

VYHODNOCOVÁNÍ GRADIENTU VLNOVÉHO POLE PŘI TESTOVÁNÍ OPTICKÝCH PRVKŮ

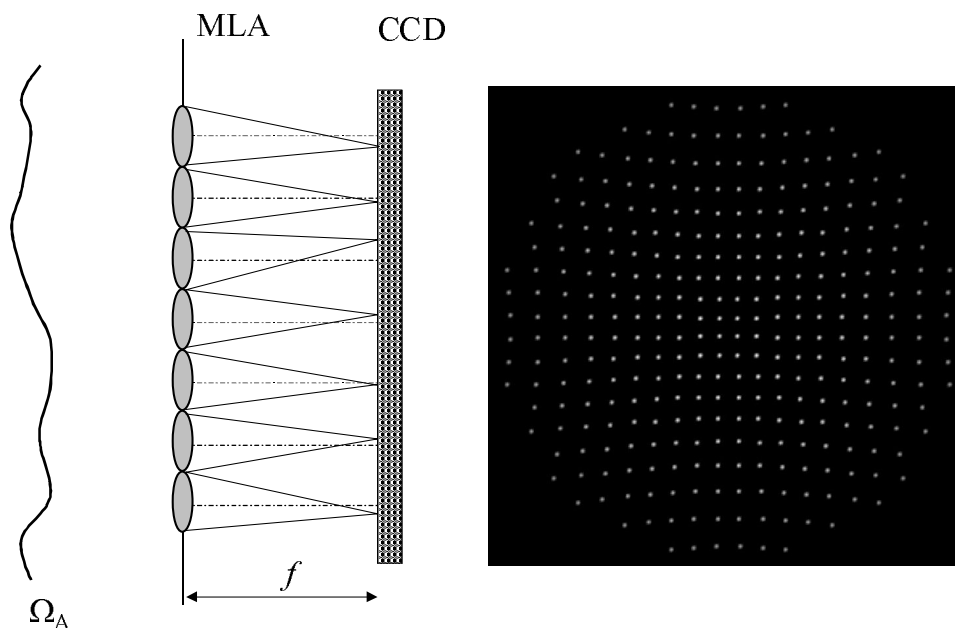
Antonín Mikš, Jiří Novák
katedra fyziky, Fakulta stavební ČVUT v Praze

1. Úvod

Při testování optických prvků v optickém průmyslu (např. zrcadla, čočky, atd.) se dá použít mnoho měřících metod [1-5]. V praxi se asi nejčastěji používají *metody interferometrické*, které umožňují opticky měřit odchylku testované plochy od plochy referenční pomocí vhodně konstruovaných interferometrů a to buď Fizeauova nebo Twyman-Greenova typu [1,6]. Interferometrické metody měření dosahují s moderními metodami pro vyhodnocování interferenčních polí [1,3-5,7] přesnosti vyhodnocení až $\lambda/100$. Měřicí systémy (interferometry) jsou však v současné době vysoce finančně nákladná a relativně složitá zařízení, a proto je často snaha realizovat měření optických ploch jiným způsobem. Dále se tedy v optické praxi používají *geometricko-optické metody*, které jsou založeny na popisu světla pomocí paprskové optiky. Tyto měřící metody mají některé nesporné výhody oproti interferometrickým metodám, např. jsou jednodušší, často méně finančně náročné, nevyžadují koherentní zdroj záření, umožňují testovat vlnoplochy s velkými aberacemi aj. Jednou z těchto metod je tzv. *Hartmannova metoda* [1], která umožňuje vyhodnocovat deformace testované vlnoplochy pomocí určení gradientu vlnového pole. V tomto článku se zaměříme na moderní metodu pro vyhodnocování fáze optických vlnových polí pomocí určování jejich gradientu, která je moderní optoelektronickou obdobou klasické Hartmannovy metody (tzv. *Shack-Hartmannova metoda* [8,9]). Tato metoda je v praxi zejména užívána v oblasti testování optických prvků a v oblasti adaptivní optiky.

2. Vyhodnocování gradientu vlnového pole

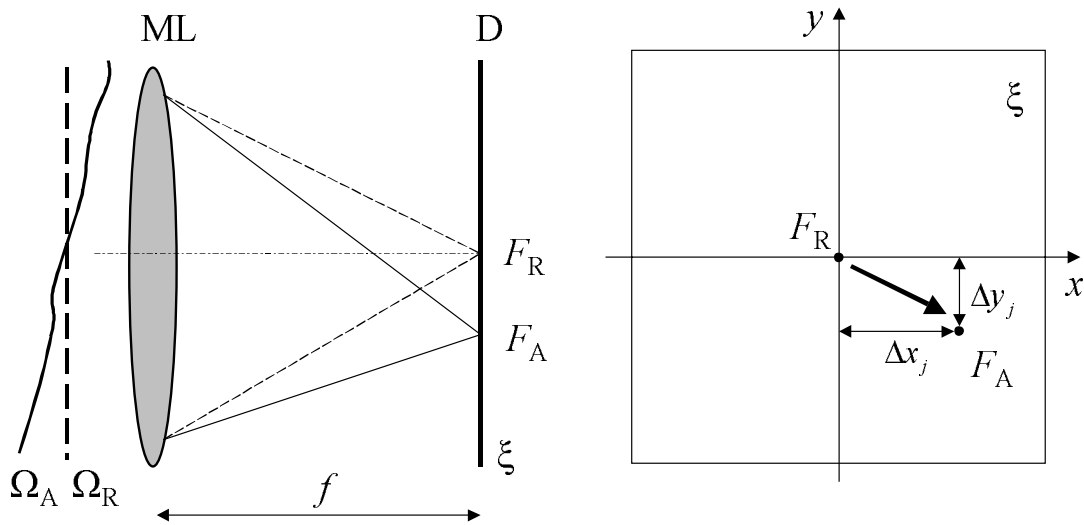
Metoda je založena na principu prostorového vzorkování dopadající vlnoplochy a určení příčných paprskových aberací v rovině detekce. Klasická Hartmannova metoda realizuje prostorové vzorkování pomocí neprůhledného stínítka s maticí vhodně zvolených otvorů. U Shack-Hartmannovy metody je místo stínítka s otvory použito dvoudimenzionální pole mikročoček s ohniskovou vzdáleností f .



Obr.1: Princip metody

Vhodným maticovým senzorem poté můžeme detekovat nejčastěji v ohniskové rovině mikročoček rozdělení intenzity dopadající vzorkované vlnoplochy v rovině detekce. Toto celkové rozdělení intenzity se skládá z „bodů“ (ve skutečnosti několik obrazových bodů senzoru), které odpovídají dílčímu rozdělení intenzity pro jednotlivé části vlnoplochy po průchodu odpovídající mikročočkou. Na **obr.1** je schematicky znázorněn princip této metody. Dopadající vlnoplocha Ω_A je vzorkována polem mikročoček MLA a je detekováno rozdělení intenzity vlnového pole v ohniskové rovině mikročoček.

Zabývejme se nyní blíže způsobem určení deformace dopadající vlnoplochy vzhledem k rovinné vlnoploše. Uvažujme proto pro jednoduchost pouze jednu mikročočku s ohniskovou vzdáleností f , na kterou dopadá rovinná vlnoplocha Ω_R ve směru optické osy čočky ML (**obr.2**).



Obr.2: Určení deformace vlnoplochy

Po průchodu touto čočkou je v rovině detektoru ξ zaznamenáno rozdělení intenzity, tj. difrakční obrazec se středem v bodě F_R . Část vlnoplochy s aberacemi Ω_A , dopadající na mikročočku ML, lze považovat za rovinnou vlnoplochu. Při průchodu vlnoplochy s aberacemi Ω_A bude střed difrakčního obrazce F_A v rovině detekce posunut vůči referenčnímu bodu F_R , a to v závislosti na sklonu části vlnoplochy Ω_A . Na základě vztahu mezi vlnovými a paprskovými aberacemi lze odvodit [10]

$$\Delta x_j = f \cdot \frac{\partial W}{\partial x}, \quad \Delta y_j = f \cdot \frac{\partial W}{\partial y}, \quad (1)$$

kde W je vlnová aberace, Δx_j a Δy_j jsou rozdíly mezi souřadnicemi bodů F_R a F_A . Body F_R a F_A lze např. určit jako těžiště intenzitního obrazce v lokálním okolí daných bodů, tj.

$$x_c = \frac{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N x_i I_{ij}}{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N I_{ij}}, \quad y_c = \frac{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N y_i I_{ij}}{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N I_{ij}}, \quad (2)$$

kde I_{ij} jsou hodnoty intenzity v pozici (i,j) okna o velikosti $M \times N$. Pro každý máme tedy dvě rovnice (1), ze kterých lze určit W .

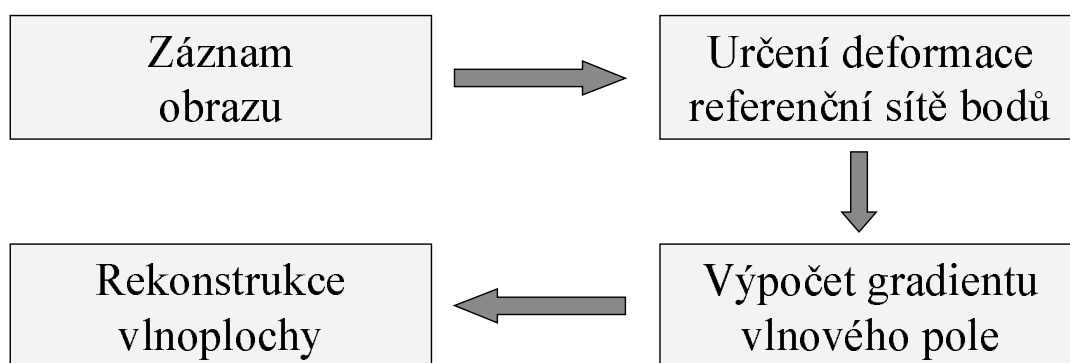
Jednou z možností, jak určit tvar testované vlnoplochy W je použití některé z technik numerické integrace podle vztahu

$$W(x_B, y_B) - W(x_A, y_A) = \frac{1}{f} \int_A^B (\Delta x dx + \Delta y dy), \quad (3)$$

kde A je zvolený bod a B je bod, ve kterém určujeme W . Druhou možností je vyjádření vlnoplochy pomocí vhodných polynomů P_k , např. Zernikeových [1]

$$\frac{\partial W}{\partial x} = \sum_{k=1}^K a_k \frac{\partial P_k}{\partial x}, \quad \frac{\partial W}{\partial y} = \sum_{k=1}^K a_k \frac{\partial P_k}{\partial y}, \quad (4)$$

kde a_k jsou koeficienty aproximace zvolenými polynomy P_k a K je počet polynomů. Dosazením (4) do (1) poté získáme soustavu lineárních rovnic, kterou lze řešit metodou nejmenších čtverců. Schematický postup uvedené metody je znázorněn na **obr.3**.

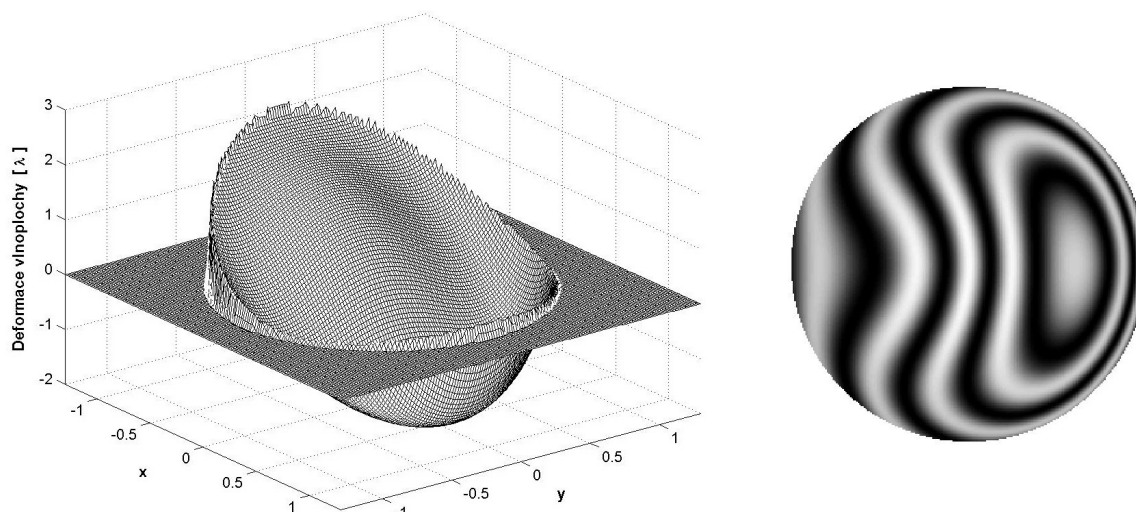


Obr.3: Postup rekonstrukce vlnoplochy

Ukažme si nyní ukázkou automatického vyhodnocení tvaru vlnoplochy na základě uvedené metody s použitím prostředků systému Matlab. Nejprve je nutno zjistit referenční síť bodů, která je nutná pro kalibraci uvedené metody. Dále je možno zaznamenat dopadající vlnoplochu, která způsobí posun jednotlivých bodů referenční sítě v závislosti na gradientu vlnoplochy. Na **obr.4** vlevo je znázorněna referenční síť bodů a na **obr.4** vpravo je deformovaná síť bodů. Na základě určení posunu jednotlivých bodů je možno podle vztahů (1), (3) a (4) vypočítat odchylku dopadající vlnoplochy vůči vlnoploše referenční. Na **obr.5** je uvedena tato odchylka společně s interferogramem, který by odpovídal této odchylce při interferometrickém měření.



Obr.4: Referenční a deformovaná síť bodů



Obr.5: Odchylka od referenční vlnoplochy

3. Závěr

V příspěvku byla ukázána optická bezkontaktní metoda pro určení deformace vlnoplochy pomocí vyhodnocení složek gradientu vlnového pole. Tato metoda má oproti interferometrickým metodám. Pomocí systému Matlab byl naprogramován postup určení deformace testované vlnoplochy, který umožňuje plně automatické vyhodnocování prováděných měření. Metoda může být s výhodou použita pro testování optických prvků v optické výrobě, jelikož je prakticky nezávislá na změnách termomechanických parametrů měřicího prostředí, jako jsou např. vibrace.

Článek byl vypracován v rámci grantu ČVUT č.0200311 a GAČR 202/02/0314.

Literatura:

- [1] Malacara D.: *Optical Shop Testing*, John Wiley & Sons, N.Y. 1992.
- [2] Mikš A.: *Interferometrické metody vyhodnocování sférických ploch v optice*, Jemná mechanika a optika, 2000, č.1
- [3] Mikš A., Novák J.: *Fringe Tracing Technique in the Process of Optical Testing*. Physical and Material Engineering 2002, Prague
- [4] Novák J.: *Analýza a vyhodnocování interferenčních struktur*. MATLAB 2001, Praha.
- [5] Robinson D.W., Reid G.T.: *Interferogram analysis: Digital Fringe Pattern Measurement Techniques*, Institute of Physics Publishing, Bristol, 1993.
- [6] Francon M.: *Optical Interferometry*, Academic Press, N.Y. 1966.
- [7] Novák J.: *Computer Simulation of Phase Evaluation Process with Phase Shifting Technique*. Physical and Material Engineering 2002, Prague.
- [8] Prieto P.M., Vargas-Martin F., Goelz S., Artal P.: *Analysis of the performance of the Hartmann-Shack sensor in the human eye*, JOSA A, Vol.17, No.8, 2000
- [9] Zou W., Zhang Z.: *Generalized wave-front reconstruction algorithm applied in a Shack-Hartmann test*, Applied Optics, Vol.39, No.2, 2000
- [10] Mikš A.: *Aplikovaná optika 10*, Vydavatelství ČVUT, Praha 2000.

Doc.RNDr. Antonín Mikš, CSc, katedra fyziky, Stavební fakulta ČVUT, Thákurova 7,
166 29 Praha 6 - Dejvice. Tel: 224354948, Fax: 23333 3226, E-mail: miks@fsv.cvut.cz

Ing. Jiří Novák, Ph.D, katedra fyziky, Stavební fakulta ČVUT, Thákurova 7,
166 29 Praha 6 - Dejvice. Tel: 224354435, Fax: 23333 3226, E-mail: novakji@fsv.cvut.cz