PŘÍRODOVĚDECKÁ FAKULTA UNIVERZITY PALACKÉHO V OLOMOUCI



Katedra experimentální fyziky

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Interferometrie v bílém světle s vysokým stupněm podvzorkování

Autor:	Erik Mikeska
Vedoucí práce:	RNDr. Pavel Pavlíček, Ph.D.
Studijní obor:	Nanotechnologie
Forma studia:	Prezenční
Rok:	2016

Bibliografická identifikace

Jméno a příjmení autora:	Erik Mikeska
Název práce:	Interferometrie v bílém světle s vysokým stupněm podvzorkování
Typ práce:	Bakalářská
Pracoviště:	Katedra experimentální fyziky
Vedoucí práce:	RNDr. Pavel Pavlíček, Ph.D.
Rok obhajoby práce:	2016
Počet stran:	30
Počet příloh:	0
Jazyk:	český

Abstrakt

Bakalářská práce představuje interferometrii v bílém světle jako měřicí metodu, která může být použita k měření výškového profilu předmětů. Zabývá se metodou podvzorkování, konkrétně vzorkováním s velkým vzorkovacím krokem porušující vzorkovací teorém. To umožňuje snížení množství dat a urychlení vyhodnocení. Na závěr je diskutována použitelnost této metody.

Klíčová slova

interferometrie v bílém světle, korelogram, podvzorkování, měření geometrického tvaru předmětu, Hilbertova transformace, korelace

Bibliographical identification

Author:	Erik Mikeska
Title:	White light interferometry with high undersampling degree
Type of thesis:	bachelor
Department:	Department of Experimental physics
Supervisor:	RNDr. Pavel Pavlíček, Ph.D.
Year of presentation:	2016
Number of pages:	30
Number of appendices:	0
Language:	czech

Abstract

Bachelor work introduces white–line interferometry as measuring method, that can be used for measurement of the vertical profile of objects. It deals with undersampling method, especially with sampling with high sampling step violating sampling theorem. That allows reducing amount of data and faster evaluation. In conclusion it is discussed applicability of this method.

Key words

white-line interferometry, correlogram, undersampling, measurement of the geometric shape of objects, Hilbert transform, cross-correlation

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že svou diplomovou práci jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu použitých zdrojů.

V Olomouci dne

.....

Poděkování

Na tomto místě bych chtěl poděkovat svému vedoucímu RNDr. Pavlu Pavlíčkovi, PhD. za trpělivou pomoc a odborné rady při psaní této bakalářské práce.

Obsah

Úvo	d	(str. 1)
Teor	retická část práce	
1	Seznámení s interferometrií	(str. 2)
2	Princip	(str. 3)
3	Odvození souvislosti mezi šířkou interferogramu, koherenční délkou a šířkou spektra	(str. 5)
4	Měření geometrického tvaru předmětu	(str. 7)
5	Korelogram	(str. 10)
6	Podvzorkování a expoziční doba	(str. 12)
7	Hilbertova transformace – výpočet obálky	(str. 16)
8	Výpočet polohy obálky podvzorkovaného korelogramu	(str. 16)
9	Nejistota měření	(str. 18)
Expe	erimentální část práce	
1	Seznámení s měřící metodou a praktickými problémy	(str. 19)
2	Měření geometrického tvaru předmětu	(str. 23)
Závě	ér	(str. 28)
Sezn	nam použitých zdrojů	(str. 29)
Sezn	nam použitých symbolů a zkratek	(str. 30)

Úvod

Interferometrie v bílém světle je známá měřicí metoda sloužící zejména k proměřování výškových profilů technických předmětů. Patří mezi jednu z mála metod měření povrchů, které dosahují nejistoty okolo 1 µm. Tím je zajímavá pro mnoho vědců a techniků, kteří se snaží přijít na to, jak tuto metodu vylepšit. Jako zdroj světla se v interferometrii využívají širokospektrální zdroje – především různé druhy LED.

Tato práce představí interferometrii v bílém světle, vysvětlí princip této měřicí metody a některé pojmy související s touto metodou. Rovněž ukáže, jak lze pomocí interferometrie měřit geometrický tvar předmětu. Představí metodu podvzorkování sloužící ke zvýšení informační účinnosti této metody. Bude ukázáno, jakým způsobem se vyhodnocují získaná data. Na závěr teoretické části bude diskutována nejistota této měřicí metody.

Experimentální část na úvod vysvětlí jak správně provést adjustaci interferometru a seznámí čtenáře s problémy, se kterými se lze setkat při interferometrickém měření. Představí jednoduchou metodu orientačního určení vlnové délky zdroje a ukáže některé vybrané příklady při interferometrickém měření. Bude testováno měření výškového profilu technického předmětu s vysokým stupněm podvzorkování, ze kterého se vyvodí závěr o použitelnosti tohoto způsobu měření.

Teoretická část práce

1 Seznámení s interferometrií

Interferometrie v bílém světle využívá známého fyzikálního jevu interference, neboli též skládání vlnění. Podstata tohoto fyzikálního jevu spočívá v tom, že vlnění přicházející do daného bodu prostoru z různých zdrojů, případně ze stejného zdroje, ale po různých drahách, se v tomto bodě navzájem skládají. Světlo, využívané v interferometrii jako zdroj vlnění, je vlnění elektromagnetické. U elektromagnetického vlnění se sčítají okamžité hodnoty elektrické složky a magnetické složky elektromagnetických vln. Experimenty využívající interference byly v minulosti významným důkazem, že světlo je vlnění. Některé projevy interference můžeme pozorovat v každodenním životě jako např. duhové zabarvení mýdlových bublin, tenkých vrstev oleje na vodě, CD a DVD disků a tenkých vzduchových vrstev (praskliny v ledu, Newtonova skla). Interference světla není využívána jen v interferometrii, ale i v jiných technických a fyzikálních oblastech např. v holografii, v optice tenkých vrstev, při měření využívající koherenční zrnitosti atd. Projevem interference světla je jeho zesilování a zeslabování v různých bodech prostoru, čili větší nebo menší osvětlení v místech, kam světlo dopadá. Pokud použijeme některý z běžných zdrojů světla (slunce, žárovku, plamen, elektrický výboj), zjistíme, že interferenci pozorovat nebudeme. Pozorovatelná interference totiž nastává, pokud je splněn základní předpoklad, a to koherence světelného vlnění. Jako koherentní označujeme světelná vlnění se stejnou frekvencí, jejichž vzájemný fázový rozdíl v uvažovaném bodě prostoru se časem nemění. Pro dosažení koherence potřebné pro pozorování interferenčních jevů lze použít dělič svazku (např. polopropustné zrcadlo), který světlo z jediného zdroje rozdělí na dva svazky paprsků. Tyto dva svazky se po proběhnutí různé dráhy setkají s určitým dráhovým rozdílem. K interferenci dojde jen v případě, že dráhový rozdíl je menší než koherenční délka světla. [8] Koherenční délka udává maximální dráhový rozdíl, při kterém je ještě světlo daného zdroje schopno interference [9]. Existují dva typy koherence – prostorová a časová. Časová koherence souvisí s vlnami vycházejícími z jednoho určitého místa na povrchu zdroje, které liší časovým posunem. Prostorová koherence naopak souvisí s vlnami vycházejícími ze dvou různých míst na povrchu zdroje bez časového posunu. Prostorová koherence je důležitá pro interferenci. Pokud je světlo prostorově koherentní, interference je pozorovatelná bez ohledu na jeho spektrální šířku [3].

Zařízení rozdělující světelný svazek jediného zdroje na dva svazky, které se po proběhnutí různé dráhy znovu setkají, se nazývá interferometr [8]. Metoda měření využívající interferometru se nazývá interferometrie. Interferometrie je více než sto let stará měřící metoda, byla použita již v roce 1892 A. A. Michealsonem při měření délky standardního metru v Mezinárodním úřadu pro míry a váhy v Sevres u Paříže [1]. Zatímco klasická interferometrie využívá monochromatických zdrojů světla (především laserů s různými vlnovými délkami), interferometrie v bílém světle využívá světelných zdrojů s velkou šířkou spektra (především LED, infračervených svíticích diod, superluminiscenčních diod, žárovek apod.). Přívlastek bílé tedy nesouvisí s barevným

vjemem, ale s šířkou spektra použitého světelného zdroje. Šířka spektra použitého zdroje se u interferometrie v bílém světle pohybuje od desítek po stovky nanometrů. Interferometrie v bílém světle má řadu výhod, které jsou pro praktické využití velmi významné. Na rozdíl od klasické interferometrie ji lze použít nejen pro měření opticky hladkých povrchů, ale i pro měření povrchů opticky drsných. Toho lze v technické praxi využít k proměřování výškových profilů technických povrchů. Navíc při jednom měření je možné proměřit výškový profil na celém povrchu předmětu, skenování v příčném směru není nutné. Druhou důležitou výhodou je malá nejistota měření pohybující se okolo 1 µm. Nejistota měření závisí pouze na vlastnostech měřeného povrchu. Koaxiální osvětlení a pozorování umožňuje provádět měření také v hlubokých dírách a zářezech, protože nedochází ke vzniku stínů. [1] Třetí důležitou výhodou je rychlost měření. Interferometrie v bílém světle pracuje s "rozumným" množstvím dat, proto jedno měření trvá většinou jen několik desítek vteřin. To je opět důležité pro průmyslové aplikace, kde čas měření hraje významnou roli. Použití mechanických 3D senzorů v tomto případě není vhodné, protože skenování celého povrchu trvá příliš dlouho. Další výhodou je velký měřící rozsah dosahující několik desítek milimetrů (může být podle potřeby dále navýšen) a poměrně malá finanční náročnost (dražší součástky měřící soustavy jsou pouze kamera a motorizovaný posuv) [1]. Nevýhodou je pouze citlivost měření na vibrace, které lze částečně odstranit použitím antivibračního stolu. Použitím antivibračního stolu však narostou náklady na pořízení měřící soustavy. Interferometrie je tedy jednou z mála přesných, rychlých, finančně nenáročných metod s velkým měřícím rozsahem, proto je často používána v průmyslové výrobě ke kontrole kvality výrobků.

2 Princip

Hlavní součástí měřící soustavy je některý z běžně dostupných dvoupaprskových interferometrů. Často se používá Michelsonův interferometr, jehož hlavní výhodou je jednoduchost. Schéma Michealsonova interferometru je na Obr. 1.

referenční zrcadlo



Obr. 1: Schéma Michelsonova interferometru

Pro potřeby interferometrie v bílém světle se většinou jako zdroje používají svítící diody (LED), superluminiscenční diody (SLD), výbojky a žárovky. Je třeba říci, že ne vždy pracujeme se zdroji svítícími ve viditelném spektru, používají se i diody svítící v infračervené oblasti. Světelný zdroj o velké šířce spektra vytváří rozbíhavý světelný svazek, který je kolimován pomocí spojné čočky. Vzniklý rovnoběžný svazek je v děliči rozdělen na dva svazky. Jako dělič svazku může sloužit např. dělící kostka. Každý ze svazků postupuje jedním ramenem interferometru k zrcadlu. Jedno ze zrcadel, které se nazývá referenční, je nepohyblivé. Druhé zrcadlo, nazývané předmětové, je pohyblivé, zpravidla bývá připevněno k počítačem řízenému motorizovanému posuvu. Odražené svazky z obou ramen interferometru se skládají a složený svazek dopadá na stínítko. Stínítkem dnes bývá obvykle snímač kamery. Pokud se předmětové zrcadlo pohybuje rovnoběžně s předmětovým svazkem, mění se intenzita světla na stínítku. Závislost intenzity světla na poloze předmětového zrcadla se nazývá korelogram. Příklad korelogramu bílého světla je znázorněn na Obr. 2.



Obr. 2: Korelogram namodelovaný v programu Matematica

Z Obr. 2 je zřejmé, že modulace intenzity je nejvýraznější pro jistou polohu předmětového zrcadla (na Obr. 2 je to posunutí v bodě 0). Tato výrazná modulace intenzity (ve střední části) vzniká jako důsledek koherentní superpozice vln. Naopak nevýrazná modulace intenzity vzniká v důsledku nekoherentní superpozice vln na krajích korelogramu. Poloha, kde je modulace intenzity maximální, definuje takzvanou referenční rovinu. Referenční rovina dává informaci o optických drahách v ramenech interferometru. Pokud leží předmětové zrcadlo v referenční rovině, optické dráhy v obou ramenech interferometru jsou stejně dlouhé. Šířka korelogramu je dána rozsahem poloh předmětového zrcadla, při kterých je modulace intenzity pozorovatelná. Šířka korelogramu závisí přímo úměrně na koherenční délce a nepřímo úměrně na šířce spektra světelného zdroje. Při koherenci v bílém světle se hledá pouze maximum modulace intenzity, s fází se nepracuje (na rozdíl od klasické interferometrie). Nalezením maxima modulace intenzity dostáváme informaci, že obě ramena interferometru jsou stejně dlouhá. Důležité je toto maximum správně vyhodnotit, k tomu potřebujeme, aby šířka korelogramu byla v rozsahu zhruba od 5 do 100 period modulace intenzity. Proto se v intereferometrii v bílém světle používají zdroje světla s velkou šířkou spektra a tím krátkou koherenční délkou. Krátká koherenční délka je typická především pro svítící diody (zhruba 10 µm) a termické zdroje světla (žárovka okolo 3 µm). Naopak lasery mají velkou koherenční délku (v řádech centimetrů až kilometrů). [1]

3 Odvození souvislosti mezi šířkou korelogramu, koherenční délkou a šířkou spektra

Souvislost mezi šířkou korelogramu, koherenční délkou a šířkou spektra lze ukázat na zdroji s gaussovským tvarem spektra. Svitící diody mají spektrum blízké Gaussovskému

spektru [12].

Normovaná spektrální hustota S(k) má v takovém případě tvar

$$S(k) = \frac{1}{2\sqrt{\pi}\Delta k} \exp\left[-\frac{(k-k_0)^2}{(2\Delta k)^2}\right],$$
(1)

kde *k* je vlnové číslo ($k = \frac{2\pi}{\lambda}$, kde λ je vlnová délka), k_0 je střední vlnové číslo a Δk je efektivní šířka spektra (angl. effective spektral width, [6]).

Intenzitu na výstupu interferometru s monochromatickým zdrojem lze popsat výrazem

$$I = I_0 (1 + \cos 2kz), \tag{2}$$

kde I_0 je střední intenzita korelogramu (intenzita pro velký dráhový rozdíl) a z je posunutí zrcadla. Nulové posunutí z se obvykle uvažuje v bodě, kdy povrch předmětu prochází referenční rovinou.

V případě polychromatického zdroje

$$I = \int S(k) I_0(1 + \cos 2kz) \, dk.$$
 (3)

Vztah mezi koherenční délkou l_c a efektivní šířkou spektra Δk popisuje vztah [6]

$$l_c = \frac{1}{2\Delta k}.$$
(4)

Dosazením (1) do (3) a převedením kosinu do komplexního tvaru pomocí Eulerova vzorce dostáváme výraz

$$I = I_0 \int S(k)dk + \frac{1}{2}I_0 \int S(k)e^{i2kz}dk + \frac{1}{2}I_0 \int S(k)e^{-i2kz}dk.$$
 (5)

Integrál (5) vyjde

$$I = I_0 + \frac{1}{2} I_0 e^{-4z^2 (\Delta k)^2} e^{i2k_0 z} + \frac{1}{2} I_0 e^{-4z^2 (\Delta k)^2} e^{-2ik_0 z}.$$
 (6)

Úpravou (6) a využitím (4) získáme výsledný tvar

$$I = I_0 (1 + e^{-\left(\frac{z}{l_c}\right)^2} \cos 2k_0 z).$$
(7)

Rovnice (7) je rovnicí korelogramu. Udává závislost intenzity *I* na poloze předmětového zrcadla *z*. Z tohoto vztahu je patrné, že šířka korelogramu je přímo úměrná koherenční délce l_c a ta je podle rovnice (4) nepřímo úměrná efektivní šířce Δk spektra zdroje světla. Vliv koherenční délky na korelogram je ukázán na Obr. 3. Z rovnice korelogramu rovněž vyplývá, že perioda, s níž je intenzita modulována, je $\lambda_0/2$ (λ_0 je střední vlnová délka zdroje). [1]



Obr. 3: Kratší koherenční délka se projeví menší šířkou korelogramu

4 Měření geometrického tvaru předmětu

Existují dva typy interferometrie v bílém světle – na opticky hladkých površích a opticky drsných površích. Inteferometrie v bílém světle na opticky hladkém povrchu byla vysvětlena v sekci 2. Jako opticky hladké povrchy se používají především zrcadla. Kritérium drsnosti povrchu je poměrně složitá záležitost. Opticky hladkým povrchem je myšlen povrch, jehož výškové rozdíly v buňce rozlišení zobrazovací soustavy nepřesahují osminu centrální vlnové délky λ_0 použitého zdroje světla. Opticky drsným povrchem je myšlen povrch, jehož výškové rozdíly v buňce rozlišení přesahují čtvrtinu centrální vlnové délky λ_0 použitého zdroje. Buňka rozlišení je plocha na měřeném

povrchu, která má stejnou velikost jako plocha Airiho disku dané zobrazovací soustavy. Velikost buňky rozlišení je tedy dána vlnovou délkou použitého světla a numerickou aperturou NA zobrazovací soustavy. Pro mikroskopový objektiv s numerickou aperturou NA má buňka rozlišení tvar kruhu o průměru $1,22\lambda_0/NA$. Například pro vlnovou délku 550 nm a mikroskopový objektiv se zvětšením 10 má buňka rozlišení tvar kruhu s průměrem 2,2 µm. Existuje třída povrchů, jejichž výškové rozdíly přesahují osminu vlnové délky a nepřesahují čtvrtinu vlnové délky použitého zdroje. Tyto povrchy nelze jednoznačně zařadit do jedné ze dvou zmíněných skupin. Takové povrchy vykazují podle okolností vlastnosti typické pro jednu nebo druhou skupinu. Zda je povrch opticky hladký nebo drsný, závisí na mechanické drsnosti, vlnové délce použitého světla a také na buňce rozlišení (a tím numerické apertuře) použité zobrazovací soustavy. Například broušené sklo se chová jako opticky hladký povrch pod mikroskopem s vysokou aperturou. [2] Interferometrii v bílém světle je tedy možné použít i v případě, kdy odrazná plocha není opticky hladký povrch (zrcadlo), ale drsný, rozptylující povrch. Výhodou této skutečnosti je možnost měření geometrického tvaru předmětů. [1] Při měření geometrického tvaru předmětů se využívá jevu koherenční zrnitosti. "Jev koherenční zrnitosti vzniká při průchodu koherentního, případně částečně koherentního, světla předmětem s difúzně rozptylujícím rozhraním nebo při odrazu od takového rozhraní" [5]. Je zřejmé, že v interferometrii dochází pouze k odrazu od rozptylujícího rozhraní (drsného povrchu). K tomu je potřeba předpokládat, že světlo dopadající na drsný povrch je nejprve zcela absorbováno a poté opět zcela vyzářeno do prostoru. Opticky drsný povrch se skládá z mnoha mikroskopických plošek, které se při osvícení koherentním světlem chovají v souladu s Huygensovým principem jako sekundární elementární bodové zdroje vlnění. Tato sekundární vlnění mají tvar kulových vln. [5] "Protože jsou bodové zdroje vzájemně koherentní a jejich rozmístění je náhodné v důsledku náhodnosti reliéfu povrchu předmětu, dochází k interferenci sekundárních kulových vln". V oblasti před drsným povrchem vznikne náhodné prostorové rozložení interferečních maxim a minim, které se označuje jako pole kohereční zrnitosti [5]. Jednotlivá maxima a minima se nazývají spekly (angl. speckle). Se spekly se lze nejčastěji setkat při osvícení drsného povrchu laserem, jakožto koherentním zdrojem světla. Při měření geometrického tvaru předmětu je předmětové zrcadlo nahrazeno opticky drsným měřeným povrchem. Je důležité, aby byly pro měření splněny podmínky koherence bílého světla. Podmínka dostatečné časové koherence je splněna, jestliže je dráhový rozdíl v interferometru menší než koherenční délka světelného zdroje. Aby byla splněna podmínka prostorové koherence, musí být koherenční plocha na drsném povrchu větší než plocha, z níž odražené světlo přispívá k jednomu speklu. [1]

Každý spekl má určitou náhodnou fázi, která je ovšem konstantní na celé ploše speklu. Jestliže je drsný povrch posouván ve směru kolmém k referenčnímu zrcadlu (ve směru šipek na obr. 4) tak, že při tom prochází referenční rovinou, vykazuje každý ze speklů modulaci intenzity jako na Obr. 2 [1]. Pole koherenční zrnitosti, zachycené snímačem kamery, tedy mění svou intenzitu v závislosti na posunutí měřeného povrchu. Nalezením maxima modulace intenzity každého ze speklů získáme informaci, kdy daná ploška na povrchu předmětu prošla referenční rovinou. Toho lze využít k měření geometrického tvaru předmětů. Schéma experimentální sestavy pro měření geometrického tvaru předmětu je na Obr. 4. V praxi probíhá měření následujícím způsobem. Měřený předmět je umístěn na mikrometrickém posuvu v předmětovém rameni Michelsonova interferometru. Vhodný světelný zdroj (IR dioda, LED,...) je pomocí spojné čočky kolimován do paralelního svazku, aby byl celý předmět

rovnoměrně osvětlen. Při měření musí předmět procházet referenční rovinou. Jako detektor slouží CCD kamera. Kamera snímá pole koherenční zrnitosti, které je obrazem povrchu předmětu v důsledku osvícení předmětu koherentním světlem. Pro zobrazení pole koherenční zrnitosti na snímač kamery se používá zobrazovací optika. Zobrazovací optika je tvořena dvěma spojnými čočkami a clonou, pomocí níž je možné nastavovat velikost speklů. V ideálním případě je na každý pixel kamery zobrazen právě jeden spekl. V okamžiku, kdy určitý bod na povrchu předmětu prochází referenční rovinou, příslušný spekl vykazuje maximální modulaci intenzity. Během měření snímá kamera pole koherenční zrnitosti s určitou frekvencí danou snímkovací frekvencí kamery a celý obraz je průběžně zpracováván. Poloha mikrometrického posuvu, při níž je modulace intenzity v daném pixelu maximální, je uložena do paměti počítače. [1] V podstatě lze říci, že vlastní měření provádí mikrometrický posuv a optická soustava pouze signalizuje, že nastal správný okamžik pro zápis hodnoty [1]. V každém pixelu kamery je zapsána hodnota posunutí, kdy příslušná ploška na povrchu měřeného předmětu prošla referenční rovinou. Ze zapsaných hodnot posunutí a souřadnic pixelů lze určit geometrický tvar předmětu.



Obr. 4: Experimentální sestava pro měření geometrického tvaru předmětu

5 Korelogram

Korelogram je průběh závislosti intenzity na souřadnici posunutí předmětového zrcadla nebo měřeného předmětu. Při měření povrchu předmětu je korelogram zaznamenán v každém pixelu kamery. Zaznamenaná intenzita je výsledkem interference světelných vln, ke které dochází při výstupu z objektového a referenčního ramena interferometru. Vlny šířící se oběma rameny pochází ze stejného zdroje. Posunutím předmětu podél osy ramene dochází ke změně optické dráhy v tomto rameni. To znamená, že interferující světelné vlny nevznikly ve stejný okamžik. Mezi těmito dvěma vlnami je časové zpoždění závislé na podélné souřadnici posunutí. Výsledná závislost představuje autokorelační funkci amplitudy elektrického pole.

Korelogram popisuje rovnice (7). Rovnici korelogramu lze v případě zdroje světla s gaussovským spektrem napsat ve tvaru

$$I = I_n + I_k \left\{ 1 + \exp\left[-\left(\frac{z - z_0}{l_c}\right)^2 \right] \cos\left(4\pi \frac{z - z_0}{\lambda_0}\right) + \varphi \right\},\tag{8}$$

kde I_n a I_k jsou nekoherentní a koherentní složky intenzity vzniklé skládáním vln v ramenech interferometru a φ je fázový posuv. [3] Obecně lze rovnici korelogramu zapsat ve tvaru

$$f(z) = I_0 + I_m \cdot G(z - z_0) \cos[2k_0(z - z_0) + \varphi], \tag{9}$$

kde I_m je modulační intenzita, G je funkce obálky a z_0 je hledaná podélná souřadnice na povrchu předmětu [2].

Korelogram vyjadřuje závislost intenzity na dráhovém rozdílu mezi oběma rameny interferometru. Lze na něj pohlížet jako na amplitudově modulovaný signál popsaný rovnicí (9). [3] Nosnou vlnu popisuje kosinus ve výrazu (8) respektive (9) a modulační signál exponenciála ve výrazu (8) respektive funkce G výrazu (9). Nosná vlna představuje střídání konstruktivní a destruktivní interference v závislosti na dráhovém rozdílu [3]. Příklad nosného signálu je možno vidět na Obr. 5.



Obr. 5: Nosný signál

Ke změně interference z konstruktivní na destruktivní dojde vždy, když se dráhový rozdíl optických drah v rameni interferometru změní o polovinu vlnové délky použitého zdroje [3]. V Michelsonově interferometru dojde ke změně optických drah o polovinu vlnové délky použitého zdroje při posunutí motorizovaného posuvu o čtvrtinu vlnové délky [3]. Modulační signál tvoří exponenciála ve výrazu (8). Tato exponenciála je znázorněna na Obr. 6.



Obr. 6: Modulační obálka

Exponenciála je konkrétní případ funkce *G*. Tvar obálky je závislý na tvaru spektra polychromatického zdroje [3]. Pokud má zdroj gaussovský tvar spektra, funkce obálky bude mít také gaussovský tvar [3, 2]. Jak již bylo zmíněno, korelogram představuje autokorelační funkci

amplitudy elektrického pole. Podle Wienerovy-Chinčinovy věty je autokorelační funkce rovna Fourierově transformaci spektra použitého světla [2]. Funkce obálky nabývá maxima v hodnotě z_0 , což je souřadnice kdy předmětové zrcadlo nebo měřený předmět prošly referenční rovinou. Pro měření geometrického tvaru předmětu tedy nejsou důležité oscilace funkce kosinus nosného signálu, ale maximum funkce obálky korelogramu [11]. Příklad korelogramu jako výsledku amplitudové modulace je na Obr. 7. Výpočet obálky je standardně prováděn pomocí Hilbertovy transformace. Naměřený korelogram je ovlivněn několika druhy šumů, které jsou způsobeny nerovnoměrným dopadem fotonů na detektor (výstřelový šum), nerovnoměrným posunutím (polohový šum) a převodem analogového signálu na digitální (kvantizační šum). [2]

Obr. 7: Korelogram jako výsledek amplitudové modulace

6 Podvzorkování a expoziční doba

Jak již bylo dříve uvedeno, ke snímání průběhu intenzity v závislosti na posunutí slouží kamera. Běžně se používají CCD nebo CMOS kamery. Kamery nedokáží snímat signál spojitě. Snímání probíhá diskrétně v předem určených časových okamžicích, daných snímkovací frekvencí kamery. Analogově-digitální převod je realizován pomocí analogově digitálních převodníků. V nejobecnější podobě je analogově digitální převodník tvořen dvěma funkčními částmi. První část se nazývá vzorkovací obvod a slouží k nahrazení spojitého signálu posloupností impulsů. Druhá část se nazývá kvantovací obvod. Kvantovací obvod nahrazuje posloupnost impulsů posloupností čísel tak, aby tato posloupnost co nejvíce odpovídala původnímu spojitému signálu. Při vzorkování a kvantování dochází ke ztrátě části informace, která je jednou z příčin chyb měření. Existuje více druhů vzorkovacích algoritmů. Mohou být založeny například na měření v předem určených časových okamžicích, v náhodných časových okamžicích nebo časových okamžicích souvisejících s průběhem signálu. Nejčastěji se používá cyklické vzorkování, což je vzorkování v předem určených časových okamžicích s konstantní periodou. Je zřejmé, že čím bude tato perioda kratší, tím více bude posloupnost diskrétních hodnot kopírovat původní analogový signál. Zvyšováním

vzorkovací frekvence dochází k zvyšování přesnosti transformace. To ale přináší řadu problémů, proto je dobré vědět, s jakou minimální frekvencí se musí vzorkovat původní analogový signál, aby mu výsledný číslicový odpovídal. Nyquistův–Shannonův vzorkovací teorém (angl. Nyquist–Shannon sampling theorem) říká, že původní spektrum nebude deformováno, jestliže bude vzorkovací frekvence vybrána tak, aby se harmonické složky spektra impulsů nepřekrývaly. [10] To je splněno, pokud je vzorkovací frekvence alespoň dvojnásobná, než nejvyšší frekvence obsažená ve spektru původního signálu. Podle vzorkovacího teorému u interferometrie v bílém světle nesmí velikost kroku vzorkování přesáhnout polovinu nejkratší periody obsažené ve spektru signálu. Při interferometrickém měření dochází ke vzorkování korelogramu. [3] Příklad vzorkování korelogramu je na Obr. 8.

Obr. 8: Úplný korelogram (černě), vzorkovaný korelogram s krokem 3 μm (zeleně), vzorkovaný korelogram s krokem 1,5 μm (červeně) a vzorkovaný korelogram s krokem 2,7 μm (modře)

Intenzita měřená kamerou s digitálním výstupem je vyjádřena v jednotkách DN, kde DN je zkratka pro digital number a znamená jeden krok analogově – digitálního převodníku [11]. Nosný signál tvořený funkcí kosinus má u Michelsonova interferometru periodu $\lambda_0/2$. Na každou periodu musí podle vzorkovacího teorému připadnout alespoň dva vzorky, z toho plyne, že na λ_0 musí připadnout čtyři vzorky. Pokud je korelogram vzorkován s krokem vyhovujícímu Nyquistovu kritériu, interferometrie v bílém světle je pomalá a její informační účinnost je nízká. [3] Vyžaduje velké množství snímků, jejichž snímání a zpracování je časově náročné. Pro představu, kdyby měl předmět výškový rozdíl 0,5 mm a střední vlnová délka zdroje byla 800 nm, bylo by potřeba získat více než 2500 snímků. Vhodnou metodou, jak snížit množství potřebných dat, je provést podvzorkování (angl. undersampling) korelogramu. Podvzorkování využívá skutečnosti, že obálku korelogramu je možné rekonstruovat i v případě, kdy je porušen vzorkovací teorém, protože rekonstrukce oscilací nosného signálu není nutná. Stačí tedy vzorkovat takovým způsobem, aby bylo možné zrekonstruovat obálku korelogramu, jejíž maximum je důležité pro nalezení podélné souřadnice posunutí. Rekonstrukce obálky je proveditelná, pokud složky funkce obálky o vysoké frekvenci jsou malé. Tato podmínka je splněna, protože obálka se mění mnohem pomaleji než oscilace nosného signálu. Tato práce se zabývá především podvzorkováním korelogramu v kombinaci s vyhodnocením pomocí Hilbertovy transformace. Abychom zabránili snížení kontrastu, který je způsoben změnou optické dráhy během expozice, je použita krátká expoziční doba.

Definujeme vzorkovací faktor

$$f = \frac{\Delta}{\lambda_0},\tag{10}$$

kde Δ je vzorkovací krok. Vzorkovací krok je vzdálenost uražená měřeným předmětem mezi dvěma následujícími snímky. Vzorkovacímu teorému odpovídá vzorkovací faktor f = 0,25. Vzorkování s vyšším faktorem než 0,25 se nazývá podvzorkování.

Dále definujeme efektivní periodu p oscilací

$$p = \frac{P}{\Delta},\tag{11}$$

kde P je perioda vzorkovaného korelogramu. Efektivní perioda je perioda oscilací vyjádřená ve vzorkovacích krocích. Efektivní perioda závisí na vzorkovacím faktoru následujícím způsobem

$$p = \max\{[(2f) \mod 1, 0]^{-1}, [1 - (2f) \mod 1, 0]^{-1}\},$$
(12)

kde mod označuje funkci modulo, což je zbytek po dělení. Závislost efektivní periody p na vzorkovacím faktoru f je zobrazena na Obr. 9.

Obr. 9: Závislost efektivní periody na vzorkovacím faktoru

Ukažme význam rovnic (10) – (12) na příkladu. Uvažujme světelný zdroj LED se střední vlnovou délkou 865 nm a vzorkování korelogramu s krokem $\Delta = 4,50 \,\mu\text{m}$. Podle rovnice (10) bude vzorkovací faktor f = 5,2. Platí, že $2f \mod 1,0 = 0,4$. Efektivní perioda bude rovna p = 2,5; jak plyne z rovnice (12). To znamená, že perioda oscilací P v zaznamenaném korelogramu bude rovna $2,5\Delta = 11,25 \,\mu\text{m}$.

Vzorkovací faktor vyhovující podmínce $2f \mod 1,0 = 0$ je nevhodný pro měření, protože krok vzorkování je celočíselným násobkem periody oscilací korelogramu. Experimenty ukázaly, že nejvhodnější jsou takové vzorkovací faktory, pro které platí $2f \mod 1,0 = 0,4$ nebo 0,6. Takový vzorkovací faktor je ekvivalentní vzorkovacímu faktoru f = 0,2 používaném ve standardní interferometrii v bílém světle.

V kontinuálním režimu je intenzita na výstupu interferometru integrována, protože se měřený předmět pohybuje. Pohybující se předmět mění rozdíl optických drah v interferometru a tudíž intenzitu na výstupu. Změna intenzity během expozice snižuje kontrast korelogramu. Kontrast C vyjádřený jako funkce expoziční doby t_{exp} je dán

$$C = \operatorname{sinc}\left(2\pi f \frac{t_{\exp}}{T}\right),\tag{13}$$

Funkce sinc je definována jako sinc(x) = sin(x)/x a T je čas mezi dvěma následujícími snímky. V případě standardní snímkovací frekvence 25 fps (fps znamená frames per second – počet snímků za sekundu) je T = 40 ms. Pro představu, pokud bude expoziční doba $t_{exp} = 1$ ms a vzorkovací faktor f = 5,2; kontrast bude přibližně roven 89%. [11]

7 Hilbertova transformace – výpočet obálky

Existují různé metody jak spočítat obálku naměřeného korelogramu. Výhodou Hilbertovy transformace je, že není vázána na určitou délku vzorkovacího kroku. Funkce obálky G je vypočítána

$$G_l = \sqrt{(I_l - I_0)^2 + [(H\{l\})_l]^2},$$
(14)

kde I_l je vzorkovací intenzita korelogramu a $(H\{I\})_l$ značí Hilbertovu transformaci korelogramu. Výpočet obálky podle rovnice (14) je možný za předpokladu, že jsou splněny podmínky Bedrosianovy věty: Periodický nosný signál se mění se souřadnicí z mnohem rychleji než funkce obálky [7]. Index l vyjadřuje, že korelogram a jeho Hilbertova transformace jsou množiny diskrétních hodnot definované pro $z_l = l \times \Delta$. Výraz $I_l - I_0$ může být vypočítán dvojitou aplikací Hilbertovy transformace $I_l - I_0$ $= (H\{H\{I\}\})_l$.

Hilbertova transformace korelogramu je vypočítána prostřednictvím Fourierovy transformace

$$H\{I\} = F^{-1}\left\{-i\frac{v}{|v|}F\{I\}\right\},$$
(15)

kde *v* je prostorová frekvence odpovídající podélné souřadnici *z* a *F* a F^{-1} značí přímou a inverzní Fourierovu transformaci. Výraz -iv/|v| v rovnici (15) znamená, že Fourierova transformace $F\{I\}$ je násobena *i* pro záporné frekvence a -i pro kladné frekvence. [11]

Ukážeme, jak funguje Hilbertova transformace na jednoduchém příkladu: Hilbertova transformace funkce cos(x) je funkce sin(x), jak plyne z rovnice (15). Hilbertova transformace posune funkci cos(x) o -90°, čímž se z ní stane funkce sin(x).

8 Výpočet polohy obálky podvzorkovaného korelogramu

Poloha maxima obálky definuje podélnou souřadnici odpovídajícího bodu na povrchu. Vhodnou metodou jak odhadnout polohu maxima obálky je korelace (angl. cross – correlation). Měřená obálka je korelována s ideálním tvarem obálky. Ideální tvar obálky je dán autokorelační funkcí světelného zdroje. Pro běžné LED může být ideální tvar obálky přibližně popsán Gaussovou funkcí. Výhodou je, že ideální tvar obálky může být vypočítán s libovolně jemným krokem. Pak může být korelace měřené obálky s ideálním tvarem vypočítána s krokem výrazně kratším než vzorkovací krok Δ . Ideální tvar obálky je posouván s krokem d na novou hodnotu korelace. Tento krok může být zvolen libovolně jemný ($d << \Delta$). [11] Zjemňováním kroku d je teoreticky možné nalézt polohu maxima obálky s větší přesností než při provedení korelace s krokem Δ . K přesnějším výsledkům lze dojít při zjemňování d do určité hodnoty, dále k žádnému zlepšení nedochází, nastává stagnace. Bylo pozorováno, že ke zlepšení výsledků dochází do přibližně desetinásobného zjemnění Δ [3]. Výpočet probíhá tak, že hodnoty podvzorkovaného korelogramu a ideální obálky jsou vertikálně nad sebou násobeny a

následně sčítány. To je ukázáno na Obr. 10 pro klasickou korelaci, kde $d = \Delta$ a na Obr. 11 pro jemnou korelaci, kde $d < \Delta$. Výsledná hodnota je vynášena do grafu v závislosti na *d*. Maximum grafu určuje polohu maxima obálky.

K výpočtu je ale možné použít i jiné obecně známé metody. Velmi známá je metoda nejmenších čtverců nebo metody využívající Fourierovy transformace. V práci je používána korelace, protože byla testována a vykazovala nejlepší výsledky ve srovnání s metodou nejmenších čtverců a metodou využívající Fourierovy transformace. Výsledky byly porovnávány na základě odchylek daných vyhodnocovacím programem.

Obr. 10: Výpočet maxima obálky vzorkovaného korelogramu s krokem $d = \Delta$ (klasická korelace)

Obr. 11: Výpočet maxima obálky vzorkovaného korelogramu s krokem $d < \Delta$ (jemná korelace)

9 Nejistota měření

Pro podélnou nejistotu platí vztah

$$\delta z = \frac{1}{\sqrt{2}} \left(\frac{\langle I_{obj} \rangle}{I_{obj}} \right)^{1/2} \sigma_z, \tag{16}$$

kde I_{obj} je intenzita speklů se zastíněnou referenční větví a σ_z je kvadratická drsnost (směrodatná odchylka výšky funkce). Z tohoto vztahu můžeme vidět, že podélná nejistota je úměrná drsnosti σ_z povrchu. Faktor úměrnosti závisí na poměru střední intenzity pole $\langle I_{obj} \rangle$ k intenzitě jednotlivého speklu $\langle I_{obj} \rangle / I_{obj}$. Statistika intenzity v individuálním speklu je dána rovnicí

$$p(I_{obj}) = \frac{1}{\langle I_{obj} \rangle} \exp\left(-\frac{I_{obj}}{\langle I_{obj} \rangle}\right).$$
(17)

Čím jasnější je odpovídající spekl, tím přesnější je měření. Tento výsledek říká, že pro praktické měření musí být správně stanoven limit intenzity speklu, a spekly s intenzitou pod tímto limitem nejsou použity pro vyhodnocení.

Vztah pro podélnou nejistotu daný rovnicí (16) byl odvozen v případě, že se jedná o drsný povrch ($\sigma_z > \lambda_0/4$). Je-li však povrch velmi drsný, vzory speklů různých vlnových délek se stanou dekorelovanými. Horní hranice pro drsnost σ_z , je dána

$$\sigma_z < \frac{l_c}{4}.\tag{18}$$

Koherenční délka l_c světelného zdroje s Gaussovským spektrem je popsána rovnicí (4).

Pokud je drsnost σ_z větší než mezní hodnota daná rovnicí (18), naměřený korelogram je zkreslený a výšková odchylka nemůže být správně vyhodnocena. V tomto případě již neplatí podmínky, za nichž byla odvozena rovnice (16). [4]

Experimentální část práce

Seznámení s měřící metodou a praktickými problémy

<u>Adjustace</u>

1

Před každým měřením je dobré mít představu co a jak měřit a jakých výsledků lze dosáhnout. V opačném případě může být experimentátor překvapen výsledky, které nejsou způsobeny novým jevem, ale vlastní chybou nebo neznalostí nějakého problému. Tato situace se stává experimentátorům poměrně často. V dnešní době mohou tuto situaci navíc přivodit ještě vyhodnocovací programy, kdy chyba ve vyhodnocení způsobí překvapivý výsledek. Na to je třeba dát velký pozor – je výhodné vidět do chodu programu. Proto řada experimentátorů pracuje s vlastními programy. Každý zajímavý výsledek je nutno prozkoumat podrobněji, aby nedošlo k chybnému výkladu výsledků. Před samotným měřením je třeba kromě teoretické přípravy provést adjustaci měřícího zařízení. Adjustace (neboli také justáž) je soubor činností vedoucích ke správnému fungování měřícího zařízení. Adjustace má vliv na přesnost měření. Čím lépe a pečlivěji bude adjustace provedena, tím bude zařízení lépe fungovat. K adjustaci Michelsonova interferometru, používaném v následujících experimentech, se používá He-Ne laser. Laser je použit místo zdroje světla a slouží k přesnému nastavení os a jednotlivých částí interferometru. Při nastavování se sleduje světelná stopa laseru pomocí stínítka tak, aby stopa prošla s co nejmenšími ztrátami světla na čip kamery. Adjustaci rovněž usnadňuje antivibrační stůl, ve kterém se nacházejí matky na zašroubování kolejniček. Tyto kolejničky naznačují roviny, čímž usnadňují přehlednost měřící aparatury. Navíc je na ně možné připevnit držáky, které drží některé části interferometru. Zjednodušují a zpřesňují pohyb částí interferometru podél jejich směru. Konstrukce Michelsonova interferometru pro praktické měření se nepatrně liší od Obr. 4. Na Obr. 4 lze vidět, že světelný svazek prochází interferometrem pod pravými úhly. Pokud by tomu tak bylo, na snímač kamery by, díky parazitním odrazům od rozhraní dělící kostky a referenční větve, dopadalo světlo nepřispívající k interferenci. Toto světlo by působilo rušivě vzhledem k měřené interferující složce světla. Potlačení parazitních odrazů od rozhraní dělící kostky lze provést nakloněním roviny světelného zdroje pod úhlem ϑ . Pro práci je zvoleno naklonění roviny světelného zdroje o úhel ϑ = arctg(1/8). Nakloněna je také dělící kostka, a to o úhel $\vartheta/2$. Tato naklonění způsobí, že žádný z úhlů v interferometru není 90°. Popsané změny úhlů v interferometru eliminují parazitní odrazy v měřící sestavě. Schéma interferometru po adjustaci je znázorněno na Obr. 12.

Obr. 12: Interferometr se zdrojem světla nakloněným pod úhlem θ; 1 – zdroj světla, 2 – spojná čočka s ohniskovou vzdáleností 80 mm, 3 – dělící kostka, 4 – předmětové zrcadlo, 5 – referenční zrcadlo, 6 – spojná čočka s ohniskovou vzdáleností 80 mm, 7 – kamera s objektivem (ohnisková vzdálenost 50 mm) a clonou

Problémy při interferometrickém měření

Při interferometrickém měření se lze setkat s několika problémy ovlivňujícími měření. Jak bylo již dříve zmíněno, jedním z nich jsou vibrace. Vibrace ovlivňují měření dost výrazným způsobem. I když je při měření používán antivibrační stůl, měření je vibracemi stejně ovlivněno. Pokud měření probíhá v budově, kde se nachází více laboratoří zároveň, stačí, když se zapne ve vedlejší místnosti hlučný stroj a měření je ovlivněno vibracemi. Důkazem působení vibrací na výsledky měření může být následující experiment. Nejprve se provede standardní interferometrické měření. Poté se provede stejné měření s tím rozdílem, že po zapnutí měření se začne klepat do antivibračního stolu s interferometrem, dokud měření neskončí. Z naměřených výsledků je možno vidět rozdíly mezi jednotlivými měřeními. U měření s vibracemi dojde deformaci korelogramu a výraznému nárůstu nejistoty měření. Takové výsledky jsou nepoužitelné. Přítomnost vibrací lze jistým způsobem pozorovat i na monitoru počítače. Pokud se pomocí motorizovaného posuvu najede předmětovým zrcadlem do oblasti referenční roviny, je možno na monitoru pozorovat interferenční proužky. Vibrace způsobují "pulsování" interferenčních proužků. Pozorováním těchto pulsů lze usoudit, jak přesné měření bude. Jestliže jsou pulsy časté a velké, bude měření méně přesné. Touto jednoduchou metodou lze sledovat podmínky z hlediska vibrací.

Dalším problémem v interferometrii je nalezení vhodného dostatečně silného zdroje. Jak bylo již dříve zmíněno, používají se zdroje s velkou šířkou spektra a tím krátkou koherenční délkou.

V některých případech je ale také důležitá intenzita zdroje. Při měření s velkým vzorkovacím faktorem porušujícím vzorkovací teorém se obvykle nastavuje krátká expoziční doba kamery, a to kvůli zachování kontrastu. Pokud je použit velký vzorkovací faktoru např. f = 5,2; znamená to, že mikrometrický posuv urazí 5,2 vlnových délek během doby mezi dvěma snímky. Nárůstem vzorkovacího faktoru tedy dochází ke zvýšení rychlosti mikrometrického posuvu. Použití krátké expoziční doby je podobné jako u fotografování. Čím je pohybující se objekt rychlejší, tím je použita kratší expoziční doba, aby byl snímek dostatečně ostrý a nedošlo k jeho rozmazání. Zkracování expoziční doba kamery a intenzita osvětlení na sobě závisí nepřímo úměrně. Intenzitu světelného zdroje není možné zvyšovat do nekonečna, protože každý zdroj má svou maximální intenzitu. Proto je u měření s velkým vzorkovacím faktorem vhodné vyzkoušet, jakou expoziční dobu zvolit, aby bylo osvětlení dostatečné a zároveň nedošlo ke snížení kontrastu vlivem pohybu předmětu.

Určení vlnové délky zdroje

Vlnovou délku použitého světelného zdroje je možné kromě spektroskopických metod určit přímo z naměřeného korelogramu. Tato metoda není zdaleka tak přesná jako spektroskopická měření, ale pro interferometrii je postačující. Korelogram musí být vzorkován s nízkým vzorkovacím krokem vyhovujícím vzorkovacímu teorému. Pro určení vlnové délky zdroje je nutné vědět, jaká vzdálenost byla ujeta za použití motorizovaného posuvu. To je možné jednoduše zjistit ve vyhodnocovacím programu. Na výstupu programu používaného v této práci je totiž soubor bitmapových obrázků a protokol obsahující informace o použité technice, parametrech nastavení a ujeté vzdálenosti motorizovaného posuvu. Bitmapový obrázek korelogramu je načten do některého z programů pracujících s pixely. Lze využít např. program malování. V programu se určí šířka korelogramu v pixelech. Následně se vhodně zvolí několik period korelogramu, které nejsou výrazně deformované a určí se jejich rozsah v pixelech. Konkrétní výběr period je ukázán na Obr. 13. Jedna perioda odpovídá polovině vlnové délky zdroje. Nyní lze trojčlenkou dopočítat vlnovou délku zdroje. Určení vlnové délky zdroje z korelogramu je ukázáno na následujícím příkladu. Mikrometrický posuv ujel při měření dráhu 22,4 µm. Jemu odpovídá rozsah v pixelech 1023 pix. Je vybráno 5 a 4 periody podle Obr. 13. Jim odpovídá rozsah v pixelech 105 respektive 82 pix. Výsledná střední vlnová délka vyjde po výpočtu 920 respektive 898 nm. Pokud z těchto hodnot uděláme aritmetický průměr, dostaneme střední vlnovou délku 910 nm.

Obr. 13: Naměřený korelogram s výběrem period

Ukázka korelogramů a jejich obálek vybraných při standardním měření povrchu mince

Jako zdroj je při měření použita LED svítící v infračervené oblasti. Měření je prováděno na evropské minci o hodnotě 1 cent. Zobrazená plocha je 960 × 120 pix. Ujetá dráha mikrometrického posuvu je 22,4 µm. Ve vyhodnocovacím programu jsou nastaveny následující parametry: vlnová délka zdroje 864 nm; vzorkovací faktor f = 0,025; počet kroků (tj. počet snímků na uraženou dráhu) = 1024, expoziční doba kamery $t_{exp} = 1$ ms. Na Obr. 14 je 5 naměřených vybraných korelogramů. Na Obr. 15 jsou jejich vypočítané obálky a na Obr. 16 korelace s ideálním průběhem.

Posunutí 22,4 µm

Posunutí 22,4 µm

Posunutí 22,4 µm

Obr. 16: Korelace s ideálním průběhem

2 Měření geometrického tvaru předmětu

sestaven Michelsonův interferometr v bílém světle. Konstrukci tohoto Je interfermometru ukazuje Obr. 12. Měření předchází testování několik druhů diod (LED, superluminiscenční dioda, IR dioda) a výběr nejvhodnější z nich. Pro měření výškového profilu drsného předmětu a mince jsou vybrány takové diody, aby měly pokud možno korelogram s obálkou podobnou Gaussově funkci bez bočních laloků a také velkou koherenční délku, to znamená dlouhý korelogram. K měření výškového profilu drsného předmětu je použita dioda Hitachi HE 8404 SG a k měření výškového profilu mince dioda HSDL 4230. Na vstupu a výstupu interferometru jsou spojné čočky o ohniskové vzdálenosti 80 mm. Jako detektor světla slouží CMOS kamera. Na kameře je nasazen objektiv o ohniskové vzdálenosti 50 mm a před kamerou je umístěna clona k nastavení velikosti speklů. K rozdělení světelného svazku do větví interferometru slouží dělící kostka. Měřený objekt je posouván pomocí počítačem řízeného motorizovaného posuvu. Popsaná sestava je využita pro měření výškového profilu drsného předmětu i

pro měření výškového profilu mince. Sestavy se liší pouze použitým zdrojem světla a objektem v předmětové větvi. Pro měření výškového profilu drsného předmětu je jako drsný povrch použit kovový držák. Při měření výškového profilu mince je použita evropská mince o hodnotě 1 cent. Experimentální sestava pro měření výškového profilu drsného předmětu je ukázána na Obr. 17 a experimentální sestava pro měření výškového profilu mince je na Obr. 18.

Obr. 17: Interferometr pro měření výškového profilu drsného předmětu; 1 – zdroj světla, 2 – spojná čočka s ohniskovou vzdáleností 80 mm, 3 – dělící kostka, 4 – měřený povrch předmětového zrcadla, 5 – referenční zrcadlo, 6 – spojná čočka s ohniskovou vzdáleností 80 mm, 7 – kamera s objektivem (ohnisková vzdálenost 50 mm) a clonou, 8 – motorizovaný posuv

Obr. 18: Interferometr pro měření výškového profilu mince; 1 – zdroj světla, 2 – spojná čočka s ohniskovou vzdáleností 80 mm, 3 – dělící kostka, 4 – držák s mincí předmětového zrcadla, 5 – referenční zrcadlo, 6 – spojná čočka s ohniskovou vzdáleností 80 mm, 7 – kamera s objektivem (ohnisková vzdálenost 50 mm) a clonou, 8 – motorizovaný posuv

Měření výškového profilu mince s vysokým stupněm podvzorkování

Jako zdroj je použita dioda HSDL 4230 svítící v infračervené oblasti. Měření je prováděno na evropské minci o hodnotě 1 cent. Zobrazená plocha je 960 × 120 pix. Ujetá dráha mikrometrického posuvu je 304,9 µm. Korelogram je vzorkován s vysokým faktorem f = 5,2. Ve vyhodnocovacím programu jsou nastaveny následující parametry: střední vlnová délka zdroje $\lambda_0 = 864$ nm; počet kroků = 64; FWHM = 15 µm; SPC = 2; XA = 6. FWHM je šířka obálky v polovině maxima a vyjadřuje délku korelogramu. Je to jiné vyjádření koherenční délky, kde FWHM = $l_c \cdot$ const. To znamená, že pro popis světelného zdroje je stejně vhodná jako koherenční délka a výhodou je, že se snadno určí. SPC je počet směrodatných odchylek na každou stranu, se kterými program pracuje při vyhodnocení. Teoreticky by bylo nejlepší vyhodnocovat co nejdelší část korelogramu. Ve skutečnosti je to ale tak, že krajní části korelogramu mají slabý signál. Tím pádem může být šum silnější než signál a vyhodnocení této části není věrohodné. Proto se signál vyhodnocuje jenom ve střední části korelogramu. XA je faktor prahu výběru hodnot. Korelogramy s malým maximem obálky nejsou příliš věrohodné. U těchto korelogramů může být šum silnější než signál. Proto tyto korelogramy nejsou zahrnuty do vyhodnocování. XA = 6 znamená, že se při vyhodnocování berou jen korelogramy s maximem obálky 6 a více (6 znamená 6 DN, kde DN je v rozmezí od 0 do 255). Při výpočtu je použit faktor zjemnění o hodnotě 48, to znamená, při korelaci s ideální obálkou je vzorkovací krok Δ ideální obálky zjemněn 48× vzhledem k naměřené obálce. Je nastavena expoziční doba kamery t_{exp} = 400 µs. Standardní odchylka drsnosti vychází 1,0 µm. Na Obr. 19 je naměřený podvzorkovaný korelogram, na Obr. 20 je jeho Hilbertova transformace a na Obr. 21 je jeho vypočítaná obálka. Na Obr. 22 je naměřený výškový profil mince a na Obr. 23 naměřený výškový profil mince včetně chybných bodů vzniklých při měření.

Obr. 21: Vypočítaná obálka

Horizontální vzdálenost [mm]

Obr. 22: Změřený výškový profil mince bez chybných bodů

Obr. 23: Změřený výškový profil mince s chybnými body

Měření výškového profilu drsného předmětu s vysokým stupněm podvzorkování

Jako zdroj je použita dioda Hitachi HE 8404 SG svítící v infračervené oblasti. Měření je prováděno na jemně drsném povrchu kovového držáku. Zobrazená plocha je 480 × 160 pix. Ujetá dráha mikrometrického posuvu je 100 µm. Korelogram je vzorkován s vysokým faktorem f = 3,2. Ve vyhodnocovacím programu jsou nastaveny následující parametry: střední vlnová délka zdroje $\lambda_0 = 875$ nm; počet kroků = 32; FWHM = 15 µm; SPC = 2. Při výpočtu je použit faktor zjemnění o hodnotě 48. Je nastavena expoziční doba kamery $t_{exp} = 2$ ms. Standardní odchylka drsnosti vychází 0,95 µm. Naměřený výškový profil kovového držáku je na Obr. 24.

Horizontální vzdálenost [mm]

Závěr

Cílem této práce bylo představit interferometrii v bílém světle jako jednu z mála přesných metod měření povrchů a zjistit, jaké tato metoda dává výsledky při vysokém stupni podvzorkování. Vysoký stupeň podvzorkovaní souvisí se zvýšením rychlosti snímání, kde je na rozdíl od standardní metody porušen vzorkovací teorém.

Experimentální část práce popisující adjustaci a problémy při interferometrickém měření může pomoci začínajícím experimentátorům nebo technikům z oblasti průmyslu správně sestavit interferometr a vyvarovat se některým nepříjemnostem. Dále je představena jednoduchá metoda vhodná k orientačnímu určení vlnové délky zdroje světla z naměřeného korelogramu.

Přínos práce spočívá v prozkoumání možností použití interferometrie v bílém světle s vysokým stupněm podvzorkování. Experimentálně bylo zjištěno, že měření výškového profilu předmětů je možné i za použití velkého vzorkovacího faktoru porušujícího vzorkovací teorém. Dosažené výsledky ale nejsou tak přesné jako u standardní metody. Přesto pro některé aplikace může být vysoký stupeň podvzorkování vzhledem k vyšší rychlosti měření vhodný, zvláště pro orientační měření výškových profilů nebo hromadné aplikace v průmyslu. Naměřené výškové profily je možno vidět v experimentální části na Obr. 22, 23, 24. Na Obr. 23 je naměřený výškový profil mince včetně chybných bodů, ve kterých dochází k výpadku měření. To je způsobeno tím, že některé spekly mají příliš nízkou nebo vysokou intenzitu a korelogram nemůže být správně vyhodnocen. Při podvzorkovaní se vyskytne více chybných bodů než u standardní metody, kde vzorkovací faktor vyhovuje vzorkovacímu teorému. Standardní odchylka drsnosti při měření s vysokým stupněm podvzorkování se pohybuje okolo 1 μm.

Další výzkum by se mohl ubírat cestou rozsáhlého zkoumání zdrojů vhodných pro interferometrii a testováním materiálů, které by mohly být použity jako zrcadlo v interferometru. V oblasti materiálů zrcadel by se možná mohly uplatnit nanostrukturované nebo vrstevnaté dielektrické materiály. Rovněž se nabízí možnost rozsáhlého zkoumání vzorkovacích faktorů a metod sloužících k nalezení maxima obálky korelogramu. Další možností by mohla být spolupráce s programátory, kteří by mohli pomoci vylepšit vyhodnocovací programy.

Seznam použitých zdrojů:

- P. Pavlíček, Měření výškového profilu předmětu pomocí interferometrie v bílém světle, Jemná mechanika a Optika 47, 83 – 85 (2002)
- [2] P. Pavlíček, Vybrané optické problémy, týkající se 3D senzorů (Vydavatelství UP v Olomouci, Olomouc, 2012)
- [3] V. Svak, Interferometrie v bílém světle s vysokou informační účinností, Diplomová práce (Univerzita Palackého v Olomouci, 2014)
- [4] P. Pavlíček, J. Soubusta, Theoretical measurement uncertainty of white-light interferometry on rough surfaces, Appl. Opt. **42**, 1809-1813 (2003).
- [5] P. Horváth, P. Šmíd, Koherenční zrnitost a její vybrané aplikace (Vydavatelství UP v Olomouci, Olomouc, 2012)
- [6] M. Born, E. Wolf, Principles of Optics (Cambridge University Press, Cambridge, 1999).
- [7] E. Bedrosian, A product theorem for Hilbert transform (The Rand Corporation, 1962)
- [8] P. Pavlíček, Konstrukce interferometru, studijní materiál SLO Olomouc.
- [9] *Http://fyzweb.cz/odpovedna/index.php?hledat=k%C5%99ivosti* [online]. [cit. 2016-08-07].
- [10] M. Mašláň, Analogové obvody (Vydavatelství UP v Olomouci, Olomouc, 1995)
- [11] P. Pavlíček, E. Mikeska, Fast white-light interferometry with Hilbert transform evaluation, připraveno k publikaci.
- [12] P. Pavlíček, J. Soubusta, Measurement of the influence of dispersion on whitelight interferometry, Appl. Opt. 43, 766 – 770 (2004).

Vysvětlivky:

- [] ve větě nebo na konci věty znamená převzatou větu nebo odkaz na
- [] na začátku věty, na konci odstavce znamená převzetí části před []

S(k)	normovaná spektrální hustota
k	vlnové číslo
k_0	střední vlnové číslo (odpovídající střední vlnové délce)
Δk	efektivní šířka spektra
λ	vlnová délka
λ_0	střední (centrální) vlnová délka
Ι	intenzita
I_0	střední intenzita
I_m	modulační intenzita
I_n	nekoherentní složka intenzity
I_k	koherentní složka intenzity
I_l	vzorkovací intenzita korelogramu
I_{obj}	intenzita speklů se zastíněnou referenční větví
$\langle I_{obj} \rangle$	střední intenzita pole
Z	posunutí zrcadla
z_0	podélná souřadnice předmětu
l_c	koherenční délka
NA	numerická apertura
φ	fázový posuv
G	funkce obálky
f	vzorkovací faktor
Δ	vzorkovací krok
р	efektivní perioda
Р	perioda vzorkovaného korelogramu
С	kontrast
t_{exp}	expoziční doba
Т	čas mezi dvěma následujícími snímky
$(H\{I\})_l$	Hilbertova transformace korelogramu
D	prostorová frekvence
F_{\perp}	přímá Fourierova transformace
F^{I}	inverzní Fourierova transformace
d	krok posunutí korelace
σ_{z}	kvadratická drsnost
9	úhel naklonění roviny světelného zdroje
FWHM	šířka obálky v polovině maxima
SPC	počet směrodatných odchylek na každou stranu
XA	faktor prahu výběru hodnot
DN	digital number tj. jeden krok analogově – digitálního převodníku
fps	frames per second tj. počet snímků za sekundu
pix	pixel

Seznam použitých symbolů a zkratek