

# SIMULACE RENTGENOVÉHO MŘÍŽKOVÉHO INTERFEROMETRU

*J. Beránek<sup>1\*</sup>, L. Švéda<sup>1</sup>*

<sup>1</sup> FJFI ČVUT, Břehová 7, 115 19, Praha 1

## Abstrakt

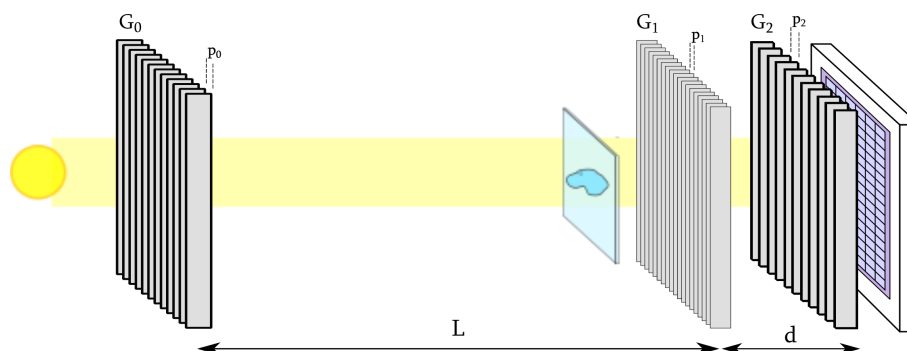
Klasická rentgenová radiografie má svá omezení při snímkování málo absorpčních předmětů (jako jsou tkáně, plasty, tenké vzorky, aj.) a jedním ze způsobů, jak dosáhnout kontrastnějších snímků, je pomocí fázového kontrastu. Fázový kontrast v rentgenové oblasti lze získat například s tzv. mřížkovým interferometrem – zařízení založeného na principu dvou mřížek, kde první mřížka vytváří interferenční pole a pomocí druhé mřížky je toto pole analyzováno.

V prostředí MATLAB byla nasimulována základní funkce mřížkového interferometru v rtg oblasti. Výsledky získané ze simulace posloužily k dalšímu zpracování dat a rekonstrukci původního objektu. Prvotní realizace experimentu v rtg oblasti je technologicky náročná, a proto se přistoupilo k ověření funkcionality systému ve viditelném oblasti.

## 1 Úvod

Na snímku pořízeném rentgenovou radiografií je kontrast způsoben rozdílnou absorpcí rentgenového záření v materiálu. Touto metodou se dosahuje dobrých výsledků jen pro dostatečně absorpční materiály. Potíže nastanou, je-li rentgenován objekt, který je složen z málo absorbujících částí anebo mají-li všechny velmi podobnou absorpci. Kontrast na snímku tím prakticky zanikne, a to vede ke značným komplikacím při vyhodnocování dat. Procházející záření se v předmětu nejenom tlumí, ale dochází i ke změně jeho fáze. Abychom mohli takovou fázovou změnu detekovat, byly navrženy metody tzv. fázového kontrastu, které umožňují pro málo absorpční materiály zvýšit aplikační možnosti radiografie.

Metody fázového kontrastu můžeme rozdělit dle [1] na interferometrické metody, metody používající analyzátor a metody volného šíření. Metody se liší především v tom, co vyjadřuje detekovaný signál, v experimentálním uspořádání a v požadavcích na zdroj záření. V článku se hlavně budeme věnovat mřížkovému interferometru (označovaný v literatuře také jako Talbotův interferometr). Mezi hlavní výhody interferometru patří možnost použít jako zdroj rtg lampu a umožňuje snímat široké zorné pole.



**Obr. 1:** Schéma rentgenového mřížkového interferometru složeného ze tří mřížek  $G_0, G_1, G_2$  s periodami  $p_0, p_1, p_2$ . Před mřížkou  $G_0$  je umístěn rentgenový zdroj (rentgenová lamp), těsně před mřížkou  $G_1$  je vložen rentgenovaný předmět, a za mřížkou  $G_2$  je umístěn detektor, který pořizuje snímky.

Mřížkový interferometr [2] je sestaven z trojice mřížek – (obr.1). První mřížka  $G_0$  je zdrojová, druhá mřížka  $G_1$  je fázová a třetí mřížka  $G_2$  je analyzující. Zdrojová mřížka  $G_0$  se umísťuje

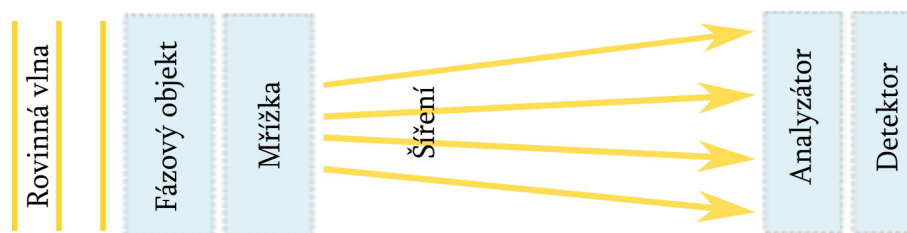
\*email: beranj19@fjfi.cvut.cz

blízko rentgenové lampy a tvoří ji absorpční maska s transparentními štěrbinami. Tato mřížka vytváří sadu malých rentgenových zdrojů. Z těchto zdrojů se šíří záření skrz rentgenovaný předmět a dopadá na druhou mřížku  $G_1$ , což je většinou  $\pi$ -fázová mřížka (je možné použít i absorpční mřížku). Za touto mřížkou vzniká interferenční pole, kam je do jisté vzdálenosti vložena třetí mřížka  $G_2$  spolu s detektorem.  $G_2$  je binární absorpční mřížka, která slouží k analýze interferenčního pole.

K rentgenovému zdroji a detektoru, které jsou k dispozici v rentgenové laboratoři KFE FJFI, jsme napočítali v [3] potřebné parametry mřížek. Mřížkové parametry mohou být například – pro maximální energii fotonu  $E = 25$  keV vychází vzdálenost zdrojové a fázové mřížky  $L = 672$  mm, perioda zdrojové mřížky  $p_0 = 33$   $\mu\text{m}$  s hloubkou štěrbin  $h_0 = 30$   $\mu\text{m}$ , které jsou vyplněny zlatem. Fázová mřížka je od analyzující mřížky vzdálena  $d = 43$  mm. Fázová mřížka je tvořena periodou  $p_1 = 4.0$   $\mu\text{m}$  s hloubkou štěrbin  $h_1 = 32$   $\mu\text{m}$ . Perioda analyzující mřížky je  $p_2 = 2.1$   $\mu\text{m}$  a hloubka absorpčních vrypů je  $h_2 = 19$   $\mu\text{m}$ , které jsou vyplněny zlatem. Výroba mřížek (např. v [4]) s těmito parametry je náročná, zejména nejvíc problematické je dodržet požadavek hloubky vrypů vůči velikosti periody mřížky.

## 2 Simulace

Snaha ověřit principiální funkčnost interferometru nás vedla k vytvoření simulace interferometru, kde bychom se naučili zpracovávat data budoucího experimentu. Kvůli nákladnosti, resp. výpočetní náročnosti prováděných základních experimentů v rentgenové oblasti, jsme zvolili viditelné světlo pro simulaci i pro experiment. Na simulování jsme použili prostředí MATLAB. Celá simulace byla rozdělena na dílčí celky, které ilustruje (obr. 2).

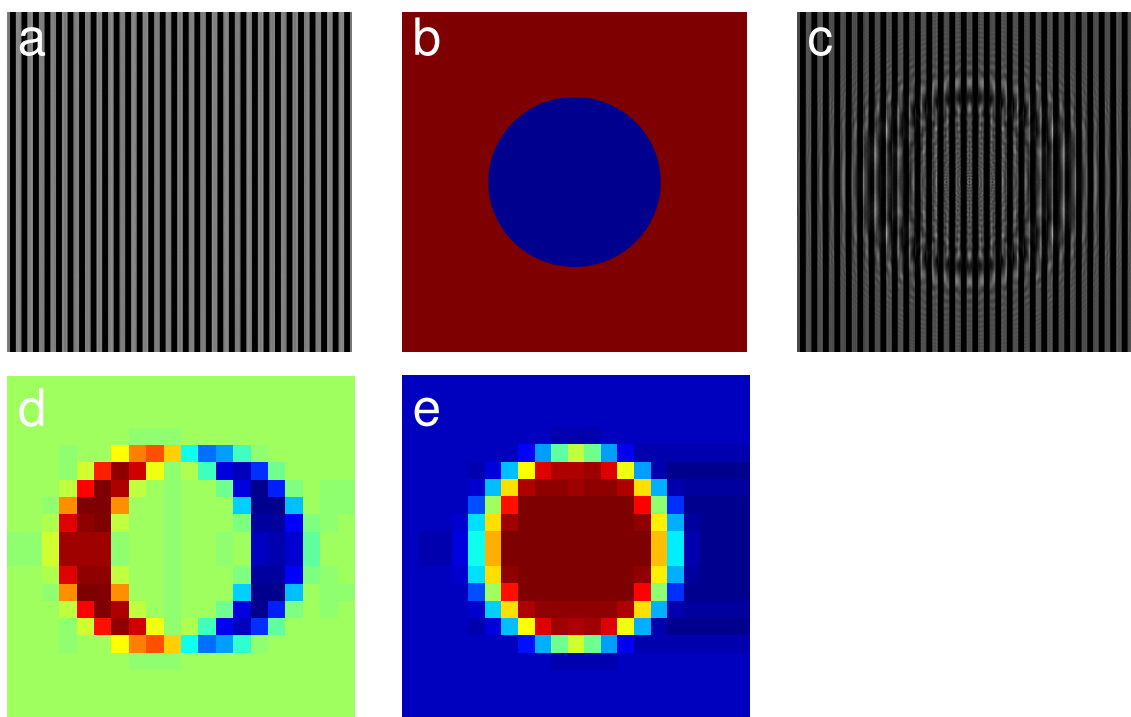


**Obr. 2:** Jednoduchá představa simulace.

První část simulace se věnovala otázce, jak se vyvíjí interferenční pole za mřížkou. Zda-li skutečně za mřížkou dochází v jistých rovinách k sebezobrazení mřížky (tzv. Talbotův jev). Řešením úlohy difrakce na mřížce jsme byli schopni vypočítat rozložení intenzitního pole za mřížkou. K tomu jsme využili Fourierovy formulace Fresnelovy difrakce [5]. Dokonalá binární absorpční mřížka s periodou  $\Lambda$  lze vyjádřit funkcí  $t(x, y) = \text{rect}(2x/\Lambda)$ . Ta moduluje dopadající rovinnou vlnu s jednotkovou amplitudou. Při použití světla o vlnové délce  $\lambda$  dochází [6], [7], [11] za absorpční mřížkou s periodou  $p_1$  v jistých diskretních vzdálenostech  $d_n = n \cdot p_1^2/\lambda$  k jejímu sebezobrazení, kde  $n = 1, 2, 3, \dots$

V dalším kroku byl vytvořen fázový objekt charakterizovaný indexem lomu  $n$ . Takový objekt působí na procházející paprsky tak, že se v něm lomí podle rozložení indexu lomu. Tím dojde ke změně rozložení intenzity za mřížkou oproti stavu, kdy před mřížkou není vložen žádný objekt. Pro účely simulace jsme si vytvořili jednoduchý objekt – (fázový) váleček, jehož podstavami procházela rovinná vlna.

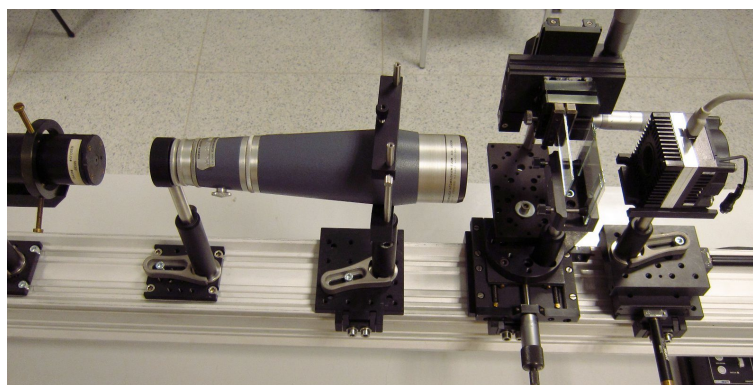
Jelikož typický detektor má veliký pixel vůči jemnému interferenčnímu poli, je nutné pro zjištění stavu interferenčního pole použít analyzátor. Analyzátor je realizovaný dokonalou absorpční binární mřížkou a je jím skenováno rozložení interferenčního pole v příčném směru. Při každém dílčím posunu je detektorem zaznamenán jeden snímek. Vyhodnocením zaznamenaného průběhu intenzity na každém pixelu detektoru lze zjistit, zda-li došlo v dané části předmětu k lomu paprsku. Tímto lze převést informaci o změně fáze vlny na změnu intenzitní, kterou můžeme



**Obr. 3:** Výsledky získané pomocí simulace v programu MATLAB. Na obr. (a) je vyobrazeno sebezobrazení v Talbotově rovině za binární absorpční mřížkou s periodou  $p = 200 \mu\text{m}$ . Pokud před mřížku byl vložen fázový objekt obr. (b) (fázový váleček) o průměru podstavy 3 mm, pak ve stejné Talbotově rovině jsme získali snímek (c). Nakonec obr. (a) i (c) posloužily ke zpracování pomocí analyzátoru spolu s detektorem. Zpracováním simulovaných dat jsme získali nejdřív gradient fáze obr. (d) z něhož se integrací získal obr. (e). Každý obrázek představuje  $6 \times 6 \text{ mm}$ .

detekovat běžným detektorem [9], [6]. V závislosti na posunu mřížky je pixelem zaznamenaná intenzita většinou podobná harmonickému průběhu. K zjištění parametrů takové funkce je výhodné použít Fourierovskou analýzu [10], [9]. Hledáme rozdíl počáteční fáze základní harmonické funkce mezi průběhy pixelové intenzity s vloženým a bez vloženého předmětu. Tímto vyhodnocením dat z celého detektoru získáme průběh gradientu fáze. Výsledky jsou prezentovány na (obr. 3).

### 3 Experiment

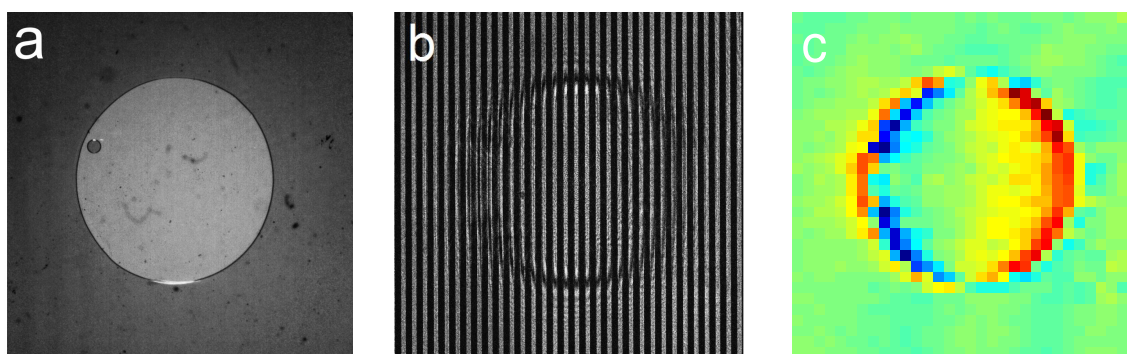


**Obr. 4:** Fotografie celého experimentu v laboratoři KFE. Laser spolu s kolimátorem vytváří kolimovanou vlnu, která prochází nejdřív fázovým objektem a následně je modulována natisklou mřížkou a výsledné pole je detekováno CCD detektorem.

V laboratoři jsme sestavili experiment (obr. 4) s mřížkovým interferometrem za použití laserového světla. Experiment sloužil k ověření skutečné funkčnosti systému a skládal se z HeNe

laseru, kolimátoru se spektrálním filtrem, fázového objektu, mřížky, detektoru, stojánků a posuvů umístěné na optické lavici.

Mřížka byla vytvořena pro viditelné světlo jednoduchým způsobem – přesně natiskými černými čarami na průsvitné fólii. Mřížka měla periodu  $200\ \mu\text{m}$ . Fázový objekt jsme vytvořili pomocí kapky UV tvrdého lepidla, které bylo umístěno mezi dvě sklíčka. Postup analýzy dat, vyzkoušený na simulaci, jsme aplikovali na data získané z experimentu (obr.5b). Tím jsme získali výsledky uvedené na (obr.5c), kde je zachycen průběh gradientu fáze kapky lepidla. Bohužel tento fázový objekt není přesně definován, což stěžuje porovnání výsledků. K (obr.5c) chybí profil fáze, protože z doposud naměřených dat se nepodařilo uspokojivě zrekonstruovat fázi.



**Obr. 5:** Výsledky získané pomocí experimentu. Na obr. (a) je fotografie původního fázového vzorku pořízená mikroskopem – vrstva lepidla s průměrem cca 4 mm vložená mezi dvěma sklíčky. (b) snímek pořízený detektorem za mřížkou s vloženým vzorkem. (c) zobrazuje gradient fáze vloženého vzorku. Velikost obr. (b) i (c) představuje  $6.5 \times 6.5\ \text{mm}$ .

## 4 Závěr

Fázový kontrast pomocí mřížkového interferometru umožňuje aplikaci radiografie i pro málo absorpční vzorky resp. s velice podobnou absorpcí za použití běžného laboratorní rtg zdroje jako je rentgenová lampa. Pomocí simulace jsme ověřili funkci tohoto interferometru a naučili jsme se zpracovávat data. Zároveň jsme v laboratoři sestavili mřížkový interferometr. Ten posloužil k porovnání výsledků získaných pomocí simulace s naměřenými daty. S výhodou jsme k simulaci mřížkového interferometru a k zpracování dat použili prostředí MATLAB.

## Literatura

- [1] FITZGERALD, R. *Phase-Sensitive X-Ray Imaging*. Physics Today. 53, 2000, s. 23–27.
- [2] PFEIFFER, F., et al. *Phase retrieval and differential phase-contrast imaging with low-brilliance X-ray sources*. Nature Physics. 2006, 2, s. 258–261.
- [3] BERÁNEK, J., *Návrh modifikace rentgenového tomografu pro fázový kontrast*, Praha, 2010. Bakalářská práce. ČVUT, Fakulta jaderná a fyzikálně inženýrská, 2010.
- [4] DAVID, C. et al. *Fabrication of diffraction gratings for hard X-ray phase contrast imaging*. Microelectron. Eng. 87, 2007, s.1172–1177.
- [5] GOODMAN, J.W. *Introduction to Fourier optics*. Roberts & Co. 2005, ISBN 9780974707723
- [6] WEITKAMP, T., et al. *X-ray phase imaging with a grating interferometer*. Optics express. 2005, 16, s. 6296–6304.
- [7] WEITKAMP, T., et al. *Tomography with grating interferometers at low-brilliance sources*. Progress in biomedical optics and imaging: Developments in X-Ray Tomography V. 2006, 7, 38.
- [8] WEITKAMP, T., et al. *Hard X-ray imaging and tomography with a grating interferometer*. SPIE V.4. 2004, 5535, s. 137–142.
- [9] ENGELHARDT, M., et al. *The fractional Talbot effect in differential x-ray phase-contrast imaging for extended and polychromatic x-ray sources*, Journal of Microscopy-oxford. Vol. 232(1), 2008, s. 145–157
- [10] GONZALEZ, R.C., WOODS, R.E. *Digital Image Processing*, 3.vydání, Pearson/Prentice Hall, 2008, 954 s. ISBN 978-0-13-505267-9.
- [11] MOMOSE, A., et al. *Demonstration of X-Ray Talbot Interferometry*. Jpn. J. Appl. Phys. 42, 2003. s. 866–868.