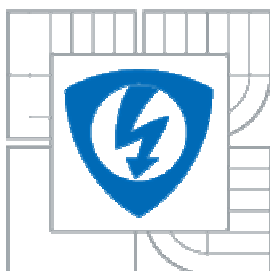




**VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ**  
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



**FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH  
TECHNOLOGIÍ**  
**ÚSTAV AUTOMATIZACE A MĚŘÍCÍ TECHNIKY**

**FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION**  
**DEPARTMENT OF CONTROL AND INSTRUMENTATION**

## **ZPRACOVÁNÍ SIGNÁLŮ V INTERFEROMETRII NÍZKÉ KOHERENCE**

**SIGNAL PROCESSING IN LOW-COHERENCE INTERFEROMETRY**

**DIPLOMOVÁ PRÁCE**  
MASTER'S THESIS

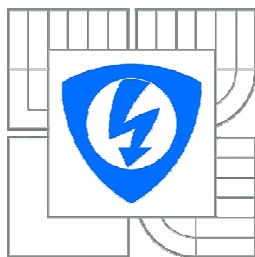
**AUTOR PRÁCE**  
AUTHOR

**Bc. PETER NOVOTNÝ**

**VEDOUCÍ PRÁCE**  
SUPERVISOR

**Ing. MARIE HAVLÍKOVÁ, Ph.D.**

BRNO 2011



VYSOKÉ UČENÍ  
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky  
a komunikačních technologií

Ústav automatizace a měřicí techniky

# Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor  
Kybernetika, automatizace a měření

**Student:** Bc. Peter Novotný

**ID:** 73000

**Ročník:** 2

**Akademický rok:** 2010/2011

## NÁZEV TÉMATU:

### Zpracování signálů v interferometrii nízké koherence

#### POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Seznamte se se základními principy interferometrických měření. Popište princip interferometrie nízké koherence a zmapujte typické aplikační oblasti.
2. Vypracujte přehled algoritmů pro detekci středu interferenčního proužku v interferometrii nízké koherence a implementujte je v programovacím prostředí Matlab podle požadavků externího pracoviště ÚPT AVČR, v. v. i.
3. Pro vybrané metody proveďte experimentální overení měřením pro známý povrch na Michelsonově interferometru. Dosažené výsledky zhodnoťte.
4. Dbejte pokynů odborného konzultanta na externím pracovišti ÚPT AVČR, v.v.i.

#### DOPORUČENÁ LITERATURA:

T. Ailing, W. Chunhui, J. Zhuangde, W. Hongjun and L. Bingcai : Study on key algorithm for scanning white-light interferometry, Proceedings of SPIE, vol. 7155, pp. 71552N--1 - 71552N--8, 2008

K. G. Larkin :Efficient nonlinear algorithm for envelope detection in white light interferometry, Journal of the Optical Society of America A, vol. 13, no. 4, pp. 832--843, 1996

M.. E. Pawlowski, Y. Sakano, Y. Miyamoto and M. Takeda: Phase-crossin algorithm for white-light fringes analysis, Optics Communications, vol. 260, pp. 68--72, 2006

**Termín zadání:** 7.2.2011

**Termín odevzdání:** 23.5.2011

**Vedoucí práce:** Ing. Marie Havlíková, Ph.D.

**prof. Ing. Pavel Jura, CSc.**

*Předseda oborové rady*

#### UPOZORNĚNÍ:

Autor semestrální práce nesmí při vytváření semestrální práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

## **Abstrakt**

Táto diplomová práca sa zaoberá algoritmi pre spracovanie signálu v oblasti interferometrie nízkej koherencie. Úvodná časť je venovaná oboznámeniu so základnými princípmi interferometrie nízkej koherencie a predstaveniu jej aplikačných oblastí. Druhá časť obsahuje zoznam vybraných algoritmov doplnený o popis ich funkčnosti. V tretej časti je popísaný postup experimentálneho merania známeho povrchu na Michelsonovom interferometri a prezentované získané výsledky pre jednotlivé algoritmy. Nakoniec, sú algoritmy porovnané na základe výsledkov merania.

## **Kľúčové slová**

Interferometria nízkej koherencie, Analýza vo frekvenčnej oblasti, Váhovanie stredu, Koherentná korelácia, Posúvanie fáze, interferogram

## **Abstract**

This diploma thesis deals with the algorithms for signal processing in a field of a low-coherence interferometry. The introductory part is devoted to the basic principle of the low-coherence interferometry and to presenting its field of applications. The second part contains a list of selected algorithms supplemented by a description of their functionality. The procedure of experimental measurement of known surface with Michelson interferometer is described in the third part and the results obtained for particular algorithms are presented. Finally, algorithms are compared on the basis of measurement results.

## **Keywords**

Low-coherence interferometry, Frequency domain analysis, Weight-center, Coherent correlation, Phase-shifting, interferogram

## **Bibliografická citácia:**

NOVOTNÝ, P. *Zpracování signálů v interferometrii nízké koherence*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2011. 54s. Vedoucí diplomové práce byla Ing. Marie Havlíková, Ph.D.

## **Prehlásenie**

„Prehlasujem, že moju diplomovú prácu na téma "Zpracování signálů v interferometrii nízké koherence" som vypracoval samostatne pod vedením vedúceho diplomovej práce a s použitím odbornej literatúry a ďalších informačných zdrojov, ktoré sú všetky citované v práci a uvedené v zozname literatúry na konci práce.

Ako autor uvedenej bakalárskej práce ďalej prehlasujem, že v súvislosti s vytvorením tejto diplomovej práce som neporušil autorské práva tretích osôb, hlavne som nezasiahol nedovoleným spôsobom do cudzích autorských práv osobnostných a som si plne vedomý následkov porušenia ustanovení § 11 a nasledujúcich autorského zákona č. 121/2000 Sb., vrátane možných trestnoprávných dôsledkov vyplývajúcich z ustanovení časti druhej, hlavy VI. diel 4 Trestného zákonníka č. 40/2009 Sb.“

V Brne dňa: **23. mája 2011**

.....  
podpis autora

## **Pod'akovanie**

Ďakujem vedúcej mojej diplomovej práce Ing. Marii Havlíkové, Ph.D. a konzultantovi Ing. Zdeňkovi Buchtovi, Ph.D. za účinnú metodickú, pedagogickú a odbornú pomoc a ďalšie cenné rady pri spracovaní mojej bakalárskej práce.

V Brne dňa: **23. mája 2011**

.....  
podpis autora

# Obsah

1	Úvod.....	9
2	Interferencia.....	10
2.1	Vznik interferencie .....	11
2.2	Koherencia.....	11
2.3	Interferometria.....	12
2.4	Michelsonov interferometer .....	13
2.5	Fázová nejednoznačnosť Laserovej interferometrie.....	15
2.6	Vplyv prostredia na interferometrické merania.....	16
3	Interferometria nízkej koherencie.....	17
3.1	Princíp činnosti .....	17
3.2	Michelsonov interferometer v Interferometrii nízkej koherencie.....	18
3.3	Disperzia.....	19
3.4	Svetelné zdroje .....	20
3.5	Aplikačné oblasti.....	20
3.5.1	Meranie výškového profilu .....	20
3.5.2	Meranie hrúbky tenkých vrstiev.....	21
3.5.3	Optická koherenčná tomografia OCT .....	21
3.5.4	Kontrola kvality automatizovaných výrobných procesov .....	22
4	Algoritmy pre detekciu stredu interferenčného prúžku V LCI.....	23
4.1	Váhovanie stredu .....	24
4.1.1	Identifikácia nultého prúžku.....	24
4.1.2	Vylepšenie rozlíšenia .....	26
4.2	Analýza vo frekvenčnej oblasti .....	27
4.2.1	Princíp metódy <i>FDA</i> .....	28
4.2.2	Prevod dát do frekvenčnej oblasti .....	28
4.2.3	Analýza dát vo frekvenčnej oblasti .....	29
4.3	Posúvanie fáze .....	30
4.4	Koherentná korelácia.....	31
4.5	Algoritmy v prostredí MATLAB.....	33
5	Simulácia a experimentálne meranie.....	34
5.1	Experimentálna zostava.....	34
5.2	Simulácia merania na modelovanom interferograme .....	36
5.3	Meranie výšky povrchu .....	38

5.4	Zaznamenávanie dát .....	39
5.5	Spracovanie nameraných dát .....	41
5.6	Výsledky merania výšky povrchu .....	43
5.7	Porovnanie algoritmov .....	43
5.8	Zhodnotenie výsledkov.....	44
6	Záver.....	46
7	LITERATÚRA.....	47
8	ZOZNAM OBRÁZKOV .....	50
9	ZOZNAM SKRATIEK .....	51



# 1 ÚVOD

V posledných desaťročiach sa stále častejšie stretávame s trendom neustálej miniaturizácie v rozličných technologických oblastiach. Hlavnými predstaviteľmi tohto trendu sú mikroelektronika, mikroelektromechanické systémy (MEMS) a nanotechnológie. Aby bolo možné dosiahnuť požadovanú kvalitu výrobkov v mikrometrických až nanometrických rozmerov, bolo treba vyvinúť nielen presné a sofistikované výrobné prístroje a metódy, ale takisto veľmi presné meracie techniky. Jednou z takýchto presných techník, ktoré si našli široké uplatnenie v praxi, je interferometria.

Je to bezkontaktná meracia technika využívajúca interferencie svetla. Jej základom je vyhodnocovanie interferenčného obrazca vzniknutého superpozíciou dvoch vlnení. Využitím svetla ako meracieho média je interferometria priamo zviazaná s etalónom dĺžky, ktorý je dnes odvodený od rýchlosti šírenia svetla vo vákuu. To ju predurčuje na veľmi presné merania malých posuvov, vlnovej dĺžky, indexu lomu a mnohých ďalších fyzikálnych veličín.

V praxi sa pomenovanie interferometria zaužívalo hlavne pre laserovú interferometriu (tiež klasická interferometria). Táto práca je zameraná na iný konkrétny druh interferometrie a to interferometriu nízkej koherencie. Tá sa od laserovej líši hlavne v tom, že využíva širokospektrálny zdroj svetla (biele svetlo).

Obsah tejto práce je rozdelený do štyroch častí. Prvá časť sa venuje všeobecnému oboznámeniu z interferometrickými meraniami a pojmami v tejto oblasti. Je tu tiež vysvetlený princíp fungovania interferometrie nízkej koherencie spolu s prehľadom oblastí v ktorých sa tento druh interferometrie využíva. Druhá časť obsahuje prehľad najpoužívanejších algoritmov používaných pre spracovanie signálu v interferometrii nízkej koherencie, doplnený o popis ich fungovania a ich implementáciu do prostredia MATLAB. Tretia časť je venovaná testovaniu vybraných algoritmov, ktoré boli implementované do prostredia MATLAB, na experimentálnom meraní s Michelsonovým interferometrom. V závere sú zhodnotené dosiahnuté výsledky, na základe ktorých sú algoritmy porovnané s referenčným údajom a vzájomne medzi sebou.

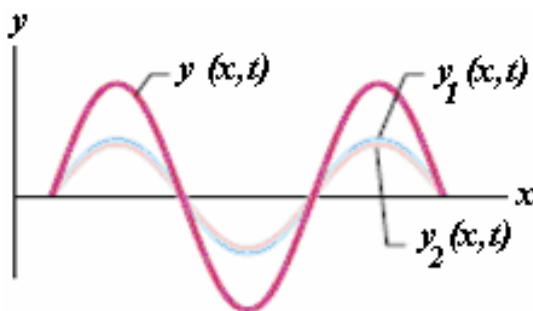
## 2 INTERFERENCIA

Je jav pri ktorom dochádza ku skladaniu (superpozícii) dvoch alebo viacerých vlnení nachádzajúcich sa v rovnakom bode. Tento jav sa uplatňuje pri všetkých druhoch vlnení, ale v tejto práci budeme uvažovať len elektromagnetické vlnenie, presnejšie časť jeho spektra, ktorú sú schopné zaznamenávať aj naše oči, teda viditeľné svetlo. Majme dve vlnenia s rovnakou amplitúdou a frekvenciou. Pokiaľ je fázový posun medzi týmito vlneniami nulový  $\Delta\varphi = 0$  bude amplitúda výsledného vlnenia dvojnásobná. V takomto prípade sa jedná o úplne konštruktívnu (Obr. 2.1) interferenciu. Naopak, ak je fázový posun rovný polovici periódy  $\Delta\varphi = \pi$ , potom je nulová výsledná amplitúda a hovoríme o úplne deštruktívnej interferencii (Obr. 2.2). Z uvedeného vyplývajú podmienky pre vznik úplne konštruktívnej interferencie:

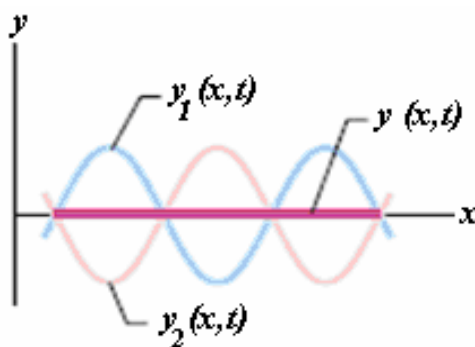
$$\Delta\varphi = 2m.\pi \quad (2.1)$$

a úplne deštruktívnej interferencie:

$$\Delta\varphi = (2m + 1).\pi \quad (2.2)$$



Obr. 2.1: Úplná konštruktívna interferencia [1].



Obr. 2.2: Úplná deštruktívna interferencia [1].

## 2.1 Vznik interferencie

Aby došlo k vzniku pozorovateľnej interferencie je potreba zaistiť koherentnosť vlnení (viď. kapitola 2.2). Toho sa dá dosiahnuť dvoma nasledovnými spôsobmi:

a.) Rozložením jednej vlny na dve a ich následným skladaním a to buď :

- odrazom na tenkej vrstve – mydlové bubliny, olejová vrstva na vode
- rozdelením na deliči zväzku – interferometre
- prechodom svetla dvoma štrbinami – Youngov pokus

b.) Použitím zdroja koherentného žiarenia – LASER.

## 2.2 Koherencia

Ak použijeme ako zdroj svetla dva rovnaké, ale nezávislé monochromatické svetelné zdroje napr. dve žiarovky, bude sa fázový rozdiel vln rýchlo a náhodne meniť. Je to preto, že svetlo je zo žiaroviek vyžarované množstvom atómov, ktoré žiaria náhodne a nezávisle po veľmi krátky čas (rádovo nanosekundy). Následkom toho sa v ľubovoľnom bode projekčnej plochy rýchlo mení interferencia vln z oboch zdrojov medzi konštruktívnou a deštruktívnou. Oko ani väčšina optických detektorov nedokáže takéto zmeny sledovať a preto nevidíme žiadne interferenčné obrazce ale len rovnomerne osvetlenú plochu. Takémuto svetlu hovoríme nekoherentné.

Aby bolo možné pozorovať interferenčné obrazce, je nutné aby sa vzájomný fázový posun vln vo zväzku nemenil v čase. Ak je táto podmienka splnená hovoríme o koherentnom vlnení. Zdrojom takéhoto vlnenia je napríklad laser. Od bežných svetelných zdrojov sa laser odlišuje tým, že vďaka stimulovanej emisii jeho atómy vyžarujú svetlo (fotóny) koordinovane, a tým generujú koherentné svetlo [1].

### Koherenčná dĺžka

Je to vzdialenosť dvoch bodov z interferogramu, v ktorých kontrast interferenčných prúžkov (relatívna intenzita) dosahuje polovičnú hodnotu maximálneho kontrastu. Závislá je od šírky spektra svetelného zdroja. Čím užšia je šírka spektra, tým väčšia je hodnota koherenčnej dĺžky. Pretože je koherenčná dĺžka závislá nielen od šírky ale aj tvaru spektra použitého svetelného zdroja je jej presné vyjadrenie obtiažne avšak približne sa dá jej hodnota určiť zo vzťahu:

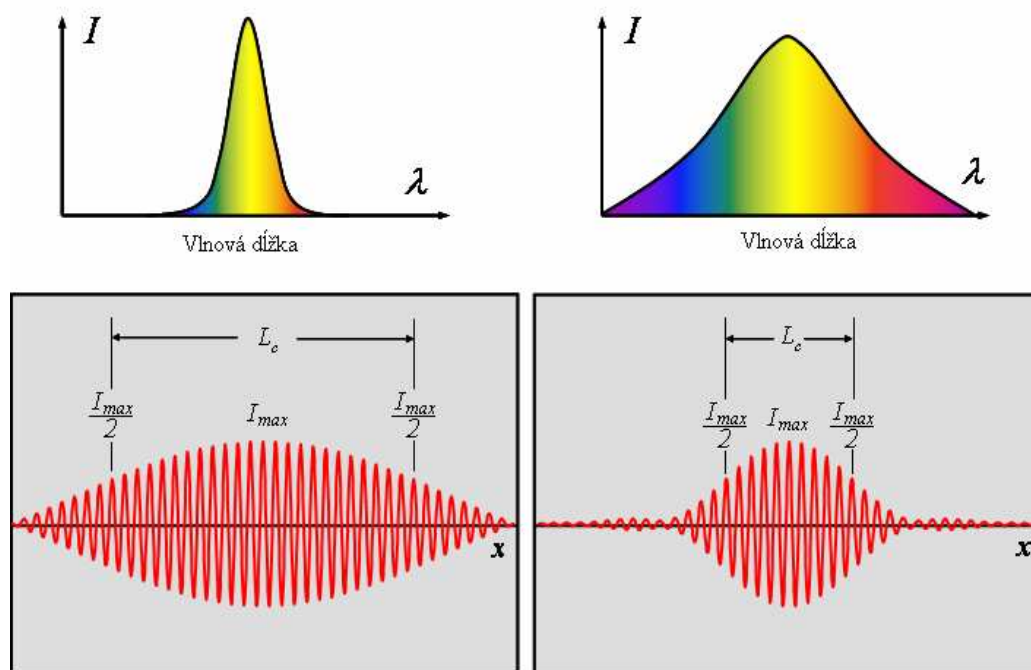
$$L_c = \frac{\lambda_0^2}{\Delta\lambda} \quad (2.3)$$

kde:

$L_c$  - koherenčná dĺžka zdroja svetla,

$\lambda_0$  - stredná vlnová dĺžka,

$\Delta\lambda$  - šírka spektra svetelného zdroja.



**Obr. 2.3:** Závislosť koherenčnej dĺžky na šírke spektra [7].

U laserov je koherenčná dĺžka jedným zo základných parametrov určujúcich ich kvalitu. Najkvalitnejšie lasery majú dĺžku koherencie až niekoľko desiatok metrov. Naopak u širokopásmových zdrojov svetla ako sú slnko, halogénové alebo bežné žiarovky sa pohybuje jej hodnota v jednotkách mikrometrov.

## 2.3 Interferometria

Je to veľmi presná bezkontaktná meracia technika z oblasti optiky využívajúca interferencie svetla. Jej základom je vyhodnocovanie interferenčného obrazca vzniknutého superpozíciou dvoch vlnení. Rozmach dosiahla táto technológia hlavne po vynájdení laseru, ktorého použitie umožnilo dosiahnutie pozorovateľnej interferencie (interferenčných prúžkov) vo veľkom rozsahu a tým umožnilo meranie relatívnych vzdialeností.

## 2.4 Michelsonov interferometer

Interferometer je komplexné optické zariadenie, používané v interferometrii na presné merania malých posuvov, vlnovej dĺžky, indexu lomu, koherenčnej dĺžky a množstva ďalších fyzikálnych veličín. V dnešnej dobe existuje celá rada rôznych druhov interferometrov [8]. Každý z nich sa však skladá zo základných prvkov ktorými sú:

- zdroj svetla (*laser, halogénové lampy, LED diódy*)
- prvky optickej sústavy (*kolimátory, deliče zväzku, zrkadlá, kompenzačné dosky, optické vlákna*)
- fotodetektor (*fotodióda, CCD snímač*)

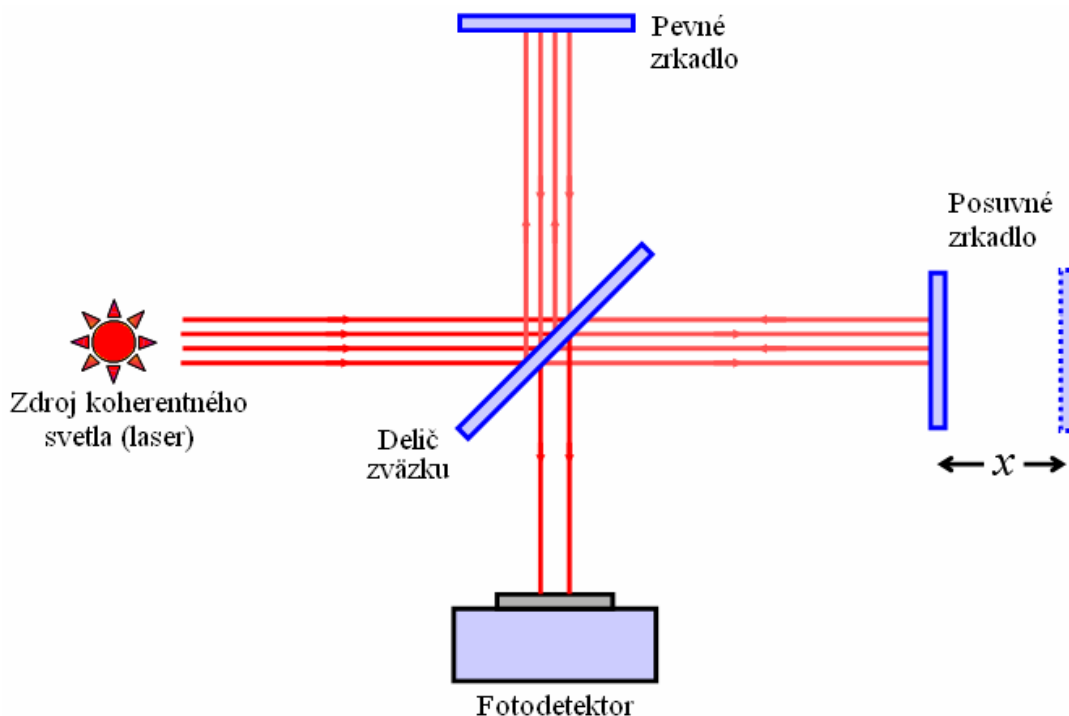
### Princíp Michelsonovho interferometru

Bol prvým interferometrom zostrojeným už v roku 1881 fyzikom Albertom Abrahamom Michelsonom. Napriek tomu, že je najstarším interferometrom, patrí dodnes medzi jeden z najbežnejšie používaných druhov. Základné usporiadanie michelsonovho interferometru je znázornené na Obr. 2.4.

Princíp fungovania bude vysvetlený s použitím zdroja koherentného žiarenia (laseru). Vlnenie vychádzajúce zo zdroja svetla dopadá na delič zväzku (polopriepustné zrkadlo), ktorý ho rozdelí do dvoch navzájom kolmých ramien. Rozdelené vlnenia majú približne polovičnú intenzitu voči pôvodnému vlneniu. Na konci jedného z ramien sa nachádza pevné zrkadlo a na konci druhého ramena je umiestnené zrkadlo posuvné. Vlnenia sa od oboch zrkadiel odrazia späť na delič zväzku, ktorý ich nasmeruje na fotodetektor. Tu spolu vlnenia navzájom interferujú a fotodetektor zaznamená intenzitu výsledného zloženého vlnenia.

Ak budeme meniť polohu posuvného zrkadla bude sa meniť dráhový rozdiel medzi vlneniami z referenčnej vetvy (rameno s pevným zrkadlom) a meracej vetvy (rameno s posuvným zrkadlom), čo spôsobí ich vzájomný fázový posuv. Ten sa v konečnom dôsledku prejaví ako zmena výslednej intenzity zaznamenaná fotodetektorom tak ako ukazuje Obr. 2.5. Takto zaznamenaný priebeh sa nazýva interferogram.

Následnou analýzou zmeny fáze priebehu z interferogramu môžeme určiť relatívne posunutie posuvného zrkadla. Presnosť s akou sme toto posunutie schopný určiť je vo veľkej miere závislá na použitom algoritme spracovania signálu a pohybuje sa rádovo v jednotkách nanometrov.



**Obr. 2.4:** Michelsonov interferometer [7].

### Matematický popis michelsonovho interferometru

Pre jednoduchosť budeme zatiaľ uvažovať nedisperzný michelsonov interferometer čo znamená, že dĺžka optickej a geometrickej dráhy bude v tomto prípade rovnaké. Ak označíme dĺžku ramena s pevným zrkadlom ako  $l_1$  a dĺžku ramena s posuvným zrkadlom ako  $l_2$  môžeme dráhový rozdiel  $\Delta l$  medzi vlneniami dopadajúcimi na fotodetektor vyjadriť nasledovne:

$$\Delta l = 2(l_1 - l_2) \quad (2.4)$$

kde:

$l_1$  - dĺžka ramena s pevným (referenčným) zrkadlom,

$l_2$  - dĺžka ramena interferometru s posuvným zrkadlom,

$\Delta l$  - dráhový rozdiel medzi vlneniami.

z čoho môžeme následne vyjadriť vzťah pre fázový rozdiel  $\Delta\varphi$ :

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi}{\lambda} \cdot \Delta l \quad (2.5)$$

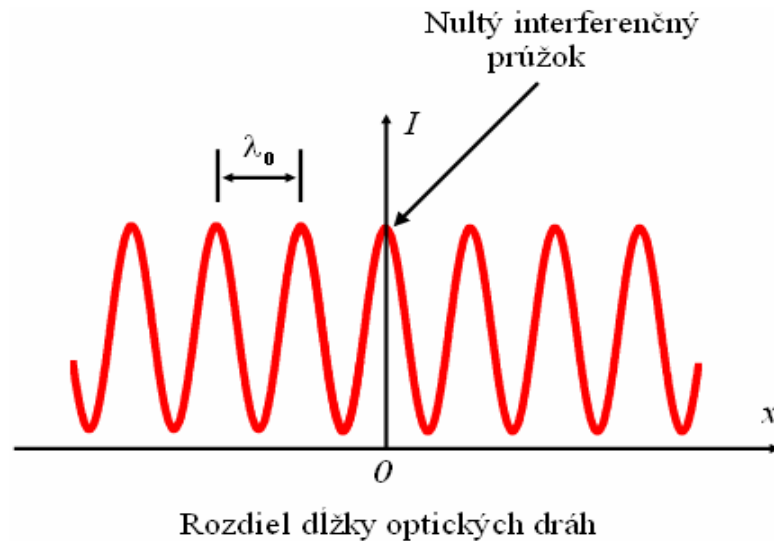
kde:

$\Delta\varphi$  - fázový rozdiel medzi vlneniami,

$\lambda$  - známa vlnová dĺžka použitého svetelného zdroja,

$\Delta l$  - dráhový rozdiel medzi vlneniami.

Z uvedených vzťahov a z podmienok pre úplnú konštruktívnu a deštruktívnu interferenciu ( 2.1 ), ( 2.2 ) vyplýva, že vlnová dĺžka interferenčných prúžkov  $\lambda_0$  je rovná polovici vlnovej dĺžky svetelného zdroja  $\lambda$



**Obr. 2.5:** Interferogram pre michelsonov interferometer so zdrojom koherentného žiarenia [7].

## 2.5 Fázová nejednoznačnosť Laserovej interferometrie

Veľkou nevýhodou *Laserovej interferometrie* je nemožnosť určenia nulového rozdielu dĺžky optických dráh. To znamená, že nevieme nájsť polohu posuvného zrkadla v ktorej by sa jeho vzdialenosť od deliča zväzku rovnala známej vzdialenosti pevného zrkadla. Toto je spôsobené tým, že pri posunutí posuvného zrkadla michelsonovho interferometru o polovicu vlnovej dĺžky svetelného zdroja dôjde vo výstupnom signále ku zmene fáze o jednu celú periódu  $\Delta\varphi = 2\pi$  a bez merania zmeny fáze by sme neboli schopný určiť, že vôbec došlo k posuvu. Avšak aj s meraním fáze sme schopný určiť len relatívne posunutie čo je niekedy nedostačujúce.

## 2.6 Vplyv prostredia na interferometrické merania

Možnosť merania v nanometrických rozmerov kladie veľké nároky na citlivosť interferometrov voči rôznym rušivým vplyvom. Pretože je vlnová dĺžka svetla závislá na indexe lomu prostredia, ktorým je väčšinou vzduch a index lomu vzduchu je funkciou tlaku, vlhkosti, teploty a chemického zloženia vzduchu (hlavne obsah  $\text{CO}_2$ ), je treba tieto vplyvy patrične kompenzovať [4]. Významným rušivým vplyvom v interferometrii je takisto šum vznikajúci v dôsledku mechanických alebo akustických vibrácií okolitého prostredia.

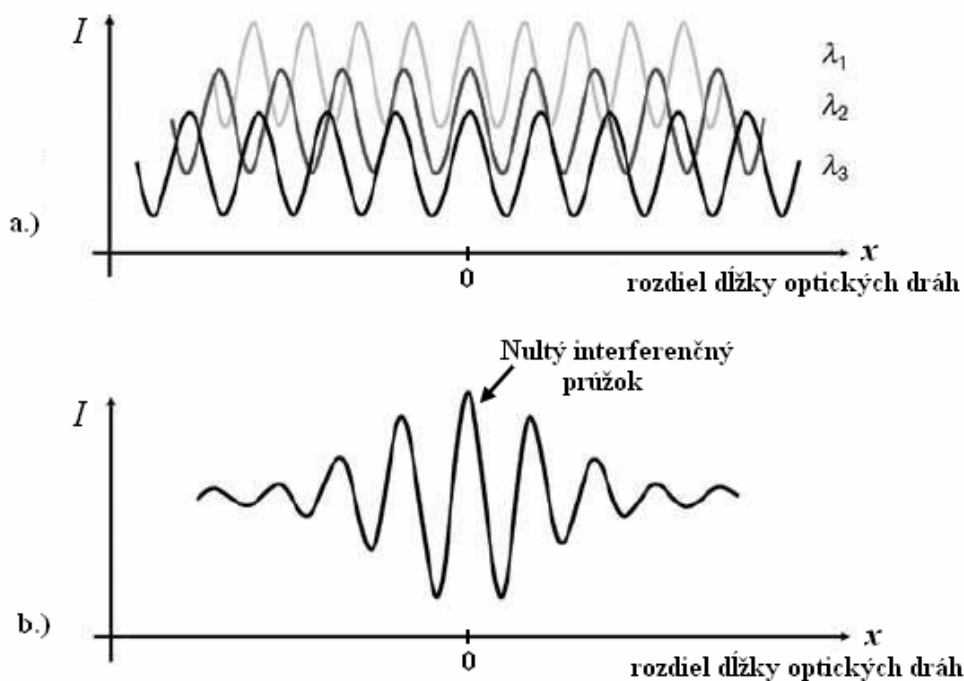


## 3 INTERFEROMETRIA NÍZKEJ KOHERENCIE

Rovnako ako *Laserová interferometria* využíva aj *Interferometria nízkej koherencie* (ďalej už len *LCI – Low Coherence Interferometry*) meranie výslednej intenzity  $I$  rozdelených a následne opätovne spojených vlnení. Na rozdiel od *Laserovej interferometrie* však *LCI* využíva širokopásmové svetelné zdroje so šírkou pásma od desiatok po stovky nanometrov. Práve vďaka použitiu širokopásmového svetelného zdroja eliminuje tento druh interferometrie problém s fázovou nejednoznačnosťou a umožňuje tak merať absolútne hodnoty posunutia (rozmerov).

### 3.1 Princíp činnosti

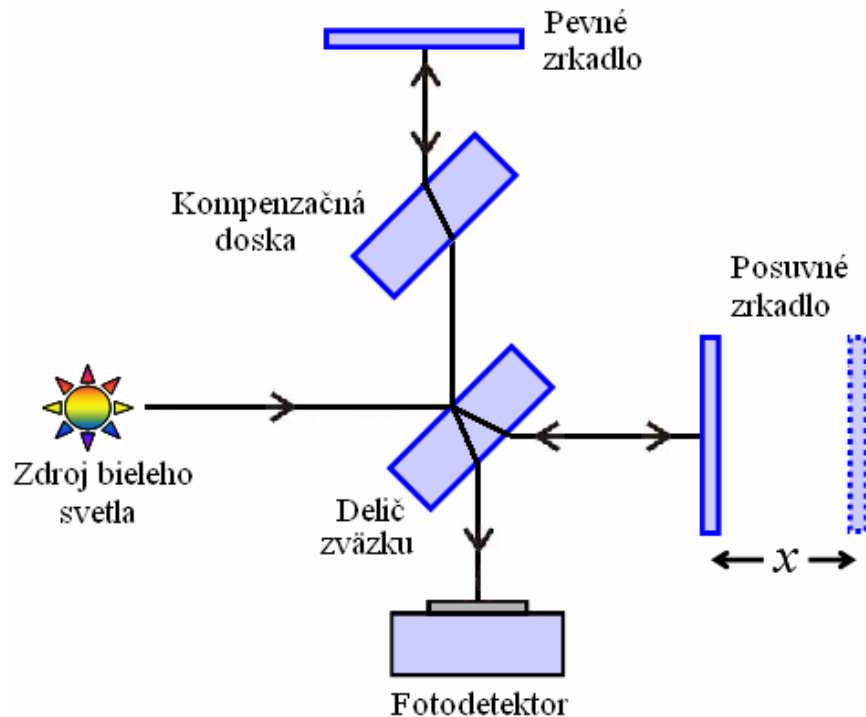
Biele svetlo je superpozíciou jednotlivých zložiek jeho spektra. Vďaka tejto jeho vlastnosti je možné si interferometer s takýmto zdrojom svetla predstaviť obdobne ako laserový interferometer, ktorý pre každú zložku (vlnovú dĺžku) spektra vytvorí interferogram s odlišnou periódou interferenčných prúžkov tak ako je to znázornené na Obr. 3.1a. Na fotodetektore sa však zaznamená len suma jednotlivých intenzít (kontrastov). Pretože je perióda prúžkov pre každú vlnovú dĺžku zdroja rôzna, bude suma intenzít maximálna len v jednom bode v ktorom je rozdiel dĺžky optických dráh pre všetky vlnové dĺžky rovný nule (Obr. 3.1a). Pri pohybe od tohto bodu s nulovým rozdielom klesá suma intenzít veľmi rýchlo tak ako to ukazuje Obr. 3.1b. Prúžok s maximálnou intenzitou označuje polohu nulového rozdielu dĺžky optických dráh a nazýva sa nultý interferenčný prúžok. Pri aplikovaní predchádzajúcich tvrdení napríklad na michelsonov interferometer znamená lokalizovanie polohy nultého prúžku nájdenie rovnovážnej polohy (dĺžky ramien sa rovnajú) a to umožňuje určenie absolútnej vzdialenosti posuvného zrkadla. Cieľom *LCI* je teda získať čo najkvalitnejší interferogram a následne pomocou algoritmov lokalizovať polohu nultého interferenčného prúžku [3].



**Obr. 3.1:** a.) interferenčné prúžky pre jednotlivé vlnové dĺžky b.) výsledný interferogram získaný sumou vlnení jednotlivých vlnových dĺžok [3].

### 3.2 Michelsonov interferometer v Interferometrii nízkej koherencie

Pri použití michelsonovho interferometru so zdrojom nízko koherentného svetla je nutné kompenzovať disperziu vlnenia (viď podkapitola 3.3) ku ktorej dochádza na deliči zväzku. Tá spôsobí rozdielny fázový posuv medzi jednotlivými zložkami spektra v meracej a referenčnej vetve interferometru. To má za následok odlišnú polohu nulového rozdielu dĺžky optických dráh pre jednotlivé zložky spektra a tým aj zmenu intenzity a posun prúžkov výsledného interferogramu. Aby poloha bodu s nulovým rozdielom dĺžky optických dráh zostala rovnaká pre všetky zložky spektra vkladá sa do vetvy interferometru v ktorej vlnenie neprechádza deličom zväzku tzv. kompenzačná doska. Tá je zhotovená z rovnakého materiálu ako delič a má rovnakú hrúbku. Na Obr. 3.2 je znázornený princíp kompenzácie disperzie pridaním kompenzačnej dosky u michelsonovho interferometru.



Obr. 3.2: Michelsonov interferometer s kompenzačnou doskou [7].

### 3.3 Disperzia

Každé prostredie ktorým sa šíri svetlo je charakterizované indexom lomu  $n$ . Ten vyjadruje pomer rýchlosti šírenia svetla v danom prostredí voči rýchlosti svetla vo vákuu a platí vzťah:

$$n = \frac{c_0}{v} \quad (3.1)$$

kde:

$n$  - index lomu,

$c_0$  - rýchlosť svetla vo vákuu,

$v$  - rýchlosť svetla pre dané prostredie.

Index lomu však nie je konštantou ale je závislý od frekvencie vlnenia  $f$  (s výnimkou vákuu kde  $n = 1$  pre celé spektrum). Pretože pre vlnovú povahu svetla platí nasledujúci vzťah:

$$\lambda = \frac{v}{f} = \frac{c_0}{n \cdot f} \quad (3.2)$$

kde:

$\lambda$  - vlnová dĺžka,

$f$  - frekvencia vlnenia,

$n$  - index lomu,

$c_0$  - rýchlosť svetla vo vákuu ,

$v$  - rýchlosť svetla pre dané prostredie.

je zrejmé, že aj rýchlosť šírenia  $v$  a vlnová dĺžka  $\lambda$  vlnenia sa menia v závislosti na jeho frekvencii [2]. Táto závislosť sa nazýva disperziou. Spôsobuje napríklad závislosť uhlu lomu na frekvencii čo je vo všeobecnosti známe hlavne ako rozklad viditeľného svetla na jednotlivé farebné zložky po prechode optickým hranolom alebo kvapkami dažďa (dúha). V praxi spôsobuje disperzia napríklad rozťahovanie šírky polychromatického svetelného impulzu v čase pri jeho prechode optickým vláknom. Vplyv disperzie na LCI je popísaný v predchádzajúcej podkapitole.

### 3.4 Svetelné zdroje

Výber vhodného zdroja bieleho svetla je pre LCI veľmi dôležitým faktorom. V praxi sa používajú napríklad halogénové lampy, biele LED diódy, vysoko svietivé diódy (SLD) a iné zdroje. Každý z týchto zdrojov má odlišné spektrum a preto vytvárajú odlišné obálky interferenčných prúžkov. Šírka obálky prúžkov je určená šírkou spektra zdroja (viď kapitola 0). Čím je spektrum širšie, tým je obálka užšia a tým presnejšie je možné určiť polohu nultého prúžku [3].

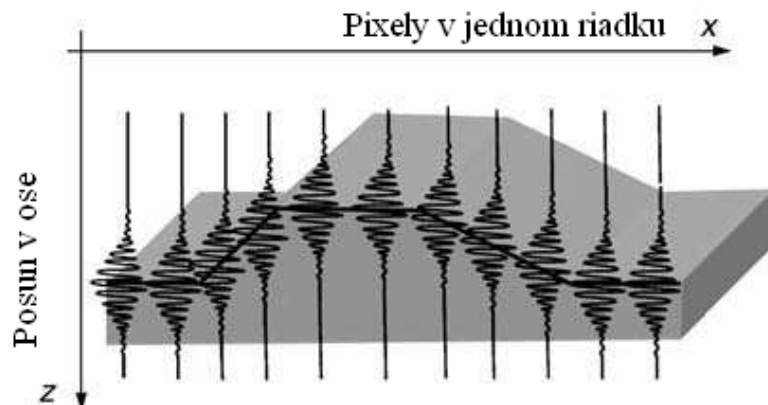
### 3.5 Aplikačné oblasti

Aplikácii v ktorých si LCI našla uplatnenia je celá rada a s vývojom techniky pribúdajú stále ďalšie. Najčastejšie využitie má táto meracia metóda v priemysle a to hlavne v mikroelektronike a MEMS, veľmi často sa tiež používa v oblasti vedy, výskumu a lekárskej techniky. V nasledujúcom texte sú uvedené niektoré najčastejšie aplikačné oblasti.

#### 3.5.1 Meranie výškového profilu

Pri použití LCI s michelsonovým interferometrom na meranie výškového profilu povrchu MEMS alebo iných súčiastok mikroskopických rozmerov sa nahrádza pevné zrkadlo vzorkom, ktorého povrch má byť meraný. Posuv posuvného zrkadla zabezpečuje piezoelektrický mikroposuv a ako fotodetektor sa používa CCD snímač

ktorý zaznamenáva interferogram jednotlivo pre každý pixel tak ako je znázornené na Obr. 3.3. Nájdením nulového rozdielu optických dráh vlnení pre každý pixel sa určí absolútna výška povrchu zodpovedajúca danému pixelu. Tak je možné vytvoriť 3D model povrchu súčiastky.



**Obr. 3.3:** Priebiehy relatívnej intenzity osvetlenia zaznamenané jednotlivými pixelmi v jednom riadku [3] .

Horizontálne rozlíšenie tejto technológie je obmedzené kvalitou CCD snímača zatiaľ čo vertikálne rozlíšenie závisí hlavne na šírke spektra použitého svetelného zdroja a algoritme spracovávajúcom signál z interferogramu.

Obdobnou metódou je možné kontrolovať presnosť hladkých povrchov. V takom prípade musia byť priebiehy interferogramov pre všetky pixely zhodné. Ak tomu tak nie je, na povrchu sa nachádza nerovnosť.

### 3.5.2 Meranie hrúbky tenkých vrstiev

Pri tomto meraní sa pevné zrkadlo nahradí tenkou vrstvou (filmom) ktorej hrúbku chceme určiť. Následne sa pri posuve posuvného zrkadla zaznamená interferogram, ktorý bude v tomto prípade obsahovať dve miesta s interferenčnými prúžkami. Tieto miesta zodpovedajú odrazom vlnenia od vrchnej a spodnej vrstvy filmu. Vzďialenosť oblastí s nultými interferenčnými prúžkami zodpovedá hrúbke meranej vrstvy.

### 3.5.3 Optická koherenčná tomografia OCT

Je príkladom využitia LCI v lekárskej technike. Podobne ako ultrazvukové zobrazovanie, ktoré meria dobu letu signálu odrazeného od rôzneho druhu tkaniva, analyzuje aj OCT odrazený svetelný signál. Pretože je ale rýchlosť svetla mnohonásobne vyššia ako rýchlosť zvuku, využíva sa miesto merania doby letu princíp

interferometrie nízkej koherencie. Miesto z ktorého sa svetlo odrazilo sa určuje analýzou signálu z interferogramov [7].

### **3.5.4 Kontrola kvality automatizovaných výrobných procesov**

Vývoj nových druhov osvetlenia ako sú napr. biele LED diódy, stále sa zdokonaľujúce technológie výroby CCD snímačov a tiež narastajúci výpočtový výkon mikropočítačových systémov prispievajú k vývoju rýchlejších a presnejších interferometrov pre automatické meranie a následnú kontrolu povrchu pomocou LCI. Príkladom môže byť [11].

Uvedené príklady využitia predstavujú len časť z aplikácií v ktorých sa dnes LCI využíva. Ďalšie oblasti použitia je možné nájsť napríklad v [3],[6],[12],[15].

## 4 ALGORITMY PRE DETEKCIU STREDU INTERFERENČNÉHO PRÚŽKU V LCI

Ideálny interferogram z *LCI* je symetrický okolo bodu s nulovým rozdielom optických dráh. Z toho je zrejmé, že najjednoduchším spôsobom určenia nultého prúžku by bolo zistenie polohy maximálnej intenzity (vid' Obr. 3.1). Rozdiel intenzity medzi nultým a susednými prúžkami je však relatívne malý (závisí od spektra svetelného zdroja) a preto by musel byť pomer užitočného signálu k šumu (SNR) dostatočne veľký, aby nedošlo k chybnéj identifikácii. Dosiahnuť vysoké hodnoty SNR v praktických aplikáciách je pomerne zložité ako aj získanie ideálne symetrického interferogramu. Z tohto dôvodu sa v posledných desaťročiach vyvinulo viacero druhov algoritmov pre detekciu stredu interferenčných prúžkov. Každý z nich má určité výhody alebo nevýhody pokiaľ ide o dosahovanú presnosť, odolnosť voči šumu alebo výpočtovú náročnosť. V nasledujúcom texte sú podrobnejšie predstavené najčastejšie používané algoritmy:

- *Váhovanie stredu*
- *Analýza vo frekvenčnej oblasti*
- *Posúvanie fáze*
- *Koherentná korelácia*

Pretože sa v dnešnej dobe jedná prevažne o analýzu diskretných signálov bude vo všetkých prípadoch intenzita reprezentovaná v podobe vektora skalárných hodnôt:

$$I(n) = [I(1) \ I(2) \ I(3) \ \dots \ I(N)] \quad n = 1, 2, 3, \dots, N \quad (4.1)$$

kde:

*I* - vektor zaznamenaných intenzít,

*N* - veľkosť vektora zaznamenaných intenzít,

*n* - index jednotlivých prvkov vektoru.

Dôležitým parametrom vystupujúcim pri spracovaní signálu z *LCI* je tiež stredná vlnová dĺžka zdroja svetla  $\lambda_0$ , ktorá je vo väčšine algoritmov známa.

Aby sme mohli čo najpresnejšie určiť polohu stredu interferenčných prúžkov, musí byť vzorkovacia priestorová perióda veľmi malá. To však kladie vysoké nároky na vzorkovací hardware a výsledkom je veľké množstvo dát, ktoré požaduje patričný výpočtový výkon. Preto sa dnešné algoritmy zameriavajú viac na dosiahnutie čo najvyššej presnosti merania s menším počtom zaznamenaných dát.

## 4.1 Váhovanie stredu

Hlavnou myšlienkou algoritmu *Váhovanie stredu* je určenie ťažiska interferenčných prúžkov, ktoré vychádza z analógie určovania ťažiska telesa. Postup získania požadovanej informácie môže byť rozdelený na dva kroky [20] a to:

- *Identifikácia nultého prúžku*
- *Vylepšenie rozlíšenia*

### 4.1.1 Identifikácia nultého prúžku

Identifikácia nultého prúžku pozostáva z troch hlavných častí, ktorými sú normalizácia, adaptívne filtrovanie a určenie ťažiska.

#### 1) Normalizácia

Normalizácia odstráni zo zaznamenaných dát jednosmernú zložku a tým ich pripraví pre následnú filtráciu. Po normalizovaní bude celkový priemer dát rovný nule. Vyjadrená môže byť nasledovne:

$$I_{norm}(n) = I(n) - \frac{\sum_{n=1}^N I(n)}{N} \quad (4.2)$$

kde:

$I_{norm}$  - normalizovaný vektor zaznamenaných intenzít,

$I$  - vektor zaznamenaných intenzít,

$N$  - veľkosť vektora zaznamenaných intenzít,

$n$  - index jednotlivých prvkov vektoru.

#### 2) Adaptívne filtrovanie

Adaptívne filtrovanie sa používa na odstránenie šumových dát z oboch strán obálky prúžkov. Vykonáva sa v dvoch krokoch. Najprv program roztriedi do skupín všetky príslušné dáta s rovnakým znamienkom. Takto vzniknuté skupiny obsahujú kladné a záporné interferenčné poloprúžky ako aj náhodné prúžky spôsobené šumom. Na rozdiel od šumových prúžkov, majú interferenčné prúžky pevnú priestorovú frekvenciu. Za predpokladu konštantného vzorkovania  $S$  (počet vzoriek na prúžok), určeného zo známej frekvencie vzorkovania a strednej vlnovej dĺžky, by mal každý poloprúžok zodpovedať približne  $S/2$  počtu dát. Na základe uvedených predpokladov program zistí šírku každej skupiny dát,  $w_j$ , a pokiaľ platí:



$$w_j > S/2 + t \quad \text{alebo} \quad w_j < S/2 - t \quad (4.3)$$

kde:

$w_j$  - šírka skupiny dát (počet dát v skupine),

$S$  - počet vzoriek na prúžok,

$t$  - tolerancia.

je skupina považovaná za šum a všetky jej dáta sú odfiltrované na nulovú hodnotu.

Môže sa však stať, že aj skupina šumových dát bude spadať do požadovaného rozsahu šírky dát. Skupiny tvorené interferenčnými poloprúžkami sa od nich dajú odlíšiť, pretože sú spojite prilahlé jeden k druhému na rozdiel od šumových, ktoré sú náhodne roztrúsené. Druhým krokom je preto sčítanie počtu skupín,  $N_p$ , ktoré su navzájom prilahlé. Ak platí že:

$$N_p < L_p \quad (4.4)$$

kde:

$N_p$  - zistený počet navzájom prilahlých skupín,

$L_p$  - minimálny požadovaný počet navzájom prilahlých skupín určený z počtu vzoriek na prúžok  $S$  a známej koherenčnej dĺžky zdroja  $L_c$ .

potom sú dáta v týchto skupinách opäť vynulované.

Po uvedených úpravách zostanú vo vektore zaznamenaných dát len prúžky s dobrou kvalitou vhodné pre ďalší krok algoritmu.

### 3) *Určovanie ťažiska*

Z odfiltrovaných dát sa získa poloha ťažiska  $c$  všetkých prúžkov zo vzťahu:

$$c = \frac{\sum_{n=1}^N (|I_{norm}(n)| \cdot n)}{\sum_{n=1}^N |I_{norm}(n)|} \quad (4.5)$$

kde:

$c$  - poloha ťažiska (stred) prúžkov,

$I_{norm}$  - normalizovaný vektor zaznamenaných intenzít,

$N$  - veľkosť vektora zaznamenaných intenzít,

$n$  - index jednotlivých prvkov vektoru.

Průžok, ležiaci najbližšie k polohe  $c$  je považovaný za nultý průžok.

Nakoľko môže ťažisko ležať kdekoľvek v nultom průžku je presnosť určenia stredy průžkov týmto postupom približne rovná  $\pm\lambda_0$  čo je väčšinou nedostačujúce. V ďalšej podkapitole je uvedený princíp zvýšenia presnosti tejto metódy.

## 4.1.2 Vylepšenie rozlíšenia

Po identifikovaní nultého interferenčného průžku sa poloha nulového rozdielu optických dráh určí výpočtom ťažiska nultého průžku  $c_n$ . Existujú dva mierne odlišné algoritmy využívajúce tento princíp. Prvý počíta ťažisko zo svetlej oblasti nultého průžku (viď Obr. 4.1), tj. využíva len kladných hodnôt intenzity v tomto průžku. Preto sa tento algoritmus nazýva ťažiskom svetlého průžku a značí sa  $c_{ns}$ . Druhý algoritmus počíta ťažisko zo všetkých dát nultého průžku, preto sa nazýva ťažiskom celého průžku a značí sa  $c_{nc}$ . Vzťahy pre výpočet uvedených ťažísk sú:

$$c_{ns} = \frac{\sum_{n=v1}^{v2} (I_{norm}(n) \cdot n)}{\sum_{n=v1}^{v2} I_{norm}(n)} \quad (4.6)$$

$$c_{nc} = \frac{\sum_{n=u1}^{u2} [(I_{norm}(n) + 1) \cdot n]}{\sum_{n=u1}^{u2} (I_{norm}(n) + 1)} \quad (4.7)$$

kde:

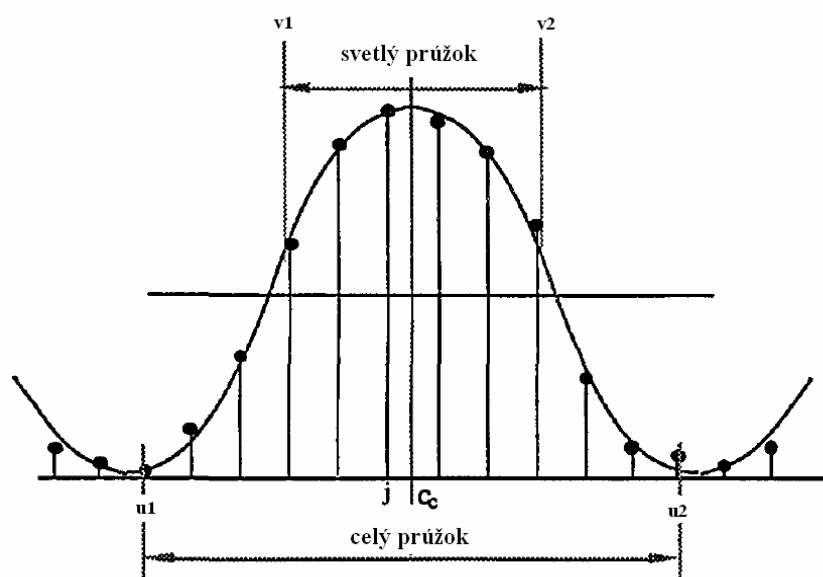
$c_{ns}$  - poloha ťažiska svetlého nultého průžku,

$c_{nc}$  - poloha ťažiska celého nultého průžku,

$I_{norm}$  - normalizovaný vektor zaznamenaných intenzít,

$N$  - veľkosť vektora zaznamenaných intenzít,

$n$  - index jednotlivých prvkov vektoru.



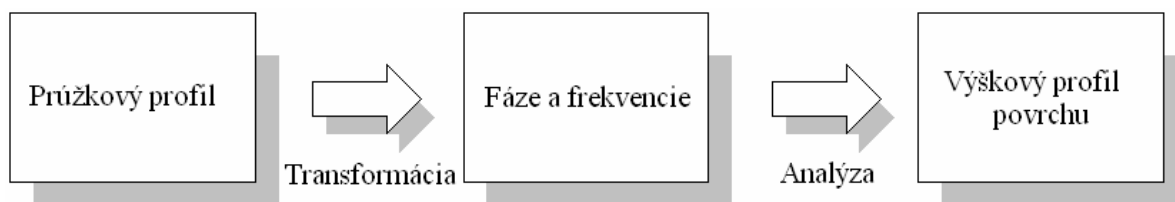
**Obr. 4.1:** Dva druhy oblastí pre určovanie ťažiska nultého prúžku [20].

### Výhody a nevýhody

Z uvedeného textu vyplýva hlavná výhoda a to, že sa jedná o výpočetne jednoduchý algoritmus, avšak kvôli jeho slabej odolnosti voči šumu je vhodný skôr na spracovanie signálu pri elektrickom skenovaní povrchu kde nedochádza k mechanickému pohybu a s tým spojeným vibráciám. V prípade skenovania mechanického sú bez použitia adaptívneho filtrovania výsledky veľmi nepresné. Nevýhodou je tiež nemožnosť kompenzácie prípadnej disperzie v interferometri.

## 4.2 Analýza vo frekvenčnej oblasti

Algoritmus *Analýzy vo frekvenčnej oblasti* (ďalej len *FDA – Frequency Domain Analysis*) je matematická metóda pre spracovanie interferogramov v zmysle fázy  $\varphi$  a priestorových frekvencií  $k$  za účelom získania informácie o výškovom profile skúmaného povrchu. Namerané dáta intenzity s prúžkovým profilom sa prevádzajú prostredníctvom vhodnej transformácie do oblasti priestorových frekvencií kde sa následne analyzujú a je z nich určený výškový profil povrchu.



**Obr. 4.2:** Princíp algoritmu *FDA*.

### 4.2.1 Princíp metódy FDA

Podstatou tejto metódy je predstava interferogramu v LCI ako superpozície interferencií jednotlivých vlnových dĺžok spektra (viď podkapitola 3.1) s maximom v polohe so zhodnou fázou. Pri vzdialovaní sa od bodu nulového rozdielu optických dráh, sa fáza interferogramu mení podľa vzťahu:

$$\varphi = k \cdot x + \varphi_0 \quad (4.8)$$

kde:

$x$  - rozdiel dĺžky optických dráh,

$\varphi_0$  - počiatočná fáza,

$k$  - priestorová frekvencia (vlnové číslo).

Priestorová frekvencia  $k$  zodpovedá príslušnej vlnovej dĺžke  $\lambda$ . Fáza  $\varphi$  je teda závislá nielen na zmene optického dráhového rozdielu  $x$ , ako je tomu u *Laserovej interferometrie*, ale takisto na priestorovej frekvencii  $k$ . Pre rôzne priestorové frekvencie  $k$  sa fáza mení rôznou rýchlosťou. Veľkosť tejto zmeny sa získa deriváciou predošlého vzťahu podľa  $k$ :

$$\frac{d\varphi}{dk} = x \quad (4.9)$$

kde:

$\frac{d\varphi}{dk}$  - derivácia fáze podľa priestorovej frekvencie,

$x$  - rozdiel dĺžky optických dráh.

Z tohto vzťahu je zrejmé, že práve veľkosť zmeny fáze s vlnovým číslom  $k$  je požadovanou informáciou o rozdiely optických dráh a teda aj o výškovom profile skúmaného povrchu.

### 4.2.2 Prevod dát do frekvenčnej oblasti

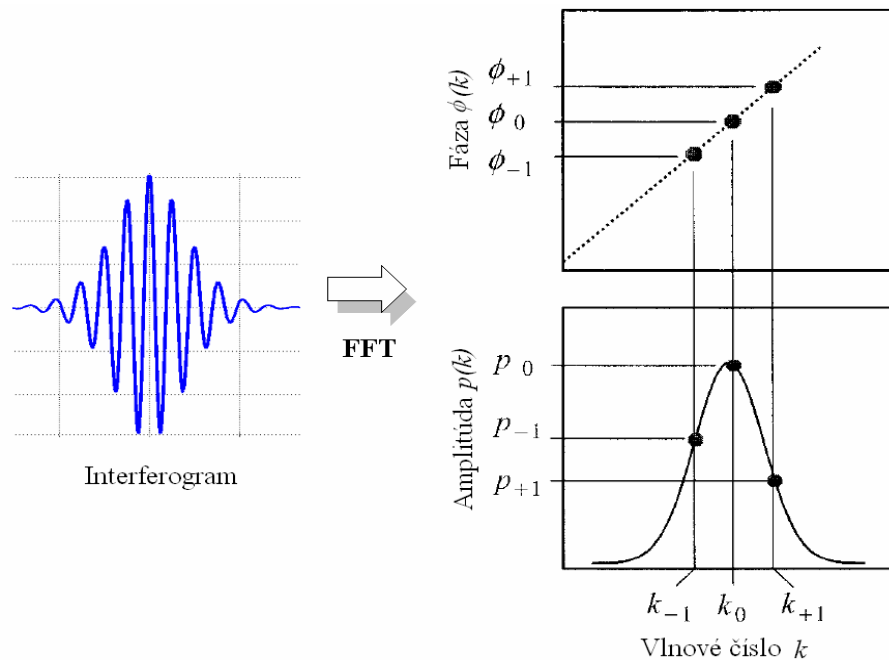
Aby bolo možné určiť závislosť zmeny fáze na priestorovej frekvencii je treba získať informáciu o fázach jednotlivých priestorových frekvencií, ktoré prispievajú k vzniku interferogramu. Toho sa dosiahne aplikáciou Fourierovej transformácie na dáta zaznamenanéj intenzity z priestorovej oblasti. Pretože sa jedná o diskrétna dáta využíva sa diskrétna forma Fourierovej transformácie (DFT). Presnejšie ide o výpočetne efektívnejší algoritmus rýchlej Fourierovej Transformácie (FFT), ktorý vyžaduje  $N \cdot \log(N)$  aritmetických operácií oproti  $N^2$  operáciám potrebným pre DFT, kde  $N$  je

počet spracovávaných dát. Vývoj efektívnejšieho algoritmu FFT značnou mierou prispel k rozšíreniu aplikačných oblastí metódy FDA.

### 4.2.3 Analýza dát vo frekvenčnej oblasti

Na Obr. 4.3 je zobrazená závislosť amplitúdy a fáze zložiek spektra na vlnovom čísle v oblasti priestorových frekvencií, získaných z dát interferogramu aplikáciou Fourierovej transformácie. Ako bolo uvedené v predchádzajúcom texte, pre určenie polohy nulového rozdielu optických dráh sú zaujímavé dáta závislosti fáze jednotlivých zložiek spektra na ich priestorovej frekvencii.

Hľadaná veľkosť zmeny fáze s priestorovou frekvenciou (vlnovým číslom), ktorá zodpovedá rozdielu optických dráh, je rovná smernici priamky spájajúcej jednotlivé body grafu.



**Obr. 4.3:** Závislosť amplitúdy a fáze na vlnovom čísle získanej ako výsledok Fourierovej transformácie interferogramu z LCI [23].

#### Výhody a nevýhody

Nevýhodou tohto algoritmu je pomerne vysoká výpočtová náročnosť. Poskytuje však dobrú odolnosť voči šumu, ktorý je odfiltrovaný v spektrálnej oblasti a umožňuje kompenzáciu prípadnej disperzie. Práve vďaka uvedeným výhodám patrí k najčastejšie používaným algoritmom spracovania signálu v interferometrii nízkej koherencie.

### 4.3 Posúvanie fáze

Algoritmus *Posúvania fáze* (ďalej len *PSI - Phase Shifting Interferometry*) je veľmi rozšírený hlavne v *Laserovej interferometrii* kde je modulácia  $M$  (kontrast) interferenčných prúžkov konštantná a z hodnôt intenzít snímaných s vopred určenou vzorkovacou vzdialenosťou (typicky štvrtina vlnovej dĺžky) sa vypočítava fáza interferogramu. Pre jej výpočet existuje veľa rôznych algoritmov a niektoré najčastejšie používané sú uvedené napr. v [24].

V interferometrii nízkej koherencie modulácia prúžkov nie je konštantná ale mení sa v závislosti na koherenčnej dĺžke použitého zdroja svetla a rozdiely optických dráh. Preto je nutné vykonať určité aproximácie aby bolo metódu posúvania fáze možné použiť aj pre *LCI*.

Častý je tiež požiadavok aby algoritmus nebol viazaný len na meranie intenzity s posunom fáze presne po  $\pi/2$ . Nepresnou kalibráciou posuvníka, vplyvom parametrov použitej optickej sústavy alebo ďalších, sa môže posun fáze medzi zaznamenávanými vzorkami líšiť od  $\pi/2$ . Zmena v posune je väčšinou konštantná a nazýva sa lineárnou chybou v posuve fáze. Druhý požiadavok je preto odolnosť voči tejto chybe.

#### Päť-krokové posúvanie fáze

Pre algoritmus *Posúvania fáze* aplikovaný v *LCI* už dnes takisto existuje množstvo modifikácií. Napríklad sedem krokové algoritmy ktoré použitím vhodných koeficientov upravujú vzťahy z *Laserovej PSI* aby splnili požiadavky uvedené v predchádzajúcom texte [24],[25]. Ďalším veľmi populárnym algoritmom je použitie päť krokového posúvania fáze [18], ktorý predpokladá, že modulácia prúžkov  $M$  je konštantná, a určuje polohu nulového rozdielu optických dráh využitím najväčšej hodnoty modulácie interferenčných prúžkov namiesto relatívnej intenzity. Následne sa nastaví krok piezoelektrického posuvu na osminu strednej vlnovej dĺžky  $\lambda/8$  čo zodpovedá fázovému posuvu  $\pi/2$  medzi dvoma susednými snímkami. Hodnota modulácie  $M$  sa vypočíta z piatich snímkou intenzity  $I_1 \sim I_5$  podľa vzťahu ( 4.10 ). Pre najväčšiu hodnotu modulácie sa zaznamená číslo sekvencie  $N$ . Vypočíta sa fázový posun interferogramu  $\Delta\varphi$  ( 4.11 ), z ktorého sa spolu s číslom  $N$  následne určí výška povrchu podľa vzťahu ( 4.12 ).

$$M^2 \propto (I_2 - I_4)^2 - (I_1 - I_3)(I_3 - I_5) \quad (4.10)$$

$$\Delta\varphi = \arctg\left[\frac{2I_2 - I_4}{2I_3 - I_5 - I_1}\right] \quad (4.11)$$

$$Z = N \cdot (\lambda/8) + \Delta\varphi \cdot \lambda/2\pi \quad (4.12)$$

kde:

$M$  - modulácia prúžkov,

$I_1 \sim I_5$  - päť záznamov intenzity so vzájomným fázovým posunom  $\pi/2$ ,

$\Delta\varphi$  - fázový posun interferogramu,

$N$  - číslo sekvencie záznamu,

$Z$  - výška povrchu.

### Výhody a nevýhody

Výhodou algoritmu posúvania fáze je jeho široká rozšírenosť vďaka používaniu v laserovej interferometrii. Existuje preto mnoho viac či menej presných modifikácií pre interferometriu nízkej koherencie. Značnou nevýhodou je však požiadavok na skenovanie v presne určených krokoch, čo v praxi nie je vždy dosť dobre možné [26]. Nevýhodou je tiež slabá odolnosť voči šumu.

## 4.4 Koherentná korelácia

Pod pojmom korelácia sa rozumie miera podobnosti signálov. Obecné vzájomná korelačná funkcia  $R_{xy}$  popisuje ako dva ľubovoľné signály korelujú pri vzájomnom posunutí. Tvar vzájomnej korelačnej funkcie pre signály v diskretnej časovej oblasti je:

$$R_{xy}(k) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} I_1(n)I_2(n+k) \quad (4.13)$$

kde:

$R_{xy}(k)$  - hodnota vzájomnej korelačnej funkcie s posunom  $k$ ,

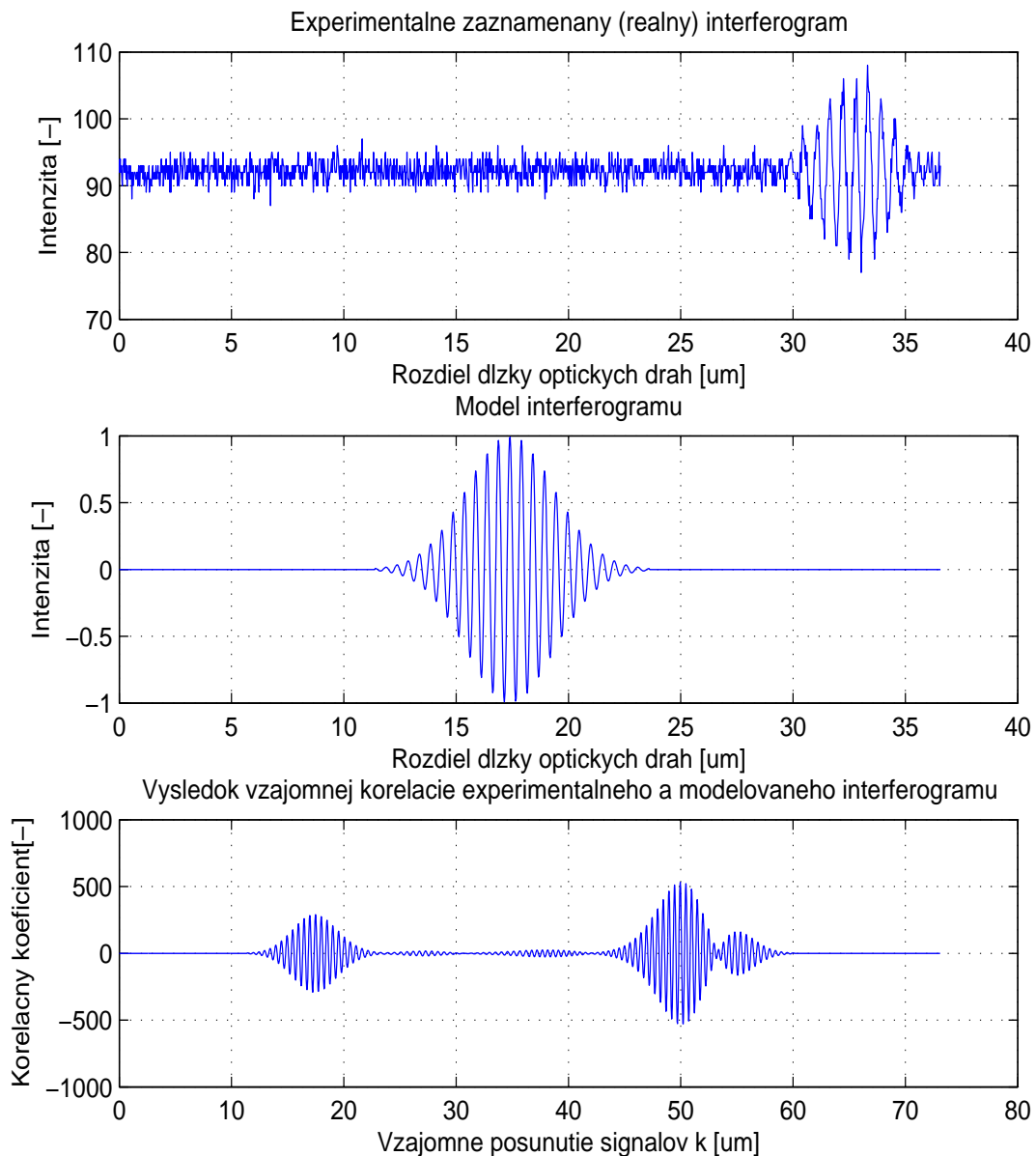
$k$  - vzájomný posun medzi korelovanými signálmi,

$I_1, I_2$  - vektory zaznamenaných intenzít korelovaných signálov,

$N$  - veľkosť vektora zaznamenaných intenzít,

$n$  - index jednotlivých prvkov vektoru.

Pri použití algoritmu *Koherentnej korelácie* sa najprv podľa známych parametrov zdroja svetla (strednej vlnovej dĺžky a koherenčnej dĺžky) namodeluje ideálny signál interferenčných prúžkov s ktorým je následne nameraný (reálny) signál korelovaný (viď. Obr. 4.4) Určenie stredu nameraných interferenčných prúžkov potom vychádza zo znalostí stredu namodelovaných prúžkov a zistenia maximálnej hodnoty korelačnej funkcie. Presnosť tejto metódy je do značnej miery závislá na hustote vzorkovania a presnosti modelu [5].



**Obr. 4.4:** Reálny a modelovaný signál s výsledkom ich vzájomnej korelácie.

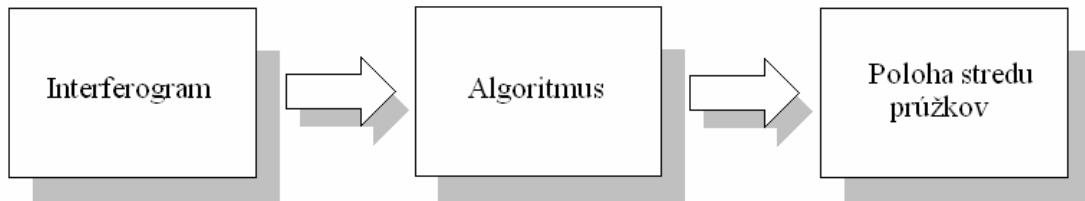
### Výhody a nevýhody

Vďaka princípu fungovania korelácie je tento algoritmus dobre odolný voči šumu a má relatívne nízku výpočtovú náročnosť. Aj napriek tomu, že nedokáže kompenzovať disperziu, patrí v praxi medzi často používané algoritmy.



## 4.5 Algoritmy v prostredí MATLAB

Jednotlivé algoritmy pre detekciu stredu interferenčných prúžkov uvedené v predošlom texte boli implementované do prostredia jazyka MATLAB tak, aby umožňovali čo najjednoduchšie použitie pri ich následnom testovaní na modelovaných a reálnych dátach. Preto je vstupom každého algoritmu vždy len jeden interferogram a výstupom je zistená poloha stredu prúžkov.



**Obr. 4.5:** Zjednodušený princíp fungovania algoritmov.

Konkrétne boli vytvorené v programovom prostredí MATLAB R2009a tieto skripty:

- ***weight\_center*** – vypočítava polohu stredu interferenčných prúžkov podľa postupových krokov algoritmu *Váhovania stredu*
- ***coherent\_correlation*** – vypočítava polohu stredu interferenčných prúžkov podľa postupových krokov algoritmu *Koherentnej korelácie*.
- ***frequency\_domain\_analysis*** – vypočítava polohu stredu interferenčných prúžkov podľa postupových krokov algoritmu *Analýza vo frekvenčnej oblasti*.
- ***phase\_shifting*** – vypočítava polohu stredu interferenčných prúžkov podľa postupových krokov algoritmu *Posúvane fáze*.

## 5 SIMULÁCIA A EXPERIMENTÁLNE MERANIE

Aby bolo možné otestovať a navzájom porovnať algoritmy pre detekciu stredu prúžkov, boli prevedené simulácie a merania na experimentálnom Michelsonovom interferometri. V prvotnej fáze meraní, kde na pozícii fotodetektora bol umiestnený snímač zaznamenávajúci celkovú intenzitu osvetlenia, sa zisťovala len vyvážená poloha interferometru. Po nainštalovaní CCD kamery na pozíciu fotodetektora sa prešlo k hlavnej časti experimentu, ktorou bolo meranie výškového profilu na referenčnom povrchu. Bližší postup týchto meraní je uvedený v nasledujúcich podkapitolách.

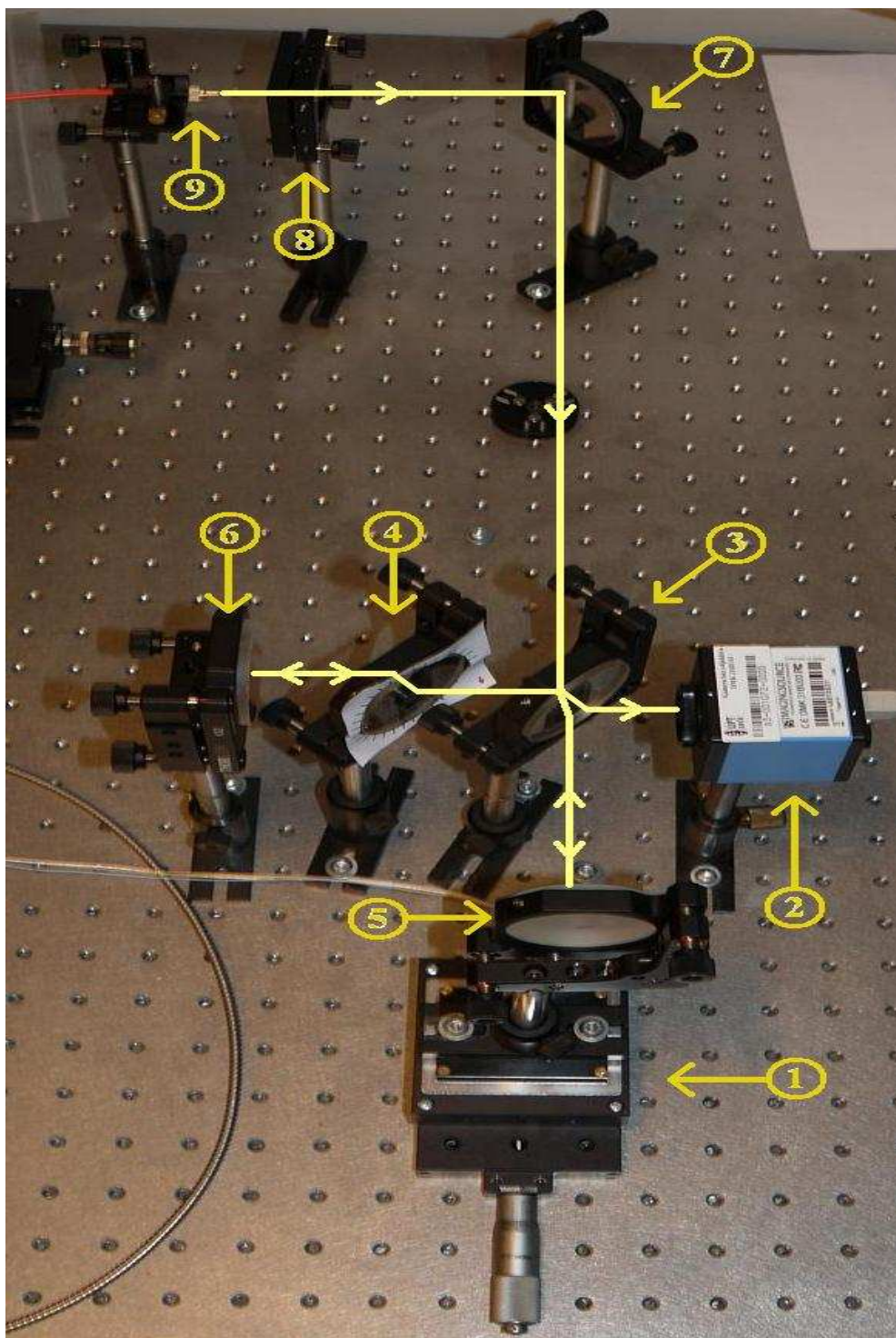
Experimentálna zostava s meracím softvérom však umožňovala testovanie len troch zo štyroch uvedených algoritmov, preto už v ďalšom texte nebude algoritmus *Posúvania fáze* uvažovaný.

### 5.1 Experimentálna zostava

V laboratóriu optiky na Ústave prístrojovej techniky AV ČR, v.v.v.i bol zostavený experimentálny Michelsonov interferometer, ktorého fyzickú realizáciu je možné vidieť na Obr. 5.1 spolu s naznačeným smerom šírenia svetla v interferometri. Detailnejšie informácie o parametroch jednotlivých prvkov zostavy sú uvedené v prílohe 1.

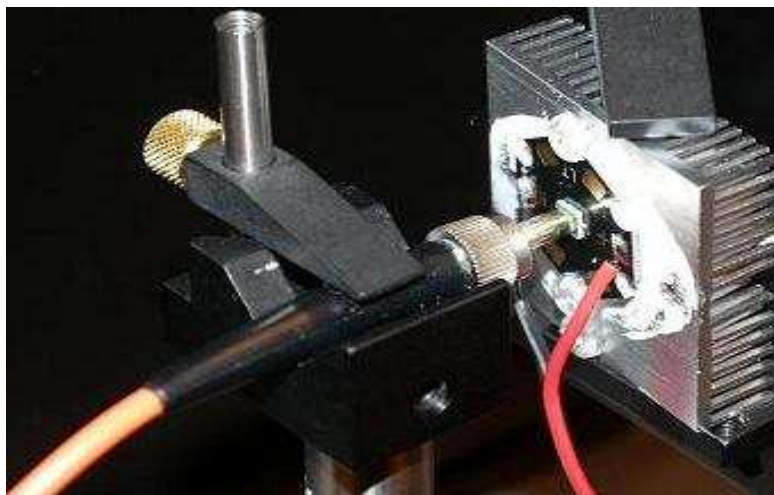
Ako zdroj svetla bola použitá biela vysoko svietivá LED dióda, ktorej svetlo bolo privádzané do interferometra prostredníctvom optického vlákna. Na Obr. 5.1 sú žltou farbou naznačené dráhy svetla vychádzajúceho z optického vlákna a ďalej sa šíriaceho cez interferometer tak ako bolo popísané v podkapitole 0.

V rámci experimentu zo zdrojom svetla boli otestované rôzne varianty kolimácie bieleho svetla do rôznych typov optických vlákien. Najvhodnejším sa aj s ohľadom na jednoduchosť výmeny zdroja ukázalo priloženie vlákna na kontakt s čipom LED diódy, tak ako to znázorňuje Obr. 5.2.



**Obr. 5.1:** Experimentálne zostavenie Michelsonovho interferometru.

- 1) Jednoosý piezoelektrický posuvný stolík, 2) Monochromatická CCD kamera,
- 3) Delič zväzku, 4) Kompenzačná doska, 5) Posuvné zrkadlo, 6) Meraný objekt,
- 7) Zrkadlo usmerňujúce zväzok do interferometru, 8) Kolimátor zväzku,
- 9) Optické vlákno.



**Obr. 5.2:** Napojenie optického vlákna k LED dióde.

## 5.2 Simulácia merania na modelovanom interferograme

Pri prvotných meraniach boli v oboch ramenách interferometra umiestnené rovinné zrkadlá (od firmy Thorlabs s garantovanou rovinnosťou  $\lambda/10$ ) a na mieste CCD kamery bol umiestnený snímač intenzity osvetlenia (fotodetektor s fotodiódou HUV 1100 BG). Pri posúvaní posuvného zrkadla prostredníctvom piezoelektrického posuvu sa snímačom zaznamenávala len intenzita zodpovedajúca priemernej informácii o výške povrchu vzťahnutej k priemeru aktívnej plochy fotodetektoru, spolu s informáciou o posunutí zrkadla. Takto namerané záznamy však neobsahovali informáciu o referenčnom strede prúžkov, takže z nich nebolo možné usúdiť nič o presnosti algoritmov. Z uvedeného dôvodu bola presnosť algoritmov pre detekciu stredu interferenčných prúžkov v tejto časti otestovaná na modely interferogramu so známou polohou stredu prúžkov, ktorý je možné matematicky vyjadriť podľa nasledujúceho vzťahu:

$$I = \cos\left(\frac{2\pi}{\lambda_0} \cdot x\right) \cdot \exp\left[-\left(\frac{2 \cdot x}{L_c}\right)^2\right] \quad (5.1)$$

kde:

$I_1$  - Modelovaná intenzita,

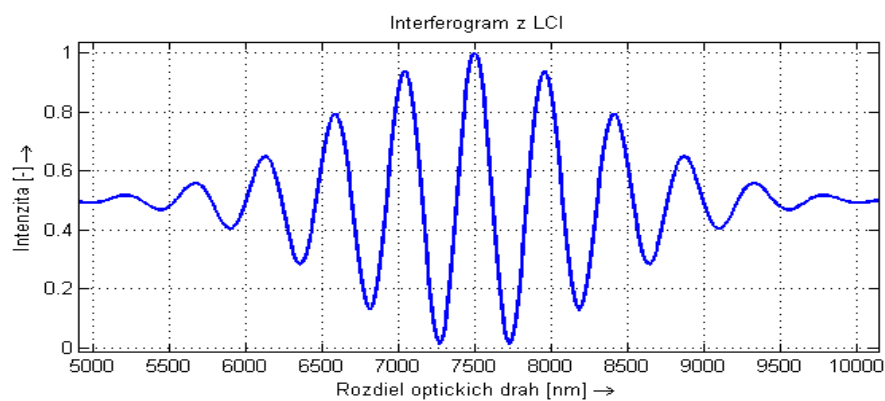
$\lambda_0$  - stredná vlnová dĺžka,

$L_c$  - koherenčná dĺžka zdroja svetla,

$x$  - rozdiel dĺžky optických dráh.

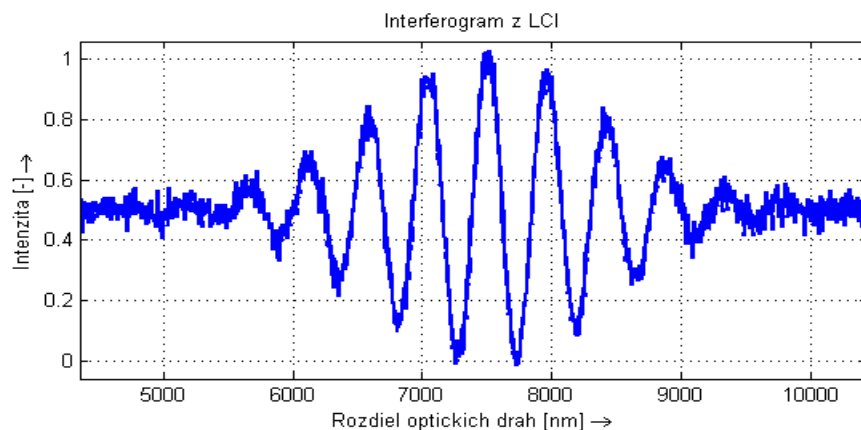
Konkrétne bol k tomuto účelu v programovom prostredí MATLAB R2009a vytvorený skript *simulacia\_merania*, ktorý obsahuje:

- model interferogramu – simulujúci samotné meranie
- spracovanie dát prostredníctvom skriptov vytvorených v predchádzajúcej časti práce a to menovite: *frequency\_domain\_analysis*, *coherent\_correlation*, *weight\_center*, ,
- výsledky detekcie stredy interferenčných prúžkov
- grafické výstupy (viď. Obr. 5.3 a Obr. 5.4)



**Obr. 5.3:** Modelovaný signál interferogramu bez šumu.

K vytvorenému modelu interferogramu bol pridaný biely šum s hodnotou SNR=16 dB tak, aby čo najvernejšie napodobil šum z reálnych záznamov.



**Obr. 5.4:** Modelovaný signál interferogramu s pridaným šumom.

## Výsledky simulácie merania

Poloha stredu prúžkov  $z_{sk}$  v namodelovanom interferograme bola rovná 7500 nm a bola považovaná za nulový rozdiel optických dráh. Postupnou aplikáciou algoritmov na modelovaný signál boli získané hodnoty rozdielu  $\Delta z$ , ktorý je ekvivalentom absolútnej chyby merania medzi skutočnou  $z_{sk}$  (modelovanou) a algoritmami určenou  $z_{alg}$  (zmeranou) polohou stredu interferenčných prúžkov pre každý nich.

$$\Delta z = z_{sk} - z_{alg} \quad (5.2)$$

kde:

$\Delta z$  - rozdiel medzi skutočnou a zistenou polohou stredu prúžkov,

$z_{sk}$  - skutočná poloha stredu prúžkov,

$z_{alg}$  - algoritmom určená poloha stredu prúžkov.

**Tabuľka 5.1** : Porovnanie presnosti jednotlivých algoritmov pre určenie stredu interferenčných prúžkov v LCI na modelovanom signále.

Algoritmus	Váhovanie stredu	Koherentná korelácia	Frekvenčná analýza
$\Delta z$ [nm]	1,60	0,00	0,31

## 5.3 Meranie výšky jamky

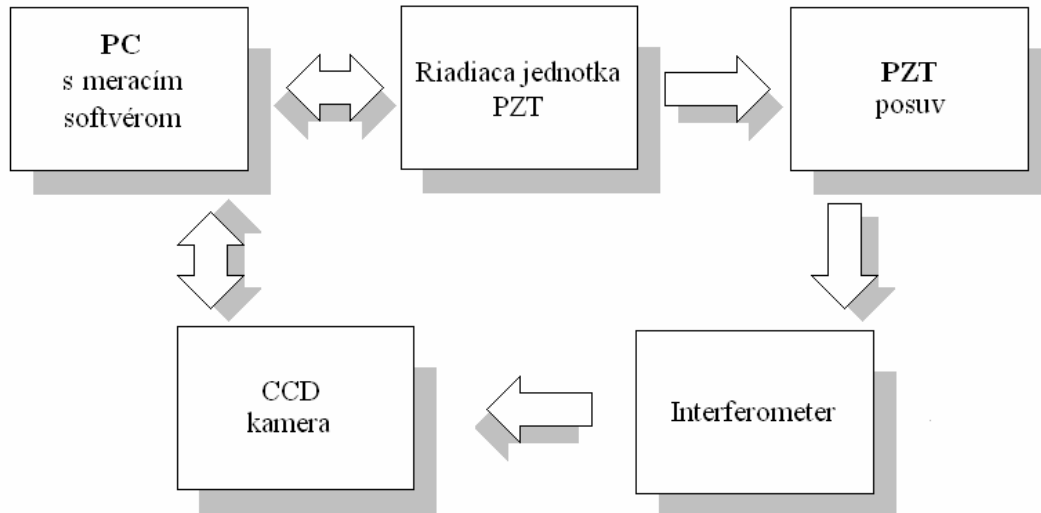
Cieľom druhej časti experimentu bolo vzájomné porovnanie algoritmov a porovnanie výsledkov s referenčným údajom, pri meraní známeho objektu, ktorým bola jamka vyleptaná do kremíkového waferu. Presnejšie sa jednalo o zmeranie výšky  $H$  tejto jamky. Ako referenčný údaj slúžila pri tomto meraní hodnota z profilometra TALYSTEP od firmy Taylor Hobson. Ten určil výšku jamky  $H$  rovnú 12  $\mu\text{m}$ .

Princíp tohoto merania sa zhodoval s princípom popísaným v podkapitole 3.5.1. Na pozíciu fotodetektora v Michelsonovom interferometri bola nainštalovaná monochromatická CCD kamera. Pevné zrkadlo bolo nahradené kremíkovým waferom s vyleptanou jamkou a na miesto pohyblivého zrkadla bol umiestnený rovnaký wafer bez jamky, aby bola zachovaná disperzia svetla pri odraze)

### Postup merania

Samotné meranie výšky jamky prebiehalo na počítači, ktorý obsahoval merací softvér. Ten komunikoval s riadiacou jednotkou piezoelektrického posuvu a zároveň zaznamenával dáta z kamery. PZT posuv pohyboval podľa pokynov z počítača

posuvným zrkadlom, čím dochádzalo k zmene rozdielu optických dráh v ramenách interferometra a následne k interferencii zaznamenávanej kamerou. Merací reťazec je znázornený na Obr. 5.5.



**Obr. 5.5:** Merací reťazec pre experimentálne meranie výšky jamky.

### Počiatkové nastavenie PZT

Pretože PZT posuv umožňoval pohyb len v rozsahu  $800\mu\text{m}$ , bolo na začiatku treba nájsť približne oblasť v ktorej dochádzalo k vzniku prúžkov. V opačnom prípade by sa mohlo stať, že aj pri prejdení celého rozsahu PZT sa interferenčné prúžky neobjavia a zaznamenané dáta by nemalo žiaden význam spracovávať. Nájdenie oblasti prúžkov spočívalo v sledovaní záznamu z kamery v reálnom čase pri zrýchlenom posuve PZT. Ak sa v meranom rozsahu prúžky neobjavili, zmenila sa poloha hrubším manuálnym posuvom o polovicu milimetra a postup sa opakoval až do objavenia prúžkov. Po nájdení oblasti prúžkov bol PZT nastavený tak, aby pri plynulom posuve v jednom smere prešiel obe oblasti výskytu prúžkov (vrch a spodok jamky).

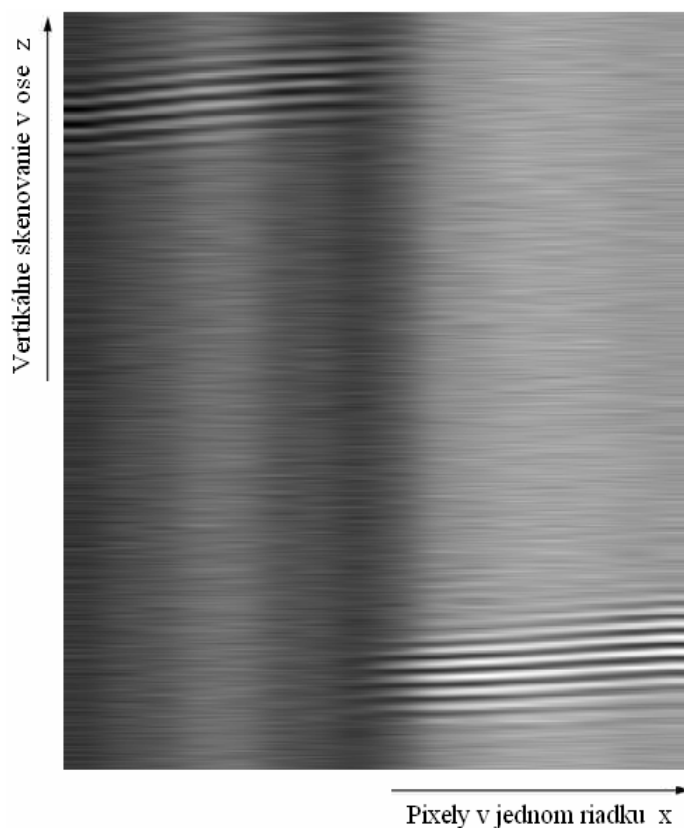
## 5.4 Zaznamenávanie dát

Nakoľko ovládací softvér neobsahoval informáciu o absolútnej hodnote rýchlosti PZT posuvu, bola po jeho nastavení do požadovanej polohy zvolená vhodne malá rýchlosť posuvu (experimentálne zistená) tak, aby kamera snímajúca s maximálnou rýchlosťou 30 obrázkov za sekundu zaznamenala dostatočný počet vzoriek v oblasti prúžkov. V ovládacom softvéri bol následne zvolený režim záznamu dát a spustené meranie. Tento krát sa už pri posúvaní stolíku zvolenou rýchlosťou ukladali obrázky z kamery spolu s informáciou o zodpovedajúcej polohe stolíka. Údaj o polohe bol

získavaný priamo z riadiacej jednotky posuvu s rozlíšením desiatok nanometrov. Po prejdení celého rozsahu s výskytom prúžkov sa meranie ukončilo a zaznamenané dáta boli uložené vo forme textového súboru. Ten obsahoval v prvom stĺpci údaj o polohe a v ostatných stĺpcoch postupne vedľa seba povkladané riadky snímača s hodnotami intenzity.

Pre zníženie výpočtovej náročnosti bolo z kamery s rozlíšením 1024x768 pixlov vybraných 20x16 ekvidištane rozdelených pixlov, čím síce kleslo horizontálne rozlíšenie merania, ktoré je určené veľkosťou pixlov použitého snímača, ale to na určovanie výšky profilu nebolo potrebné. Pretože boli z kamery pre každý pixel vyčítane tri rovnaké hodnoty bol výsledkom merania v konečnom dôsledku textový súbor obsahujúci 961 stĺpcov ( $1+20 \times 16 \times 3$ ) a  $N$  riadkov, kde  $N$  je počet zaznamenaných obrázkov, ktorý je priamoúmerný dĺžke meraného úseku a nepriamoúmerný rýchlosti posuvu PZT stolíka.

Príklad takto zaznamenaných dát je zobrazený na Obr. 5.6, kde je vybraný zo záznamu jeden riadok (20 hodnôt) a výška obrázku zodpovedá  $N$  vzorkom. Na obrázku je tiež dobre zreteľný rozdiel medzi dvoma polohami prúžkov, ktorý zodpovedá výške meranej jamky.



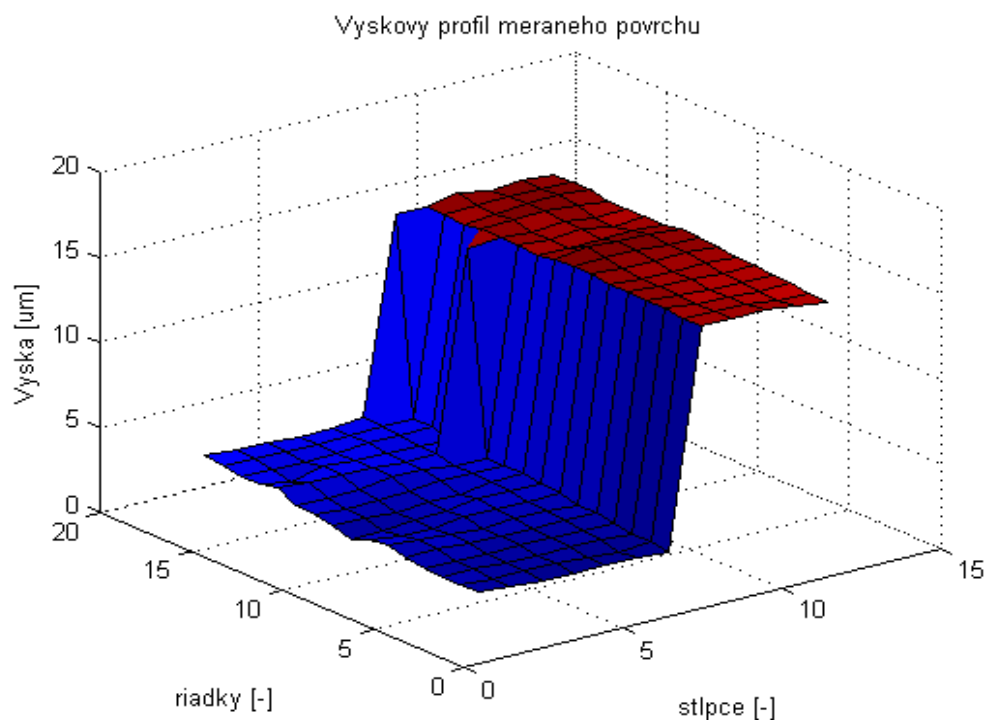
**Obr. 5.6:** Záznam intenzít v jednom riadku CCD snímača pri vertikálnom skenovaní meranej jamky.



## 5.5 Spracovanie nameraných dát

V ďalšej časti práce bol v prostredí MATLAB R2009a vytvorený skript *vyska\_jamky* pre automatické spracovanie dát z experimentálneho merania. Ten previedol dáta z textového súboru na 3D zobrazenie výškového profilu, z ktorého bola následne vypočítaná výška meranej jamky. K získaniu informácie o výškovom profile povrchu boli použité algoritmy implementované v predchádzajúcej časti práce.

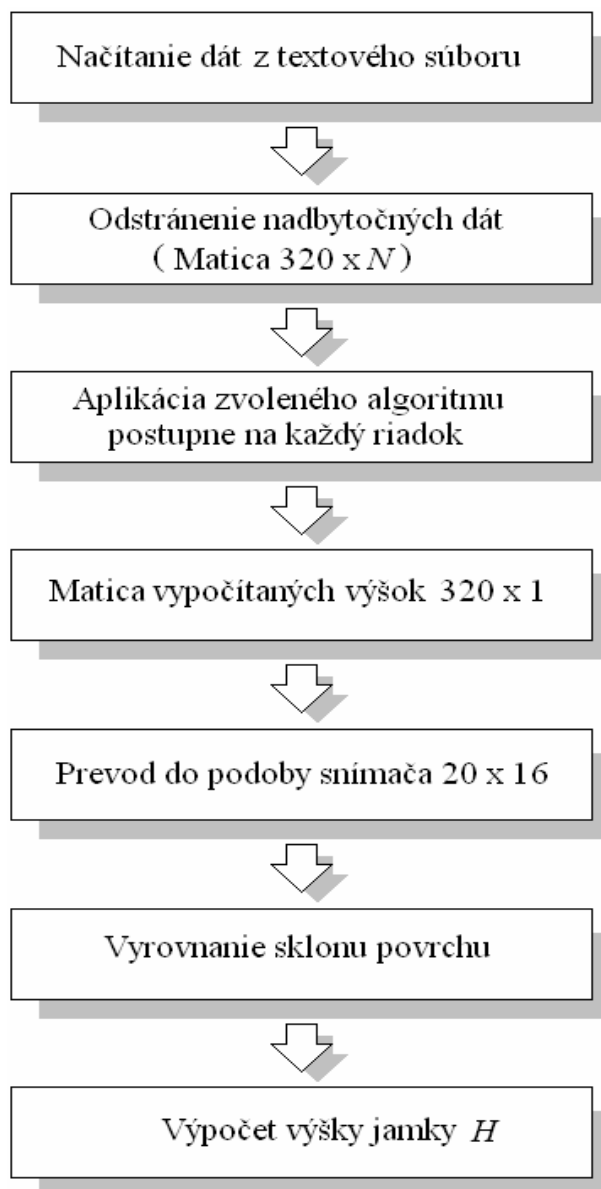
Postup spracovania dát je blokovo znázornený na Obr. 5.8. Po načítaní textového súboru sa odstránia redundantné dáta (pretože každý pixel bol zaznamenaný 3x). Takto sa získa matica intenzít o 320 riadkoch a  $N$  stĺpcoch, a vektor dĺžky  $N$  obsahujúci hodnoty posuvu PZT stolíka. Pretože každý riadok matice zodpovedá jednému pixelu snímača, aplikuje sa v ďalšom kroku zvolený algoritmus detekcie stredu prúžkov postupne na každý riadok. Tak je získaná matica výšok povrchu s 320 riadkami a len jedným stĺpcom, ktorý obsahuje vypočítanú hodnotu polohy stredu prúžkov pre každý riadok. Aby bolo možné získať 3D predstavu o profile povrchu je treba previesť rozmery matice výšok späť na rozmery snímača (20 stĺpcov x 16 riadkov). K tomu stačí preukladať jednotlivé riadky vždy po šesnástich prvkoch vedľa seba do stĺpcov. Takto získaná matica zodpovedá rozmermi dvom rozmerom snímača (riadky x stĺpce) a hodnoty prvkov matice zodpovedajú výškovému (tretiemu) rozmeru. Zobrazením matice v 3D grafe sa získa predstava o tvare povrchu meraného objektu ako je možné vidieť na Obr. 5.7.



**Obr. 5.7:** 3D zobrazenie výškového profilu časti meranej jamky.

Nakoľko sa meranie pohybuje vo veľmi malých rozmeroch je obtiažne dosiahnuť dokonalej kolmosti medzi rovinami zrkadiel (waferov) v interferometri. Z tohto dôvodu má meraná plocha väčšinou určitý nežiadúci sklon, ktorý je treba pred výpočtom výšky eliminovať. Toho sa dosiahne postupnou aproximáciou dát cez stĺpce a riadky, a následným odčítaním aproximovaných hodnôt. Na záver sa vypočíta výška jamky ako rozdiel aritmetického priemeru hodnôt spodnej a vrchnej plochy jamky.

Výsledky merania výšky jamky získané popísaným postupom sú uvedené v nasledujúcej podkapitole a boli ďalej použité pre porovnanie presnosti algoritmov.



**Obr. 5.8:** Postup spracovania dát z experimentálneho merania výšky jamky skriptom *vyska\_jamky*.

## 5.6 Výsledky merania výšky povrchu

Pre porovnanie algoritmov boli v tesnom časovom slede za sebou zopakované štyri rovnaké merania, aby sa čo najviac znížil vplyv zmeny okolitých podmienok (hlavne teploty) na presnosť merania. Tabuľka 5.2 obsahuje výsledky detekcie stredu prúžkov pre jednotlivé algoritmy získané spracovaním dát z týchto meraní.

Tabuľka 5.2 : Výsledky merania, výška jamky  $H$  pre jednotlivé algoritmy.

Algoritmus	Váhovanie stredu	Koherentná korelácia	Frekvenčná analýza
Číslo merania	Výška jamky $H [\mu m]$		
1	12,2760	12,0707	12,0416
2	12,4045	12,0761	12,2379
3	12,0635	12,0219	11,9136
4	11,8382	11,9553	11,8529

## 5.7 Porovnanie algoritmov

Jednotlivé algoritmy boli porovnané na základe výsledkov experimentálnych meraní z dvoch hľadísk. Prvým hľadiskom bola smerodajná odchýlka, ktorá umožňuje porovnanie algoritmov z pohľadu stálosti výsledkov merania. Čím je smerodajná odchýlka väčšia, tým viac sa jednotlivé výsledky meraní odlišujú. Smerodajná odchýlka sa vypočíta podľa vzťahu:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (H_i - \bar{H})^2} \quad (5.3)$$

kde:

$\sigma$  - smerodajná odchýlka,

$H_i$  -  $i$ -tá meraná výška jamky,

$\bar{H}$  - aritmetický priemer meraných výšok,

$N$  - počet meraní.

Vypočítané hodnoty smerodajnej odchýlky pre meranie výšky povrchu z predošlej podkapitoly sú uvedené v nasledujúcej tabuľke 5.3.

**Tabuľka 5.3 :** Porovnanie algoritmov, kritérium smerodajná odchýlka  $\sigma$ ,  $N=4$ .

Algoritmus	Váhovanie stredú	Koherentná korelácia	Frekvenčná analýza
Charakteristika			
$\sigma$ [ $\mu\text{m}$ ]	0,215	0,048	0,147

Druhým hľadiskom bolo porovnanie výsledkov experimentálnych meraní s referenčným údajom z profilometra TALYSTEP, ktorý určil výšku jamky na  $H_s=12\mu\text{m}$ . Takto získané informácie umožnili porovnať algoritmy z hľadiska presnosti detekcie stredú interferenčných prúžkov. K tomuto účelu boli vypočítané hodnoty absolútnych a relatívnych chýb  $\Delta H, \delta H$  všetkých meraní pre jednotlivé algoritmy podľa nasledujúcich vzťahov:

$$\Delta H = H_m - H_s \quad (5.4)$$

$$\delta H = \frac{\Delta H}{H_m} \cdot 100 \quad (5.5)$$

kde:

$\Delta H$  - absolútna chyba merania,

$\delta H$  - relatívna chyba merania (presnosť merania),

$H_m$  - nameraná výška jamky,

$H_s$  - skutočná výška jamky.

Tabuľka 5.4 obsahuje prehľad absolútnych a relatívnych chýb  $\Delta H, \delta H$  pre jednotlivé merania a algoritmy.

**Tabuľka 5.4 :** Porovnanie algoritmov, chyba  $\Delta H$  a presnosť merania  $\delta H$ .

Algoritmus	Váhovanie stredú		Koherentná korelácia		Frekvenčná analýza	
	$\Delta H$ [ $\mu\text{m}$ ]	$\delta H$ [%]	$\Delta H$ [ $\mu\text{m}$ ]	$\delta H$ [%]	$\Delta H$ [ $\mu\text{m}$ ]	$\delta H$ [%]
1	0,276	2,25	0,071	0,59	0,042	0,35
2	0,405	3,26	0,076	0,63	0,238	1,94
3	0,063	0,53	0,022	0,18	-0,086	-0,73
4	-0,162	-1,37	-0,045	-0,37	-0,147	-1,24

## 5.8 Zhodnotenie výsledkov

Na základe hodnôt smerodajnej odchýlky bolo možné konštatovať, že najstálejšie výsledky z experimentálnych meraní zaručoval algoritmus *Koherenčnej*

*korelácie*. Po ňom nasledoval algoritmus *Analýzy vo frekvenčnej oblasti* s približne trikrát horším výsledkom. Posledný skončil algoritmus *Váhovania stredu* s viac ako štvornásobne horším výsledkom čo zodpovedalo očakávaniu vzhľadom k jeho slabej odolnosti voči šumu.

Z hľadiska presnosti dosiahol najhoršie výsledky taktiež algoritmus *Váhovania stredu* po ktorom nasledovala *Analýza vo frekvenčnej oblasti*. Najmenšie hodnoty chýb a teda aj najlepšiu presnosť dosiahol algoritmus *Koherentnej korelácie*. To vypovedá o vhodnosti jeho použitia pri takomto druhu merania.

Z hodnôt chýb merania je taktiež vidieť, že i napriek snahe zachovať konštantné podmienky pri všetkých štyroch meraniach došlo vplyvom prostredia k relatívne veľkým zmenám.

## 6 ZÁVER

V úvode práce som sa oboznámil s teoretickými princípmi a pojmami, ktoré boli dôležité pre pochopenie javov vedúcich ku vzniku interferencie a jej využitiu pri interferometrických meraniach. Pri pokračovaní som sa zameril na konkrétnu oblasť interferometrie a to *Interferometriu nízkej koherencie (LCI)*.

V ďalšej časti som vypracoval prehľad algoritmov používaných pri spracovaní signálu v *LCI* a bližšie som sa oboznámil s princípmi fungovania vybraných druhov algoritmov, ktoré som následne implementoval do prostredia MATLAB R2009a.

Pre možnosť porovnania a otestovania implementovaných algoritmov som vykonal experimentálne merania na Michelsonovom interferometri, ktorý bol zostavený na externom pracovisku Ústavu prístrojovej techniky AVČR, v. v. i. Úvodné merania s fotodiódou na pozícii snímača však neumožňovali porovnávanie presnosti algoritmov, kvôli absencii údajov o referenčnom strede interferenčných prúžkov. Preto som algoritmy otestoval na modelovanom signále s pridaným šumom. Výsledky tejto simulácie sú uvedené v kapitole 5.2.

Po nainštalovaní CCD kamery na pozíciu snímača som mohol prejsť k hlavnej časti experimentu, ktorou bolo meranie výškového profilu na referenčnom povrchu. Referenčným povrchom bola do kremíkového waferu vyleptaná jamka so známou výškou (12  $\mu\text{m}$ ). Na jamke som vykonal sériu štyroch rovnakých meraní, nasledujúcich tesne po sebe aby som obmedzil vplyv zmeny okolitého prostredia hlavne teploty.

Pre dáta získané z experimentálnych meraní som vytvoril skript *vyska\_jamky* pre automatické meranie výšky jamky s použitím jednotlivých algoritmov detekcie stredu interferenčných prúžkov. Aplikáciou uvedeného skriptu na experimentálne dáta som teda získal informácie o výške jamky pre všetky merania a všetky implementované algoritmy.

Na základe nameraných hodnôt výšky jamky som následne porovnal algoritmy z hľadiska stálosti výsledkov meraní, kde sa ako najlepší ukázal algoritmus koherentnej korelácie. Presnosť algoritmov som zistil porovnaním s referenčnou hodnotou výšky. Tu taktiež najlepšie obstál algoritmus koherentnej korelácie čo vypovedá o jeho vhodnosti pre použitie na takýto typ meraní.

Literárne zdroje uvádzajú presnosť merania v *LCI* v jednotkách nanometrov, zatiaľ čo v tejto práci sa mi podarilo dosiahnuť najlepšej presnosti v desiatkach nanometrov. Aj napriek tomu sa dá konštatovať, že sa jedná o dobrý výsledok vzhľadom na jednoduchosť prevedenia uvedeného experimentu. Lepšej presnosti by zrejme mohlo byť dosiahnutej napríklad kompenzáciou vplyvov okolia uvedených v kapitole 2.6.

## 7 LITERATÚRA

- [1] HALLIDAY D., RESNICK R., WALKER J.: *Fyzika – Elektromagnetické vlny – Optika – Relativita*. Brno: VUTIUM, 2000, ISBN 80-214-1868-0.
- [2] SALEH B.E.A., TEICH M. C.: *Fundamentals of Photonics*. New York: Wiley, 1991, ISBN: 0-471-2-1374-8.
- [3] MALACARA D.: *Optical Shop Testing Third Edition*. New York: Wiley, 1978, ISBN: 978-0-471-48404-2.
- [4] ESTLER W. T.: *High-accuracy displacement interferometry in air*. APPLIED OPTICS, vol. 24, no. 6, pp. 809-815, 1985.
- [5] AILING T., CHUNHUI W., ZHUANGDE J., HONGJUN W., BINGCAI L.: *Study on key algorithm for scanning white-light interferometry*. Proceedings of SPIE, vol. 7155, pp. 71552N--1 - 71552N--8, 2008.
- [6] SOMERVELL A.R.D., BARNES T.H.: *Fast, accurate measurement of path difference with white light*. J. Mod. Opt., vol. 50, pp. 2781-2790, 2003.
- [7] KONECKY S.: *Optical Coherence Tomography (OCT)*. Dostupné 1.5.2010 na [http://lammp.bli.uci.edu/education/bme136/images/bme136\\_2010\\_OCT.ppt](http://lammp.bli.uci.edu/education/bme136/images/bme136_2010_OCT.ppt)
- [8] *List of types of interferometers* [online]. WIKIPEDIA 8.3.2010 [citované 10.4.2010]. Dostupné na [http://en.wikipedia.org/wiki/List\\_of\\_types\\_of\\_interferometers](http://en.wikipedia.org/wiki/List_of_types_of_interferometers)
- [9] WYANT J.C.: *White Light Interferometry*. Proceedings of SPIE, vol. 4737, 98, 2002.
- [10] AALTONEN J.P., SEPPÄNEN H.O., OINONEN M.J., SAARIKKO H., ÖSTERBERG J.M., RADIVOJEVIC Z.P., KASSAMAKOV I.V., HÆGGSTÖM E.O.: *Scanning WLI in quality control of single-point tape automated bonding*. Microelectronic Engineering, vol. 84, pp.114–123, 2007.
- [11] BLUNT R.T.: *White Light Interferometry – a production worthy technique for measuring surface roughness on semiconductor wafers*. Int. Conf. on Compound Semiconductor Manufacturing Technology, Vancouver BC, Canada, pp. 59-62, April 24-27, 2006.
- [12] KNYBLOVÁ L., HLUBINA P., CIPRIAN D.: *Měření disperze skupinového indexu lomu řádné a mimořádné vlny v krystalu křemene pomocí spektrální interferometrie v bílém světle*. Jemná mechanika a optika, s. 138-141, 5/2006.
- [13] RAO Y.J., Jackson D.A.: *Recent progress in fibre optic low-coherence interferometry*. Meas. Sci. Technol., vol. 7, pp. 981–999, 1996.

- [14] BOBROFF N.: *Residual errors in laser interferometry from air turbulence and nonlinearity*. APPLIED OPTICS, vol. 26, no. 13, pp. 2676-2682, 1987.
- [15] McMURTRY S., WRIGHT J.D., Jackson D.A.: *A multiplexed low coherence interferometric system for humidity sensing*. Sensors and Actuators B, vol. 67, pp. 52-56, 2000.
- [16] DECK L., de GROOT P.: *High-speed noncontact profiler based on scanning white-light interferometry*. APPLIED OPTICS, vol. 33, no. 31, pp. 7334-7338, 1994.
- [17] HLUBINA P.: *Měření vzdáleností a posunutí zrcadla interferometru s využitím spektrální interferometrie v bílém světle*. Jemná mechanika a optika, vol. 48, č. 2, s. 50-53, 2003.
- [18] LARKIN K. G.: *Efficient nonlinear algorithm for envelope detection in white light interferometry*. Journal of the Optical Society of America A, vol. 13, no. 4, pp. 832-843, 1996.
- [19] PAWLOWSKI M. E., SAKANO Y., MIYAMOTO Y., TAKEDA M.: *Phase-crossing algorithm for white-light fringes analysis*. Optics Communications, vol. 260, pp. 68-72, 2006.
- [20] CHEN S., PALMER W., GRATTAN K. T. V., MEGGITT B. T.: *Digital signal-processing techniques for electronically scanned optical-fibre white-light interferometry*. APPLIED OPTICS, vol. 31, no. 28, pp. 6003-6010, 1992.
- [21] de GROOT P., DECK L.: *Surface profiling by analysis of white-light interferograms in the spatial frequency domain*. J. Mod. Opt., vol. 42, no. 2, pp. 389-401, 1995.
- [22] de GROOT P., DECK L.: *Surface profiling by frequency domain analysis of white-light interferograms*. Proceedings of SPIE, vol. 2248, pp. 101-104, 1994.
- [23] de GROOT P., de LEGA X. C., KRAMER J., TURZHITSKY M.: *Determination of fringe order in white-light interference microscopy*. APPLIED OPTICS, vol. 41, no. 22, pp. 4571-4578, 2002.
- [24] ADACHI M.: *Phase-shift algorithm for white-light interferometry insensitive to linear error in phase shift*. OPTICAL REVIEW vol. 15, no.3, pp. 148-155, 2008.
- [25] SANDOZ P.: *An algorithm for profilometry by white-light phase-shifting interferometry*. J. Mod. Opt., vol. 43, no. 8, pp. 1545-1554, 1996.
- [26] LARKIN K. G.: *A self-calibrating phase-shifting algorithm based on the natural demodulation of two-dimensional fringe patterns*. OPTICS EXPRESS, vol. 9, no. 5, 2001



- [27] HARIHARAN P., OREB B. F., EIJU T.: *Digital phase-shifting interferometer: a simple error-compensating phase calculation algorithm*. APPLIED OPTICS, vol. 26, pp. 2504-2506, 1987.
- [28] DEBNATH S.K., KRISHNA MOHAN N., SHARMA D.K., KOTHIYAL M.P.: *Optical profiling using white light interference in spectral domain*. Dostupné 12.3.2011 na <<http://een.iust.ac.ir/profs/Sadr/Papers/disp15.pdf>>
- [29] de GROOT P., DECK L.: *Three-dimensional imaging by sub-Nyquist sampling of white-light interferograms*. OPTICS LETTERS, vol. 18, no. 17, pp. 1462-1464, 1993.
- [30] PFÖRTNER A., SCHWIDER J.: *Dispersion error in white-light Linnik interferometers and its implications for evaluation procedures*. APPLIED OPTICS, vol. 40, no. 34, pp. 6223-6228, 2001.
- [31] HIRABAYASHI A., OGAWA H., KITAGAWA K.: *Fast surface profiler by white-light interferometry by use of a new algorithm based on sampling theory*. APPLIED OPTICS, vol. 41, no. 23, pp. 6223-6228, 2002.

## 8 ZOZNAM OBRÁZKOV

Obr. 2.1: Úplná konštruktívna interferencia [1].	10
Obr. 2.2: Úplná deštruktívna interferencia [1].	10
Obr. 2.3: Závislosť koherenčnej dĺžky na šírke spektra [7].	12
Obr. 2.4: Michelsonov interferometer [7].	14
Obr. 2.5: Interferogram pre michelsonov interferometer so zdrojom koherentného žiarenia [7].	15
Obr. 3.1: a.) interferenčné prúžky pre jednotlivé vlnové dĺžky b.) výsledný interferogram získaný sumou vlnení jednotlivých vlnových dĺžok [3].	18
Obr. 3.2: Michelsonov interferometer s kompenzačnou doskou [7].	19
Obr. 3.3: Priebehy relatívnej intenzity osvetlenia zaznamenané jednotlivými pixelmi v jednom riadku [3].	21
Obr. 4.1: Dva druhy oblastí pre určovanie ťažiska nultého prúžku [20].	27
Obr. 4.2: Princíp algoritmu <i>FDA</i> .	27
Obr. 4.3: Závislosť amplitúdy a fáze na vlnovom čísle získanej ako výsledok Fourierovej transformácie interferogramu z <i>LCI</i> [23].	29
Obr. 4.4: Reálny a modelovaný signál s výsledkom ich vzájomnej korelácie.	32
Obr. 4.5: Zjednodušený princíp fungovania algoritmov.	33
Obr. 5.1: Experimentálne zostavenie Michelsonovho interferometru.	35
Obr. 5.2: Napojenie optického vlákna k LED dióde.	36
Obr. 5.3: Modelovaný signál interferogramu bez šumu.	37
Obr. 5.4: Modelovaný signál interferogramu s pridaným šumom.	37
Obr. 5.5: Merací reťazec pre experimentálne meranie výšky jamky.	39
Obr. 5.6: Záznam intenzít v jednom riadku CCD snímača pri vertikálnom skenovaní meranej jamky.	40
Obr. 5.7: 3D zobrazenie výškového profilu časti meranej jamky.	41
Obr. 5.8: Postup spracovania dát z experimentálneho merania výšky jamky skriptom <i>vyska_jamky</i> .	42

## 9 ZOZNAM SKRATIEK

Skratka/Symbol	Popis
<b>DFT</b>	Discrete Fourier Transform
<b>FDA</b>	Frequency Domain Analysis
<b>FFT</b>	Fast Fourier Transform
<b>LCI</b>	Low Coherence Interferometry
<b>LED</b>	Light Emitted Diode
<b>MEMS</b>	Micro-Electro Mechanical Systems
<b>OCT</b>	Optical Coherence Tomography
<b>OPD</b>	Optical Path Difference
<b>PSI</b>	Phase Shifting Interferometry
<b>PZT</b>	Lead zirconate titanate (PbZrTi)
<b>SLD</b>	Super Luminescent Diode
<b>SNR</b>	Signal to Noise Ratio
<b>WLI</b>	White Light Interferometry

## **Zoznam príloh**

- Príloha 1    Parametre prvkov experimentálnej zostavy
- Príloha 2    Spektrogram použitej bielej LED diódy
- Príloha 3    DVD so skriptmi v prostredí MATLAB kódmi a elektronickou  
verziou práce

# Príloha 1 - Parametre prvkov experimentálnej zostavy

<b>Názov:</b>	<b>Označenie (Výrobca):</b>	<b>Základné parametre:</b>
Piezoelektrický posuvný stolík - PZT	P-628.1CL (Physik Instrumente)	Aktívne osy: X Pojazd: 800 $\mu\text{m}$ Rozlíšenie: <1 nm
Riadiace jednotky pre PZT stolík	E-503, E-509, E-516 (Physik Instrumente)	
Monochromatická CCD kamera	DMK 31BU03 (The Imaging Source)	Rozlíšenie: 1024x768 Veľkosť pixelu: 4.65x4.65 $\mu\text{m}$ Rýchlosť záznamu: 30fps
Optické vlákno	M15L02 (THORLABS)	Priemer: 105 $\mu\text{m}$ Numerická aperatúra: 0.22 NA Zakončenie: SMA-SMA Dĺžka: 2 m
Biela LED dióda	L-LXHL-LW6C (GME)	Farba: biela Výkon: 5W Napájanie: 6,8 V; 700 mA Vyžarovací uhol: 150°; Svetelný tok: 120 lm Puzdro: Hexagon 20mm

## Príloha 2 - Spektrogram použitej bielej LED diódy

