [11] Základní fyzikální měření IV, 07 – Michelsonův interferometr [online]. Jihočeská univerzita v Českých Budějovicích, Pedagogická fakulta, Katedra fyziky. 4 strany. [cit. 24.11.2008]. Dostupné z WWW: <<http://mvt.ic.cz/dva/zfm-kvo/zfm-kvo-08.pdf>>.
- [12] PATA, V. Úvod do laserové interferometrie [online]. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav metrologie a zkušebnictví. 26 stran. [cit. 3.1.2007]. Dostupné z WWW: <http://www.umz.fme.vutbr.cz/uvod_lasery.ppt>.
- [13] KNYBLOVÁ, L. Fyzikální principy technických měřících [cit. 6.10.2005]. Dostupné z WWW: <<http://www.knyblova.czweb.org/semestralky/fptmm.pdf>>.

- [14] WIKIPEDIE. Sagnac effect [online].
<http://en.wikipedia.org/wiki/Sagnac_effect>.
- [15] Limtek LMS, Sestava pro laserové interferenční měření délek, Technický popis. 5 stran.
- [16] KOLOUCH, J., BIOLKOVÁ, V. Impulsová a číslicová technika, přednášky [online].
Brno: Vysoké učení technické, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií,
2003. 187stran. [cit. 5. 5. 2009], Dostupný z WWW: <https://www.feec.vutbr.cz/et/skripta/urel/Imp_a_cisl_technika_S.pdf>.
- [17] Agilent Technologies, Agilent infiniivision 6000 series oscilloscopes, Programovací manuál [online]. 886 stran. [cit. 13.4.2009]. Dostupný z WWW: <http://www.home.agilent.com/upload/cmc_upload/All/6000_series_prog_guide.pdf>.