

Univerzita palackého v Olomouci
Přírodovědecká fakulta

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE



Měření tvaru vlnoplochy pomocí prostorového modulátoru světla

Katedra optiky

Vypracovala: Denisa Jelínková

Vedoucí bakalářské práce: Mgr. Michal Baránek, Ph.D.

Studijní program: B1701 Fyzika

Studijní obor: Digitální a přístrojová optika

Datum odevzdání: 18. května 2017

Poděkování

Velice děkuji vedoucímu Mgr. Michalu Baránkovi, Ph.D. za odborné rady, čas věnovaný v laboratoři a konzultacím při zpracování této bakalářské práce.

Dále děkuji své rodině za motivaci při psaní bakalářské práce.

Prohlášení

Tímto prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci zpracovala samostatně pod vedením Mgr. Michala Baránka, Ph.D. a s použitím citované literatury.

V Olomouci dne 18. 5. 2017

Podpis

Abstrakt

Prostorové modulátory světla jsou optoelektronické přístroje, které v posledních letech nachází řadu aplikací v různých oblastech optiky. Pozornost této práce se soustředí na využití PMS při adaptivní kompenzaci deformaci vlnoplochy. Hlavní náplní je realizace experimentu, ve kterém je nejprve pomocí interferometrické metody fázových posunutí získán tvar vlnoplochy signálního svazku a následně jsou korigovány změřené odchylky fáze od ideální rovinné vlny. V obou zmíněných činnostech hraje klíčovou roli právě PMS.

Abstract

Spatial Light Modulators are optoelectronic devices which in recent years have been applied in various areas of optics. This thesis focuses on the use of PMS in an adaptive compensation of waveform deformation. The main objective is a realization of an experiment in which, firstly, by means of interferometric phase shifting methods, the waveform of the signal beam is obtained and, secondly, measured phase deviations from the ideal plane wave are corrected. In both of these stages, PMS plays a key part.

Obsah

Úvod.....	1
1 Prostorový modulátor světla	2
1.1 Kapalné krystaly, elektrooptick� jev	2
1.2 Š�ření sv�tla modul�torem	4
1.3 Amplitudov� modulace.....	4
1.4 F�zov� modulace.....	5
1.5 Difrakce na pevn� m�r�zce modulátoru.....	6
1.6 Využití PMS.....	8
2 Interference	9
2.1 Michelsonov interferometr	9
3 Detekce fáze	11
3.1 Metoda fázových posunutí	11
4 Experiment	14
4.1 Popis experimentu.....	14
4.2 Separace difrakčních r�ad� PMS.....	15
4.3 Rízení experimentu	16
4.4 Zpracování dat	17
4.5 Oprava deformace	18
4.6 Vyhodnocení experimentu	20
5 Diskuze.....	22
6 Závěr.....	24

Úvod

Prostorový modulátor světla (PMS) je optický prvek, který se skládá z mnoha buněk (pixelů) kapalných krystalů, které jsou elektronicky řízené signálem z počítače. Pomocí počítače ovládáme velikost napětí přiváděného na jednotlivé pixely PMS a tímto způsobem je možné ovlivňovat propustnost nebo optickou dráhu.

Jednou z řady aplikací PMS je adaptivní kompenzace deformací vlnoplochy. Problém při experimentální realizaci korekce představuje skutečnost, že optické přístroje detekují pouze intenzitu. Potřebnou informaci o fázi lze ovšem získat díky moderním interferometrickým metodám. Příkladem je metoda fázových posunů, která pracuje s vícenásobným záznamem interferenčního obrazce, kde se jednotlivé snímky od sebe liší definovaným fázovým posuvem referenčních vln.

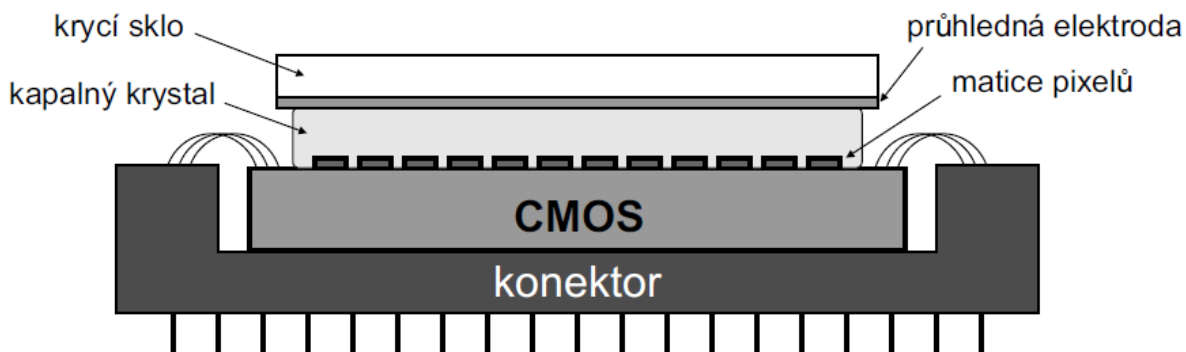
Výrazným argumentem pro využití PMS v adaptivních systémech je ten, že PMS může plnit obě klíčové funkce. Kromě finální korekce tvaru vlnoplochy je schopen také přesně měnit vzájemný fázový posun interferujících vln a umožnit tak provedení metody fázových posunů.

Hlavní náplní práce je stavba a justáž experimentálního uspořádání obsahujícího odrazný PMS Hamamatsu x10468. Cílem je pomocí metody fázových posunů nalézt deformace vlnoplochy signálního svazku a následně provést jejich opravu. Změřené odchylky fáze od referenční rovinné vlnoplochy jsou z velké části způsobeny prohnutím aktivního displeje použitého PMS. Možnost vlastní korekce tohoto výrobního nedostatku může být důležitým krokem k optimalizaci činnosti PMS v budoucích experimentech v laboratoři digitální optiky na Katedře optiky.

1 **Prostorový modulátor světla**

Prostorový modulátor světla (PMS) je optický prvek, který se skládá z mnoha buněk (pixelů) kapalných krystalů (obr. 1). Ty jsou elektronicky řízené signálem z počítače. Pomocí softwaru ovládáme velikost napětí, které je přiváděno na jednotlivé buňky. Tímto způsobem je možné ovlivňovat propustnost nebo optickou dráhu každého pixelu zvlášť. Tato vlastnost PMS je výhodná pro mnohé aplikace, neboť jsme schopni měnit amplitudu nebo fázi dopadajícího záření podle určitých požadavků. [1]

Každý PMS je charakterizován svými parametry, na které je třeba brát ohled při realizování experimentu. Mezi ty nejdůležitější patří: pracovní vlnová délka, rychlost odezvy, aktivní plocha, rozměry, vzájemné vzdálenosti jednotlivých pixelů a samozřejmě způsob modulace světelného pole. [2]

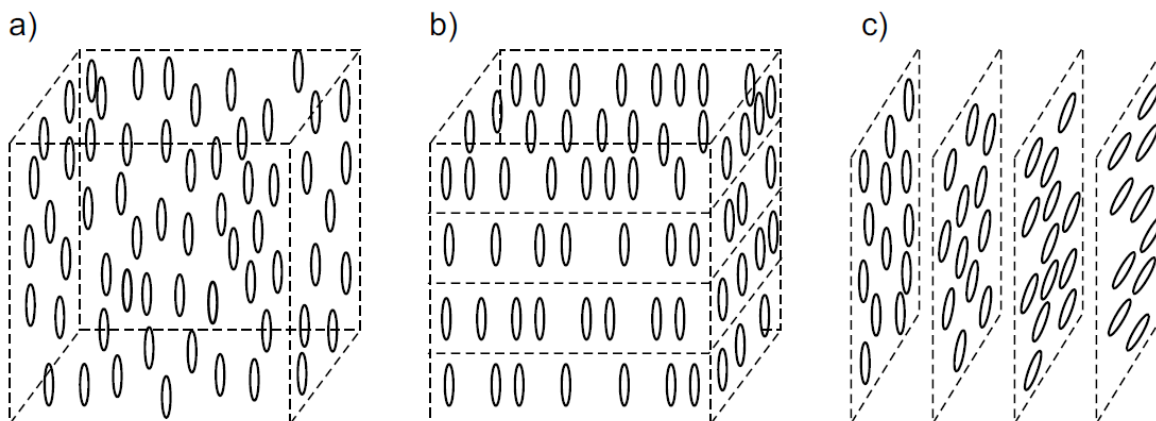


Obrázek 1.: Prostorový modulátor světla [2].

1.1 **Kapalné krystaly, elektrooptický jev**

Kapalné krystaly se charakterizují tím, že analogicky ke klasickému krystalovému uspořádání existuje orientační uspořádání molekul doutníkového tvaru, ale zcela chybí uspořádání prostorové, což je obdobné jako u kapalin. Existují tři typy kapalných krystalů (obr. 2):

- 1) *Nematické* kapalné krystaly mají molekuly uspořádány rovnoběžně, ale jejich polohy jsou náhodné.
- 2) *Smectické* kapalné krystaly mají molekuly uspořádány rovnoběžně, navíc jejich středy leží v rovnoběžných rovinách a polohy molekul jsou opět náhodné.
- 3) *Cholesterické* kapalné krystaly jsou zkroucenou formou nematické fáze, orientace má tvar šroubovice kolem osy. [2]



Obrázek 2.: Typy kapalných krystalů: a) nematické; b) smektické; c) cholesterické [2].

Kapalné krystaly mají schopnost díky působení vnějších sil měnit orientaci svých molekul a tímto způsobem ovlivňovat polarizační stav prošlého světla. Vlastnosti přiléhajících povrchů, například leštění skleněných destiček, určuje výchozí vlastnosti krystalu. Po přiložení elektrického pole se začnou molekuly kapalného krystalu vychylovat ze svých původních poloh. U nematického krystalu může dojít v závislosti na směru přiloženého pole ke sklonění podélné osy molekul do směru tohoto pole. U stočených nematických krystalů může přiložené pole rovněž naklánět podélnou osu molekul, čímž zároveň ruší šroubovitě stočení optické osy v jednotlivých vrstvách krystalu. Efekt, popisující změnu chování krystalu po přiložení elektrického pole, se nazývá elektrooptický jev. Projevuje se tak, že po přiložení elektrického pole se změní tenzor permitivity, respektive soustava hlavních indexů lomu.

Optické vlastnosti můžeme měnit např. přiloženým elektrickým polem (elektrooptické PMS), změnou přiloženého magnetického pole (magnetooptické PMS) nebo intenzitou jiné elektromagnetické vlny (optooptické PMS). Např. elektrooptický PMS se stočeným nematickým kapalným krystalem působí na dopadající záření v každém pixelu jako polarizační rotátor. Výsledné stočení roviny polarizace závisí na velikosti přivedeného elektrického napětí, kterým jednotlivé pixely PMS ovládáme. Umístí-li se tyto krystaly mezi zkřížené polarizátory, dostáváme ovladatelnou funkci propustnosti PMS, která závisí na velikosti přivedeného elektrického napětí. [2]

1.2 Šíření světla modulátorem

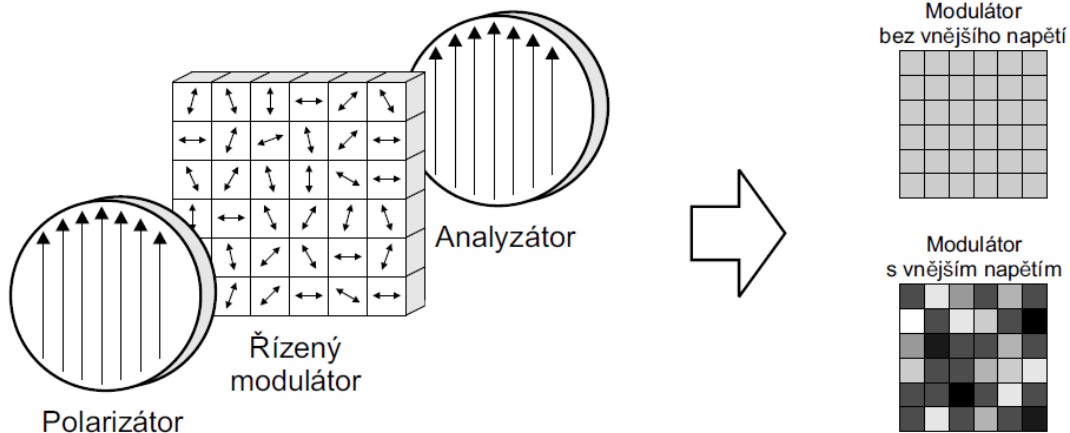
PMS tvoří matice ovladatelných pixelů mikrometrových rozměrů, které lokálně ovlivňují fázi nebo amplitudu dopadající elektromagnetické vlny. Matematicky lze vliv PMS v rovině $z = 0$ popsat funkcí propustnosti $t(x, y)$, která splňuje vztah

$$U_i(x, y, 0) = t(x, y) U_0(x, y, 0), \quad (1.1)$$

kde $U_i(x, y, 0)$ je komplexní amplituda vlny po průchodu PMS a $U_0(x, y, 0)$ je komplexní amplituda dopadající vlny na PMS.

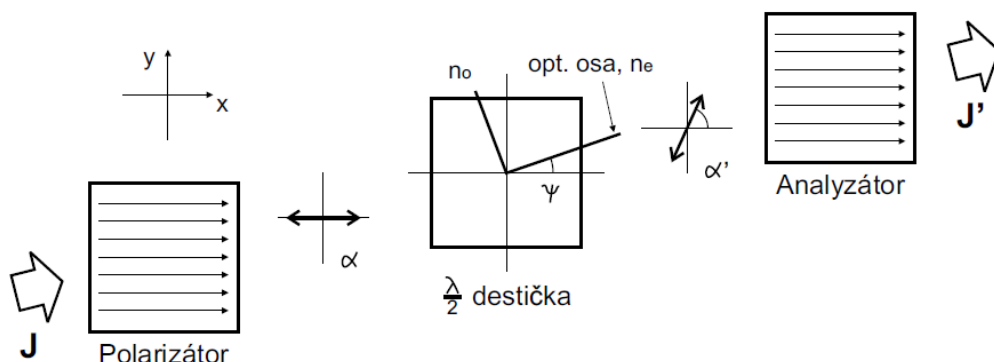
Ze vztahu (1.1) plyne, že $t(x, y)$ je funkce, kterou násobíme počáteční komplexní amplitudu, abychom získali výsledné pole. Funkce propustnosti je obecně komplexní a normovaná funkcí, tedy $|t(x, y)| \leq 1$. PMS mohou pracovat v amplitudovém či fázovém režimu. V amplitudovém režimu dochází k modulaci amplitudové části světla, naopak u fázového režimu je pomocí komplexní části funkce propustnosti modulována fáze procházející vlny. Obecně se jedná o kombinaci obou modulací (amplitudově – fázová modulace). Ve většině případů je snaha maximalizovat absolutní hodnotu funkce propustnosti, aby při vzájemném působení s PMS nedocházelo k úbytku elektromagnetické energie. Proto jsou fázové PMS perspektivnější. Protože každý pixel PMS může nabývat pouze konstantních hodnot, má funkce propustnosti PMS skokový průběh. [3]

1.3 Amplitudová modulace



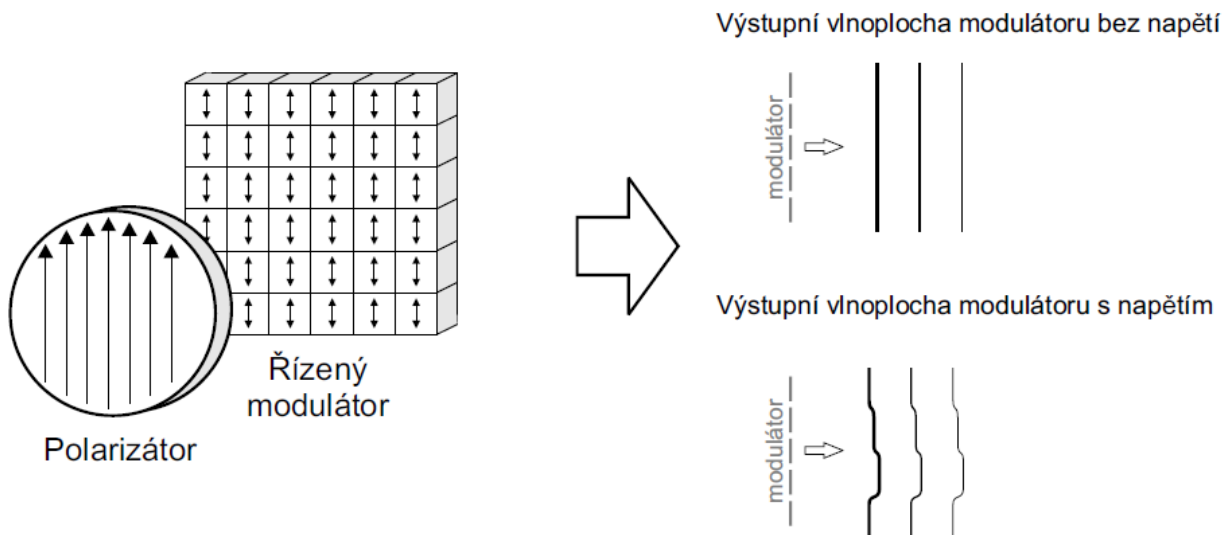
Obrázek 3.: Amplitudový modulátor světla [2].

Na obrázku 3. je znázorněna amplitudová modulace, kde jsou za sebou seřazené prvky: polarizátor, PMS a poté analyzátor. Přivedeným signálem na PMS se změní polarizační stav, který vede k tomu, že intenzita prošlého světla za analyzátozem se změní. Frekvence ani fáze nosné vlny se u této modulace nemění. [1], [4]



Obrázek 4.: Neřízená fázová destička jako modulátor amplitudy [2].

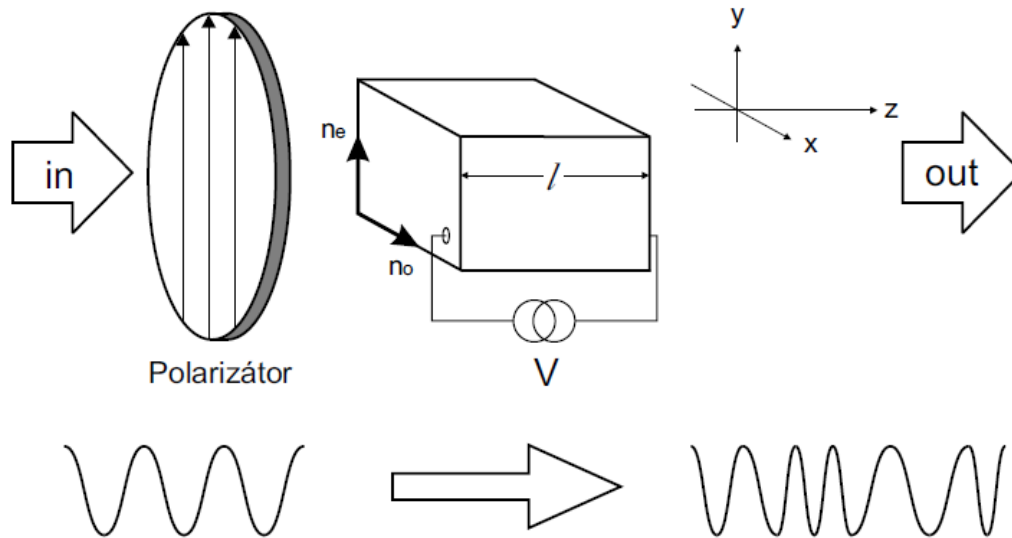
1.4 Fázová modulace



Obrázek 5.: Fázový modulátor světla [2].

Fázový modulátor (obr. 5) pracuje na principu elektrooptického fázového zpoždění řízené fázové destičky, ale konstrukce zařízení je jiná. Vstupní svazek je polarizován paralelně s jednou z hlavních os krystalu. Jelikož vnější pole nestáčí

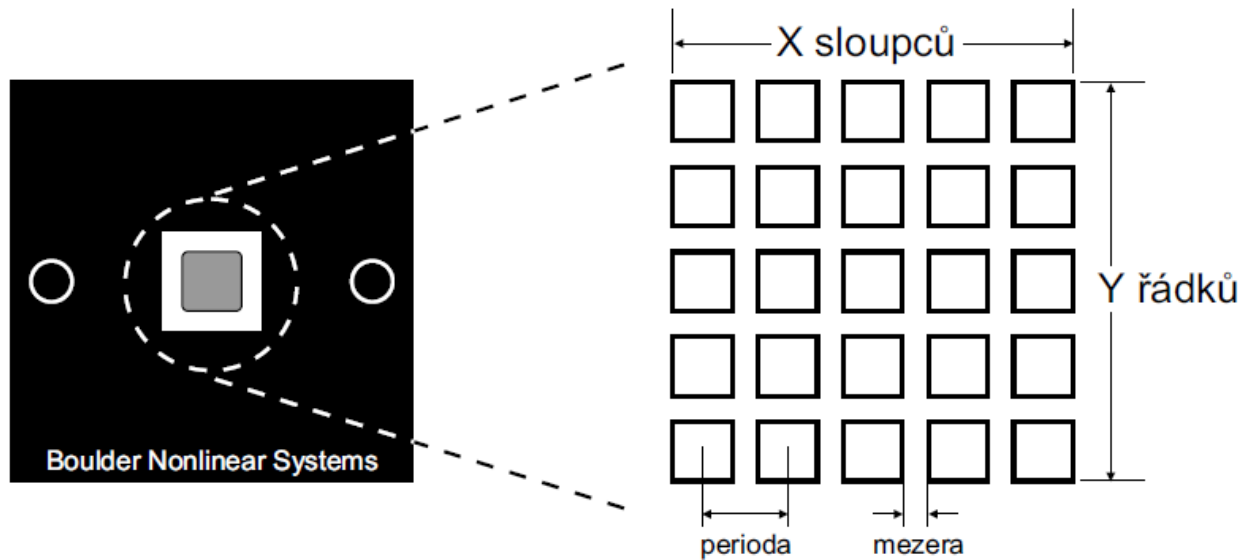
hlavní osy krystalu, je pouze potřeba správně natočit řízenou fázovou destičku. Působení vnějšího pole tedy nemění polarizační stav světla, ale řídí změnu indexu lomu, a tedy i změnu optické dráhy světla v krystalu. [2]



Obrázek 6.: Elektricky řízená modulace fáze [2].

1.5 Difrakce na pevné mřížce modulátoru

Jestliže do dráhy šíření monochromatického světla bude vložena překážka, jejíž rozměry jsou srovnatelné s vlnovou délkou světla, nastává jev, kdy se světlo dostává za hranice geometrického stínu – dochází k difrakci (ohybu) světla. Při práci s PMS ji nelze opomenout, protože PMS je kromě ovladatelných pixelů složen i z nepropustných oblastí, které od sebe jednotlivé pixely oddělují (obr. 7). A právě zde je první důležitý projev difrakce světla – difrakce na pixelech PMS, které tvoří pevnou binární mřížku, zjednodušeně si ji můžeme představit jako difrakci na lineární mřížce. [3]



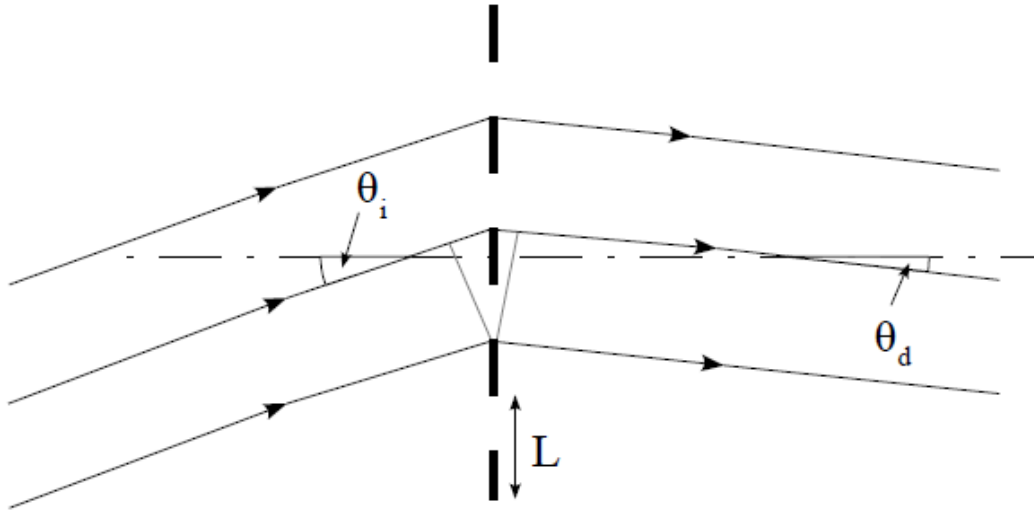
Obrázek 7.: Periodická (difraktivní) struktura pixelů aktivní části prostorového modulátoru světla [2].

Ve vzdáleném poli se bude difraktované světlo na lineární mřížce zesilovat interferencí ve směrech, pro které je splněna podmínka konstruktivní interference. Matematicky můžeme tuto skutečnost zapsat pomocí mřížkové rovnice

$$\sin(\theta_d) - \sin(\theta_i) = \frac{m\lambda}{L}, \quad (1.2)$$

kde L je perioda mřížky, θ_i úhel dopadu, θ_d úhel difraktovaného záření a $m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$

Ze vztahu (1.2) je zřejmé, že pro dopadající záření pod úhlem θ_i je možné několik směrů θ_d pro difraktované záření v závislosti na m . Proto průchodem pevné binární mřížky, která odděluje jednotlivé pixely, se dopadající záření rozdělí do mnoha směrů, tzv. difrakčních řádů. [3]



Obrázek 8.: Difrakce na lineární mřížce [3].

1.6 Využití PMS

PMS nachází řadu aplikací, jako například: strukturované osvětlení, filtrace prostorového spektra, difrakční dělení svazku, tvarování optických pulsů, nahrazení optických komponent a také počítačem generované hologramy. Prostřednictvím prostorového modulátoru světla je možná konstrukce optické pinzety, která umožňuje manipulaci s mikročásticemi. [1]

V této práci je zkoumána možnost využití PMS při opravě deformací vlnoplochy. Ty však nelze přímo detekovat. Jednu z cest, jak získat informaci o fázi světelné vlny a nalézt tvar vlnoplochy, představují interferometrické metody. Také na jejich realizaci se může aktivně podílet PMS.

2 Interference

Interferenci můžeme popsat jako speciální typ superpozice dvou nebo více postupných vln z diskrétně rozložených zdrojů. Výsledkem této superpozice je vlnění s časově stálými maximy a minimy amplitudy vektoru elektrické intenzity. Díky tomu dochází k místnímu zesilování a zeslabování intenzity I elektromagnetického pole – mluvíme o konstruktivní a destruktivní interferenci.

Intenzita světla je úměrná kvadrátu amplitudy vektoru elektrické intenzity. Platí tedy, že rozložení intenzity v interferenčním obrazci je popsáno vztahem

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} * \cos(\Delta\varphi), \quad (1.3)$$

kde intenzita světla bude maximálně zesílena v místech, kde platí

$$\cos(\Delta\varphi) = 1 \Rightarrow \Delta\varphi = 2m\pi ; m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots \quad (1.4)$$

A maximálně zeslabena tam, kde

$$\cos(\Delta\varphi) = -1 \Rightarrow \Delta\varphi = (2m + 1)\pi ; m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots (1.5)$$

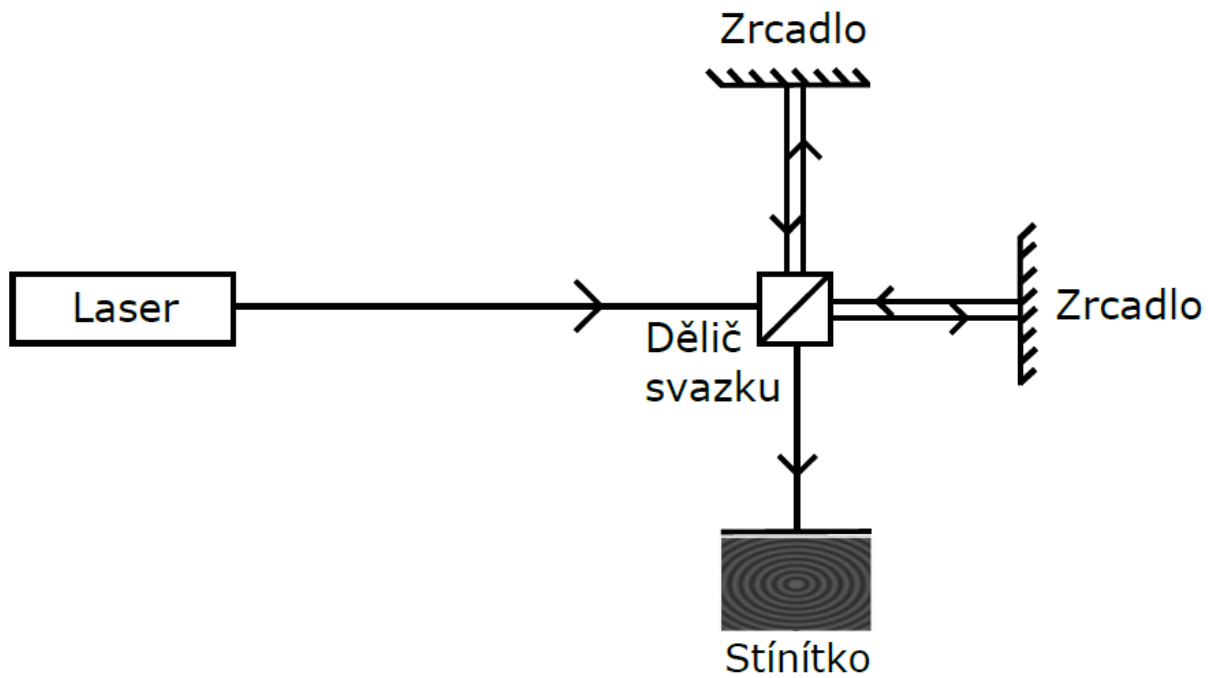
Jednou z podmínek u interference je, že svazky musí být koherentní, což znamená že obě vlny mají stejnou frekvenci. Respektive jejich fázový rozdíl v uvažovaném bodě se s časem nemění. Koherenčnost v experimentu je zajištěna a to pomocí He-Ne laseru. [5]

2.1 Michelsonův interferometr

Při zkoumání vlastností odrazných ploch lze interferenci experimentálně realizovat Michelsonovým interferometrem.

Nezákladnější forma Michelsonova interferometru se skládá z monochromatického světelného zdroje (laseru), děliče svazku, 2 odrazných ploch a stínítka, popřípadě CCD prvku (obr. 10).

Světelný svazek vychází ze zdroje a dopadá na dělič svazku, který svazek rozdělí na dva. Světelné svazky pokračují každý svojí cestou. Od odrazných zrcátek se odráží zpět do děliče a svazky se spojí do jednoho. Opět pokračují stejnou cestou a na stínítku svazek interferuje.



Obrázek 10.: Michelsonův interferometr.

3 Detekce fáze

Jeden interferenční záznam sice poskytne informaci o fázi, ale nestačí k tomu, aby mohla být fáze kvantifikována. Kvantitativní informaci o fázi je možné získat pomocí metody fázových posunutí (PSI – z anglického Phase shifting interferometry).

3.1 Metoda fázových posunutí

Metoda fázových posunutí je jednou z metod pro vyhodnocení interferogramů používané při vyhodnocení měření deformací a tvarů ploch a vlnoplochu. Používá se v plno odvětvích, zejména v optickém průmyslu.

Největší změnou v přístrojovém vybavení za posledních 30 let bylo začlenění počítačů do systému měření. Interferometrie není žádnou výjimkou a nejvýznamnějším projevem této situace byl vývoj interferometrie fázového posuvu PSI. Na rozdíl od jiných technik, PSI představuje metodu sběru dat a analýzy.

PSI elektronicky zaznamenává sérii interferogramů, zatímco je změněna referenční fáze interferogramu. Vlnoplocha je zašifrována v odchylnkách tohoto schématu intenzity zaznamenaných interferogramů a jednoduchý výpočet bod po bodu fázi odkryje. Využití těchto raných prací zahrnovalo optické testování, snímání vlnoplochy v reálném čase pro aktivní optiku, a mikroskopii. [6]

Hlavní rozdíl mezi různými schématy PSI detekce je způsob, jakým se referenční fáze mění, doba a rychlost, při které se měří interferenční obrazec.

Nejlepší řešení pro konkrétní použití závisí na celé řadě faktorů, včetně výpočetní složitosti a rychlosti, citlivosti na chyby fázového posuvu, rychlosti přenosu dat a kompatibilitě s režimem detekce.

Tento algoritmus se čtyřmi kroky vyžaduje, aby se čtyři samostatné interferogramy dotyčné části, která je testovaná, zaznamenaly a digitalizovaly. Mezi po sobě zaznamenané interferogramy se zavádí optický fázový posuv $\frac{\pi}{2}$ do referenčního svazku. Jelikož se jedná o samostatná měření, časová závislost byla změněna jako krok ve fázi v indexu i . Funkce $\delta(t)$ nabývá tyto 4 hodnoty

$$\delta_i = 0, \frac{\pi}{2}, \pi, \frac{3\pi}{2} \quad i = 1, 2, 3, 4. \quad (1.11)$$

Čtyři rovnice znázorňující čtyři měřené diagramy intenzity v interferogramech,

$$I_A(x, y) = I'(x, y) + I''(x, y) \cos[\varphi(x, y)] \quad (1.12)$$

$$I_B(x, y) = I'(x, y) + I''(x, y) \cos[\varphi(x, y) + \frac{\pi}{2}] \quad (1.13)$$

$$I_C(x, y) = I'(x, y) + I''(x, y) \cos[\varphi(x, y) + \pi] \quad (1.14)$$

a

$$I_D(x, y) = I'(x, y) + I''(x, y) \cos[\varphi(x, y) + \frac{3\pi}{2}], \quad (1.15)$$

kde $I'(x, y) = I_1 + I_2$ a $I''(x, y) = 2\sqrt{I_1 I_2}$ z rovnice (1.3). Jednoduchá trigonometrická identita poskytne

$$I_A(x, y) = I'(x, y) + I''(x, y) \cos[\varphi(x, y)] \quad (1.16)$$

$$I_B(x, y) = I'(x, y) - I''(x, y) \sin[\varphi(x, y)] \quad (1.17)$$

$$I_C(x, y) = I'(x, y) - I''(x, y) \cos[\varphi(x, y)] \quad (1.18)$$

a

$$I_D(x, y) = I'(x, y) + I''(x, y) \sin[\varphi(x, y)]. \quad (1.19)$$

Tyto čtyři rovnice o třech neznámých [$I'(x, y)$, $I''(x, y)$ a $\varphi(x, y)$] mohou být nyní vyřešeny pro hodnotu $\varphi(x, y)$ v každém bodě v interferogramu. Odchyłka ve výrazu intenzity $I'(x, y)$ je eliminována odečtením rovnic ve dvojicích

$$I_D - I_B = 2I''(x, y) \sin[\varphi(x, y)] \quad (1.20)$$

a

$$I_A - I_C = 2I''(x, y) \cos[\varphi(x, y)]. \quad (1.21)$$

Uvážením poměru těchto dvou rovnic se eliminuje výraz modulace intenzity $I''(x, y)$ a vznikne výsledek, který obsahuje pouze neznámé fáze $\varphi(x, y)$ a čtyři měřené intenzity

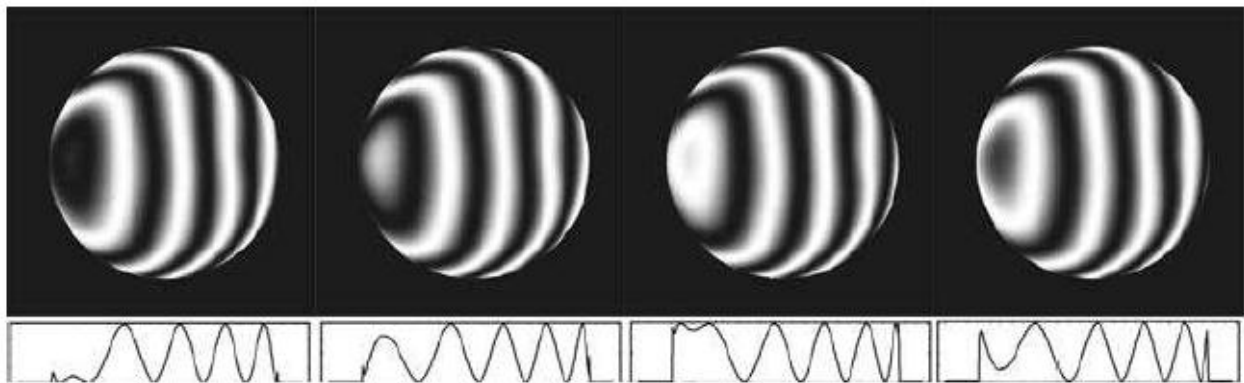
$$\frac{I_D - I_B}{I_A - I_C} = \frac{\sin[\varphi(x, y)]}{\cos[\varphi(x, y)]} = \tan[\varphi(x, y)]. \quad (1.22)$$

Tato rovnice nyní může být upravena, aby vznikl výsledek PSI algoritmu o čtyřech krocích. Výsledný vztah

$$\varphi(x, y) = \tan^{-1} \left[\frac{I_D - I_B}{I_A - I_C} \right]. \quad (1.23)$$

Tato jednoduchá rovnice je vyhodnocena při každém bodu měření pro získání mapy měřené vlnoplochy. K prokázání jednoduchosti tohoto algoritmu a pro umožnění snadnějšího porovnání s jinými algoritmy se předpokládá závislost čtyř měření na (x, y) .

Obrázek 11. ukazuje fotografie čtyř interferogramů, zaznamenaných po fázovém posuvu o $\frac{\pi}{2}$. Zdá se, že interferenční proužky se pohybují napříč rámečkem, ale důležitější je, že se intenzita v jakémkoli bodu liší od fáze. [6]

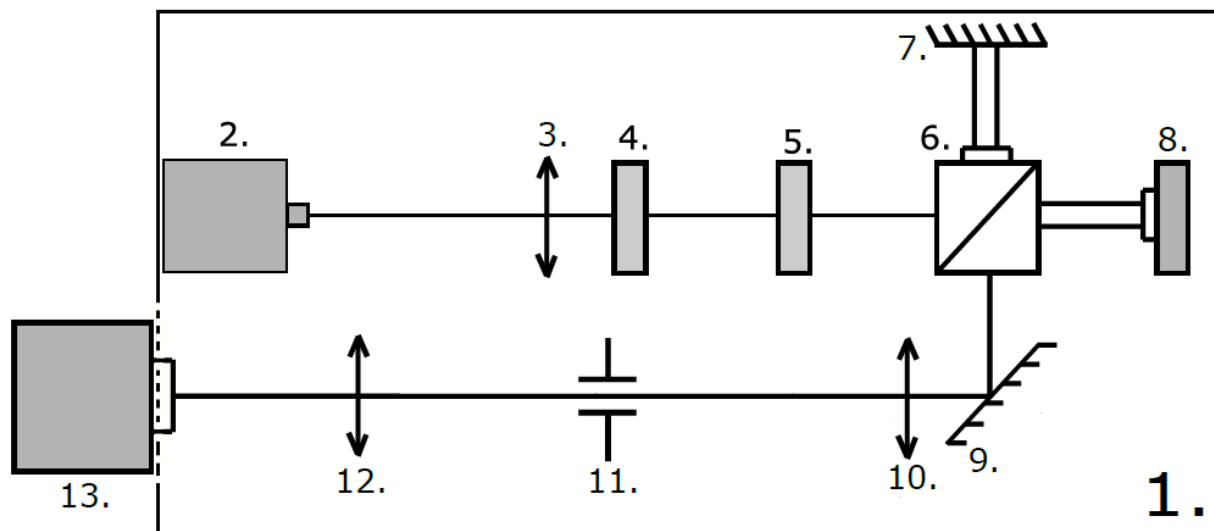


Obrázek 11.: Čtyři interferogramy zaznamenané po fázových posuvech o $\frac{\pi}{2}$ a horizontální průřez jejich středem [6].

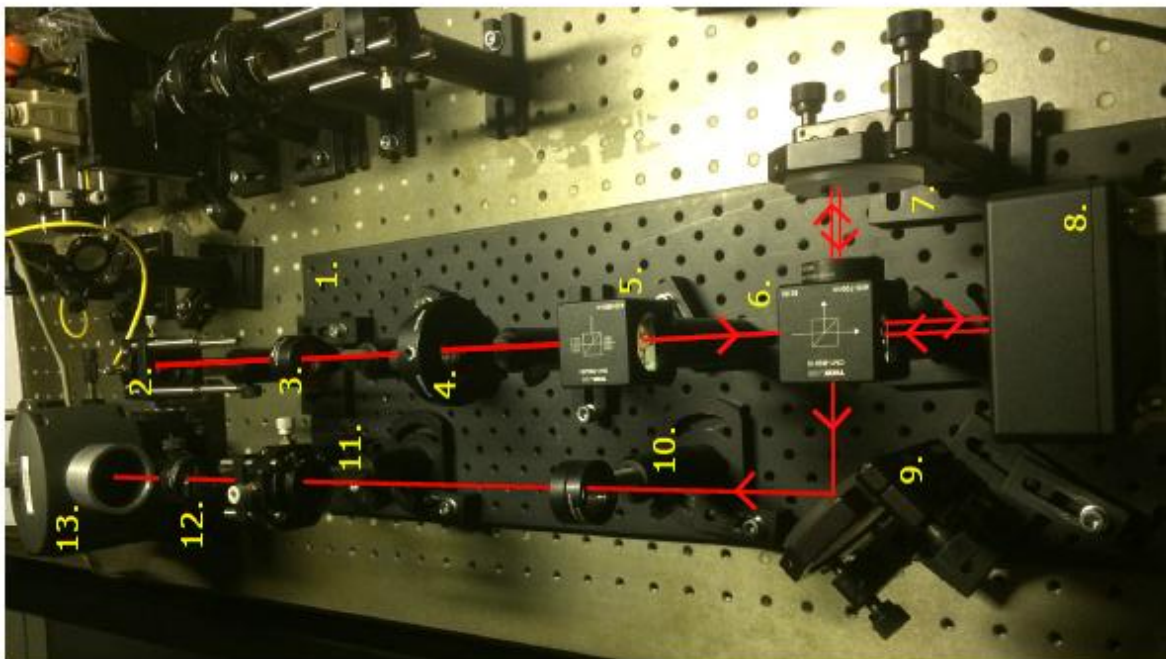
4 Experiment

4.1 Popis experimentu

Experiment (obr. 12) je sestaven na ploše o velikosti 20x60 cm. Světlo He-Ne laseru je navázáno do optickém vlákna. Po vyvázání se šíří přes kolimační čočku o ohniskové vzdálenosti 150 mm. Kolimovaný svazek pokračuje přes půlvlnnou destičku a lineární polarizátor, které zajišťují správnou polarizaci pro práci s PMS (Hamamatsu x10468). Dále se v sestavě nachází dělič 50:50 který svazek rozděluje na dva. Jeden ze svazků se odráží od referenčního zrcátka a druhý se odráží od PMS, kde ztrácí část výkonu kvůli difrakci. Z tohoto důvodu je na děliči 50:50 ze strany zrcátka přidělaný absorpční filtr, který vykompenzuje rozdíl intenzit, aby výsledný interferenční záznam měl co největší kontrast. Druhá část experimentu je složena ze spojné čočky o ohniskové vzdálenosti 200 mm. Spojná čočka slouží k odseparování difrakčních řádů, které vznikly po průchodu přes PMS. Následující clonkou, která je umístěna v ohnisku čočky, se oddělí pracovní řád od ostatních. Předposlední prvek v sestavě je spojná čočka s ohniskovou vzdáleností 100 mm. Soustava těchto 2 spojných čoček zobrazí interferogram na CCD prvek (F-view II). CCD prvek je napojený na počítač na kterém se snímají interferenční záznamy v programu AnalySIS.



Obrázek 12.: 1. Pracovní plocha o velikosti 20 x 60 cm, 2. Zdroj – čelo vlákna s navázaným světlem He-Ne laseru, 3. Spojná čočka s ohniskovou vzdáleností 150 mm, 4. Půlvlnná destička, 5. Lineární polarizátor, 6. Dělič 50:50 s absorpčním filtrem, 7. Referenční zrcátko, 8. PMS Hamamatsu x10468-01 20x20 μm , 9. Zrcátko, 10. Spojná čočka s ohniskovou vzdáleností 200 mm, 11. Clonka, 12. Spojná čočka s ohniskovou vzdáleností 100 mm, 13. CCD prvek.



Obrázek 13.: Experimentální sestava.

4.2 Separace difrakčních řádů PMS

Po průchodu PMS nastává difrakce, proto jsou v sestavě za odrazným zrcátkem, pomocí kterého směřujeme svazek, umístěny 2 spojné čočky a clonka. První spojná čočka umožňuje odseparování difrakčních řádů, následnou clonkou se vymezení pracovní řád a druhou spojnou čočkou se interference zobrazí na CCD prvek. Vzdálenost mezi jednotlivými difrakčními řády je možné vypočítat. PMS Hamamatsu má velikost pixelů $20\ \mu\text{m}$, budou provedeny 4 záznamy, proto je celková perioda $L = 80\ \mu\text{m}$, ohnisková vzdálenost první spojně čočky je $f = 200\ \text{mm}$ a vlnová délka $\lambda = 632,8\ \text{nm}$. Pro výpočet je využita mřížková rovnice (1.2).

V případě kolmého dopadu svazku na PMS lze úpravou mřížkové rovnice vyjádřit difraktovaný úhel jako podíl vlnové délky a periody

$$\sin \theta_d = \frac{\lambda}{L} \quad (1.24)$$

Díky tomuto výpočtu získáme difraktovaný úhel $\theta_d = 0^\circ 27' 9,51''$, který udává odklon prvního difrakčního řádu od nultého.

Separace difrakčních řádů probíhá v ohnisku čočky. To proto, že na čočku dopadá rovnoběžný svazek paprsků, tím pádem se svazky sbíhají v ohnisku čočky, kde se nejlépe difrakční řády odseparují.

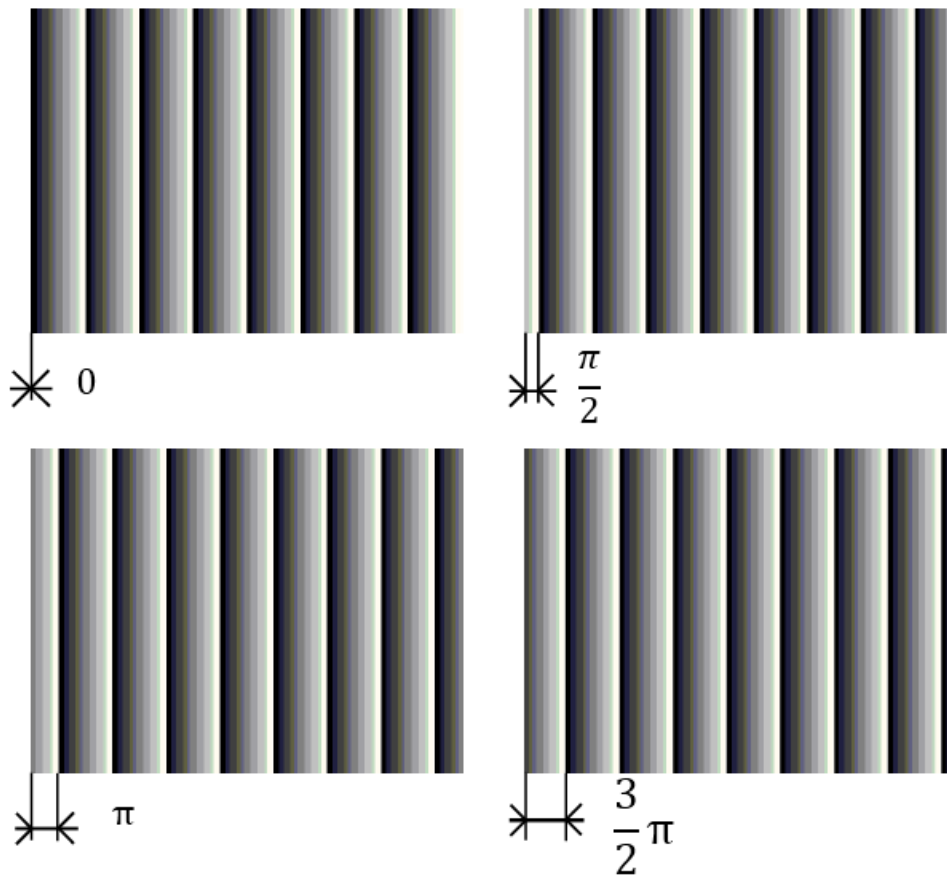
Jelikož je známa ohnisková vzdálenost a difraktovaný úhel, je možné dopočítat vzdálenost mezi jednotlivými řády pomocí goniometrické funkce

$$\operatorname{tg} \theta_d = \frac{x}{f} \quad (1.25)$$

Vzdálenost mezi jednotlivými difrakčními řády je $x = 1,58 \text{ mm}$. Tato hodnota je přijatelná pro práci s tímto experimentem.

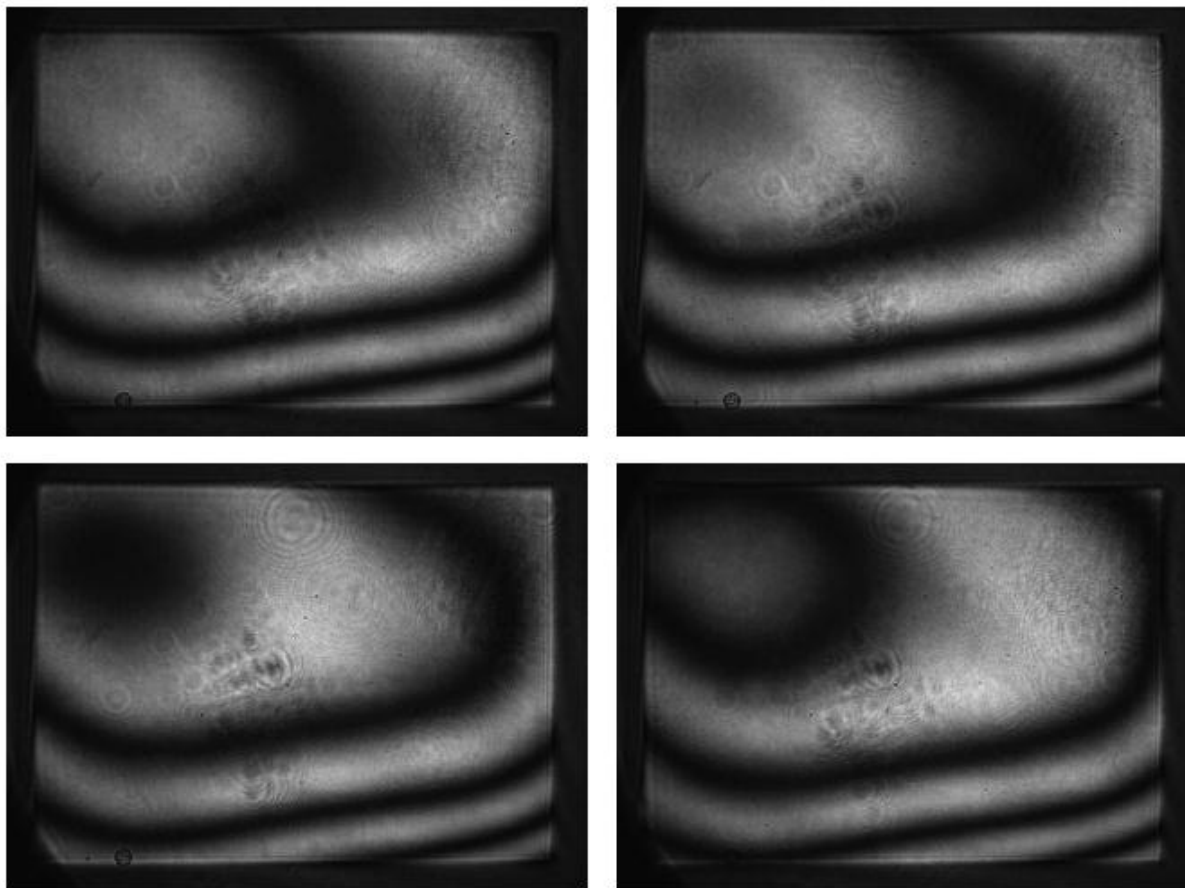
4.3 Řízení experimentu

Řízení experimentu je pomocí počítače, na který je napojený PMS i CCD prvek. Na PMS jsou vysílány vstupní signály, které mají podobu periodických mřížek. Mřížky jsou vytvořené pomocí programu Matlab a liší se fázovým posuvem. V případě tohoto experimentu je metoda fázových posunů založena na čtyřech hodnotách, proto i vstupní signály vysílané pomocí PMS jsou čtyři, a jejich fázové posuvy jsou: $0, \frac{\pi}{2}, \pi, \frac{3\pi}{2}$. Pro představu jsou tyto mřížky znázorněné na obrázku 14.



Obrázek 14.: Periodické mřížky s rozdílným fázovým posuvem. (Z důvodu názornosti principu je perioda na těchto obrázcích zvětšena).

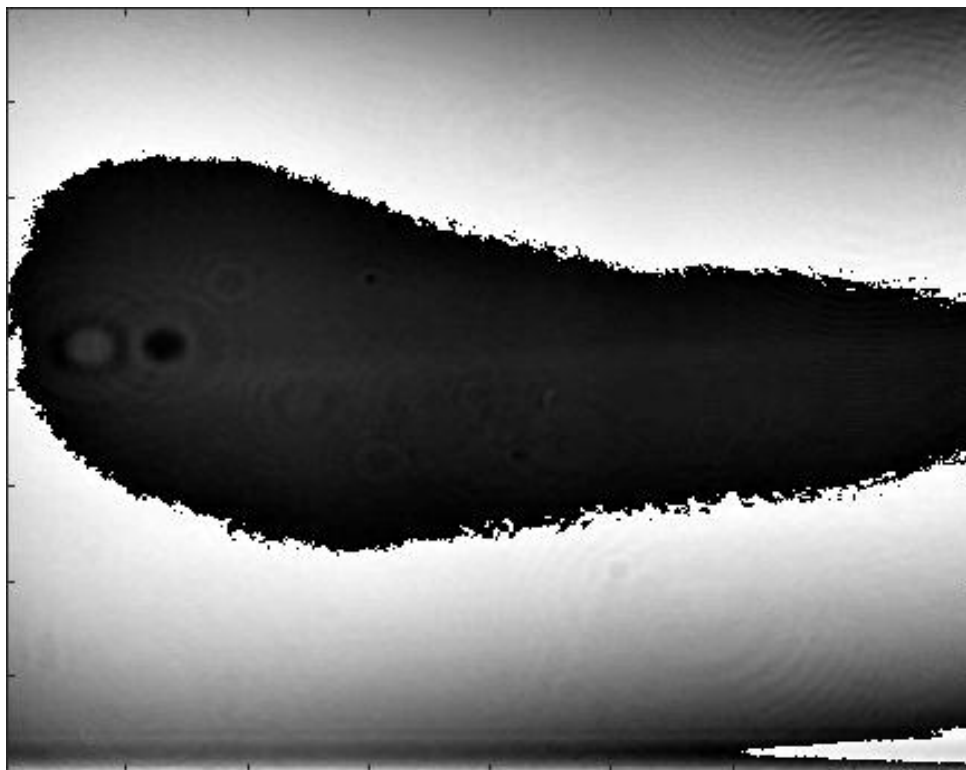
Na základě těchto mřížek budou na výstupu snímány 4 interferogramy. Jak budou vznikat interferogramy, tak se budou lišit fázovým posuvem jedné z referenčních vln, a proto se budou lišit posunem proužků. Interferogramy jsou snímány pomocí CCD prvku a následně ukládány do paměti počítače, kde probíhá jejich zpracování. Názornou sérii interferogramů je možné vidět na obrázku 15.



Obrázek 15.: Série zaznamenaných interferogramů.

4.4 Zpracování dat

Následné zpracování záznamů je v programu Matlab. Získání hledané fáze je na základě naměřené série záznamů a základního vztahu (1.23) pro tuto metodu. Díky tomuto procesu získáme hledanou fázi (obr. 16), která je klíčová pro další kroky.



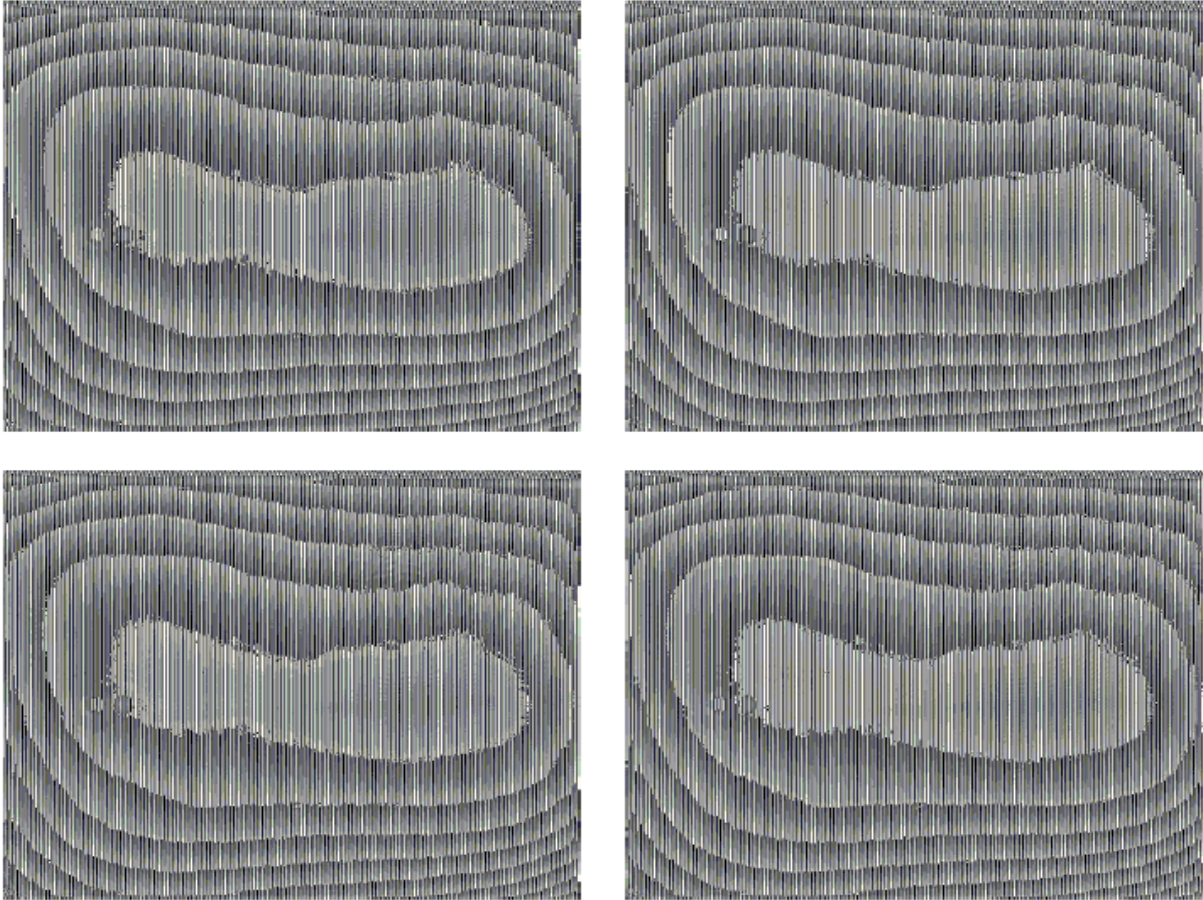
Obrázek 16.: Nalezená fáze.

Dále je třeba počítat s tím že aktivní plocha PMS je rozměrově o něco větší než aktivní plocha na CCD prvku. PMS má velikost 800 x 600 pixelů kde pixel má rozměr 20x20 μm , CCD prvek má velikost 1376 x 1032 pixelů, kde je pixel velký 6,45x6,45 μm . Tento problém je třeba vyřešit převzorkováním neboli interpolací. Pomocí programu Matlab byl také numericky odseparován náklon referenční vlny.

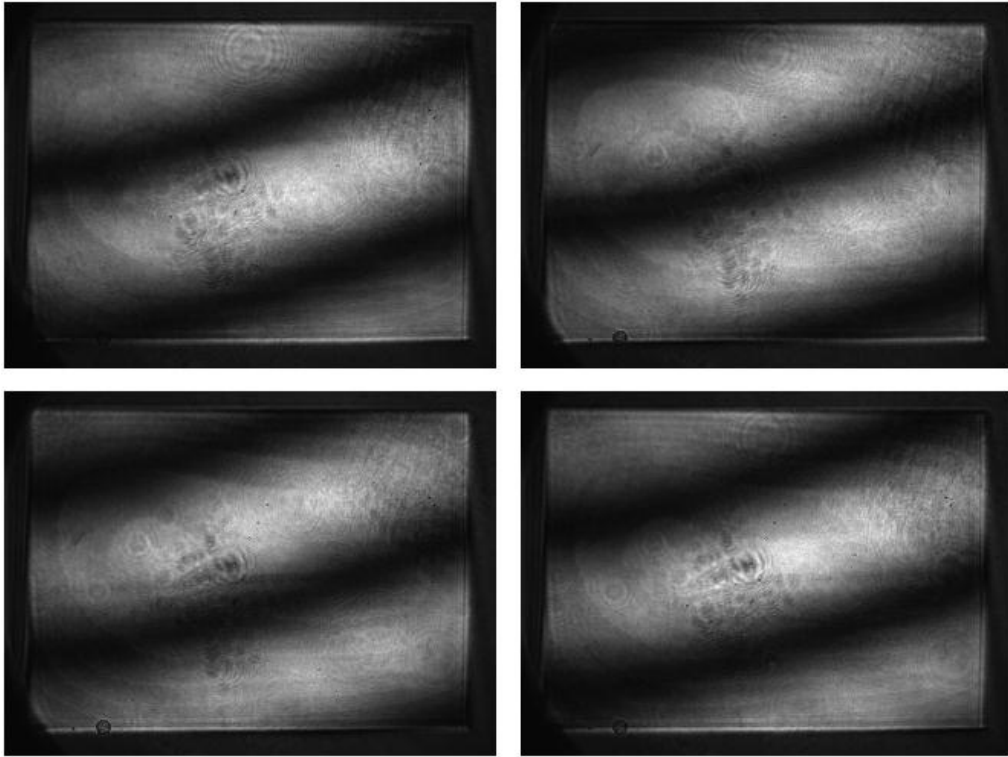
Vzhledem k tomu, že aktivní plochy PMS a CCD prvku nejsou stejně velké, je třeba zajistit, aby svazek dopadal na celé aktivní plochy, což je v experimentu zajištěno soustavou 2 spojných čoček o ohniskové vzdálenosti 200 a 100 mm. Kdy vznikne takový obraz, který je vhodný pro měření.

4.5 Oprava deformace

Se znalostí nalezené fáze představující deformace vlnoplochy lze vytvořit nové vstupní signály (obr. 17), které tvoří původní periodické mřížky modulované kompenzační fází. Na obrázku 17. je znázorněna reálná velikost série mřížek posílaných na PMS. Jde o ty stejné mřížky, které jsou na obrázku 14., jen v reálné velikosti a doplněné o nalezenou fázi. Díky těmto mřížkám je na výstupu korigovaný interferogram. Série korigovaných interferogramů je znázorněna na obrázku 18.



Obrázek 17.: Série mřížek s nalezenou fází.



Obrázek 18.: Série korigovaných interferogramů.

4.6 Vyhodnocení experimentu

Zpracováním interferenčních záznamů metodou PSI je získána fáze, jejíž hodnoty leží v intervalu od 0 do 2π . K nalezení kompletního tvaru vlnoplochy je nutné použít numerickou funkci pro navázání fáze (anglicky unwrapping). Pro kvantitativní vyhodnocení získaných výsledků je použit výpočet střední kvadratické odchylky (RMS z anglického root mean square), která vyjadřuje velikost nalezených deformací vztaženou k referenční rovinné vlnoploše.

$$V = \sqrt{\frac{\sum(D - \bar{D})^2}{P}}, \quad (1.26)$$

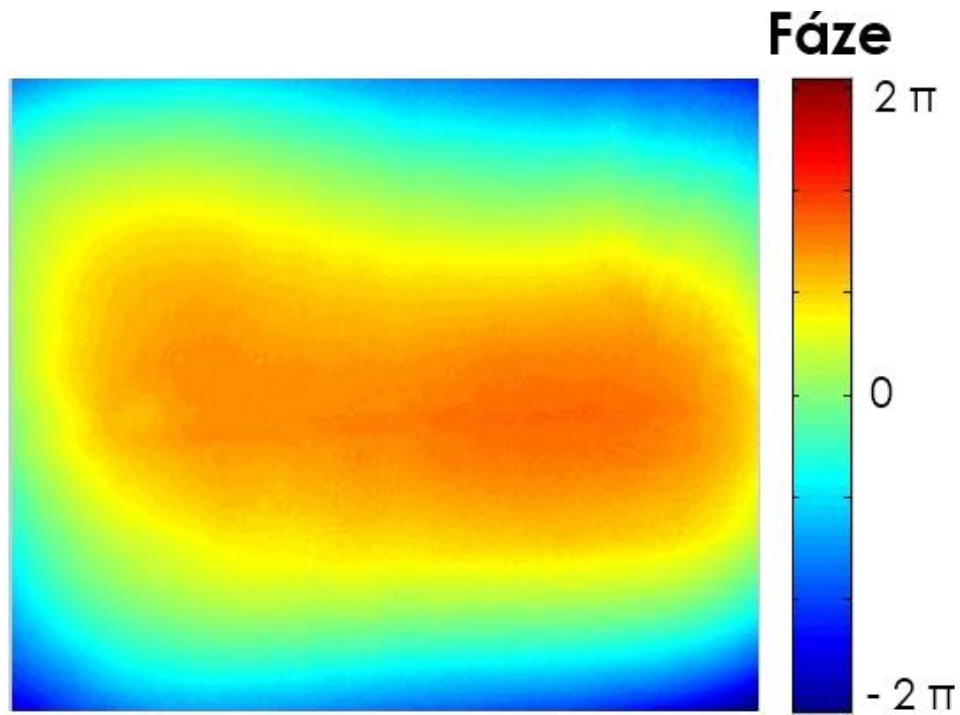
kde \bar{D} je průměrná hodnota a P je počet pixelů.

RMS pro deformovanou vlnoplochu, která je na obrázku 19., vyšlo $V_D = \mathbf{0.33}$.

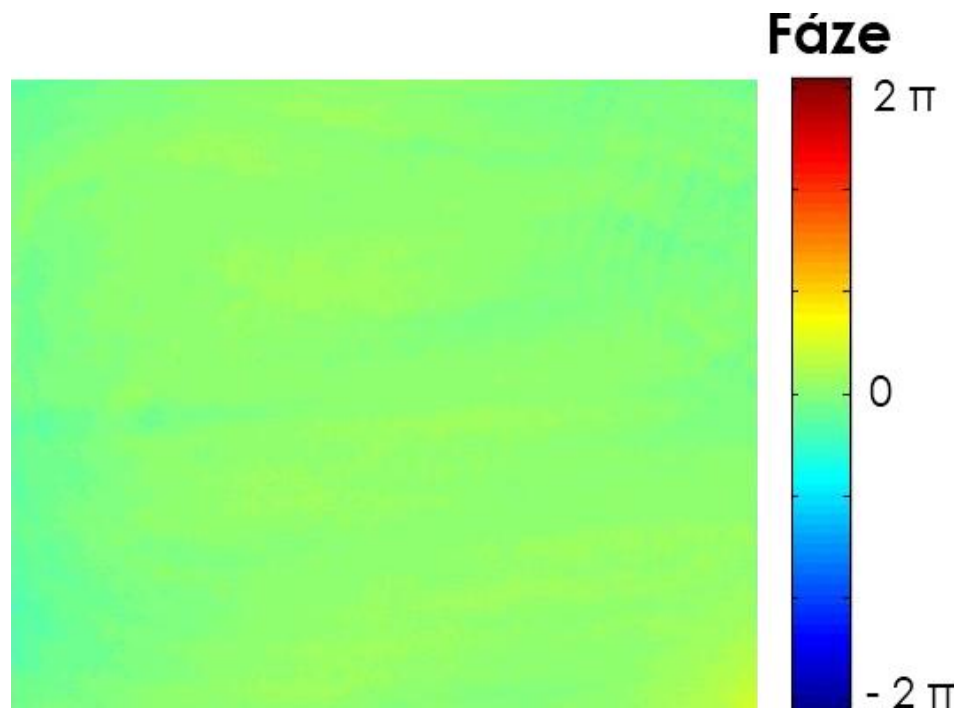
Na obrázku 20. je vlnoplocha korigovaná, pro kterou RMS vyšlo $V_K = \mathbf{0.02}$.

Z výsledků měření je zřejmé že korekce vlnoplochy pomocí PMS a metody fázového posunutí je účinná. Lze to usoudit z porovnání obrázků 19. a 20., kde je

možné vidět zúžení barevného rozsahu, které definuje rozpětí od -2π až do 2π .
Nebo také z číselné hodnoty RMS.



Obrázek 19: Původní deformovaná vlnoplocha.

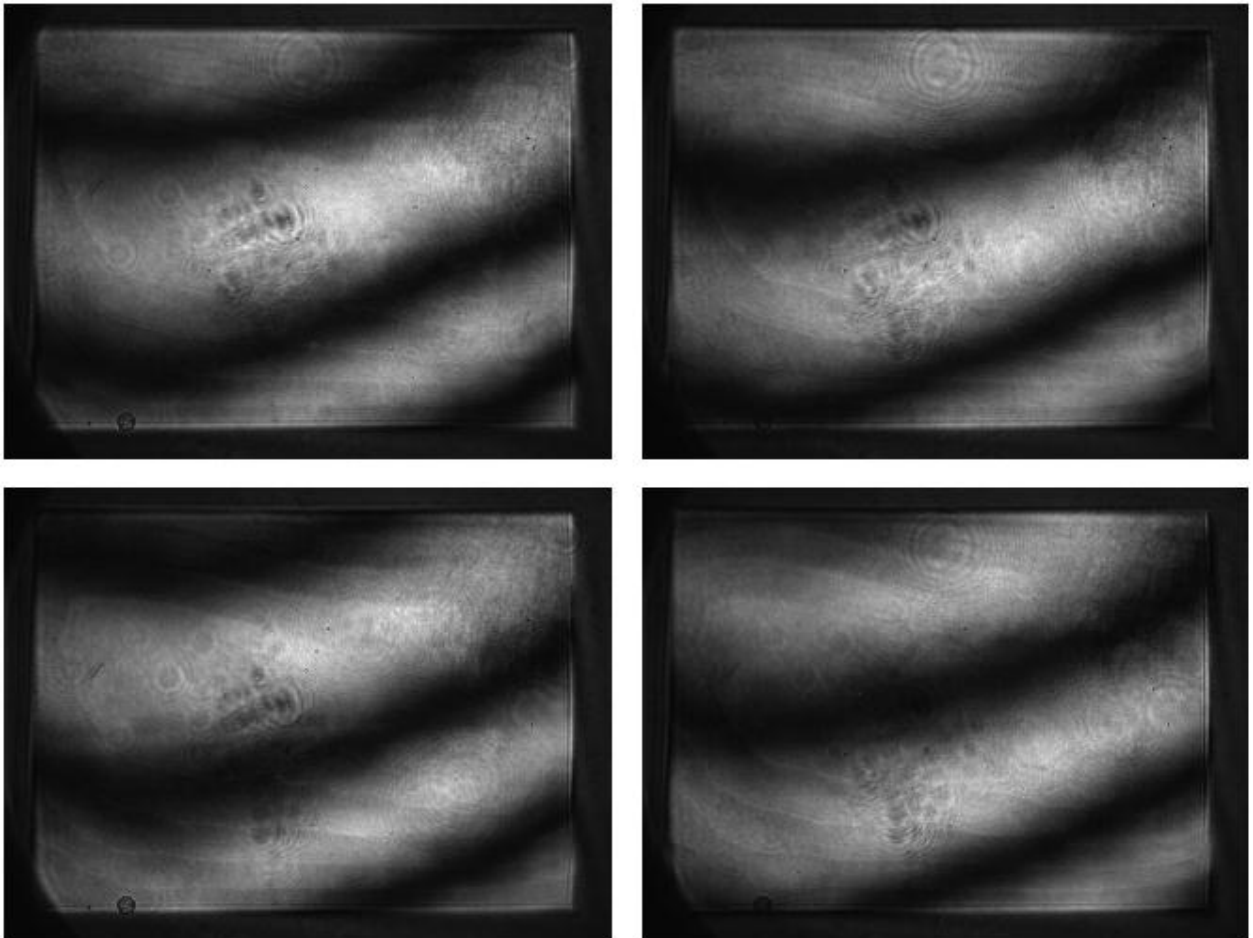


Obrázek 20.: Zkorigovaná vlnoplocha.

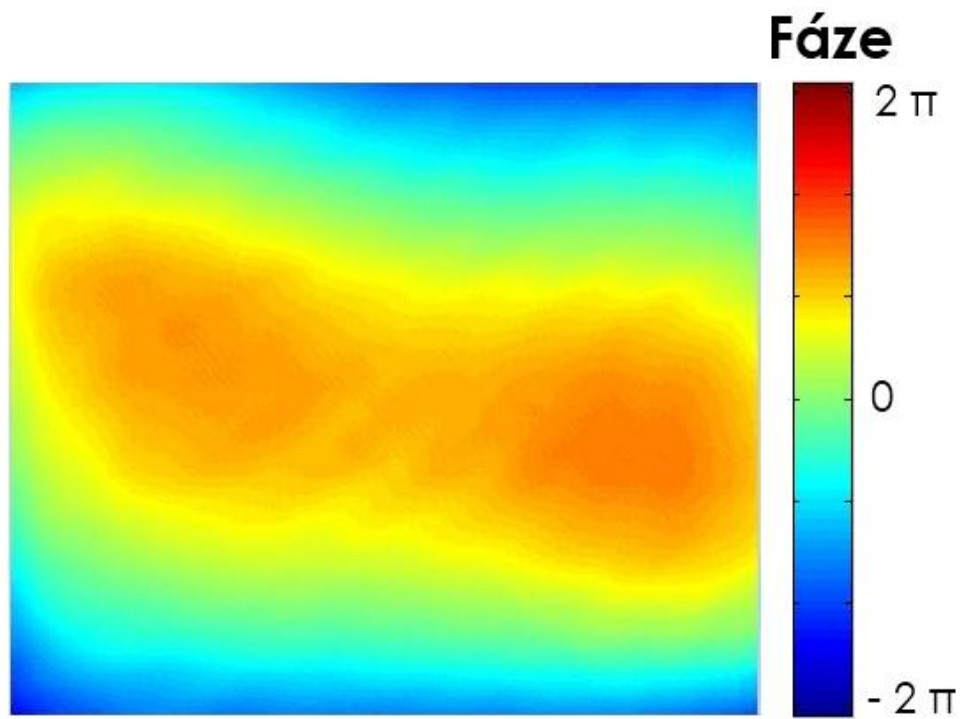
5 Diskuze

Měřené deformace vlnoplochy jsou z velké části způsobeny prohnutím aktivní plochy PMS. Tohoto technického nedostatku si jsou výrobci PMS vědomi, a proto je ke každému přístroji automaticky dodávána korekční mapa obsahující kompenzační fázi.

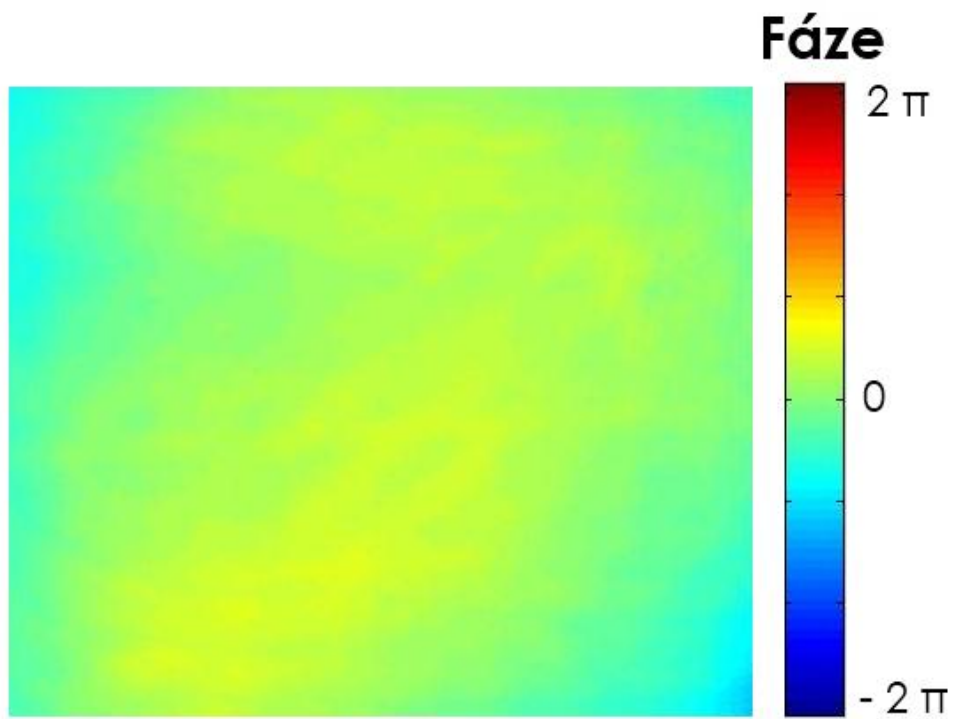
Výsledky z vlastního experimentu vychází lépe než výsledky s použitím korekční mapy od dodavatele. A to proto, že korekce od dodavatele je změřená na sestavě, která nemusí být stejná jako ostatní experimenty. RMS pro korekci výrobcem vychází **0,11**. Proto je výhodnější si tvar vlnoplochy u každého experimentu zjistit než používat korigované mapy od dodavatelů, už jen proto že přinese lepší výsledky.



Obrázek 21.: Série interferogramů s korekcí od dodavatele.



Obrázek 22.: Deformace vlnoplochy od dodavatele.



Obrázek 23.: Korekce vlnoplochy od dodavatele.

6 Závěr

Hlavní náplní práce byla stavba experimentu, jehož důležitou součástí byl PMS Hamamatsu x10468. Díky PMS byla úspěšně realizovaná interferometrická metoda fázových posunutí, pomocí které byly kvantitativně vyhodnoceny deformace vlnoplochy způsobené prohnutím aktivního displeje PMS. PMS se dále posílel na adaptivní korekci nalezených fázových odchylek.

Dosažené výsledky ukazují, že provedením vlastní kompenzace lze docílit několikanásobné kvalitnější opravy deformací než při použití korekční mapy dodavatele výrobcem. Tento poznatek může být využitý během budoucích experimentů v laboratoři digitální optiky na Katedře optiky.

Použitá literatura

- [1] L. Fialová, Experimentální ověření optických vlastností prostorových modulátorů světla, Bakalářská práce UP Olomouc (2011)
- [2] Z. Doležel, Teoretické a experimentální posouzení energetické účinnosti prostorových modulátorů světla, Diplomová práce UP Olomouc (2007)
- [3] F. Chlup, Metody pro ovládání amplitudových a fázových modulátorů světla, Diplomová práce UP Olomouc (2007)
- [4] J. Běhal, Charakteristika činnosti prostorového modulátoru světla, Diplomová práce UP Olomouc (2015)
- [5] I. Vyšín, J. Říha; Paprsková a vlnová optika, studijní materiály UP Olomouc (2012)
- [6] D. Malacara, Optical shop testing, Wiley (2007)