

# METODY PŘEDZPRACOVÁNÍ INTERFEROMETRICKÝCH DAT

Jiří Novák

katedra fyziky, Fakulta stavební ČVUT v Praze

## 1. Metody předzpracování interferometrických dat

Bezkontaktní interferometrické metody [1-3] se používají v mnoha oblastech vědy a průmyslu pro měření posunutí, vibrací, deformací a kvality různých typů povrchu u různých konstrukčních prvků a objektů. Správné a plně automatické vyhodnocení interferenčního pole, které je zaznamenáváno při měření, je tedy velice důležité pro praktické použití zmíněných měřících metod. Vzhledem k tomu, že měřená data vždy jistým způsobem obsahují vlivy různých fyzikálních parametrů, které mohou nepříznivým způsobem ovlivňovat měření (např. data jsou ovlivněna šumem, zaznamenané interferenční pole má nerovnoměrný kontrast, atd.), je nutno před samotným vyhodnocováním provést předzpracování naměřených dat, které vede k zajištění vyšší kvality vstupních dat a následné vyšší úspěšnosti zpracování a vyhodnocení měření. Některé parametry, které mohou určovat a testovat kvalitu zaznamenané interferenční struktury, jsou např.: kontrast interferenčních proužků, poměr signál/šum, spojitost interferenčních proužků, vyváženost intenzity pozadí obrazu, rozdělení prostorových frekvencí proužků v interferogramu, atd.

Typické rozdělení reálně detekované intenzity interferenčního pole můžeme psát jako

$$\begin{aligned} I &= I_0 [1 + K \cos \Delta\varphi(x, y)] N_m + N_a = (A + C + C^*) N_m + N_a, \\ C &= I_0 K e^{i\Delta\varphi} / 2 = B e^{i\Delta\varphi} / 2, \end{aligned} \quad (1)$$

kde  $I_0$  je intenzita pozadí,  $K$  je kontrast interferenčního pole,  $N_m$  je multiplikativní šum a  $N_a$  je aditivní šum. Je nutné poznamenat, že u všech funkcí ve vztahu (1) musíme uvažovat závislost na prostorových souřadnicích v rovině detekce  $(x, y)$ . Spektrum rozdělení intenzity je poté možno psát jako

$$\tilde{I} = (\tilde{A} + \tilde{C} + \tilde{C}^*) * \tilde{N}_m + \tilde{N}_a, \quad (2)$$

kde  $\sim$  značí Fourierovu transformaci uvedených funkcí a  $*$  značí konvoluci. Intenzita pozadí může kolísat zejména vzhledem k energetickému profilu svazku, změně odrazivosti povrchu měřeného povrchu v jeho různých částech (nerovnoměrná odrazivost povrchu měřeného objektu v důsledku prostorově se měnících charakteristik povrchu), nerovnoměrné citlivosti použitého senzoru, parazitním difrakčním a interferenčním jevům v optickém měřícím systému (např. působením prachových částic v optickém systému) a stabilitě zdroje. Změny intenzity pozadí interferogramu, způsobené energetickým profilem svazku, mají nízké frekvence a naopak změny, způsobené nerovnoměrnou odrazivostí povrchu a nerovnoměrnou citlivostí detektoru, se mohou projevit jako vysokofrekvenční složky.

Rušivé vlivy okolního prostředí při měření, např. mechanické vibrace nebo fluktuace indexu lomu vzduchu, mohou způsobit vážnou degradaci interferogramů, což se projevuje zejména při použití metody fázového posuvu [2,3] pro vyhodnocování. Popsané negativní faktory mohou výrazným způsobem ovlivnit měření, což se projeví zejména při měření s dlouhými expozičními časy, kdy tyto fluktuace fyzikálních veličin vedou ke značnému snížení kontrastu a degradaci prováděného měření. Pro odstranění těchto problémů z procesu měření je možno umístit měřící zařízení na antivibrační stůl a zajistit stabilitu parametrů okolního prostředí při procesu měření nebo použít jiné vhodnější měřící a vyhodnocovací techniky. Kontrast interferenčního pole může být ovlivněn hlavně poměrem intenzit referenčního a objektového svazku.

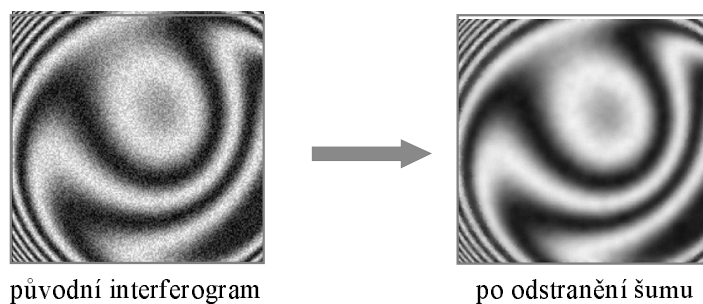
## 2.1. Potlačení šumu v interferogramech

Interferenční signál, který je zaznamenán reálným optoelektronickým detektorem, je tedy při detekci a následném elektronickém zpracování částečně degradován přenosovými vlastnostmi optického a elektronického systému. Šum ve zpracovávaném digitálním obraze (interferogramu) můžeme rozdělit na dva odlišné typy, a to *šum aditivní* a *multiplikativní* [3].

*Aditivní šum* obsahuje zejména elektronický šum v důsledku použití různých optoelektronických a elektronických zařízení v procesu záznamu interferogramu. Dalším typem šumu, který má převažující vliv u mnoha interferometrických měřicích metod je tzv. *koherentní (spekl) šum*, což je šum způsobený interferencí koherentních vlnových polí po odrazu na difúzně rozptylujícím povrchu. Koherentní šum může být modelován jako multiplikativní šum s negativním exponenciálním pravděpodobnostním rozdělením a vysokým kontrastem.

Metody pro potlačení šumu jsou vždy určitým kompromisem mezi ztrátou informace a dostatečnou mírou odstranění šumu. Filtraci digitálního obrazu je možno provádět buď v *prostorové* nebo ve *frekvenční oblasti*. V prostorové oblasti lze použít lineární nebo nelineární techniky filtrace digitálního obrazu [3,5] v závislosti na typu šumu ve zpracovávaném interferenčním signálu. Je možno použít klasické lineární filtry typu dolní nebo horní propust k potlačení aditivního šumu, avšak tyto typy filtrů způsobují často rozostření jemných struktur v interferogramu (tj. proužků s vysokou prostorovou frekvencí), což je velmi negativní jev vzhledem k následné spolehlivosti vyhodnocovacího procesu [2,6].

Proto je často nutné použít k potlačení šumu některých sofistikovanějších metod. Velmi dobrou metodou filtrace interferogramu je tzv. *adaptivní filtrace*, která aplikuje lineární nebo nelineární procedury filtrace digitálního obrazu adaptivně v závislosti na lokálních vlastnostech okolí vyšetřovaného obrazového bodu [7,8]. Tato metoda u filtrace interferogramu může být aplikována např. na základě určení gradientu rozdělení intenzity [8], kdy lze provést filtraci některým ze standardních filtrů pouze ve směru interferenčních proužků, což zamezí přílišnému rozostření interferenčních proužků. Popsané filtry je často vhodné použít opakovaně pro dosažení lepších výsledků. Na **obr.1** je příklad použití adaptivní filtrace pro odstranění šumu u interferogramu.



**Obr.1:** Potlačení šumu u interferometrických dat

Další vhodnou technikou pro potlačení šumu u interferometrických dat je použití morfologických filtrů [10], které využívají sekvence binárních morfologických operací na digitálním obraze pro účinné potlačení šumu. Pro potlačení multiplikativního šumu lze použít techniky *homomorfní filtrace*, pomocí které převedeme multiplikativní šum logaritmováním na šum aditivní. Ve spektrální oblasti je nejvhodnější pro filtraci interferogramů použít adaptivní pásmové filtrace pomocí různých typů dvojdimenzionálních oken, známých z analýzy signálů, jako např. Hammingovo, Hanningovo, Bartletovo okno, aj.

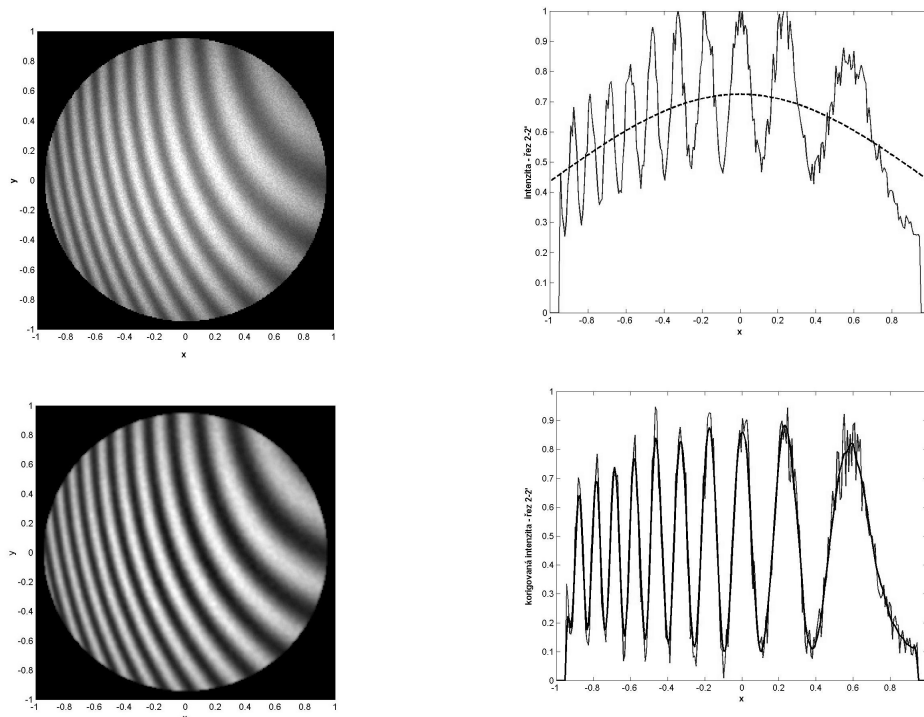
## 2.2. Korekce nerovnoměrnosti střední intenzity a kontrastu interferogramu

Předpokládaná struktura interferenčních proužků může být po odstranění šumu porušena lokálním kolísáním intenzity pozadí a kontrastu interferenčního pole což je důležité zejména při zpracování měřených dat metodami, které identifikují tvar interferenčních proužků.

Pro korigování nerovnoměrné intenzity pozadí interferogramu je nejprve nutno nalézt odhad střední hodnoty intenzity interferenčního pole  $A(x,y)$  v každém bodě interferogramu. Po získání tohoto odhadu odečteme funkci  $A(x,y)$  od hodnot intenzity  $I(x,y)$

$$I_N(x, y) = I(x, y) - A(x, y) \quad (3)$$

a dostaneme normalizovaný interferogram  $I_N(x,y)$ , kde byla odstraněna nerovnoměrná složka střední hodnoty intenzity  $A(x,y)$ . Uvedený postup byl aplikován na příklad interferenční struktury se šumem (**obr.2**).



**Obr.2:** Odstranění nerovnoměrné intenzity pozadí interferogramu

Vhodnou metodou předzpracování interferogramu s nízkou modulací interferenčního signálu může být použití transformace jasové stupnice [4]. Pro zvýšení kontrastu je možno použít metody vyrovnání histogramu. Na **obr.3** je znázorněn příklad aplikace této metody na interferenční obrazec.



**Obr.3:** Vyrovnání histogramu interferenčních obrazců

Je vidět, že u výsledného interferogramu došlo k výraznému zvýšení kontrastu. Zvýšení kontrastu je žádoucí pro další zpracování, zejména pak u metod, které hledají extrémní interferenční struktury [6,11,12]. Nízký kontrast interferenčních proužků má za následek nižší spolehlivost a možné selhání těchto metod.

Poté co je z interferogramu odstraněn šum a je provedena normalizace interferenční struktury může být interferogram zpracován některou metod pro vyhodnocení interferenčních polí [2,6,13-16].

### 3. Závěr

Príspevek se zabývá vybranými metodami digitálního zpracování obrazu při vyhodnocování interferometrických měření. Ve většině metod pro vyhodnocení interferometrických měření je velmi důležité získat co nejkvalitnější vstupní data. U prakticky prováděných interferometrických měření je proto často nutno potlačit šum, zlepšit kontrast obrazu, atd. V článku byla ukázána praktická aplikace několika vybraných metod digitální analýzy obrazu, které mohou být s výhodou použity při předzpracování interferometrických dat s použitím Matlabu a Image Processing toolboxu.

Článek byl vypracován v rámci grantu GAČR č.103/02/0357 a GAČR č.202/02/0314.

### Literatura:

- [1] Cloud G.: *Optical Methods of Engineering Analysis*, Cambridge Univ.Press, Cambridge 1998.
- [2] Kreis T.: *Holographic interferometry: Principles and methods*, Akademie Verlag Berlin, 1996.
- [3] Mikš A.,Novák J.: *Application of multi-step algorithms for deformation measurement*. SPIE Proceedings vol.4398, Washington 2001.
- [4] Klíma M., Bernas M., Hozman J., Dvořák P.: *Zpracování obrazové informace*. Vydavatelství ČVUT, Praha 1999.
- [5] Mitra S.K., Sicuranza G.L.: *Nonlinear Image Processing*, Academic Press, New York 2001
- [6] Robinson D.W., Reid G.T.: *Interferogram analysis: Digital Fringe Pattern Measurement Techniques*, Institute of Physics Publishing, Bristol, 1993.
- [7] Astola J., Kuosmanen P.: *Fundamentals of Nonlinear Digital Filtering*, CRC Press, New York 1997
- [8] Yaroslavsky L., Eden M.: *Fundamentals of Digital Optics*, Birkhauser, Boston 1996
- [9] Yu Q., Liu X., Andresen K.: *New spin filters for interferometric fringe patterns and grating patterns*, Applied Optics, Vol.33, No.17, 1994
- [10] Soille P.: *Morphological Image Analysis: Principles and Applications*, Springer Verlag, Berlin 1999
- [11] Novák J.: *Interpolation and analysis of interference fringe pattern*. Proceedings - Research Activities of Physical Departments of Civil Engineering Faculties in the Czech and Slovak Republics, Brno 2001.
- [12] Novák J.: *Analýza a vyhodnocování interferenčních struktur*. MATLAB 2001, Praha.
- [13] Mikš A.,Novák J.: *Fringe Tracing Technique in the Process of Optical Testing*. Physical and Material Engineering 2002, Prague
- [14] Mikš A.,Novák J.: *Application of multi-step algorithms for deformation measurement*. SPIE Proceedings vol.4398, Washington 2001.
- [15] Novák J.: *Computer Simulation of Phase Evaluation Process with Phase Shifting Technique*. Physical and Material Engineering 2002, Prague
- [16] Kujawinska M., Wójciak M.: *High Accuracy Fourier Transform Fringe Pattern Analysis*, Optics and Lasers in Engineering **14**, 325-339, 1991

Ing.Jiří Novák,PhD., katedra fyziky, Fakulta stavební ČVUT, Thákurova 7, 166 29 Praha 6, tel: 224354435, e-mail:novakji@fsv.cvut.cz