

SIGNAL PROCESSING IN LOW-COHERENCE INTERFEROMETRY

Peter Novotný

Master Degree Programme (2), FEEC BUT

E-mail: xnovot04@stud.feec.vutbr.cz

Supervised by: Marie Havlíková

E-mail: havlika@feec.vutbr.cz

Abstract: This paper deals with the algorithms for a signal processing in a field of a low-coherence interferometry. The first part is devoted to the basic principle of the low-coherence interferometry. The second part contains a list of selected algorithms supplemented with a simplified description of the algorithms function. Finally, results of modelled interferograms signal processing are discussed.

Keywords: Low-coherence interferometry, interferogram, frequency domain analysis

1. ÚVOD

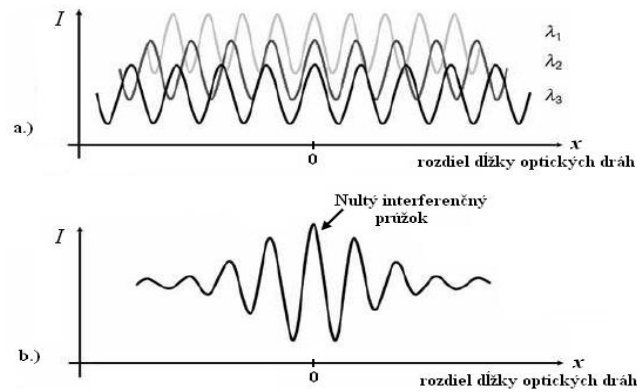
K dosiahnutiu požadovanej kvality výrobkov v mikrometrických až nanometrických rozmerov je treba vyvinúť nielen presné výrobné prístroje a metódy, ale takisto veľmi presné meracie techniky. Jednou z takýchto techník, ktorá nachádza stále častejšie uplatnenie v praxi, je interferometria nízkej koherencie (ďalej už len LCI). Jedná sa o bezkontaktnú optickú meraciu techniku. Využitím svetla ako meracieho média je možné LCI naviazať priamo na etalón dĺžky, ktorým je dnes odvodený od rýchlosti šírenia svetla vo vákuu. Uplatnenie nachádza hlavne pri 3D diagnostike povrchov a meraní hrúbky tenkých transparentných vrstiev.

2. INTERFEROMETRIA NÍZKEJ KOHERENCIE (LCI)

Rovnako ako laserová interferometria využíva aj LCI meranie výslednej intenzity 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. Vďaka tomu nastáva interferencia len v malom rozsahu od vyváženej polohy interferometru, takže interferometer vlastne indikuje dosiahnutie stavu vyváženia (nulovú polohu).

2.1. PRINCÍP VZNIKU INTERFEROGRAMU V LCI

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 Obrázek 1:a. Na fotodetektore sa ale zaznamená len výsledná suma jednotlivých intenzít (kontrastov). Pretože je perióda prúžkov pre každú vlnovú dĺžku zdroja rôzna, je suma intenzít maximálna len v jednom bode, v ktorom je rozdiel dĺžky optických dráh pre všetky vlnové dĺžky rovný nule. Pri pohybe od tohto bodu klesá suma intenzít v dôsledku narastajúceho fázového rozdielu medzi jednotlivými zložkami tak ako to ukazuje Obrázek 1:b. Prúžok s maximálnou intenzitou označuje polohu nulového rozdielu dĺžky optických dráh a nazýva sa nulý interferenčný prúžok. Pri aplikovaní predchádzajúcich tvrdení, napríklad na Michelsonov interferometer, znamená lokalizovanie polohy nultého prúžku nájdenie rovnovážnej polohy (dĺžky ramien interferometru sa rovnajú) a to umožňuje určenie absolútnej vzdialenosti posuvného zrkadla. Cieľom LCI je teda získať čo najkvalitnejší interferogram a následne pomocou algoritmov lokalizovať polohu stredu interferenčných prúžkov.



Obrázek 1: a) interferenčné prúžky pre jednotlivé vlnové dĺžky. b) výsledný interferogram získaný sumou vlnení jednotlivých vlnových dĺžok.[1]

3. PREHĽAD ALGORITMOV PRE DETEKCIU STREDU INTERFERENCEŇNÝCH PRÚŽKOU V LCI

V posledných desaťročiach bolo v oblasti LCI vyvinutých viacero algoritmov pre detekciu stredú interferenceŇných prúžkov. V nasledujúcom texte sú zjednodušené vysvetlené princípy fungovania niektorých vybraných algoritmov.

3.1. VÁHOVANIE STREDU

Hlavnou myšlienkou tohto algoritmu je určenie ťažiska interferenceŇných prúžkov, ktoré vychádza z analógie určovania ťažiska telesa [2]. Stred prúžkov c sa určí z nasledujúceho vzťahu:

$$c = \frac{\sum_{n=1}^N (I(n) \cdot n)}{\sum_{n=1}^N I(n)} \quad (1)$$

kde $I(n)$ je intenzita zaznamenaná v n -tom kroku merania z celkového počtu meraní N .

3.2. KOHERENTNÁ KORELÁCIA

Pri použití koherentnej korelácie [4] sa najprv podľa známych parametrov zdroja svetla namodeluje ideálny signál interferenceŇných prúžkov, s ktorým je následne nameraný signál korelovaný. Určenie stredú nameraných interferenceŇných prúžkov potom vychádza zo znalostí stredú namodelovaných prúžkov a zistenia maximálnej hodnoty korelačnej funkcie.

3.3. ANALÝZA VO FREKVENČNEJ OBLASTI

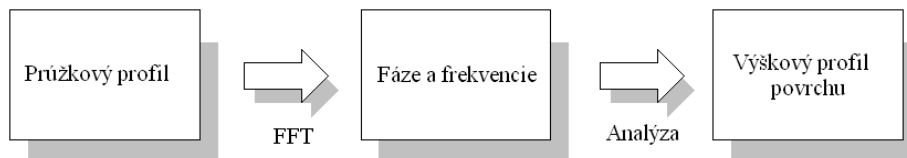
Podstatou tejto metódy je predstava interferogramu v LCI ako superpozície interferenceŇí jednotlivých vlnových dĺžok spektra (vid' obrázok 1a) s maximom v polohe so zhodnou fázou. Pri vzdiaľovaní sa od bodu nulového rozdielu optických dráh, sa fáza interferogramu mení podľa vzťahu:

$$\varphi = k \cdot x \quad (2)$$

kde x je rozdiel dĺžky optických dráh a k je priestorová frekvencia. Pre rôzne priestorové frekvencie sa fáza mení rôznou rýchlosťou. Veľkosť tejto zmeny sa získa deriváciou vzťahu (2) podľa k :

$$d\varphi/dk = x \quad (3)$$

Z tohto vzťahu je zrejmé, že práve veľkosť zmeny fázy s priestorovou frekvenciou je požadovanou informáciou o rozdiely optických dráh a teda aj o výškovom profile skúmaného povrchu [3]. Informácia o závislosti fázy na frekvencii sa dá získať napr. Fourierovou transformáciou nameraného interferogramu a následnou analýzou v spektrálnej oblasti (vid' Obrázek 2:).



Obrázek 2: Postup spracovania signálu pri frekvenčnej analýze.

4. SIMULÁCIA MERANIA

V doterajšom priebehu práce bolo nameraných niekoľko interferogramov, ktoré boli použité pre odladenie algoritmov. Pretože namerané záznamy neobsahovali informáciu o referenčnom strede prúžkov, boli algoritmy následne otestované na modely interferogramu, ktorý je možné matematicky vyjadriť podľa nasledujúceho vzťahu [4]

$$I = \cos\left(\frac{2\pi}{\lambda} \cdot x\right) \cdot \exp\left[-\left(\frac{2x}{L_c}\right)^2\right] \quad (4)$$

K takto vytvorenému modelu bol pridaný biely šum (SNR = 16dB) tak, aby čo najvernejšie napodobil šum z reálnych záznamov. V blízkej budúcnosti sa plánuje meranie na referenčnom povrchu s cieľom uvedené metódy vzájomne porovnať.

Simuláciou boli získané hodnoty rozdielu Δz (viď tabuľka 1) medzi modelovanou (skutočnou) a algoritmami zistenou polohou stredu interferenčných prúžkov pre jednotlivé algoritmy. Skutočná poloha stredu je rovná 7500 nm a je považovaná za nulový rozdiel optických dráh.

Algoritmus	Váhovanie stredu	Koherentná korelácia	Frekvenčná analýza
Δz [nm]	1,60	0,00	0,31

Tabuľka 1: Porovnanie presnosti jednotlivých algoritmov pre určenie stredu interferenčných prúžkov v LCI.

5. ZÁVER

Napriek pomerne dobrým výsledkom všetkých algoritmov na modelovaných dátach sa v praxi váhovanie stredu a koherentná korelácia používajú len zriedkavo kvôli ich malej odolnosti voči disperzii. Analýza vo frekvenčnej oblasti patrí aj napriek jej výpočtovej náročnosti k najčastejšie používaným metódam pretože je odolná voči šumu a dokáže kompenzovať i disperziu.

V ďalšej časti práce budú algoritmy testované pri reálnom meraní s CCD kamerou, ktorého cieľom je bezkontaktná kontrola kvality koncových mierok.

REFERENCIE

- [1] MALACARA, D.: Optical Shop Testing Third Edition, New York: Wiley, 1978, ISBN 978-0-471-48404-2.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] AILING, T., CHUNHUI, W., ZHUANGDE, J., HONGJUN, W., BINGCAI, L.: Study on key algorithm for scanning white-light interferometry, Proceedings of SPIE, vol. 7155, 2008.