

PŘÍRODOVĚDECKÁ FAKULTA
UNIVERZITY PALACKÉHO V OLOMOUCI

Katedra optiky



Aktivní fázová stabilizace interferometru pomocí zpětnovazební PID regulace

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Vojtěch Švarc

2016

PŘÍRODOVĚDECKÁ FAKULTA
UNIVERZITY PALACKÉHO V OLOMOUCI

Katedra optiky



**Aktivní fázová stabilizace interferometru
pomocí zpětnovazební PID regulace**

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Vypracoval:	Vojtěch Švarc
Studijní program:	B1701 Fyzika
Studijní obor:	Optika a optoelektronika, 3. ročník
Forma studia:	prezenční
Vedoucí bakalářské práce:	Mgr. Martina Miková
Konzultant bakalářské práce:	Mgr. Miroslav Ježek, Ph.D.
Práce odevzdána dne:

Abstrakt

Cílem práce je aktivní stabilizace fáze v inteferometru pomocí analogové PID regulace. V rámci práce byl sestaven dvousvazkový Michelsonův interferometr, na němž byla sestavená PID regulace testována a laděna. Byla provedena měření stability při stabilizaci fáze blízko minima, maxima a v polovině interferenčního proužku. Dle očekávání byla stabilizace nejúčinnější v polovině proužku, fázový drift během osmi hodin byl zmenšen z 1100° na 2° . Pomocí rychlé Fourierovy transformace byla zjištěna spektra fázových změn, stabilizační smyčka zmírnila fázové změny na frekvencích do 100 Hz. V druhé části práce je diskutována implementace PID regulace do vláknového Machova-Zehnderova interferometru a proveden test PID regulace v tomto experimentálním uspořádání.

Klíčová slova

Optická fáze, stabilizace, interferometr, PID regulace.

Poděkování

Chtěl bych poděkovat Mgr. Martině Mikové za vedení mé bakalářské práce, trpělivost a čas strávený konzultacemi. Velké díky patří i Mgr. Miroslavu Ježkovi, Ph.D. za cenné rady a konzultace. Dále děkuji Mgr. Robertovi Stárkovi za pomoc s rychlou Fourierovou transformací a ostatním kolegům z laboratoře za příjemnou a uvolněnou atmosféru. V neposlední řadě bych chtěl poděkovat své rodině za podporu a zázemí.

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem předloženou práci napsal samostatně pod vedením Mgr. Martiny Mikové a Mgr. Miroslava Ježka, Ph.D. s použitím uvedené literatury. Souhlasím, aby byla práce použita pro potřeby výuky a prezentována na internetových stránkách Univerzity Palackého.

V Olomouci dne

Obsah

1	Úvod a motivace	1
2	Metody	3
2.1	Michelsonův interferometr	3
2.2	Fázové změny a jejich kompenzace	5
2.3	Mezní frekvence	6
2.4	PID regulace	7
2.5	Možnosti realizace PID	8
3	Experiment	10
3.1	PID kontroler	10
3.2	Nastavení zisku PID regulace	11
3.3	Výkonové členy	12
3.4	Michelsonův dvousvazkový interferometr	13
4	Zpracování dat a diskuze výsledků	15
4.1	Měření stability interferometru	15
4.2	Frekvenční obraz	19
4.3	Souvislost stabilizačního a měřicího svazku	21
5	Diskuze implementace PID regulace do vláknového Machova-Zehnderova interferometru	23
5.1	Experimentální uspořádání	25
5.2	Test stabilizační smyčky pro vláknový MZI	26
6	Závěr	29
	Literatura	31
A	Justáž Michelsonova dvousvazkového interferometru	33
B	Fluktuace vstupní intenzity	34
C	Fotografie experimentálních uspořádání	35

1 Úvod a motivace

Interferometrie má řadu aplikací jak v komerční sféře, tak v základním výzkumu. Interferometry se využívají v metrologii k velmi přesným měřením, na základě změny fáze interferujících svazků lze měřit rozdíly vzdáleností s přesností zlomků vlnové délky světla [1]. Toho bylo nedávno využito při detekci gravitačních vln, kde se fáze interferujících svazků měnila v důsledku periodické deformace časoprostoru v ramenech Michelsonova interferometru [2]. Interferometry mají časté využití i při experimentech kvantové optiky, jako je přenos kvantového klíče při kvantovém šifrování [3] nebo při testech porušení Bellových nerovností [4, 5]. Abychom zamezili samovolným změnám fáze v důsledku nestability prostředí, je nutné stabilizovat fázi pasivními či aktivními metodami. Existují stabilní konfigurace jako například Sagnacův interferometr, které jsou po určitý čas stabilní i bez aktivní stabilizace [6], většinu interferometrů je však nutné stabilizovat pasivně i aktivně.

Aktivní stabilizace bývá nejčastěji realizována pomocí PID regulace připojené na fázový modulátor. Zpětnovazební PID regulace vyhodnocuje změny interferenčního obrazce detekovaného CCD kamerou [7] či změny výstupní intenzity z interferometru [8, 9], které jsou úměrné změně fáze a dle potřeby je kompenzuje pomocí fázového modulátoru. Výhodou aktivní stabilizace je možnost udržení konstantní fáze i po dobu několika desítek hodin [7].

Pro experimenty kvantové optiky, ve kterých pracujeme s jednofotonovými zdroji, může být stabilizace obtížná. Pokud pro vyhodnocování fázových změn využijeme zdroj na jednofotonové úrovni a jednofotonové detektory, je problematické stabilizovat vyšší frekvence, jelikož nám omezený počet detekovaných fotonů nedává dostatečně rychlou a přesnou informaci o skutečné fázi v interferometru [10]. Existuje například sekvenční stabilizace na jednofotonové úrovni, při které je měření přerušované stabilizační procedurou po řádově několika vteřinách [11], to se však projeví delší dobou měření a pro delší akumulární časy se může zvýšit nejistota měření. Řešením je využití kontinuální stabilizace na silném svazku, který je však nutné dokonale odseparovat od jednofotonového měřicího signálu, což je nelehký úkol [8, 9].

Naše práce směřuje k aktivní fázové stabilizaci vláknového Machova - Zehnderova interferometru s jednofotonovým měřicím signálem a silným stabilizačním signálem. V rámci této práce je realizován první test, tedy vývoj PID regulace a její aplikace pro stabilizaci objemového Michelsonova inter-

ferometru. Smyčka byla otestována i na vláknovém Machově - Zehnderově interferometru, kde byly oba svazky silné. Experimentální uspořádání využívající velmi podobnou architekturu dvousvazkového interferometru stabilizovaného pomocí PID regulace je využito v několika nedávno realizovaných experimentech [4, 5, 8, 9, 12].

V předložené práci jsem sestrojil zmíněný Michelsonův interferometr (sekce 3.4) i elektronickou zpětnovazební smyčku (sekce 3.1), hledal její optimální parametry a porovnával stabilitu Michelsonova interferometru s využitím stabilizační smyčky a bez ní (sekce 4.1). V rámci práce rovněž proběhla diskuze a první test implementace zpětnovazební smyčky do Machova - Zehnderova interferometru (kapitola 5).

2 Metody

2.1 Michelsonův interferometr

Schéma Michelsonova interferometru je na obrázku 1. Vstupní svazek je pomocí děliče svazku rozdělen do dvou ramen, svazky se odrazí od zrcátek, na stejném děliči se složí a interferují. Výsledná intenzita, kterou detekujeme, závisí na rozdílu drah ramen v interferometru Δl . Jelikož svazek musí projít dráhový rozdíl $\Delta l = |l_1 - l_2|$ cestou tam i zpět, platí

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi}{\lambda} \cdot n \cdot 2\Delta l, \quad (1)$$

kde λ je vlnová délka záření, $\Delta\varphi$ fázový rozdíl interferujících svazků a n je index lomu vzduchu, který uvažujeme $n = 1$. Výsledná intenzita I je dána interferenčním zákonem

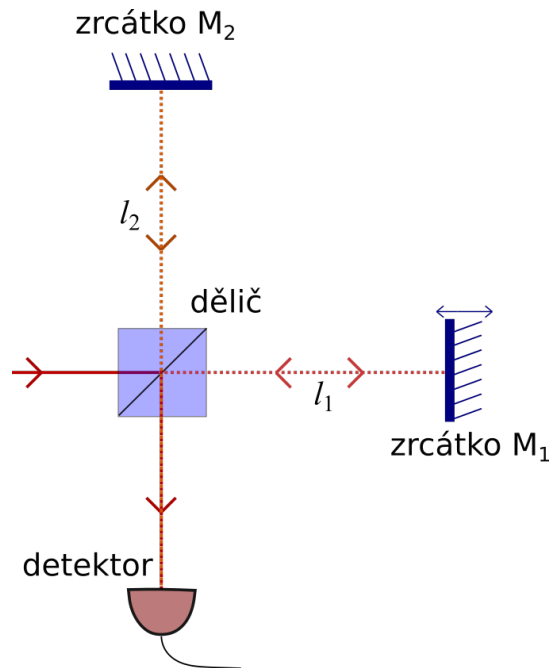
$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} |\gamma| \cos \Delta\varphi, \quad (2)$$

kde I_1 a I_2 jsou intenzity interferujících svazků a $|\gamma|$ je modul stupně časové koherence, který může nabývat hodnot z intervalu $\langle 0, 1 \rangle$. Pro další úvahy předpokládáme $|\gamma| = 1$. Maximální intenzita I_{\max} , kterou můžeme detekovat, je pro fázový rozdíl $\Delta\varphi = 0 + 2k\pi$, kde $k = 0, 1, 2, 3, \dots$. Nastává tzv. konstruktivní interference. Minimální intenzitu I_{\min} detekujeme při fázovém rozdílu $\Delta\varphi = \pi + 2k\pi$, kde $k = 0, 1, 2, 3, \dots$. Nastává tzv. destruktivní interference.

Hrubě jsme schopni dráhový rozdíl Δl ovlivňovat jedním ze zrcátek, které je umístěné na mechanickém lineárním posuvu. Druhé zrcátko je připojeno na piezokrystal, kterým jsme schopni vychylovat zrcátko o vzdálenosti v řádu jednotek až desítek mikrometrů s rozlišením v řádu nanometrů. Takto jemný posuv nám umožňuje nastavit konkrétní fázi v interferometru, či proskenovat interferenční proužky, což je důležité například při justáži [14].

Nyní odvodíme závislost intenzity interferujících svazků I_1 a I_2 na dělicím poměru děliče svazku s intenzitní propustností T a odrazivostí R pro Michelsonův interferometr. Pokud nebudeme uvažovat ztráty na děliči, platí $R + T = 1$. Ztráty při odrazu η_1, η_2 na zrcátkách M_1, M_2 budeme uvažovat $\eta_1 = \eta_2 = \eta$.

Vstupní svazek s intenzitou I_0 se rozdělí na děliči do dvou svazků (viz obr. 1). Pro intenzitu prošlého svazku (červený tečkovaný) I_1' musí platit



Obrázek 1: Schéma Michelsonova interferometru. Vstupní svazek je děličem rozdělen do dvou kolmých ramen, odražen od zrcátek a složen na stejném děličí. Výslednou interferenci měříme detektorem.

$I'_1 = TI_0$. Následně se svazek odrazí od zrcátka M_1 , postupuje zpět stejnou drahou, dopadá opět na dělič, kde jeho odraženou část detekujeme, platí tedy

$$I_1 = \eta T R I_0. \quad (3)$$

Pro odražený vstupní svazek (oranžový tečkovaný) platí $I'_2 = RI_0$. Následně se odrazí od zrcátka M_2 , dopadne znovu na dělič a jeho prošlou část detekujeme, platí tedy

$$I_2 = \eta R T I_0. \quad (4)$$

Srovnáme-li vztahy (3) a (4), zjistíme že

$$I_2 = I_1. \quad (5)$$

Svazky na výstupu interferometru mají stejnou intenzitu, dosazením do interferenčního zákona (2) získáme zjednodušený vztah

$$I = 2I_1(1 + \cos \Delta\varphi). \quad (6)$$

Pro vyhodnocení kvality interference se zavádí veličina zvaná vizibilita V , neboli kontrast interferenčního proužku. Definuje se vztahem

$$V = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}}, \quad (7)$$

kde I_{\max} je maximum intenzity odpovídající konstruktivní interferenci a I_{\min} minimum intenzity odpovídající destruktivní interferenci. Maximální vizibilitu $V = 1$ dostaneme pro $I_{\min} = 0$. Jak bylo odvozeno v předchozí kapitole, prošlý i odražený svazek mají stejnou intenzitu, což znamená, že v ideálním případě vizibilita nezávisí na dělicím poměru děliče svazku.

Pomocí detektoru jsme schopni detekovat pouze intenzitu interferujících svazků, resp. odpovídající proud (napětí) z detektoru, nikoliv fázi. Nás budou zajímat fázové změny, vyjádříme tedy fázi ze zjednodušeného tvaru interferenčního zákona (6).

$$\Delta\varphi(t) = \arccos \left[\frac{I(t)}{2I_1} - 1 \right], \quad (8)$$

kde $I(t)$ je aktuální intenzita a I_1 intenzita interferujících svazků, která je v ideálním případě v čase konstantní.

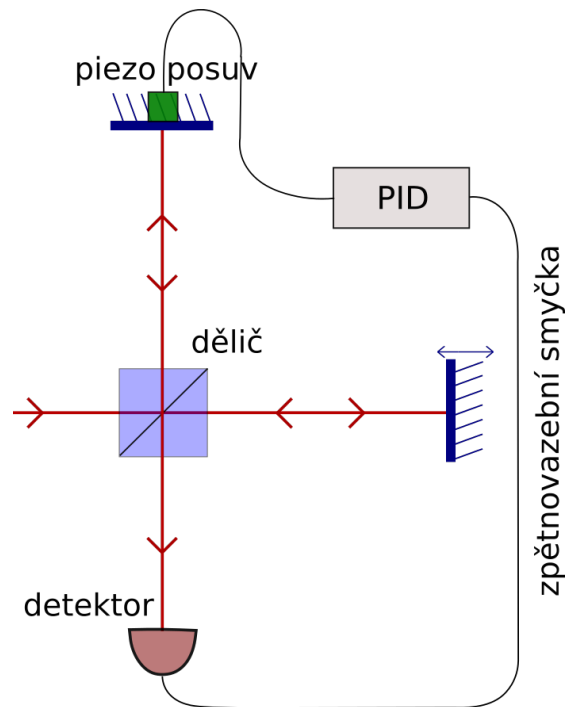
2.2 Fázové změny a jejich kompenzace

Každý interferometr vykazuje v čase samovolné fázové změny, které odpovídají změně délek ramen interferometru nebo indexu lomu v optických vláknech. Fázové změny mohou být způsobeny například prouděním vzduchu, mechanickými vibracemi či změnami teploty. Uvážíme-li, že vlnová délka laserového svazku se obvykle pohybuje v řádu stovek nm, stačí sebemenší vychýlení jednoho ze zrcátek a fáze se zásadně změní. Pro laserový svazek o vlnové délce λ znamená změna jeho dráhy o $\frac{\lambda}{2}$ změnu fáze o 180° , což může být změna z maxima interferenčního proužku do minima.

Samovolné změny fáze je potřeba eliminovat, jinak bychom neměli kontrolu nad výslednou interferencí. K tomu lze použít pasivních či aktivních metod stabilizace. Vzduchové proudění a mechanické vibrace lze částečně stabilizovat pasivními metodami, tedy zakrytím interferometru a jeho umístěním na optický stůl. Samotná pasivní stabilizace však nebývá zejména z hlediska delších časových intervalů postačující, proto se pro dosažení vysoké stability používá zpravidla jak pasivní, tak aktivní stabilizace.

Aktivní stabilizaci je možné realizovat pomocí elektronické zpětnovazební smyčky (viz obr. 2), která umožňuje kromě kompenzace fázových změn také

nastavení konkrétní fáze v interferometru. Zpětnovazební smyčka zahrnuje detektor, elektronický obvod (PID regulaci - podrobný popis viz dále) a fázový modulátor, v našem případě se jedná o piezokrystal, který je na základě piezoelektrického jevu [13, 15] schopen pohybovat jedním ze zrcátek o vzdálenosti v řádu jednotek až desítek mikrometrů s krokem v řádu nanometrů. Na základě detekované intenzity a časového průběhu změn intenzity posílá PID regulace na piezokrystal odpovídající napětí. Piezokrystal posouvá zrcátkem tak, aby vykompenzoval nechtěné fázové změny. Na stejném principu funguje stabilizace vláknového interferometru, kde se rozdíl optických drah kompenzuje natahováním či uvolňováním optického vlákna.



Obrázek 2: Schéma objemového Michelsonova interferometru se zpětnovazební smyčkou, která zajišťuje konstantní fázi.

2.3 Mezní frekvence

Zpětnovazební smyčka zahrnující PID regulaci, fázový modulátor (piezokrystal) a detektor je schopna přenášet jen určitý rozsah frekvencí, což znamená, že nelze stabilizovat libovolně rychlé změny fáze. U piezokrystalu je největším omezením jeho kapacita, rovněž elektronické součástky a vodiče mají

parazitní kapacitu, kterou nelze plně eliminovat, což se projeví pomalejší odezvou a také detektor má konečnou rychlost odezvy.

Proto je výhodné definovat pojem mezní frekvence, která určuje jakou frekvenci je schopen systém přenést. Mezní frekvence $f_{3\text{dB}}$ určitého systému je frekvence, při níž zisk K klesne na polovinu maximální hodnoty, tedy $K(f_{3\text{dB}}) = \frac{1}{2}K_{\text{max}}$.

2.4 PID regulace

PID regulace [16, 17] je typ elektronické zpětnovazební smyčky sloužící ke stabilizaci určité veličiny. Tato veličina je převedena na napětí a poslána na vstup PID regulace společně s námi zvoleným, referenčním napětím. Základní princip spočívá v porovnání vstupního napětí s referenčním napětím, jejich rozdíl se snaží PID smyčka minimalizovat. Používá k tomu proporční (P), integrační (I) a derivační (D) člen. Správné nastavení parametrů PID zajistí optimální stabilizaci. Celkově se naše PID regulace skládá z následujících pěti členů: diferenční člen, proporční člen, integrační člen, derivační člen a sumační člen.

V **diferenčním členu** se provede rozdíl referenčního napětí U_{set} a napětí z detektoru U_{photo} , výsledné chybové napětí U_{err} je dáno vztahem

$$U_{\text{err}} = U_{\text{set}} - U_{\text{photo}}. \quad (9)$$

Výsledné chybové napětí je závislé na čase a obsahuje různé frekvence v závislosti na procesu, který stabilizujeme. V našem případě obsahuje signál frekvence v řádu jednotek i zlomků Hz, což odpovídá pomalým změnám (změny teploty), dále obsahuje frekvence v řádu desítek Hz, které odpovídají proudění vzduchu a rychlé frekvence v řádu stovek a tisíců Hz, které odpovídají mechanickým vibracím (vibrace stolu, hluk). Chybové napětí U_{err} přivedeme následně na vstup proporčního, integračního a derivačního členu.

Proporční člen zesílí chybové napětí U_{err} se ziskem K_P . To lze matematicky zapsat jako

$$U_P = K_P \cdot U_{\text{err}}, \quad (10)$$

kde U_P je výstupní napětí z proporčního členu. Všechny obsažené frekvence jsou zesíleny stejným faktorem.

Příspěvek **integračního členu** je dán historií chybového napětí U_{err} . Matematicky lze vyjádřit jeho působení integrací po dobu t , tedy

$$U_I = K_I \int_0^t U_{\text{err}}(\tau) d\tau, \quad (11)$$

kde U_I je výstupní napětí z integračního členu, K_I je zisk integračního členu. Integrační člen zesílí nízké frekvence, reaguje tedy na pomalé změny. Integrační člen je velmi náchylný k oscilacím.

Derivační člen vybere z napětí U_{err} vysoké frekvence a zesílí je se ziskem K_D . Výstupní napětí z derivačního členu U_D je dáno derivací

$$U_D = K_D \frac{dU_{\text{err}}}{dt}. \quad (12)$$

V PID regulaci se tento člen chová jako tlumící člen. Bohužel však také zesiluje šum.

Sumační člen provede sečtení napětí z jednotlivých bloků PID, výstupní napětí U_{out} je dáno vztahem

$$U_{\text{out}} = U_P + U_I + U_D. \quad (13)$$

Pokud dosadíme za příspěvky jednotlivých bloků PID, získáme vztah

$$U_{\text{out}} = K_P \cdot U_{\text{err}} + K_I \int_0^t U_{\text{err}}(\tau) d\tau + K_D \frac{dU_{\text{err}}}{dt}, \quad (14)$$

který udává celkové výstupní napětí z PID regulace. V našem experimentu je výstupní napětí přivedeno na piezokrystal.

2.5 Možnosti realizace PID

PID regulace může být realizována jako analogová nebo digitální. V dnešní době jsou hojně využívány mikroprocesory, jejich hlavní výhodou je variabilita. Ladění parametrů probíhá automaticky a v pravidelných časových intervalech se parametry automaticky přenastavují, aby se dosáhlo optimální stabilizace. Nevýhodou je však větší šum, tedy menší přesnost než u analogových PID regulací, další nevýhodou je menší šířka pásma [17].

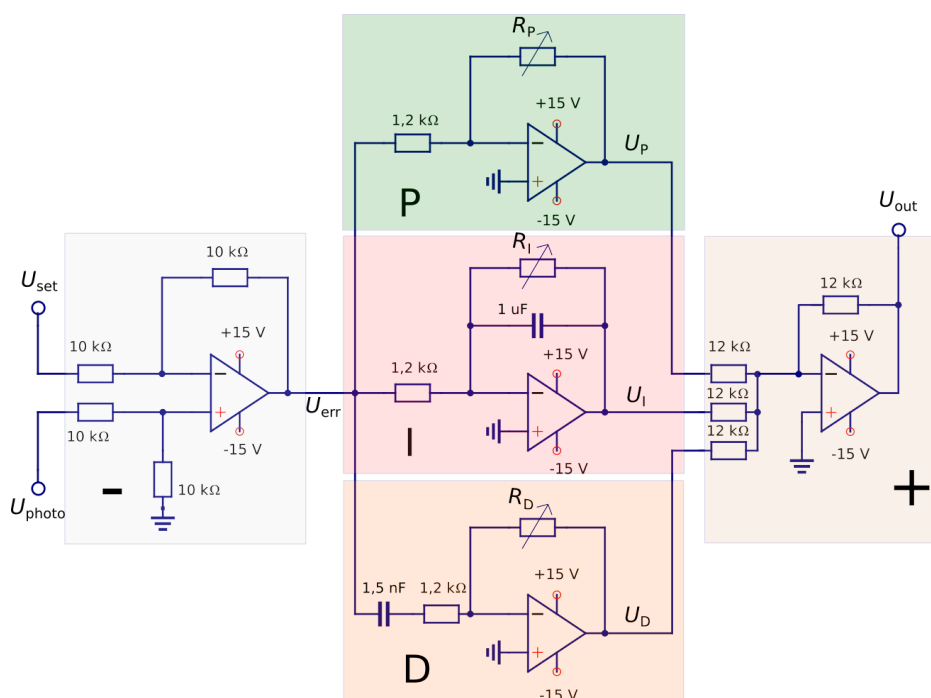
Analogová PID regulace se používá zpravidla tam, kde je potřeba velké stability. Příkladem může být teplotní PID kontroler laserové diody, který zajišťuje, že se v čase nemění vlnová délka emitovaného záření. Také při fázové

stabilizaci je potřeba velká přesnost, proto jsme v našem případě sestrojili analogovou PID regulaci. Použili jsme operačních zesilovačů s negativní zpětnou vazbou [18]. Jelikož je naše PID regulace sestavena z pěti nezávislých bloků, je snadné ji upravovat a ladit dle potřeb.

3 Experiment

V rámci této kapitoly je popsáno experimentální uspořádání Michelsonova interferometru a elektronické zpětnovazební smyčky. Všechny parametry a nastavení PID regulace uvedené zde se vztahují ke stabilizaci Michelsonova interferometru. Při stabilizaci vláknového Machova-Zehnderova interferometru je třeba tyto parametry změnit, což je uvedené v kapitole 5.

3.1 PID kontroler



Obrázek 3: Schéma PID regulace: proporční člen (P), integrační člen (I), derivační člen (D), diferenční člen (-), sumační člen (+).

Jak již bylo uvedeno, vlastní PID regulace je analogová, obvod je sestaven na pájivé vývojové desce. Základ každého z pěti bloků tvoří operační zesilovač (typ LM358N) s negativní zpětnou vazbou v invertujícím zapojení (viz obr. 3). Daný typ operačních zesilovačů vyžaduje bipolární napájení ± 15 V. To současně určuje nejvyšší výstupní napětí.

Jako zdroj referenčního napětí U_{set} používáme tříkanalový laboratorní napájecí zdroj EL302RT. Napětí U_{set} společně s napětím z PIN fotodiody U_{photo} posíláme do **diferenčního** členu (-). Výstupem je chybové napětí U_{err} ,

kteře nám určuje velikost chyby – rozdílu referenčního napětí a detekovaného napětí (9). Chybové napětí postupuje do bloků **PID**, kde jsou jednotlivé frekvence zesíleny různým způsobem v závislosti na zisku jednotlivých členů.

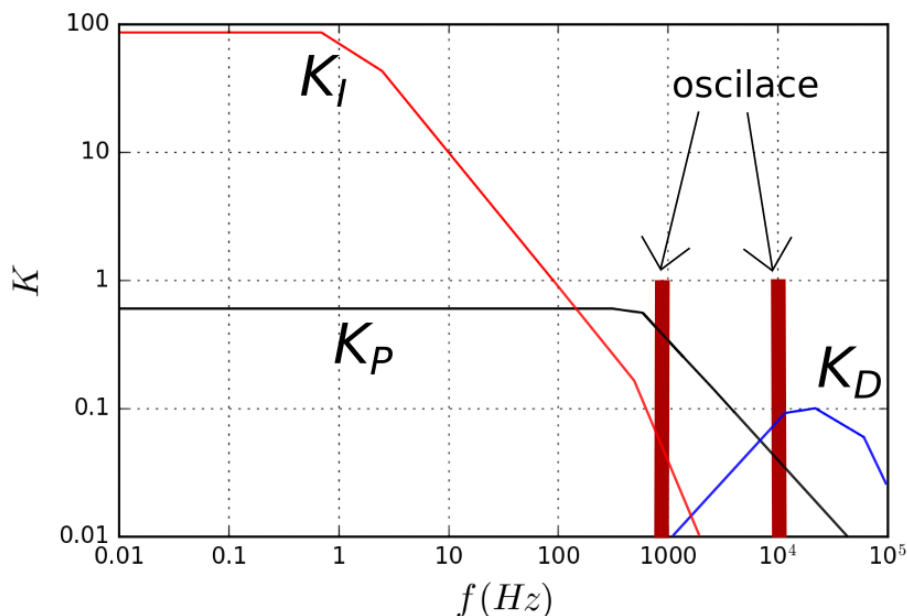
Ve zpětných vazbách proporčního, integračního a derivačního členu jsou potenciometry, které umožňují měnit zisk K_P , K_D v intervalu 0 až 8,3 a K_I v intervalu 0 až 86. Frekvenční odezvy integračního a derivačního členu jsou dány kapacitami kondenzátorů. Integrační člen má ve zpětné vazbě kondenzátor s kapacitou $1 \mu\text{F}$, čemuž odpovídá mezní frekvence $f_{3\text{dB}} = 2,5 \text{ Hz}$ při volbě zpětnovazebního odporu $R_I = 104 \text{ k}\Omega$ (viz dále). Frekvence, při níž poklesne zisk na 1, je 90 Hz. Derivační člen má na vstupu kondenzátor s kapacitou $1,5 \text{ nF}$, čemuž odpovídá mezní frekvence 22 kHz při volbě zpětnovazebního odporu $R_D = 7 \text{ k}\Omega$ (viz dále). V **sumačním** (+) členu se provede součet příspěvků napětí z bloků PID (13). Výstupní napětí, které posíláme na piezokrystal, je silně frekvenčně závislé a je nastaveno tak, aby v něm měly největší váhu pomalé změny.

Kvůli vlastní kapacitě $C = 7200 \text{ nF}$ piezokrystalu ($10 \times 10 \times 18 \text{ mm}$) se mezní frekvence $f_{3\text{dB}}$ celého PID systému snížila z původních 180 kHz na 1 kHz. Proto má zejména derivační člen mnohem menší zisk než bez zapojení k piezokrystalu. Schematicky jsou frekvenční závislosti zisků K_P , K_I , K_D po připojení k piezokrystalu znázorněny na obrázku 4.

3.2 Nastavení zisku PID regulace

Stabilizaci fáze v Michelsonově interferometru jsme nejprve zkoušeli provádět za pomoci proporčního členu. Nebylo možné efektivně stabilizovat, protože při větším zesílení docházelo k oscilaci zpětnovazební smyčky okolo frekvence 900 Hz. Bylo zjištěno, že pro tuto frekvenci je přiváděné napětí fázově zpožděno o 180° , tedy oscilace zesiluje, místo toho, aby je tlumilo. Další frekvence, na které měla smyčka tendenci oscilovat, byla 10 kHz, kde se pravděpodobně nachází rezonanční pík piezokrystalu. Bylo třeba přidat integrační a derivační člen, abychom se mohli problematickým frekvencím vyhnout.

Ladění bloků PID [16] probíhalo manuálně s připojeným osciloskopem, na němž jsme sledovali průběh napětí z PIN fotodiody U_{photo} a také referenční napětí U_{set} . V prvním kroku jsme nastavili zisk proporčního členu tak, aby smyčka začala oscilovat. Poté jsme snížili zisk na přibližně dvoutřetinovou hodnotu. Dále jsme nastavili integrační člen na hodnotu, kde smyčka



Obrázek 4: Schematické znázornění frekvenční závislosti zisků jednotlivých členů PID regulace K_P , K_I , K_D po připojení k piezokrystalu. Rudě jsou vyznačeny frekvence, na kterých měla smyčka tendenci oscilovat (900 Hz a 10 kHz). Vynesené závislosti nejsou proměřené detailně, ale pouze přibližně.

uspokojivě stabilizovala dlouhotrvající změny. Možné oscilace jsme vykompenzovali derivačním členem. Toto nastavení je jen přibližné, proto jsme zkoušeli zisky jednotlivých členů mírně měnit, na osciloskopu jsme sledovali chování zpětnovazební smyčky. Po několika pokusech jsme dosáhli uspokojivé stabilizace. Finální hodnoty zpětnovazebních odporů (viz obr. 3) jsme zvolili:

$$R_P = 0,8 \text{ k}\Omega,$$

$$R_I = 104 \text{ k}\Omega,$$

$$R_D = 7 \text{ k}\Omega.$$

3.3 Výkonové členy

Za PID regulaci jsme zkoušeli dát výkonové členy, abychom mohli operovat s vyšším napětím. Čím vyšší napětí dodáme na piezokrystal, tím více vychýlí zrcátko. To znamená, že jsme schopni proskenovat více interferenčních proužků, což může být výhodné zejména při dlouhotrvajícím fázovém driftu.

Napřed jsme vyzkoušeli vysokonapěťový zesilovač od firmy Falco Systems. Ten by byl schopen dodat napětí v rozsahu -125 V až 125 V. Nevýhodou byl šum a stabilizace pouze velmi nízkých frekvencí, mezní frekvence byla méně jak 1 Hz, což je nedostačující.

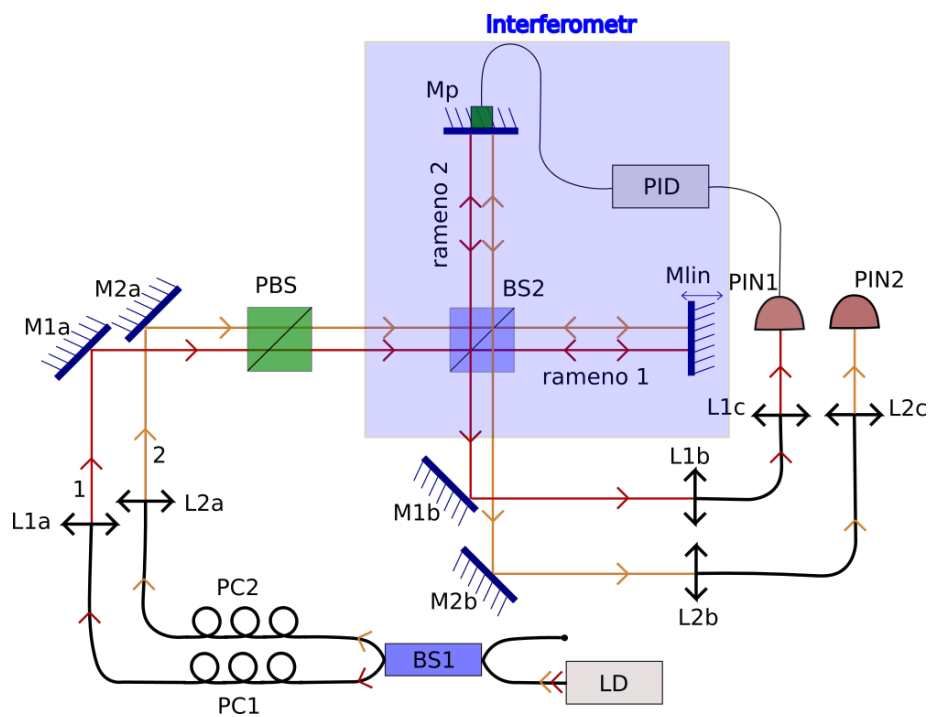
Dále jsme zkusili zesilovač PDu100B (Piezodrive), který byl schopen dodat napětí v rozsahu od 0 do 80 V. Jeho výhodou byla větší šířka pásma (mezní frekvence 120 Hz). Nevýhodou byl šum, který byl nesrovnatelně větší než u předchozího zesilovače.

Napětí -15 V až +15 V se nakonec ukázalo jako dostačující pro korekci fázových změn (při pomalých změnách v řádu Hz jsme schopni proskenovat cca 8 interferenčních proužků), proto jsme zvolili variantu bez výkonového členu.

3.4 Michelsonův dvousvazkový interferometr

Experimentální uspořádání nalezneme na obrázku 5. Jako zdroj světla jsme použili laserovou diodu QSS-810-0.5S (SN:04.02.29) od firmy QPhotonics navázanou do optického vlákna typu 780-HP. Vstupní svazek je pomocí vláknového děliče (Sifam SN:01199327 [19]) rozdělen na dva svazky. Jeden z těchto svazků slouží ke stabilizaci interferometru, na druhém svazku můžeme měřit.

Pomocí polarizačních kontrolerů nastavíme vhodný polarizační stav světla tak, abychom dostali co největší intenzitu svazků za polarizujícím děličem svazku. Tento člen nám zajistí, že do interferometru postupují pouze lineárně polarizované svazky. Svazky se pomocí objemového děliče svazku rozdělí do dvou ramen, odrazí se od zrcátek a postupují stejnou trajektorií zpět. Na děličí svazku se znovu složí a interferují. Dále jsou pro lepší prostorový překryv navázány do optického vlákna. Svazky jsou detekovány pomocí PIN fotodiod typu PDA 36A od firmy Thorlabs. Napětí z PIN1 je přivedeno na vstup PID regulace jako U_{photo} . Výstupní napětí z PID regulace U_{out} je přivedeno na piezokrystal, který kompenzuje fázové změny. Zároveň sledujeme napětí z PIN1,2 na osciloskopu. Typická vizibilita se pohybovala nad 99%. Postup justáže je popsán v příloze A a fotografie experimentu je v příloze C.



Obrázek 5: Dvousvazkový Michelsonův interferometr se zapojenou PID regulací: laserová dioda (LD), vláknový dělič svazku (BS1), polarizační kontroler (PC), navazovač/vyvažovač svazku (L), červený svazek č. 1 – stabilizační, žlutý svazek č. 2 – měřicí, zrcátko (M), polarizující dělič svazku (PBS), dělič svazku (BS2), zrcátko s lineárním posuvem (Mlin), zrcátko s piezokrystalem (Mp), detektor (PIN).

4 Zpracování dat a diskuze výsledků

K měření stability Michelsonova interferometru byl využit čtyřkanálový dvacetibitový AD převodník [20] ovládaný přes počítač programem v jazyce Python. Měření probíhala s rozlišením 500 bodů za sekundu, výstupní soubor je ve formátu CSV. Data byla zpracována rovněž pomocí programu Python. Vytvořený skript je schopen vybrat data ze souboru (formáty TXT i CSV), přepočíst je na fázi pomocí vztahu (8) a provést rychlou Fourierovu transformaci (FFT). Rovněž v něm lze vykreslovat data do grafů.

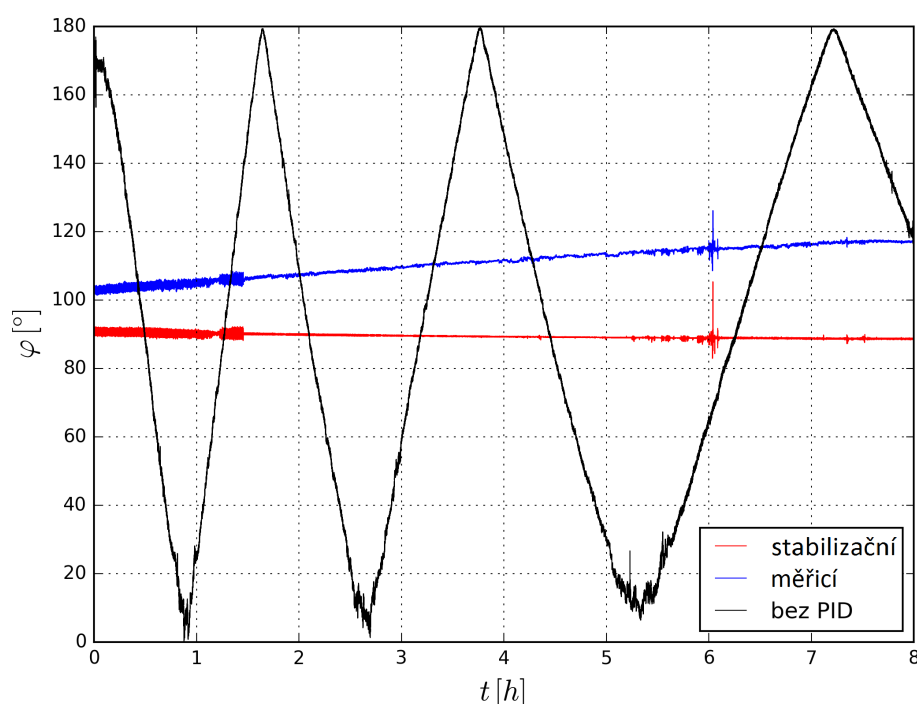
Vybrání dat ze souboru probíhá pomocí *for* cyklu, kde jsou jednotlivé řádky textu interpretovány jako řetězec. Dále je text pomocí funkce *genfromtxt* z balíčku *numpy* načten do seznamu, neboli pole, typicky má pole 5 sloupců a N řádků, kde N je počet vzorků. Výhodou je možnost vybírat dle potřeby jednotlivé sloupce pole, které odpovídají jednotlivým měřicím kanálům. Pro přepočet na fázi pomocí vztahu (8) je třeba načíst knihovnu *math*, jelikož je využita funkce *arccos*. Přepočet na fázi probíhá pomocí *for* cyklu pro každou hodnotu ze sloupce zvlášť, hodnoty fáze jsou zapisovány do nového pole. Pro provedení rychlé Fourierovy transformace využijeme funkci *fft* z knihovny *fftpack*. Pro odfiltrování záporných hodnot frekvencí je využito funkce *where*. Pro zobrazení dat do grafu je třeba načíst knihovnu *matplotlib.pyplot* a využít funkci *subplots*.

4.1 Měření stability interferometru

Měření stability probíhalo z důvodu vyloučení působení silných mechanických vibrací v noci po dobu osmi hodin. Dále byl při všech měřeních interferometr pasivně stabilizován zakrytím papírovou krabicí pro zmírnění vzduchového proudění. Bylo provedeno měření bez zapnuté stabilizace a tři měření se zapnutou stabilizací. V prvním případě jsme nastavili referenční napětí tak, aby přibližně odpovídalo fázi 90° , bylo tedy nastaveno v polovině interferenčního proužku. V dalších dvou měřeních jsme testovali stabilizační smyčku blízko minima a maxima interferenčního proužku. Při měření bez stabilizace jsme snímali průběhy napětí na detektorech PIN1 a PIN2 (viz obr. 5), které odpovídají fázi. Při měření se stabilizací jsme snímali průběhy napětí na detektorech PIN1 a PIN2 a průběh výstupního napětí z PID regulace U_{out} , které nám umožňovalo monitorovat jaké fázové změny bylo nutno kompenzovat. Výstupem těchto měření je průběh fázových změn bez stabi-

zace a se stabilizací. Dále jsme provedli rychlou Fourierovu transformaci pro zjištění spektra fázových změn.

Na obrázku 6 je srovnání průběhu fáze bez zapnuté stabilizace (černě) a se zapnutou stabilizací pro stabilizační svazek (červeně) a měřicí svazek (modře). Při samovolném fázovém driftu fáze přešla z minima do maxima více jak 6 krát, což při prognóze, že se fáze měnila lineárně (jen jedním směrem) odpovídá změně o více než 1100° . Zato při zapnuté stabilizaci se fáze během osmi hodin až na drobné fluktuace změnila o přibližně 2° .



Obrázek 6: Srovnání stability bez zapnuté a se zapnutou stabilizací. Černě je vyznačen průběh fáze bez aktivní stabilizace. Červeně je vyznačen průběh fáze pro stabilizační svazek a modře pro měřicí svazek s aktivní stabilizací.

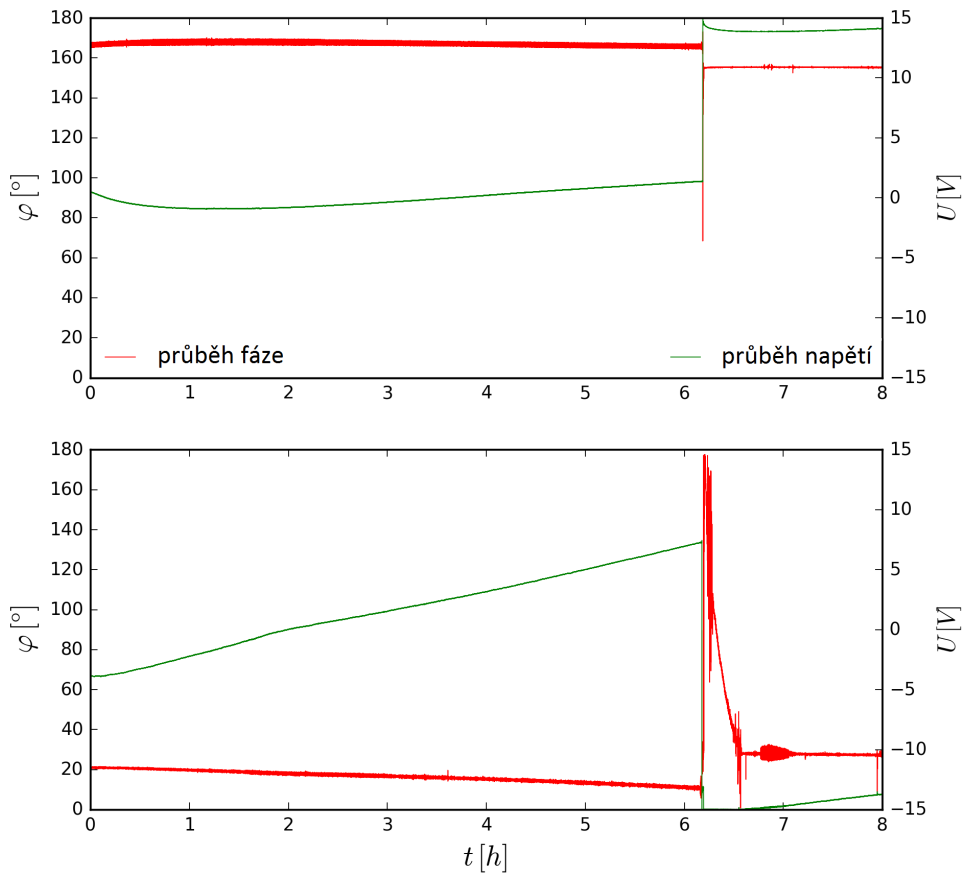
Je nutné si uvědomit, že změna fáze mohla být větší, jelikož jsme ji vyhodnocovali jen na základě změny napětí na detektoru. Reálně však docházelo ke změně vstupní intenzity obou svazků jednak kvůli fluktuacím intenzity použité laserové diody a také kvůli změně polarizace ve vláknech a dalšími vlivy (typický průběh vstupní intenzity je v příloze B). To znamená, že výstupní intenzity ramen interferometru I_1 ze vztahu (8) nebyla konstantní, i když my jsme ji jako konstantní uvažovali. To znamená, že zejména okolo

maxima intenzity výstupních svazku není přepočten nejpřesnější. Proto se graf průběhu fáze bez stabilizace (černý) nedotýká nulové fáze, i když reálně k fázovému překmitu došlo. Dále si můžeme všimnout, že se fáze více změnila (o více než 10°) u měřicího svazku. Kromě již zmíněných důvodů hraje také roli prostorová separace svazků, svazky jsou od sebe vzdáleny přibližně 5 mm. Fázové změny na stabilizačním svazku nemusí plně odpovídat změnám na měřicím svazku, zvláště, uvážíme-li, že stačí rozdíl drah v řádu nanometrů. Kdybychom měli přístup ke druhému výstupu interferometru, mohli bychom měřit změny intenzity obou svazků, a tedy zpřesnit přepočten. Zároveň by bylo možné upravovat hodnotu referenčního napětí na základě změny intenzity stabilizačního svazku.

Při stabilizaci v blízkosti minima jsme nastavili referenční napětí na hodnotu 0,1 V, což odpovídalo fázi cca 164° (maximum intenzity odpovídalo napětí 4,8 V). Průběhy fázových změn stabilizačního svazku (červeně) a výstupního napětí z PID regulace (zeleně) jsou zobrazeny na obrázku 7 nahoře. Z grafu je patrné, že prvních 6 hodin fungovala smyčka správně (změna intenzity odpovídala změně fáze o 1°). V čase 6 h 11 min od začátku měření nastal větší fázový výkyv, který smyčka neustabilizovala. Fáze se během několika sekund ustálila na nové hodnotě, která byla podobná původní fázi, až na násobky několika π . To lze vyvodit z průběhu výstupního napětí. Bylo totiž změřeno, že změna výstupního napětí o 13 V znamená překmit fáze o cca 4 interferenční proužky.

Při stabilizaci v blízkosti maxima jsme nastavili referenční napětí na hodnotu 4,55 V, což odpovídalo fázi cca 21° (maximum intenzity odpovídalo napětí 4,7 V). Průběhy změn fáze stabilizačního svazku a výstupního napětí vidíme na obrázku 7 dole. Z grafu je patrné, že prvních 6 hodin fungovala smyčka víceméně správně (změna intenzity odpovídala změně fáze o 9°). Poté nastalo větší vychýlení fáze, které smyčka neustabilizovala. Fáze sice se ustálila na hodnotě blízké původní fázi, z průběhu výstupního napětí je však patrné, že nová fáze byla násobkem π , stejně jako při stabilizaci v minimu.

Oproti stabilizaci v minimu má na stabilizaci v maximu velký vliv změna vstupní intenzity svazku. Pokud by tato vstupní intenzita poklesla natolik, že by odpovídající napětí v maximu (v našem případě 4,7 V) bylo menší než referenční napětí (v našem případě 4,55 V), smyčka by z principu nemohla fungovat. V našem případě by tedy stačil pokles intenzity o 3,3%.



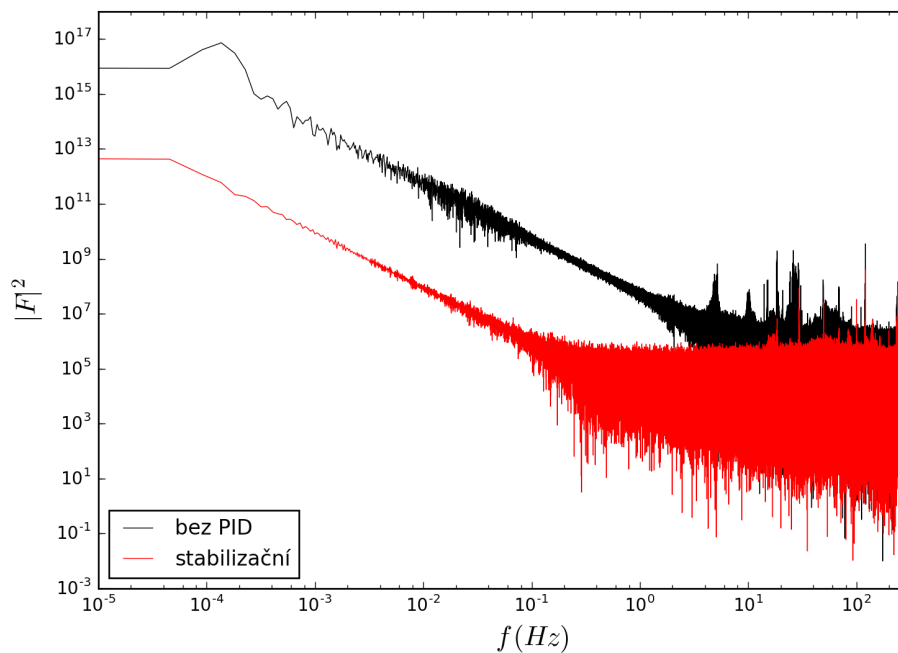
Obrázek 7: Průběhy fáze stabilizačního svazku (červeně) a výstupního napětí z PID regulace U_{out} (zeleně) při stabilizaci v minimu (nahore) a v maximu (dole). V čase 6 h 11 min od začátku měření (4:56 SELČ) došlo v obou případech k výraznější fluktuaci fáze, kterou smyčka neustabilizovala. Došlo k saturaci výstupního napětí a ustálení fáze na blízké hodnotě původní fáze, posunuté však o několik násobků π .

Při srovnání grafů na obrázku 7 je patrné, že k výpadku stabilizační smyčky došlo při obou měřeních ve stejné době (ve 4:56 SELČ). Také při stabilizaci v polovině interferenčního proužku došlo v této době k větší fázové fluktuaci, což znamená, že jde o pravidelnou změnu. Mohlo dojít k sepnutí vzduchotechniky či jiné výrazné změně, kterou nebyla schopna smyčka v minimu ani maximu ustabilizovat. Stabilizační smyčka přestává efektivně fungovat, jakmile fázový rozdíl stabilizovaných interferujících svazků překročí hodnotu $k\pi$, kde $k = 0, 1, 2, 3, \dots$. To znamená, že směrnice průběhu intenzity změní znaménko a smyčka v tomto případě vychyluje piezokryстал přesně na opačnou stranu, než je žádoucí. Při stabilizaci blízko minima

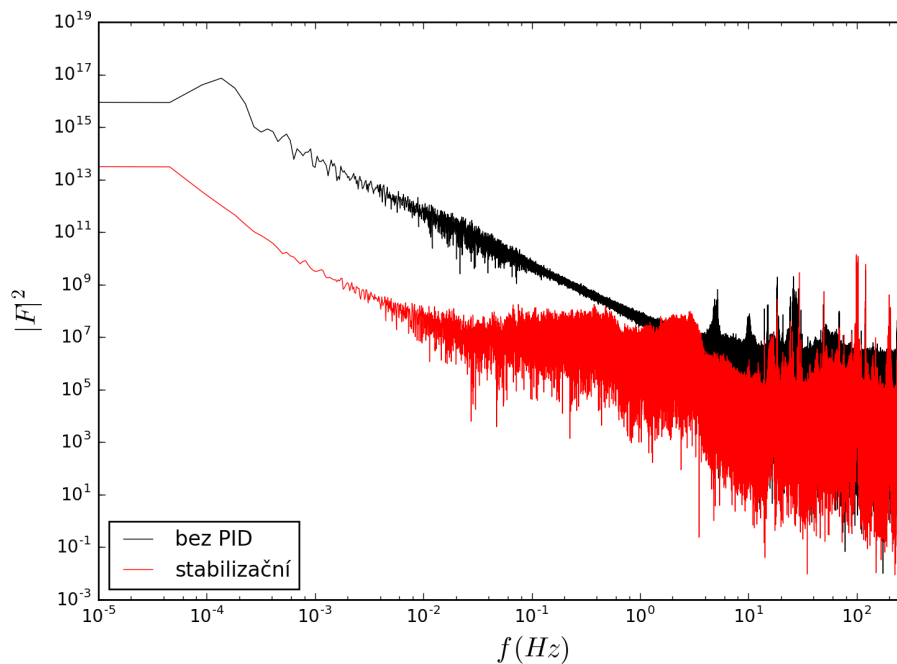
nebo maxima k takovému překmitu může dojít snadněji než při stabilizaci v polovině proužku, proto je stabilizace v minimu a maximum interferenčního proužku mnohem náchylnější na rychlé změny s větší amplitudou než stabilizace uprostřed proužku.

4.2 Frekvenční obraz

Pro zjištění spektra fázových změn jsme provedli rychlou Fourierovu transformaci. Celkový počet vzorků byl 15 milionů při vzorkovací frekvenci 500 vzorků za sekundu, rozlišovací schopnost je tedy $3,3 \cdot 10^{-5}$ Hz a nejvyšší rozlišitelná frekvence je 250 Hz. Pro zjištění spektra fázových změn při stabilizaci v blízkosti minima a maxima jsme použili jen prvních 11 milionů vzorků, použití všech vzorků by zkreslovalo výsledky, jelikož po šesti hodinách přestala stabilizační smyčka fungovat. Rozlišovací schopnost se tedy snížila na $4,5 \cdot 10^{-5}$ Hz. Obrázek 8 ukazuje srovnání frekvenčního spektra bez použití stabilizace a za použití stabilizace, kde referenční napětí bylo nastaveno do poloviny interferenčního proužku.



Obrázek 8: Spektrum fázových změn bez aktivní stabilizace (černě) a s aktivní stabilizací v polovině interferenčního proužku (červeně).

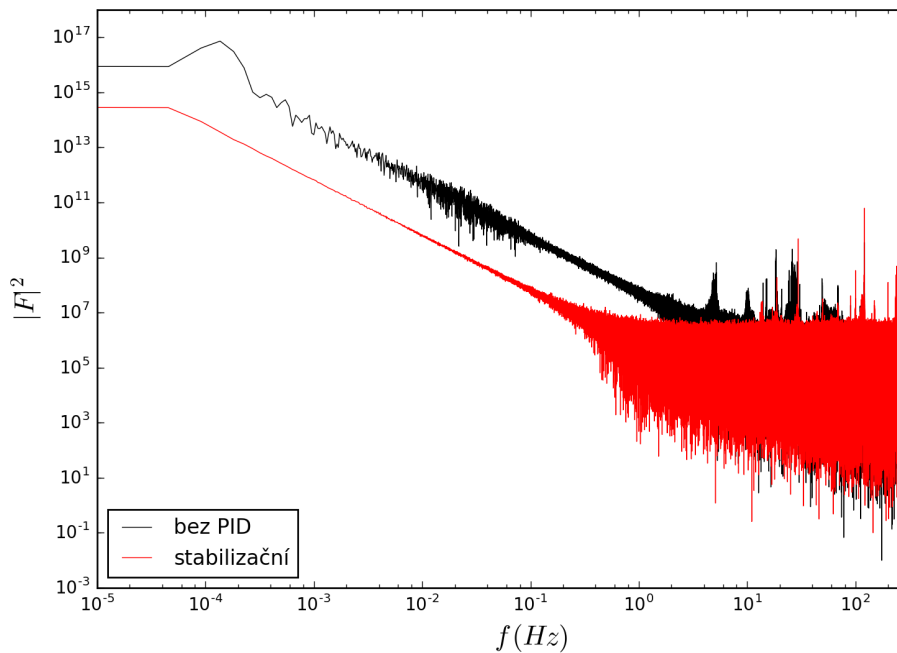


Obrázek 9: Spektrum fázových změn bez aktivní stabilizace (černě) a s aktivní stabilizací v minimu interferenčního proužku (červeně).

Je vidět, že největší váhu při fázové změně mají pomalé změny, které se však podařilo stabilizovat nejlépe. Stabilizace velmi účinně funguje do frekvence 1 Hz a je schopna reagovat na změny do frekvencí až do 100 Hz. Je patrné, že maxima na frekvencích 6 Hz, 30 Hz a 60 Hz jsou stabilizační smyčkou potlačena. Frekvence v řádu stovek Hz nejsou téměř stabilizovány. V laboratorních podmínkách měly být frekvence v řádu kHz utlumeny anti-vibračním systémem optického stolu, proto není prioritou tlumit tyto vyšší frekvence.

Spektra fázových změn při stabilizaci blízko minima a maxima jsou na obrázcích 9 a 10. Stabilizační smyčka byla opět schopna účinně stabilizovat frekvence do hodnoty přibližně 1 Hz. Dále byla schopna stabilizační smyčka potlačit některé píky, stejně jako při stabilizaci uprostřed proužku. Jedná se zejména o píky na frekvencích 6 Hz a 30 Hz. Oproti spektru při stabilizaci v polovině interferenčního proužku vidíme (obr. 8), že stabilizační smyčka některé frekvence nepotlačila, ale naopak zesílila, což je patrné zejména při stabilizaci blízko minima interferenčního proužku. Jedná se o frekvence okolo 2 Hz a dále o pík na frekvenci cca 100 Hz, který je zřetelný i při stabilizaci blízko maxima. Naopak při stabilizaci blízko maxima je navíc patrný pík

na frekvenci 250 Hz. Může se jednat o vlastní šum smyčky nebo oscilace smyčky, které se při stabilizaci v polovině interferenčního proužku neprojeví. Důvodem, proč jsou oscilace zřetelnější v minimu než maximu, může být vzdálenost pracovního bodu smyčky od extrémálních bodů, což bylo diskutováno na konci předchozí části. Při stabilizaci blízko minima byla tato vzdálenost přepočtená na stupně $180^\circ - 164^\circ = 16^\circ$ a při stabilizaci blízko maxima 21° .



Obrázek 10: Spektrum fázových změn bez aktivní stabilizace (černě) a s aktivní stabilizací v maximu interferenčního proužku (červeně).

Srovnáním obrázků 9 a 10 vidíme, že stabilizace poblíž minima probíhá obecně lépe, než stabilizace poblíž maxima. Důvodem je, že při stabilizaci poblíž minima se téměř neprojeví změny intenzity interferujících svazků, naopak poblíž maxima se tyto změny projeví nejvíce.

4.3 Souvislost stabilizačního a měřicího svazku

Nejllepších výsledků stabilizace jsme dle předpokladu dosáhli při stabilizaci v polovině interferenčního proužku. Pokud bychom mohli ovlivňovat fázový rozdíl měřicího a stabilizačního svazku, bylo by možné stabilizovat v polovině proužku, a zároveň mít měřicí svazek s libovolnou fází. Toho by šlo dosáh-

nout například přidáním planparalelních destiček do dráhy měřícího svazku v ramenech interferometru, natáčením jedné z destiček by se měnila relativní fáze.

Pokud pro daný interferometr nelze nastavit fázový rozdíl měřícího a stabilizačního svazku, je nutné zajistit takové laboratorní podmínky, aby k větším výkyvům fáze nedocházelo a smyčka mohla pracovat dle potřeby v celém rozsahu interferenčního proužku. Při stabilizaci v maximu je navíc nutné zajistit stabilitu interferujících svazků.

5 Diskuze implementace PID regulace do vláknového Machova-Zehnderova interferometru

Cílem budoucí práce bude implementace PID regulace do vláknového Machova - Zehnderova interferometru (dále jen MZI). Alespoň v jednom z ramen interferometru bude zapojen fázový modulátor, ke kterému bude PID regulace připojena. Stabilizace bude probíhat na silném svazku, měřicí svazek bude na jednofotonové úrovni.

Oproti stabilizaci objemového Michelsonova interferometru, kde jsou svazky prostorově separované, je stabilizace vláknového MZI na jednofotonové úrovni komplikovanější. Oba svazky postupují stejným vláknem a na výstupu je potřebujeme dokonale oddělit, abychom nedetekovali v měřicím jednofotonovém signálu silný stabilizační signál. V lepším případě bychom při měření detekovali více šumu, v horším případě by přeslechy stabilizačního signálu mohly vést k výraznému zkreslení výsledků nebo dokonce ke zničení jednofotonového detektoru. Při výkonu měřicího signálu 10^5 fotonů za sekundu by se přípustná hodnota počtu detekovaných fotonů za sekundu ze stabilizačního signálu mohla pohybovat v řádu 10^2 . Je zřejmé, že při zeslabení stabilizačního signálu se tyto přeslechy sníží. Pro kvalitní stabilizaci však nelze zeslabit stabilizační svazek příliš, jelikož se začne čím dál více projevovat šum detektoru, poměr signálu k šumu bude menší. Z analýzy plyne, že při výstupním výkonu stabilizačního svazku $2,5 \cdot 10^5$ fotonů za sekundu by byl poměr signálu k šumu pro detektor PDF10A/M od firmy Thorlabs 10:1, což je hraniční hodnota. Proto je lepší předpokládat, že stabilizační svazek musí mít nejméně 10^6 fotonů za sekundu.

Separace obou svazků lze docílit například použitím dvou rozdílných vlnových délek měřicího a stabilizačního signálu, které na výstupu oddělíme pomocí interferenčního filtru. Snadněji lze od sebe oddělit svazky s větším rozdílem centrálních vlnových délek a s užší spektrální šířkou. Pro kvalitní separaci svazků bude nejspíše potřeba použít sekvence více interferenčních filtrů. Při rozdílu centrálních vlnových délek svazků o 10 nm je útlum stabilizačního signálu na jednom interferenčním filtru cca o 10^4 , samozřejmě záleží na typu interferenčního filtru. Při výkonu stabilizačního svazku 10^6 fotonů za sekundu by stačilo použít jednoho interferenčního filtru. Při použití dvou interferenčních filtrů by bylo možné zvýšit výkon stabilizačního signálu na

10^7 fotonů za sekundu, čímž by se mohla zpřesnit stabilizace, a současně by bylo možné použít bližší vlnové délky měřicího a stabilizačního signálu.

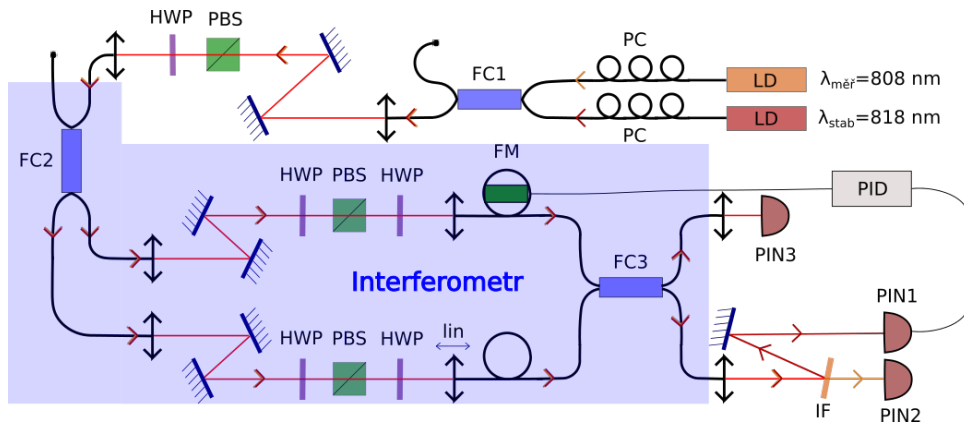
Volba vlnových délek obou svazků bude kompromisem, jelikož chování vláknových optických komponent je silně závislé na vlnové délce. Stabilizační a měřicí svazek budou cítit jiný index lomu ve vláknech. Pokud nebude interferometr nájstován přesně v maximu autokorelační funkce nebo se od něj při stabilizaci vzdálí, změní se fáze svazků vůči sobě. Může se tedy stát, že ačkoliv stabilizační svazek přesně sleduje danou fázi, měřicí vůči němu driftuje. Tento rozdíl fází jednotlivých svazků bude nastávat i vlivem lokální změny disperze, respektive grupového indexu lomu ve vláknech kvůli změnám teploty a dalším vlivům. Rozdíl fází obou svazků bude úměrný rozdílu jejich centrálních vlnových délek, při rozdílu centrálních vlnových délek o 10 nm je třeba sladit délku ramen s přesností na 150 nm. Dělicí poměry vláknových děličů vykazují přibližně lineární závislost na vlnové délce [19], což znamená, že vizibilita stabilizačního signálu bude tím menší, čím větší bude rozdíl vlnových délek měřicího a stabilizačního signálu. Zhoršená vizibilita stabilizačního signálu se negativně projeví na kvalitě stabilizace.

Další možností separace signálů o dvou rozdílných vlnových délkách je použití difrakční mřížky na výstupu interferometru. Její výhodou je lepší prostorová separace svazků, nevýhodou je větší ztráta výkonu. Jiný způsob oddělení svazků spočívá v použití dvou ortogonálních lineárních polarizací. Jeden ze svazků by byl navázán do pomalé osy polarizaci udržujícího vlákna a druhý do rychlé osy. Ač by byly oba signály na stejných vlnových délkách, efektivně by kvůli rozdílným indexům lomu pomalé a rychlé osy optického vlákna nastávaly stejné problémy jako při použití dvou různých vlnových délek. Separace svazků na výstupu interferometru by byla provedena pomocí polarizujícího děliče svazku, ovšem dělicí poměr pro pomalou a rychlou osu je různý.

Dalším problémem bude zajištění intenzitní stability stabilizačního signálu. I při stabilizaci Michelsonova objemového interferometru se negativně projevovaly změny intenzity svazku a změny polarizace (viz příloha B). Jedním z řešení je použití frekvenčně stabilizovaných laserových diod a řídicích jednotek s vysokou stabilitou. I přesto bude důležité monitorovat intenzitu stabilizačního svazku (například na druhém výstupu interferometru) a upravovat dle potřeby referenční napětí, abychom stabilizovali na správné fázi i při změně vstupní intenzity.

5.1 Experimentální uspořádání

Některé z výše diskutovaných kroků byly vyzkoušeny v praxi. Využili jsme MZI v polarizaci udržujících vláknech sestavený Lukášem Podhorou v rámci bakalářské práce [13], který jsme rozšířili o vzduchovou mezeru, která nám umožňuje kontrolovat polarizaci a správně navázat do polarizaci udržujícího vlákna obě laserové diody. Můžeme tedy používat i laserové diody které jsou navázány do polarizaci neudržujících vláken. Na výstupu MZI jsou svazky o dvou rozdílných vlnových délkách separovány pomocí interferenčního filtru.



Obrázek 11: Schéma vláknového MZI v polarizaci udržujících vláknech se zapojenou PID regulací: Laserová dioda (LD), polarizační kontroler (PC), vláknový dělič (FC), polarizující dělič svazku (PBS), půlvlnná destička (HWP), lineární mechanický posuv (lin), fázový modulátor (FM), interferenční filtr (IF), detektor (PIN). Na modrém podkladu je vyznačen interferometr [13].

Schéma experimentálního uspořádání je na obr. 11. Jako zdroj stabilizačního svazku jsme použili laserovou diodu QFLD-810-10S (SN:12.12.05) navázanou do optického vlákna typu 780-HP s centrální vlnovou délkou 818 nm a pološířkou spektra 1 nm. Jako zdroj měřícího svazku jsme použili laserovou diodu QSS-810-0.5S (SN:04.02.29) navázanou do optického vlákna typu 780-HP s centrální vlnovou délkou 808 nm a pološířkou spektra 1 nm. Intenzita měřícího svazku byla nastavena na hodnotu řádově stokrát menší než je intenzita stabilizačního svazku.

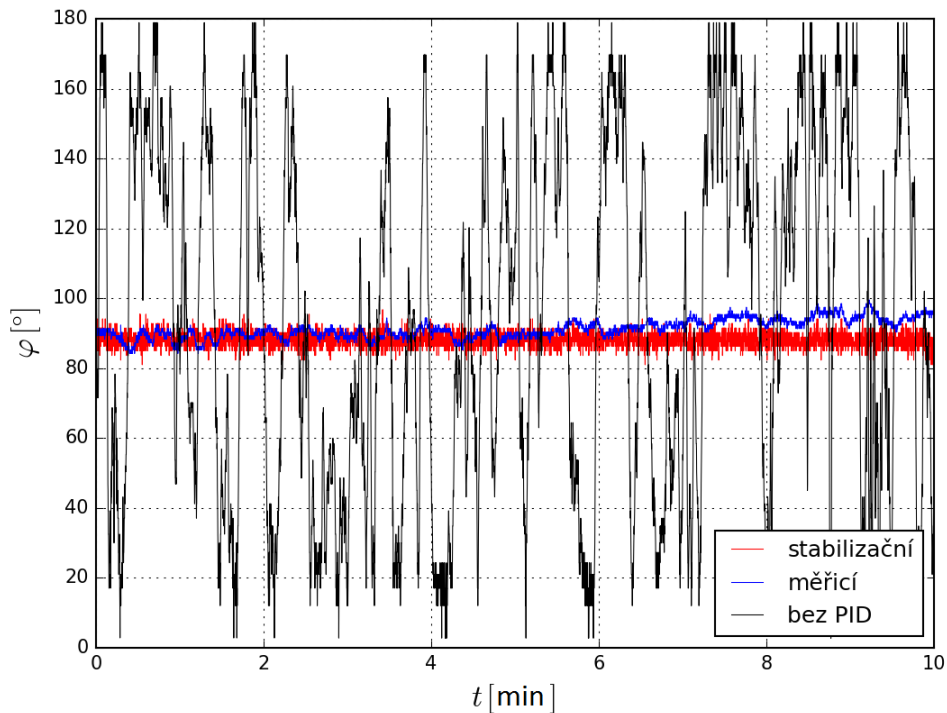
Polarizační stav svazků nastavíme polarizačními kontrolery (PC), pomocí vláknového děliče (FC1) od firmy Sifram (SN:01176017 [19]) jsou oba svazky spojeny do jednoho vlákna. Dále postupují do vzduchové mezery, která slouží ke správnému navázání svazku do pomalé osy polarizaci udržujícího opti-

kého vlákna PM 780-HP (viz [13]). Svazky jsou přivedeny na vstup interferometru, kde jsou pomocí vláknového děliče (BS-SQS-PM SN:02457172) rozděleny do dvou ramen interferometru. Svazky v obou ramenech procházejí vzduchovou mezerou a jsou opět navázány do optického vlákna PM 780-HP. Navazovač svazku v jednom z ramen interferometru je umístěn na lineárním posuvu (lin), kterým lze vyrovnat dráhy svazků. Ve druhém rameni interferometru je umístěn vláknový fázový modulátor (FM), který je připojen na PID regulaci.

Prostorová separace svazků na výstupu je provedena pomocí interferenčního filtru (IF) od firmy Semrock (LL01-808-125 SN:7) propouštějícího centrální vlnovou délku 808,9 nm s plnou šířkou v polovině maxima 2,6 nm. Po naklonění o cca 5°, které je potřebné k odklonění stabilizačního svazku, se jeho centrální vlnová délka posune na hodnotu cca 808 nm, což je centrální vlnová délka měřicího svazku. Stabilizační svazek je odražen od interferenčního filtru, zrcátka a detekován detektorem PIN1, výstupní napětí z PIN1 je přivedeno na vstup PID regulace. Měřicí svazek interferenčním filtrem projde a je detekován detektorem PIN2. Zatím nejsou svazky odseparovány dokonale, na PIN2 detekujeme kromě měřicího svazku i 10^{-4} svazku stabilizačního, což odpovídá intenzitě cca 1% měřicího signálu. Také pozadí, které se při měření nepodařilo plně eliminovat, tvořilo asi 30% detekované intenzity. Detektor PIN3 bude sloužit k monitorování výstupní intenzity z MZI, zatím však nebyl využit.

5.2 Test stabilizační smyčky pro vláknový MZI

Parametry PID regulace musely být přenastaveny, jelikož docházelo k oscilacím smyčky dokonce i při nulovém zisku jednotlivých členů. Oscilace byly projevem vlastního šumu smyčky přivedeného na hliníkový vláknový fázový modulátor s rezonančním maximem na frekvenci 16,9 kHz [13], který je mnohem citlivější než piezokrystal ovládající zrcátko v Michelsonově interferometru. Z toho důvodu bylo potřeba přidat na konec PID smyčky dolní propust s mezní frekvencí $f_{3dB} = 2,5$ Hz, která potlačila vysoké frekvence, tedy i šum. Při dalším vývoji bude mezní frekvence na výstupu PID regulace zvýšena a vlastní šum detektoru bude potlačen přidáním dolní propusti před vstup PID regulace. Další možností je použití pásmové zádrže, která potlačí jen určitý interval frekvencí. Parametry PID členů jsme přenastavili na:



Obrázek 12: Aktivní stabilizace vláknového MZI. Černě je vyznačen průběh fázových změn bez zapnuté stabilizační smyčky. Červeně je vyznačen stabilizační svazek při zapnuté stabilizaci a modře měřicí svazek při zapnuté stabilizaci. Stabilizace probíhala po dobu deseti minut bez eliminace vzduchového proudění zakrytím interferometru.

$R_P = 6,2 \text{ k}\Omega$, odpovídající maximálnímu zisku 5,

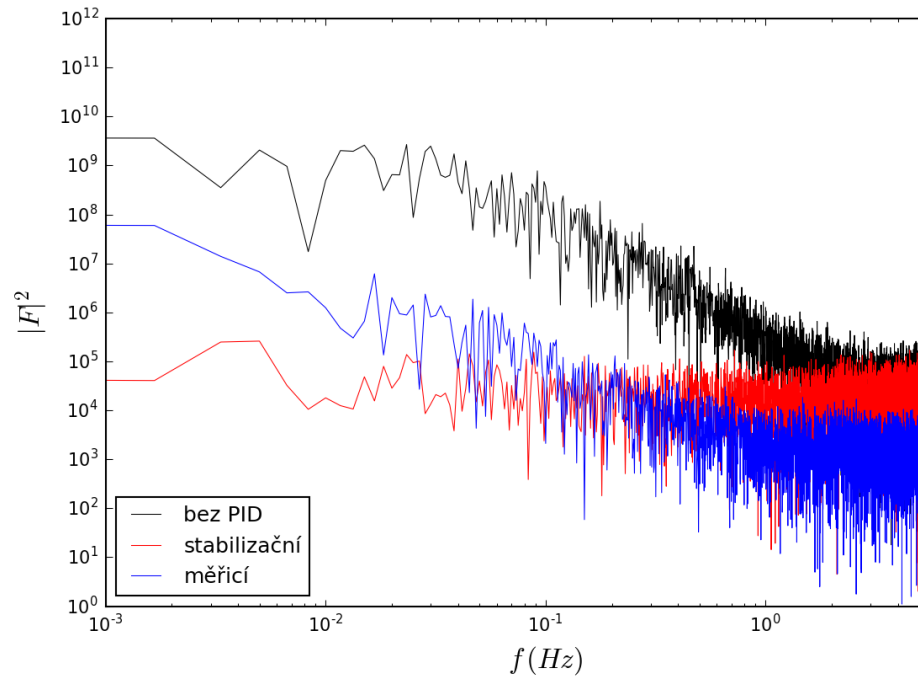
$R_I = 104 \text{ k}\Omega$, odpovídající maximálnímu zisku 86,

$R_D = 10 \text{ k}\Omega$, odpovídající maximálnímu zisku 8,3.

Na obrázku 12 je srovnání průběhu fázových změn bez a s aktivní stabilizací v polovině interferenčního proužku. Při měření nebylo pasivně stabilizováno vzduchové proudění, přesto se podařilo po dobu deseti minut udržet fázi stabilizačního svazku (červeně) víceméně konstantní, fázový drift byl pouze 1° . Fakt, že pomalé frekvence byly velmi dobře stabilizovány, dokládá i frekvenční spektrum na obrázku 13.

Fáze měřicího svazku se změnila více z důvodů zmíněných v první části kapitoly, a také kvůli velké míře pozadí, které bylo víceméně konstantní, mohlo však mít nezanedbatelný vliv. Proto je změna fáze měřicího svazku

o 5° za 10 minut pro pasivně nestabilizovaný interferometr uspokojivým výsledkem.



Obrázek 13: Spektrum fázových změn bez a s aktivní stabilizací v polovině interferenčního proužku. Černě je vyznačen stabilizační svazek bez aktivní stabilizace. Červeně je vyznačen stabilizační a modře měřicí svazek s aktivní stabilizací. Velmi účinně byly stabilizovány frekvence do 1 Hz, při zvýšení mezní frekvence dolní propusti by mělo být možné stabilizovat i vyšší frekvence stejně jako při stabilizaci Michelsonova dvousvazkového interferometru.

Zmírnění vzájemného driftu stabilizačního a měřicího svazku, vylepšování stabilizační smyčky včetně stabilizace zdroje stabilizačního signálu, efektivnější separace měřicího a stabilizačního svazku a přechod ke slabému signálu bude předmětem další práce.

6 Závěr

V rámci této práce byla sestrojena analogová PID regulace a realizován dvou-svazkový Michelsonův interferometr, na němž byla zpětnovazební smyčka testována a laděna. Byla provedena měření stability interferometru a porovnána stabilita bez a s využitím aktivní stabilizace. Při stabilizaci v polovině interferenčního proužku udržela zpětnovazební smyčka fázi téměř konstantní po dobu osmi hodin, fázový posun byl pouze 2° . Bez použití aktivní stabilizace byl za stejnou dobu posuv více jak 1100° . Při stabilizaci blízko maxima a minima byla smyčka schopna kompenzovat fázové změny více jak 6 hodin. V laboratorních podmínkách s kvalitní pasivní stabilizací, která by vyloučila prudší a rychlejší změny fáze, by mohla smyčka v principu fungovat déle i blízko minima interferenčního proužku. Pokud by navíc byla zajištěna stabilita intenzity vstupního svazku, bylo by možné stabilizovat i blízko maxima interferenčního proužku.

Pomocí rychlé Fourierovy transformace byla zjištěna spektra fázových změn a kvalita jejich kompenzace zpětnovazební smyčkou. Nejlépe smyčka stabilizovala dle očekávání v polovině interferenčního proužku, kde je schopna reagovat na frekvence do 100 Hz. Zejména pomalý fázový drift, který je zastoupen nejvíce, se podařilo eliminovat téměř o tři řády, a to i při stabilizaci blízko minima interferenčního proužku. Blízko maxima byl eliminován o dva řády.

V další části práce proběhla diskuze implementace zpětnovazební smyčky do vláknového Machova-Zehnderova interferometru, kterým budou procházet dva optické signály, silný a slabý. Na slabém signálu na úrovni jednotlivých fotonů bude probíhat měření a pomocí silného signálu bude probíhat stabilizace. Nejvíce problémů pramení z nutnosti prostorové separace signálů na výstupu interferometru. Kromě zmíněné diskuze bylo rozšířeno experimentální uspořádání Lukáše Podhory [13] a provedeno testovací měření stability vláknového Machova-Zehnderova interferometru bez zapnuté a se zapnutou stabilizací, zatím se silnými svazky, které byly na výstupu separovány pomocí nakloněného interferenčního filtru. I přes absenci pasivní stabilizace jsme dosáhli dobrých výsledků. Bez vypnuté stabilizace přecházela fáze z minima do maxima několikrát za minutu, při zapnutí stabilizace se u stabilizačního svazku změnila fáze během deseti minut jen o 1° , útlum nízkých frekvencí byl o čtyři řády. Předmětem další práce bude zmírnění vzájemného driftu

stabilizačního a měřicího svazku, lepší separace obou svazků na výstupu interferometru a přechod ke slabému signálu.

Naše výsledky postupně vedou ke stabilizaci Machova-Zehnderova interferometru s měřicím svazkem na jednofotonové úrovni, který bude využit k experimentům v oblasti kvantové optiky a kvantového zpracování informace, kde je nutná stabilita fáze interferometru. Naši PID regulaci lze však využít i ke stabilizaci jiných interferometrů, například objemového Michelsonova, což již bylo v rámci práce ověřeno.

Reference

- [1] Číp, O., Buchta, Z. *Přesné měření délek pomocí laserové interferometrie* [online]. 2011- [cit. 2016-5-18]. Dostupné z: http://www.crr.vutbr.cz/system/files/brozura_06_1110.pdf
- [2] Abbott, B. *et al.* *Observation of Gravitational Waves from a Binary Black Hole Merger*, Phys. Rev. Lett. **116**, 061102 (2016).
- [3] Tamaki, K. *et al.* *Loss-tolerant quantum cryptography with imperfect sources*, Phys. Rev. A **90**, 052314 (2014)
- [4] Cuevas, A. *et al.* *Long-distance distribution of genuine energy-time entanglement*, Nat. Commun. **4**, 2871 (2013).
- [5] Carvacho, G. *et al.* *Postselection-Loophole-Free Bell Test Over an Installed Optical fiber Network*, Phys. Rev. Lett. **115**, 030503 (2015).
- [6] Mičuda, M. *et al.* *Highly stable polarization independent Mach-Zehnder interferometer*, Rev. Sci. Instr. **85**, 083103 (2014).
- [7] Grassani, D., Galli, M., Bajoni, D. *Active stabilization of a Michelson interferometer at an arbitrary phase with subnanometer resolution*, Opt. Lett. **39**, 2530 (2014).
- [8] Xavier, G. B., Weid, J. P. *Stable single-photon interference in a 1 km fiber-optic Mach-Zehnder interferometer with continuous phase adjustment*, Opt. Lett. **36**, 1764 (2011).
- [9] Cho, S., Noh, T. *Stabilization of a long-armed fiber-optic single-photon interferometer*, Opt. Express **17**, 19027 (2009).
- [10] Pulford, D., Robillard, C., Huntington, E. *Single photon locking of an all-fiber interferometer*, Rev. Sci. Instr. **76**, 063114 (2015).
- [11] Miková, M. *et al.* *Increasing efficiency of a linear-optical quantum gate using electronic feed-forward*, Phys. Rev. A **85**, 012305 (2012).
- [12] Ma, X., Zotter, S., Kofler, J., Ursin, R., Jennewein, T., Brukner, Č. a Zeilinger, A. *Experimental delayed-choice entanglement swapping*. Nat. Phys. **8**, 479-485 (2012).

- [13] Podhora, L. *Charakterizace a konstrukce vláknového fázového modulatoru*, bakalářská práce. Olomouc, 2015.
- [14] Saleh, B.E., a Teich M.C. *Základy fotoniky*. Vyd. 1. Praha: MATFY-ZPRESS, 1994.
- [15] Piezoelectricity. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2016-04-10]. Dostupné z: <https://en.wikipedia.org/wiki/Piezoelectricity>
- [16] PID controller. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2016-03-20]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/PID_controller
- [17] Astrom, K.J., a Hagglund, T. *PID controllers*. 2nd ed. Research Triangle Park, N.C.: International Society for Measurement and Control, 1995
- [18] Scherz, P., a Monk, S. *Practical electronics for inventors*. 3rd ed. New York: McGraw-Hill, 2013.
- [19] Kouřil, M. *Charakterizace vláknových děličů svazku*, bakalářská práce. Olomouc, 2013.
- [20] Převodník ADS 1262. <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/ads1262.pdf>
Zapojení a komunikace s počítačem implementována Mgr. Michalem Dudkou.

A Justáž Michelsonova dvousvazkového interferometru

Při změně teploty v místnosti nebo jinými vlivy se může stát, že se interferometr rozjustuje, což se projeví sníženým vstupním výkonem a menší vizibilitou. Pro stabilizaci sice není vizibilita klíčová, nicméně při vyšší vizibilitě probíhá stabilizace lépe (je větší odstup signálu od šumu). Dojustáž je komplikovanější než pro jednosvazkový interferometr, jelikož oba svazky postupují stejnými rameny. Najustováním zrcátek v obou ramenech zpravidla zlepšíme vizibilitu pouze pro jeden ze svazků. Druhý musíme dojustovat pomocí jiných zrcátek. Zde je stručný popis, jak justáž probíhá.

Zakryjeme měřicí svazek (č. 2 na obr. 5) a nastavíme polarizační kontroler PC1 tak, abychom na fotodiodě PIN1 detekovali maximální intenzitu. Poté zakryjeme stabilizační svazek (č. 1) a provedeme totéž s polarizačním kontrolerem PC2 a detektorem PIN2. Tímto dostaneme maximum intenzity svazků vstupujících do interferometru.

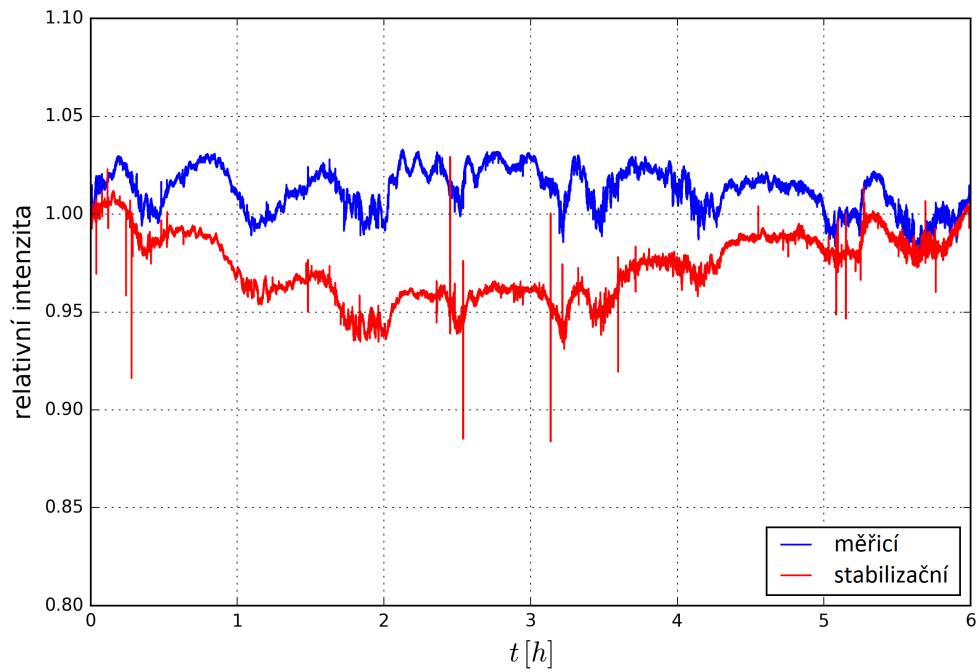
Na vstup piezokrystalu (Mp) přivedeme pilové napětí z funkčního generátoru, amplitudu volíme kolem 10 V a frekvenci okolo 100 Hz. Zakryjeme měřicí svazek (č. 2), mezi zrcátko M1b a dělič svazku BS2 umístíme detektor. Výstupní napětí z detektoru sledujeme na osciloskopu, měli bychom pozorovat interferenční proužky. Pomocí lineárního posuvu zrcátka M1in vyrovnáme dráhy ramen interferometru a pomocí justážních šroubů zrcátka M1in a Mp se snažíme dosáhnout co nejlepšího prostorového překryvu svazků, neboli maximalizujeme vizibilitu.

Přerušíme rameno 1, pomocí justážních šroubů zrcátka M1b a navazovače L1b maximalizujeme navázání do optického vlákna. Místo ramena 1 přerušíme rameno 2, maximalizujeme navázání do vlákna pomocí zrcátka M1in. Přestože chybí jeden stupeň volnosti, je navázání ramena 1 v našem experimentální uspořádání dostatečné (lze dosáhnout navazovací účinnosti přes 80%). Po odkrytí obou ramen bychom měli dostat velmi vysokou vizibilitu (přes 99%).

Zakryjeme stabilizační svazek (č. 1) a postupujeme obdobně pro měřicí (č. 2). Nastavíme vertikální a horizontální naklonění vyvazovače L2a a zrcátka M2a tak, abychom dostali co největší vizibilitu interferenčních proužků na detektoru umístěném mezi děličem svazku BS2 a zrcátkem M2b. Poté přerušíme jedno z ramen interferometru a maximalizujeme navazovací účinnost

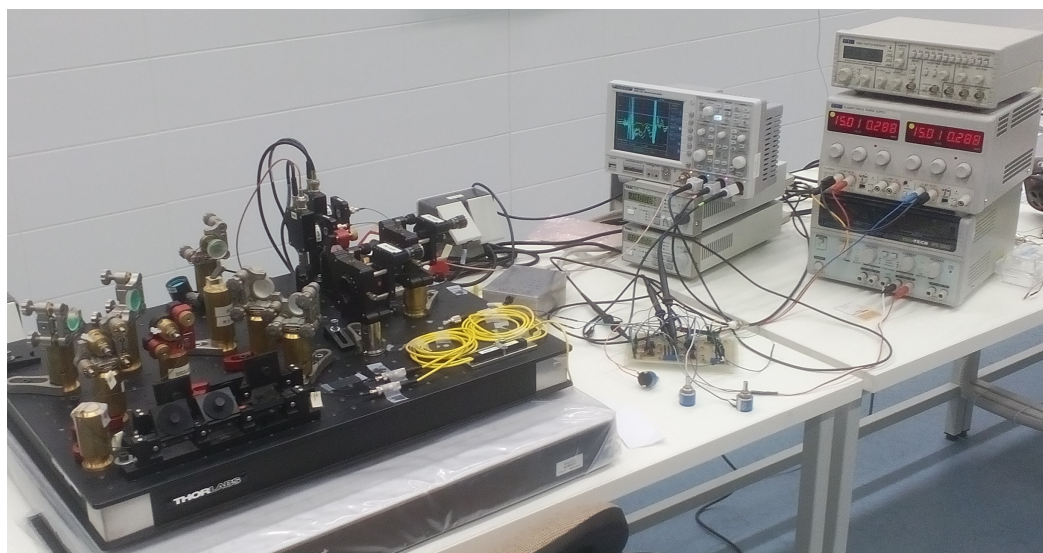
do optického vlákna pomocí zrcátka M2b a navazovače L2b. Opět bychom měli získat vysokou vizibilitu (okolo 99%).

B Fluktuace vstupní intenzity

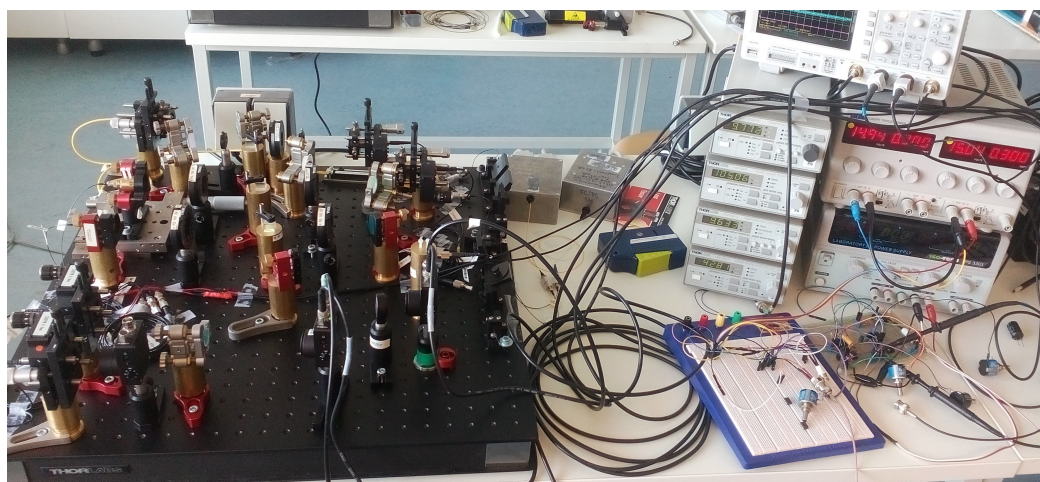


Obrázek 14: Průběh vstupní intenzity měřicího (modře) a stabilizačního svazku (červeně) po dobu šesti hodin. Na y-ové ose je vyznačena relativní intenzita svazků vztažená k intenzitě na počátku měření. Po dobu šesti hodin se vstupní intenzita změnila v rozmezí 6%.

C Fotografie experimentálních uspořádání



Obrázek 15: Experimentální uspořádání při aktivní stabilizaci dvousvazkového Michelsonova interferometru.



Obrázek 16: Experimentální uspořádání při aktivní stabilizaci vláknového Machova-Zehnderova interferometru.