

Univerzita Palackého v Olomouci
Přírodovědecká fakulta

Katedra Optiky

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE



Interferometrické měření fázové modulace

Vypracovala:	Andrea Mičková
Vedoucí bakalářské práce:	Mgr. Michal Baránek, Ph.D
Studijní program:	B1701 Fyzika
Studijní obor:	Digitální a přístrojová optika
Datum odevzdání:	24. 7. 2017

Abstrakt

Prostorové modulátory světla jsou optoelektronické přístroje, které nachází řadu aplikací v různých oblastech moderní optiky. Při vhodném nastavení vstupní polarizace lze docílit čistě fázové modulace světelného svazku procházejícího aktivním displejem přístroje. Hlavní náplní práce je interferometrické měření, jehož cílem je určení hloubky prováděné fázové modulace v závislosti na hodnotě signálu odeslaného na modulátor. Požadované údaje jsou získány zpracováním zaznamenaných interferenčních obrazců.

Klíčová slova: interference, fázová modulace, prostorový modulátor světla, zpracování obrazu

Abstrakt

Spatial light modulators are optoelectronic devices which have a lot of applications in the modern optics. The aim of this work is determination of the depth of performed phase modulation in relation to value of input signal addressing the spatial light modulator. Desired data are obtained by image processing of recorded interference patterns.

Key words: interference, phase modulation, spatial light modulator, image processing

Poděkování

Chtěla bych poděkovat své rodině, která mě podporovala vždy a za všech okolností po celou dobu studia a také bych ráda poděkovala mému vedoucímu Mgr. Michalu Baránkovi, Ph.D za čas, ochotu a užitečné rady, které vedly ke vzniku mé bakalářské práce.

Prohlášení

Čestně prohlašuji, že jsem bakalářskou práci „Interferometrické měření fázové modulace“ vypracovala samostatně pod vedením Mgr. Michala Baránka, Ph.D za použití odborné literatury, která je uvedena na konci práce.

V Olomouci dne 24. 7. 2017

Podpis

Obsah

1 Úvod	1
2 Teorie	2
2.1 Prostorový modulátor světla	2
2.2 Kapalné krystaly	3
2.3 Amplitudová a fázová modulace	4
2.4 Difrakce světla na mřížce	5
2.5 Kalibrační křivka	7
2.6 Interference světla	8
2.7 Interference dvou rovinných vln	8
2.8 Interferometické měření fázové modulace	13
3 Experiment	14
3.1 Popis experimentu	14
3.2 Řízení experimentu	16
3.3 Zpracování dat	17
4 Vyhodnocení a diskuze naměřených výsledků	18
5 Závěr	20
6 Použitá literatura	21

1. Úvod

Prostorový modulátor světla (PMS) je moderní optoelektronické zařízení, které má široké uplatnění v moderní optice. Slouží k modulaci procházející elektromagnetické vlny. Jeho aktivní plocha je tvořena z kapalných krystalů. Tyto krystaly jsou uloženy do vzájemně oddělených buněk (pixelů) a tvoří tak periodickou strukturu.

Na každý pixel PMS lze pomocí elektrod přivést elektrické napětí. PMS se podle způsobu modulace dělí na fázové, u nichž dochází ke tvarování vlnoplochy a amplitudové, které mění prostorové rozložení výstupní intenzity. Prostorové modulátory světla můžeme využít např. při korekci optických aberací nebo filtraci prostorového spektra [1], [2].

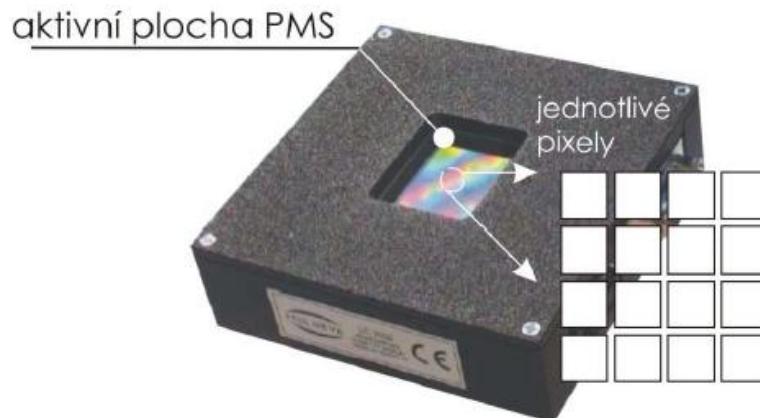
Hlavní náplní této bakalářské práce je realizace experimentu, který umožní záznam interference dvou světelných svazků. Každý ze svazků prochází různou částí displeje prostorového modulátoru světla Holoeye LC 2002 (832 x 624 pixelů) s rozdílnou hodnotou přivedeného signálu.

Konečnou fází je zpracování zaznamenaných interferenčních obrazců a určení hloubky prováděné fázové modulace v závislosti na hodnotě vstupního signálu.

2. Teorie

2.1 Prostorový modulátor světla

PMS je přístroj, který umožňuje modulaci procházející světelné vlny a nachází v moderní optice široké uplatnění. Ke své funkci využívá elektrooptického jevu kapalných krystalů, ze kterých je plocha PMS vytvořena. Krystaly jsou uloženy do vzájemně oddělených buněk (pixelů) (Obrázek 1). Při použití PMS je nutné ovládat jeho jednotlivé pixely pomocí elektrického signálu přivedeného z počítače. Pomocí vhodného softwaru je vytvořena matice hodnot, která rozměrově odpovídá počtu pixelů aktivní plochy PMS. Tato matice je poté promítnuta na displej PMS a velikost jejich prvků určuje rozsah prováděné modulace.

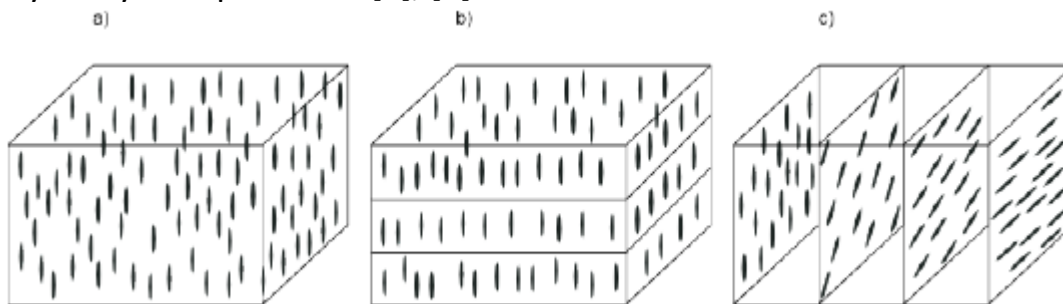


Obrázek 1: Znárodnění aktivní plochy PMS a jejího rozdělení na jednotlivé pixely [2].

2.2 Kapaln  krystaly

Aktivn  plocha PMS je tvořena z kapaln  krystalů. Kapaln  krystaly jsou látky na rozhraní kapaln  a pevn , tedy krystalick  fáze, tvořící opticky anizotropn  prostředí. Při globálním pohledu projevují chování kapalin. Zaměříme-li se vřak na molekul rn  uroveň těchto látek tak zjistíme, že lze nalézt jistou uspořádanost typickou pro látky krystalick .

Z hlediska vnitřního uspoř dan  molekul můžeme kapaln  krystaly dělit na nematické, smektick  a cholestick  (Obrázek 2). Kapaln  krystaly nematick ho typu mají n hodn  prostorov  rozm stěn , jsou vřak vůči sobě vz jemn  koline rn . Středy smektick ch kapalných krystalů jsou oproti nematických navíc uspoř dan  do rovnoběžných vrstev. Cholestick  kapaln  krystaly se od nematických liř  postupn m řroubovit m st ačen m kolem osy. Toto stočen  existuje u cholestick ch kapalných krystalů přirozeně [1], [3].

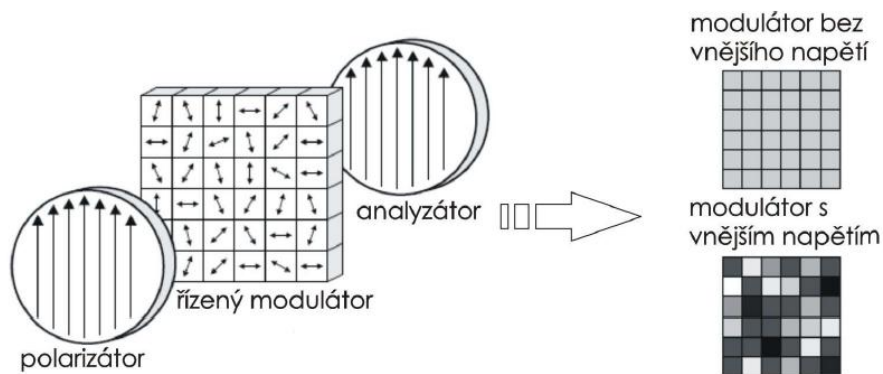


Obrázek 2: *Struktura kapalných krystalů: a) nematické krystaly, b) smektick  krystaly, c) cholestick  krystaly [1].*

Orientaci kapalných krystalů můžeme ovlivňovat silov m působením. Vz jemn m pootočen m skleněných planparalelních destiček, mezi kterými jsou zároveň umístěny kapaln  krystaly nematick ho typu, můžeme vytvořit stočenou formu nematických kapalných krystalů [1], [3].

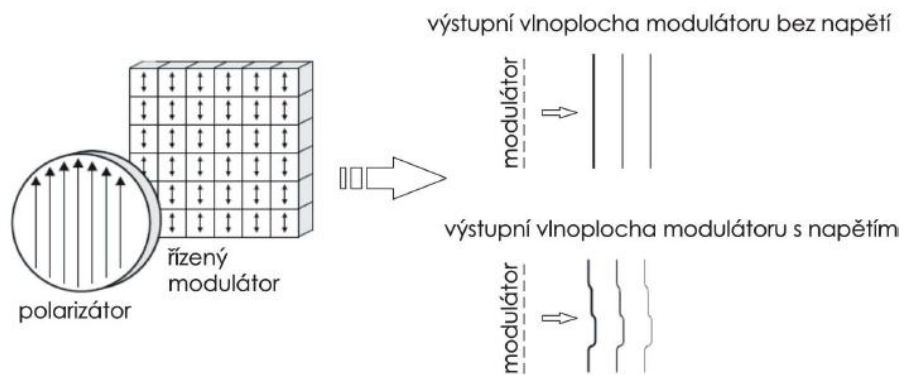
2.3 Amplitudová a fázová modulace

PMS se podle způsobu modulace dělí na fázové a amplitudové. Můžeme se setkat i s typy, které kombinují amplitudovou i fázovou modulaci. U amplitudové modulace je problém řešen umístěním lineárních polarizátorů před a za PMS (Obrázek 3). Různé hodnoty signálu na jednotlivých pixelech PMS způsobí, že v různých místech svazku po průchodu kapalnými krystaly je jiná polarizace. Když tento svazek potom prochází analyzátozem, tak je v každém místě různá propustnost [4].



Obrázek 3: Princip amplitudové modulace světla [4].

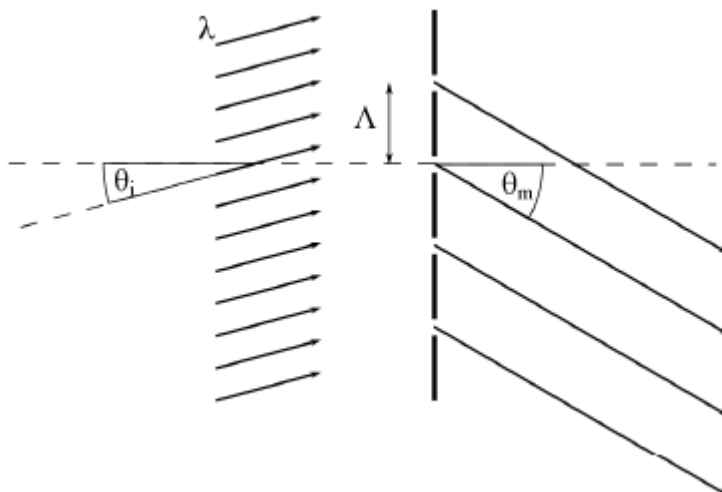
Pokud chceme dosáhnout fázové modulace, tak ta pracuje se zpožděním řízené fázové destičky. Vstupní svazek je paralelně polarizován s hlavní osou kapalného krystalu. Je potřeba, aby byla správně natočena řízená fázová destička. Dochází ke změně indexu lomu a optické dráhy světla v kapalném krystalu, nikoliv ke změně polarizačního stavu světla (Obrázek 4) [4].



Obrázek 4: Princip fázové modulace světla [4].

2.4 Difrakce světla na mřížce

Vzhledem k rozměrům displeje a množství pixelů, ze kterých se aktivní plocha PMS skládá, je za potřebí brát v úvahu difrakci světla. Teorie difrakce je založena na Huygensově – Fresnelově principu, který nám říká, že pokud do šíření monochromatického světla umístíme nějakou překážku, která má podobné rozměry jako vlnová délka použitého světla, tak dochází k ohybu světla a světlo se dostává za hranice geometrického stínu. Při práci s PMS na difrakci nesmíme zapomenout, protože PMS se kromě ovladatelných pixelů skládá také z nepropustných oblastí, které od sebe pixely oddělují. Dochází ke vzniku difrakce na mřížce, kterou vytváří pixely PMS (Obrázek 5) [5].



Obrázek 5: *Difrakce na mřížce* [6].

Difrakční mřížka je soustava velkého počtu štěrbin. Základním parametrem je mřížková konstanta a matematicky můžeme difrakci zapsat pomocí mřížkové rovnice

$$\sin(\theta_m) - \sin(\theta_i) = \frac{m \lambda}{\Lambda} \quad , \quad (1)$$

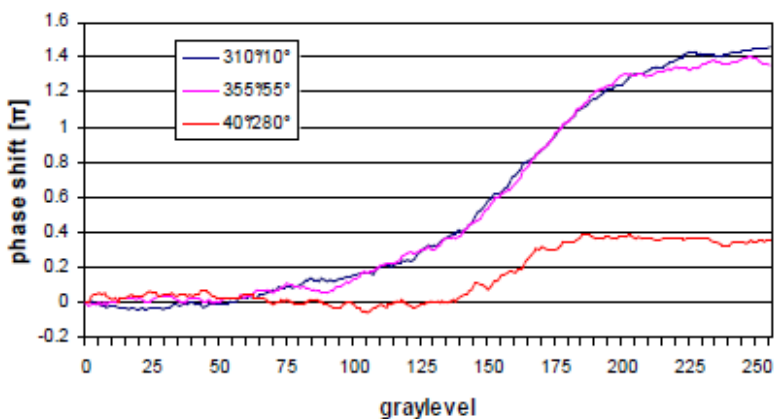
kde Λ je mřížková konstanta, θ_i je úhel dopadu, θ_d úhel difraktovaného záření, $m = 0, 1, 2, \dots$ a λ je vlnová délka.

Průchodem přes mřížku, která odděluje jednotlivé pixely, se dopadající záření rozdělí do mnoha směrů, tzv. difrakčních řádů [6].

2.5 Kalibrační křivka

PMS se ovládá pomocí signálů vysílaných z počítače. Pomocí vhodného softwaru (program MATLAB) je vytvořena matice hodnot, rozměrově odpovídající počtu pixelů aktivní plochy PMS. Každému prvku této matice je přiřazena hodnota, reprezentující požadovanou změnu propustnosti nebo fáze na odpovídajícím pixelu PMS. Obslužný software PMS, tyto prvky řídicí matice převede na elektrické napětí přiložené na elektrody pixelu PMS. Prvky matice reprezentující požadovanou změnu amplitudy nebo fáze mohou nabývat hodnot v rozsahu 0-255. V případě fázové modulace určuje hodnota signálu velikost fázového posuvu.

Ve své práci vycházím z kalibrační křivky PMS Holoeye LC 2002 (obrázek 6) [7]. Jedná se o kalibrační křivku, která byla proměřena pro různé typy lineární polarizace. Cílem práce je změřit kalibrační křivku PMS Holoeye LC 2002 při optimálním polarizačním stavu vstupního záření, který není v manuálu [7] a kde bych navazovala na diplomovou práci Jaromíra Běhala. Měření, které bylo provedeno v laboratoři digitální optiky v Olomouci ukazuje, že optimální fázová modulace je pro eliptickou vstupní polarizaci [3]. Optimální polarizace se rozumí taková polarizace, kde je amplitudová modulace minimální. Kalibrační křivka se bude měřit pomocí interferometrického měření.



Obrázek 6: Kalibrační křivka PMS Holoeye LC 2002 [7].

2.6 Interference světla

Interferenci můžeme definovat jako speciální typ superpozice dvou nebo většího počtu postupných vln z diskrétně rozložených zdrojů. Při jejich pohybu a prolínání dochází v určitém bodě k vzájemnému zesilování, kdežto v jiných bodech dochází vzájemnému rušení. Výsledkem je interferenční obrazec, kde jsou patrné projevy zesilování a zeslabování (světlé a tmavé proužky) [8].

2.7 Interference dvou rovinných vln

Platí, že rozložení intenzity v interferenčním obrazci je popsáno vztahem

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

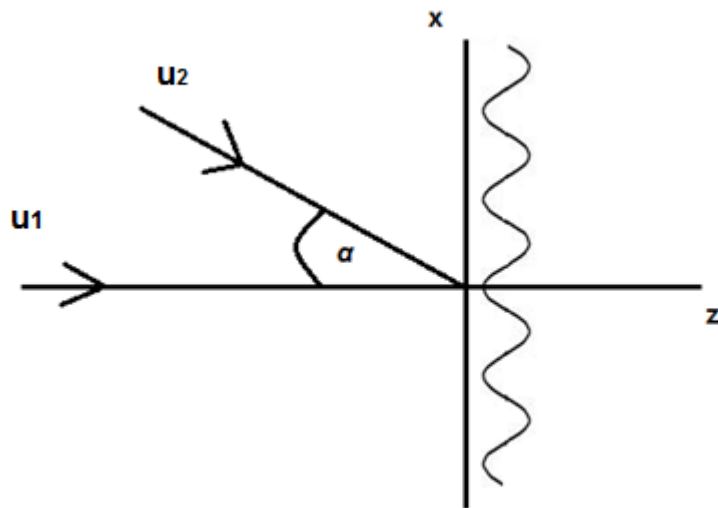
kde I_1 je intenzita první vlny, I_2 je intenzita druhé vlny, $\Delta\varphi$ je fázový rozdíl interferujících vln. Když spolu necháme interferovat dvě vlny, tak nám vznikne interferenční obrazec. Pokud spolu necháme interferovat dvě rovinné vlny, tak na výsledném interferenčním obrazci dostaneme rovné proužky. Pokud spolu necháme interferovat dvě sférické nebo parabolické vlny, tak na výsledném interferenčním obrazci dostaneme kroužky.

Za předpokladu, že $z = 0$, můžeme psát rovinné vlny ve tvaru

$$u_1 = e^{i \frac{2\pi}{\lambda} * x * \sin \alpha_1} \quad (3)$$

$$u_2 = e^{i \frac{2\pi}{\lambda} * x * \sin \alpha_2}, \quad (4)$$

kde pro jednoduchost uvažujeme, že $\alpha_1 = 0$ a $\alpha_2 = \alpha$ (Obrázek 7).



Obrázek 7: *Nákres interference dvou rovinných vln.*

Pro určení pozice maxim v interferenčním obrazci dvou rovinných vln si nejprve určíme fázový rozdíl, kde pro maximum platí

$$\Delta\varphi = 2\pi * m = \varphi_2 - \varphi_1 = \frac{2\pi}{\lambda} * x * \sin \alpha. \quad (5)$$

Z toho nám vyplívá, že pozice maxim určíme vztahem

$$x_{max} = m * \frac{\lambda}{\sin \alpha} \quad . \quad (6)$$

Vzdálenost mezi dvěma sousedními maximy je perioda Λ

$$\Lambda = \frac{\lambda}{\sin \alpha} \quad . \quad (7)$$

Pokud budeme navíc uvažovat fázové posuvy δ_1 a δ_2 , můžeme psát rovinné vlny ve tvaru

$$u_1 = e^{i(\frac{2\pi}{\lambda} * x * \sin \alpha_1 + \delta_1)} \quad (8)$$

$$u_2 = e^{i(\frac{2\pi}{\lambda} * x * \sin \alpha_2 + \delta_2)} \quad . \quad (9)$$

Za zvoleného předpokladu, že $\alpha_1 = 0$ a $\alpha_2 = \alpha$, platí pro fázový rozdíl vztah

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi}{\lambda} * \sin \alpha * x + \delta, \quad (10)$$

kde

$$\delta = \delta_2 - \delta_1 \quad . \quad (11)$$

Podmínkou pro maximum, že $\Delta\varphi=2\pi m$, dostaneme vztah pro pozici maxim

$$x_{max} = \frac{\lambda}{\sin \alpha} * \left(m - \frac{\delta}{2\pi} \right) , \quad (12)$$

a zároveň vzdálenost mezi dvěma sousedními maximy – periodu Λ

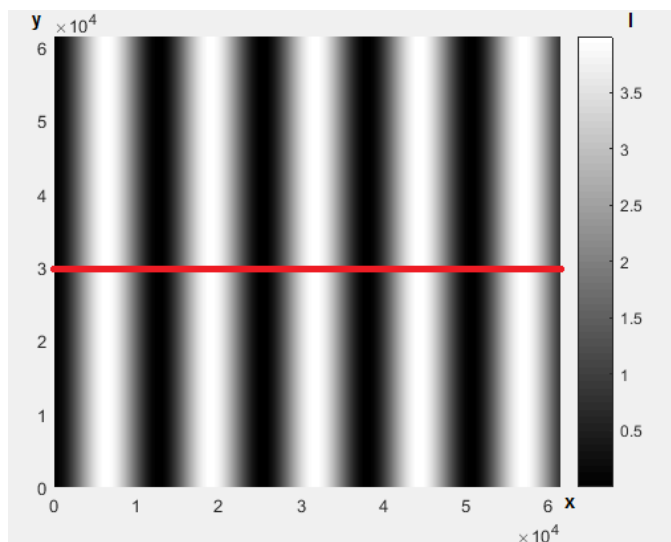
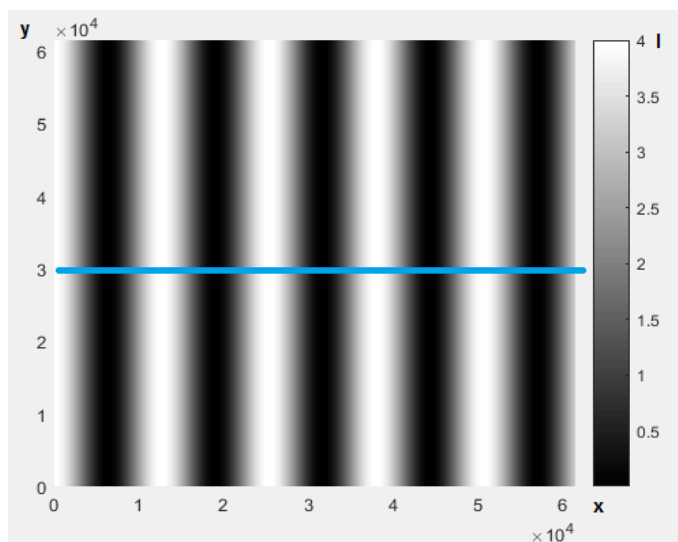
$$\Lambda = \frac{\lambda}{\sin \alpha} . \quad (13)$$

Porovnáním vztahů (6), (7), (12) a (13) je zřejmé, že i při uvažovaném fázovém posuvu je vždy stejná perioda a liší se pouze pozice maxim (obrázek 9), (obrázek 10).

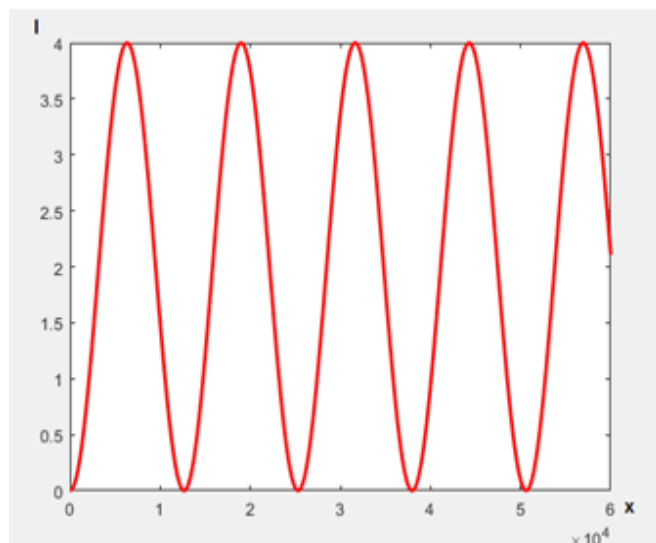
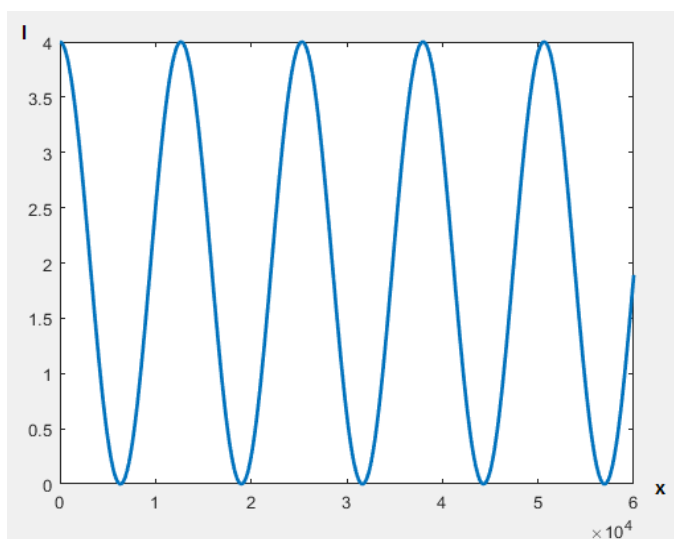
Dosazením vztahu (10) do Interferenčního zákona (2) s použitím vztahů (7) a (13), získáme výslednou intenzitu I

$$I = 2 + 2 * \cos \left(\frac{2\pi}{\Lambda} * x - \delta \right) , \quad (14)$$

se kterou budeme dále pracovat při zpracování výsledků z experimentálního měření.



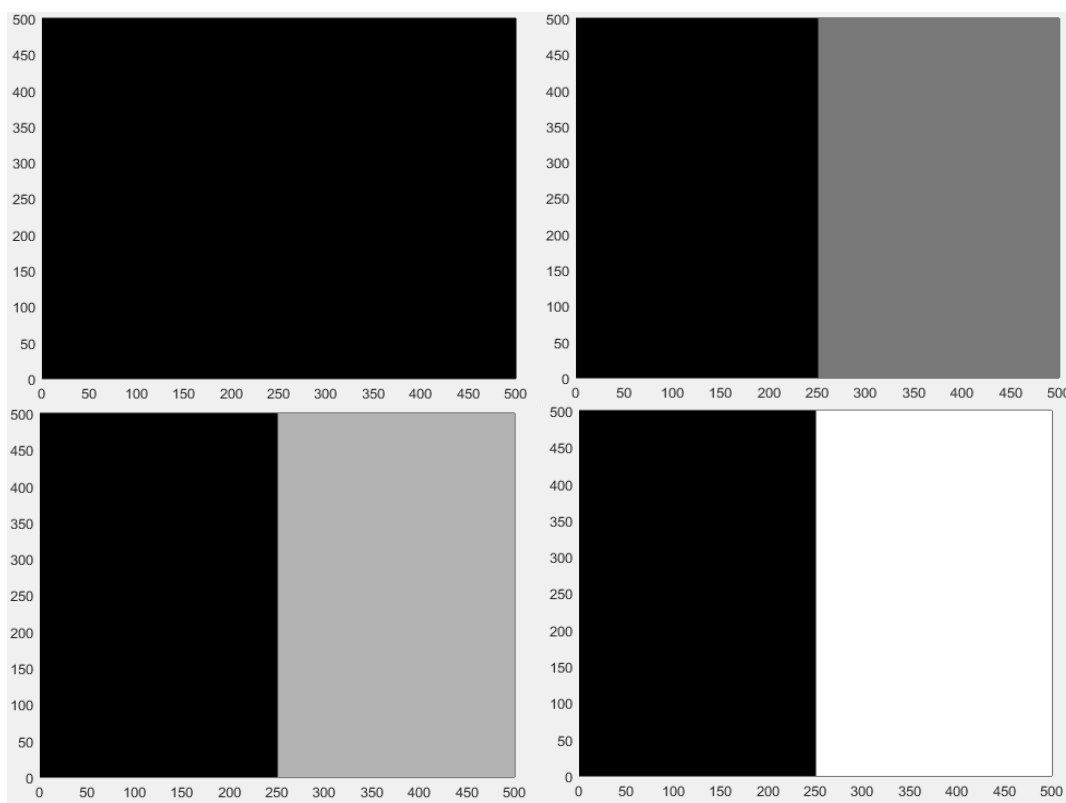
Obrázek 8: Interferenční obrazce pro vlnovou délkou $\lambda = 632,8 \text{ nm}$ a pro úhel $\alpha = 0.00005 \text{ rad}$, kde pro první obrázek je $\delta = 0$ a pro druhý obrázek $\delta = \pi$.



Obrázek 9: Grafy řezů interferenčních obrazců. Modrá křivka pro $\delta = 0$ a červená pro $\delta = \pi$. Z grafů je patrné, že vznikne posun interferenčních proužků o polovinu periody.

2.8 Interferometrické měření fázové modulace

Interferometrické měření vyžaduje, aby někde v prostoru byly přítomny současně dvě nebo více optických vln. Výsledné pole je pak součtem dvou vln. Pokud jedné z interferujících vln budeme přidávat konstantní fázový posuv, tak se nám to na interferenčním obrazci projevuje tak, že se posunují proužky. PMS si rozdělíme na dvě poloviny, kde na každou z nich bude posílána jiná hodnota signálu od 0 do 256, kde hodnota 0 odpovídá černé barvě a hodnota 256 odpovídá bílé barvě (Obrázek 10). Přiváděný signál je vstup a výstupem je vzniklá interference, kdy obě z interferujících vln prochází různou částí displeje s jinou hodnotou vstupního signálu (Obrázek 8). Různá hodnota tohoto signálu znamená různý fázový posuv.

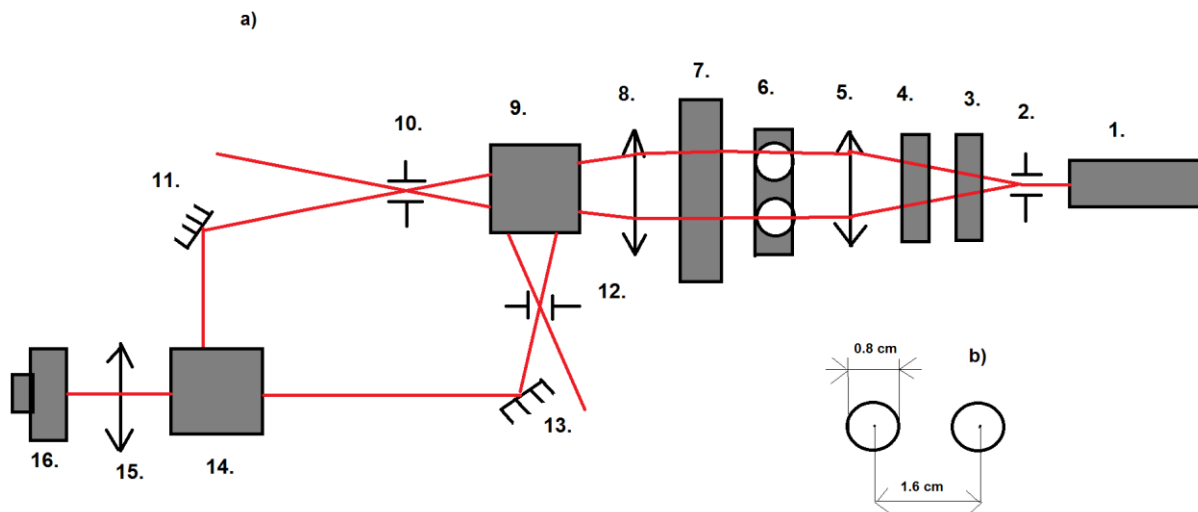


Obrázek 10: Přiváděné signály na prostorový modulátor světla, kde černé barvě odpovídá hodnota 0 a bílé barvě odpovídá hodnota 256.

3. Experiment

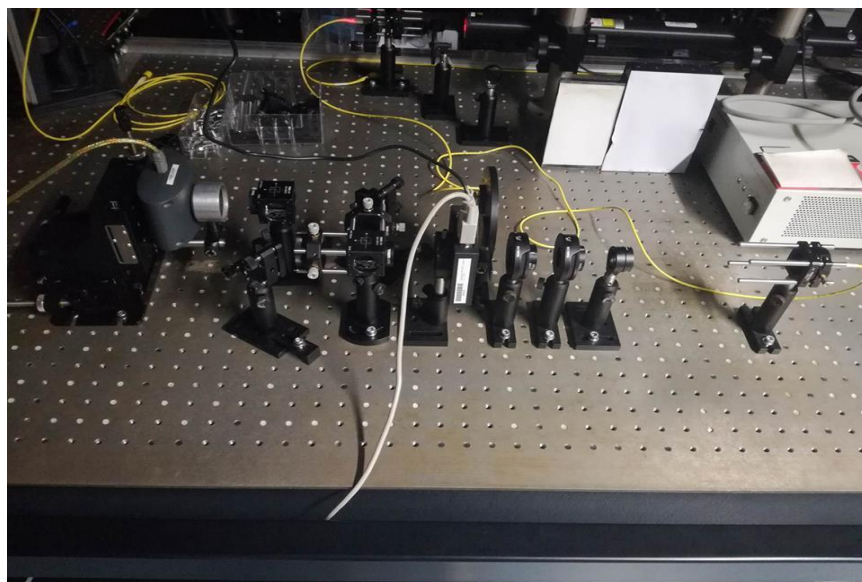
Hlavní náplní našeho experimentu je záznam interference dvou světelných svazků. Každý ze svazků prochází různou částí displeje PMS s rozdílnou hodnotou přivedeného signálu. Naměřená data využijeme k určení hloubky prováděné fázové modulace v závislosti na hodnotě vstupního signálu.

3.1 Popis experimentální sestavy



Obrázek 11 a) Schéma experimentální sestavy: 1. Zdroj – čelo vlákna s navázaným světlem He-Ne laseru, 2. Prostorový filtr, 3. Lineární polarizátor, 4. Čtvrtvlnná destička, 5. Kolimační čočka o ohniskové vzdálenosti 200 mm, 6. Dva kruhové otvory 7. PMS Holoeye LC 2002, 8. Spojná čočka o ohniskové vzdálenosti 75 mm, 9. Dělič, 10. Clona, 11. Zrcátko, 12. Clona, 13. Zrcátko, 14. Dělič, 15. Spojná čočka o ohniskové vzdálenosti 50 mm, 16. CCD prvek. **b)** Detail dvou kruhových otvorů.

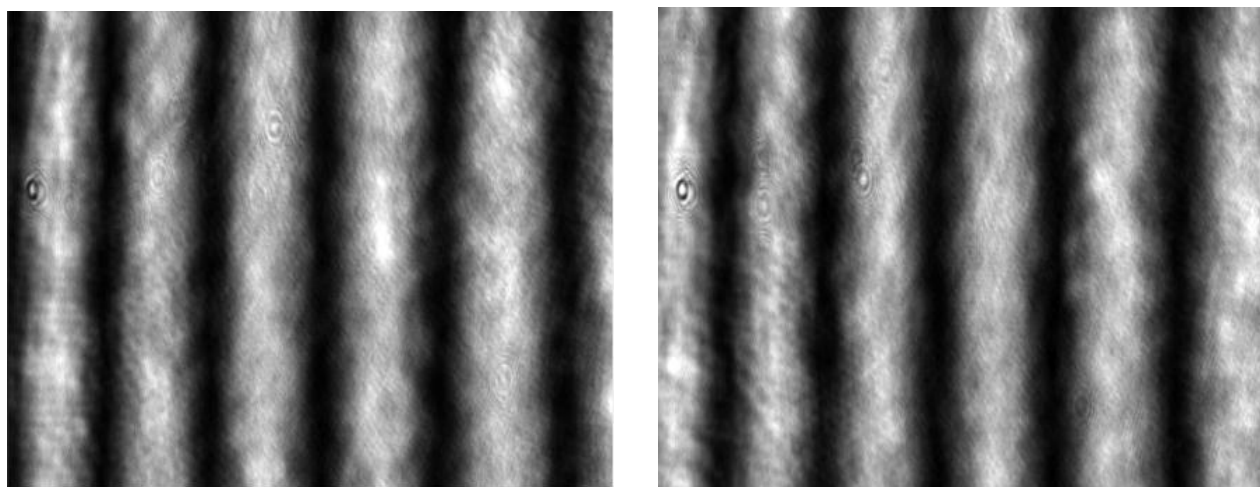
Schéma použité experimentální sestavy je uvedené na (obrázek 11 a)). Pracují se svazkem světla Helium-Neonového laseru (laser s centrální vlnou délkou 632 nm). Paprsek z laseru prochází prostorovým filtrem přes lineární polarizátor a čtvrt vlnou destičku, které zajišťují správnou polarizaci při práci s PMS, a dopadá na kolimační čočku. Světelný svazek dále prochází dále přes dva kruhové otvory, kde jejich středy jsou od sebe vzdáleny 1,6 cm a mají průměr 0,8 cm (Obrázek 11 b)). Za těmito kruhovými otvory se nachází PMS, na který jsou z počítače přiváděny signály (Obrázek 10). První dělič v sestavě nám způsobí, že se svazek rozdělí do dvou větví, tedy v každé větvi budeme mít stejně jasné a stejně velké dvě kruhové stopy. Abychom docílili výsledné interference na CCD prvku (F-view II), je potřeba si v každé větvi zaclonit jeden z kruhových otvorů tak, abychom si zaclonili vždy ten opačný, aby po průchodu druhým děličem v sestavě vznikla na CCD prvku výsledná interference. Spojné čočky v sestavě slouží k odseparování difrakčních řádů, které vznikly po průchodu přes PMS. Clony jsou umístěny v ohnisku čoček a slouží k oddělení nultého difrakčního řádu od ostatních. Výsledná interference nám vzniká na CCD prvku (kameře), kterou máme napojenou na počítač, kde vyhodnocujeme výsledky z měření.



Obrázek 12: Experimentální sestava sestavená v laboratoři optiky

3.2 Řízení experimentu

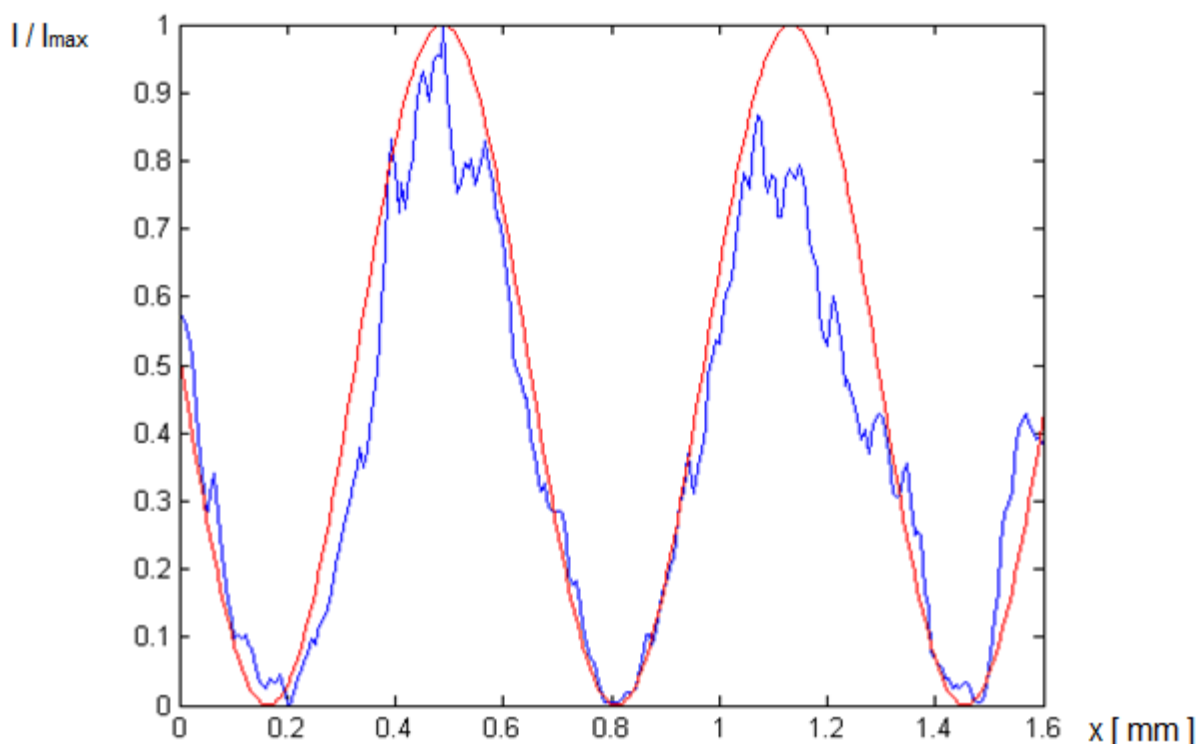
Experiment je řízen pomocí počítače, na který je napojen PMS i kamera, kam se zaznamenává interference. Na PMS jsou vysílány signály, které byly vytvořeny v programu Matlab (Obrázek 10) a které nám způsobí různé fázové posuvy interferujících vln (Obrázek 8). Pomocí algoritmu vytvořeného v programu Matlab byla na PMS vysílána série signálů a na CCD prvek bylo zaznamenáno 64 interferenčních obrazců, které se od sebe lišily posunem interferujících proužků. Zaznamenané interferenční obrazce (Obrázek 13) byly ukládány do paměti počítače a sloužily pro zpracování dat.



Obrázek 13: Výřezy z interferenčních obrazců. Na snímcích je viditelný posun interferenčních proužků způsobený změnou hodnoty signálu na polovině aktivní plochy PMS.

3.3 Zpracování dat

Zpracování dat se provádí v počítači v programu Matlab, kde zpracováváme zaznamenané interferenční obrazce. Experimentální data získaná kolmým řezem interferenčních proužků proložíme funkcí, která odpovídá závislosti výsledné intenzity I na souřadnici x (14) (Obrázek 14). Parametrem fitu je fázový posun δ . Pro konkrétní interferenční záznam pořízený při známé hodnotě signálu na PMS tak získáme velikost fázového posunu interferujících vln. Poté již není problém vykreslit kalibrační křivku, která udává závislost fázového posunu na velikosti vstupního signálu. Pro správný fit experimentálních dat je třeba znát hodnotu periody Λ , kterou zjistíme po zaznamenání interferenčních obrazců pomocí softwaru kamery.

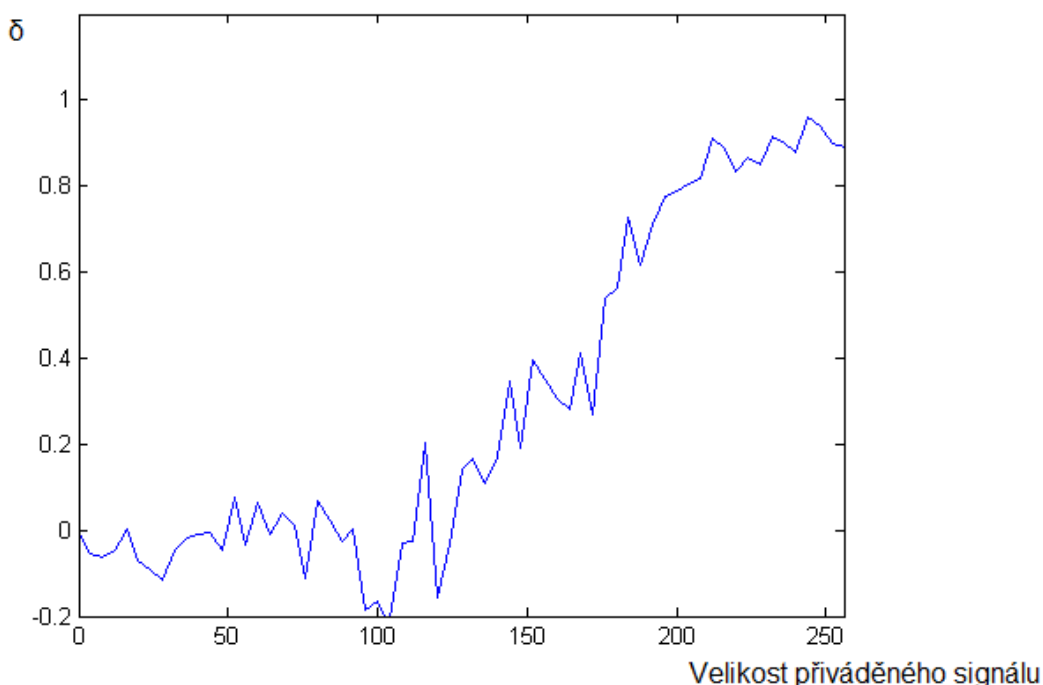


Obrázek 14: Experimentální data proložená intenzitou I (14). Modrá barva jsou experimentální data a červená barva patří fitu.

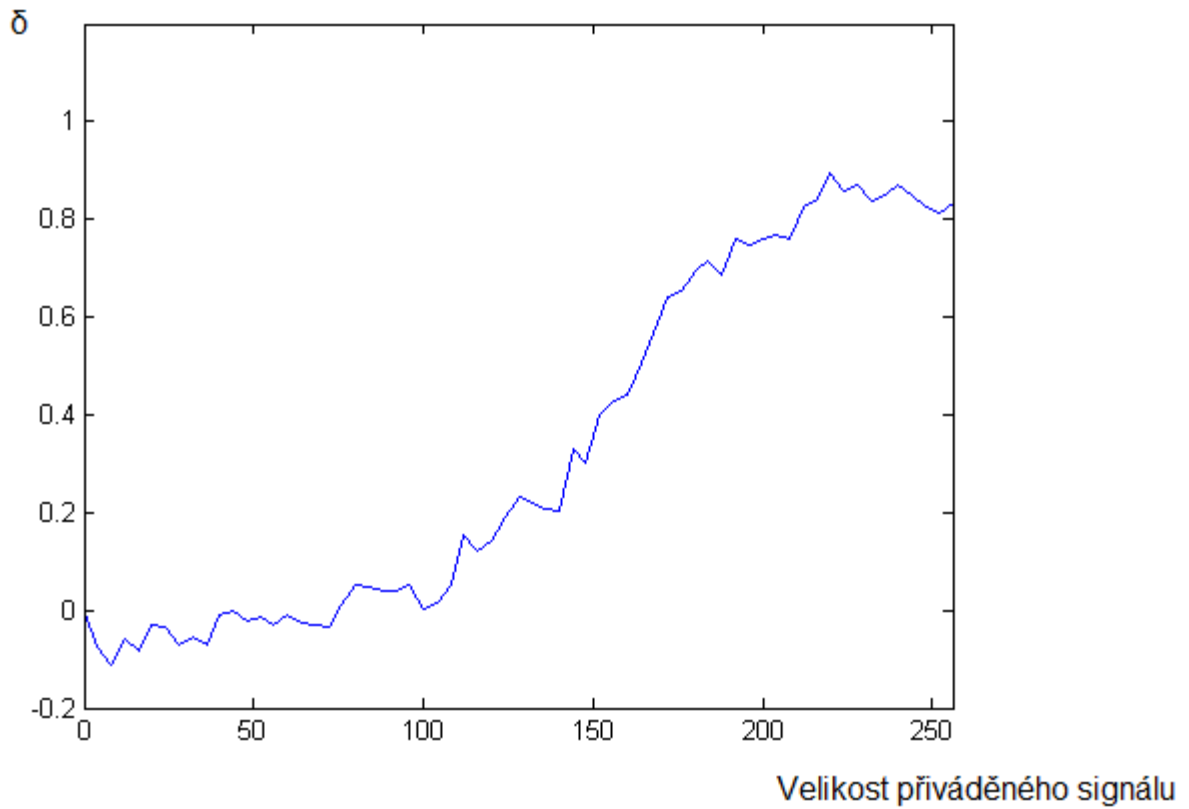
4. Vyhodnocení a diskuze naměřených výsledků

Při zpracování interferenčních záznamů jsme získali kalibrační křivky, které byly různě zašuměné a nestabilní (Obrázek 15). Pro lepší výsledek jsme provedli průměr deseti měření a dostali výslednou kalibrační křivku, která měla nejmenší odchylky (Obrázek 16).

Při zpracování interferenčních záznamů nám velké problémy způsoboval třes a nestabilní interferenční záznam. Dokázali jsme, že metoda interferometrického měření fázové modulace principiálně funguje, ale bohužel jsme nezískali takové výsledky, které by bylo možné věrohodně porovnat s kalibrační křivkou z manuálu k PMS Holoeye LC 2002.



Obrázek 15: Kalibrační křivka jednoho z měření, kde je patrný třes interferenčního záznamu. Na horizontální ose je velikost přiváděného signálu a na vertikální ose fázový posun δ .



Obrázek 16: Výsledná kalibrační křivka, která byla zprůměrovaná z deseti měření. Na horizontální ose je velikost přiváděného signálu a na vertikální ose fázový posun δ .

5. Závěr

Hlavní náplní této bakalářské práce byla realizace experimentu, který umožnil záznam interference dvou světelných svazků. Každý ze svazků procházel různou částí displeje prostorového modulátoru světla Holoeye LC 2002 (832 x 624 pixelů) s rozdílnou hodnotou přivedeného signálu. Zaznamenané interferenční obrazce se dále zpracovávaly, čímž jsme dostali výslednou kalibrační křivku.

Při zpracování interferenčních záznamů nám velké problémy způsoboval interferometr, který nebyl dostatečně stabilní, a z tohoto důvodu nešlo kalibrační křivky věrohodně porovnat.

Bylo dokázáno, že metoda principiálně funguje, ale je potřeba sestavit stabilnější interferometr, který by zamezil vzniklým odchylkám. Tohoto faktu možno využít v budoucí práci, kde bychom se se snažili sestavit stabilnější sestavu experimentu.

6. Použitá literatura

- [1] B.E.A Saleh, M.C. Teich, Základy fotoniky – svazek 2, MATFYZPRESS, Praha (1994).

- [2] P. Bouchal, Fresnelova nekoherentní korelační holografie (FINCH), Bakalářská práce Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství (2009).

- [3] J. Běhal, Charakteristika činnosti prostorového modulátoru světla, Diplomová práce UP Olomouc (2015).

- [4] Z. Doležel, Teoretické a experimentální posouzení energetické účinnosti prostorových modulátorů světla, Diplomová práce UP Olomouc (2007).

- [5] F. Chlup, Metody pro ovládání amplitudových a fázových modulátorů světla, Diplomová práce UP Olomouc (2007).

- [6] P. Fiala, Základy fyzikální optiky, 1. vydání, Jaderná a fyzikálně inženýrská fakulta ČVUT Praha (1999), ISB 80-01-01975-6.

- [7] Holoeye, Optixplorer: Laboratory tutorials, hardware operating instructions, software operating instructions, Manuál k prostorovému modulátoru světla LC 2002 (2007).

- [8] I. Vyšín a J. Říha, Paprsková a vlnová optika, Olomouc (2012).