

# ANALÝZA MĚŘENÍ TVARU VLNOPLOCHY V OPTICE POMOCÍ MATLABU

*J. Novák, P. Novák*

Katedra fyziky, Fakulta stavební, České vysoké učení technické v Praze

## Abstrakt

**V práci je popsán software pro počítačovou simulaci a analýzu zobrazovacích vlastností optických soustav, vytvořený ve výpočetním systému MATLAB. Tento software umožňuje výpočet, analýzu a následnou vizualizaci nejdůležitějších charakteristik pro hodnocení kvality obrazu (PSF, MTF). Na základě měřených či počítačově simulovaných dat (tvaru vlnoplochy) lze provádět jejich další zpracování.**

## 1 Úvod

Metodám měření a analýzy tvaru vlnoplochy v optice je ve světě dlouhodobě věnována značná pozornost, neboť se jedná o velmi důležitou problematiku, mající zásadní význam v celé řadě oblastí vědy a techniky. Tvar vlnoplochy nese množství velmi důležitých informací, jež se dají výhodně využít pro vědecké, průmyslové nebo biomedicínské účely. Možnost zpětné rekonstrukce tvaru vlnoplochy z přímých měření intenzity optického záření má aplikace v širokém oboru vědeckých, technických a biomedicínských oborů (astronomie, optické měřicí průmyslové systémy, zobrazovací systémy v mikroskopii, oční lékařství, materiálové inženýrství, atd.). K řešení této, pro praxi důležité, problematiky bylo použito mnoho různých přístupů. Každá z metod má své výhody, ale i nevýhody, které vždy silně závisí na konkrétní aplikaci, pro kterou se daná metoda využije. Neméně důležitou problematikou je navazující následná analýza naměřené vlnoplochy, neboť touto analýzou lze získat množství potřebných informací pro praktické účely. Tato práce se zabývá analýzou měření tvaru vlnoplochy pro oblast optické metrologie v průmyslu, analýzu aberací optických soustav a jejich testování.

Při hodnocení kvality zobrazovacích vlastností optických soustav (např. fotografických a mikroskopových objektivů, dalekohledů, projekčních systémů, apod.) je nutno kvantitativně určit, jakým způsobem bude za daných podmínek vypadat obraz a zda tento obraz nebude nepřipustně degradován vyšetřovanou optickou soustavou (tj. jaký bude kontrast obrazu a jaká je rozlišovací schopnost soustavy). Pro hodnocení optických soustav a prvků se využívá tzv. optická funkce přenosu, která určuje s jakým kontrastem budou zobrazeny jednotlivé struktury předmětu. Kvalita hodnocených optických soustav poté závisí na difrakci světla na apertuře soustavy a na aberacích (vadách) optických soustav.

V práci je popsán výukový software pro počítačovou simulaci a analýzu zobrazovacích vlastností optických soustav, vytvořený ve výpočetním systému MATLAB. Tento software umožňuje výpočet, analýzu a následnou vizualizaci nejdůležitějších charakteristik pro hodnocení kvality obrazu. Může sloužit jak pro analýzu měření tvaru vlnoplochy tak jako vhodný doplněk výuky aplikované optiky.

## 2 Hodnocení zobrazovací kvality optických soustav

Kvalita obrazu předmětu vytvořeného určitou optickou soustavou závisí na řadě faktorů z nichž k nejdůležitějším patří aberace optické soustavy. Aberacemi (vadami) optických soustav nazýváme odchylky zobrazení reálné optické soustavy od ideální optické soustavy [1]. Aberace optických soustav vznikají z několika příčin a to v důsledku lomu a odrazu světla na plochách optické soustavy, nedokonalostí výroby optických soustav a vadami materiálu, z kterého jsou optické prvky vyráběny.

Podle představ geometrické optiky nám ideální optická soustava, tj. soustava bez aberací, zobrazuje bod jako bod. Z hlediska vlnové optiky pak, v důsledku konečných rozměrů optických soustav, dochází při zobrazení k difrakci světla a obrazem bodu není bod, ale difrakční obrazec, vyznačující se specifickým rozdělením intenzity světla v obrazové rovině. Této odezvě optické soustavy na bodový signál (bodový zdroj světla) říkáme *rozptylová funkce bodu* (PSF - Point Spread

Function). Tvar rozptylové funkce (rozdělení energie v difrakčním obrazci) závisí obecně na vlnové délce světla, tvaru pupily, numerické apertuře, aberacích optické soustavy a poloze zobrazovaného bodu v rovině předmětu.

Optická soustava, jejíž vlastnosti budou omezeny pouze vlnovou povahou světla (soustava bez aberací), se nazývá *fyzikálně dokonalá optická soustava*. V případě zobrazení reálné optické soustavy, tj. optické soustavy zatížené aberacemi, dochází vlivem aberací k snižování kvality obrazu. Má-li být zobrazení optickou soustavou co nejdokonalejší, musí být vlnová aberace korigována tak, aby její zbytková hodnota byla co nejmenší a to v co nejširší spektrální oblasti.

Další funkcí, která nám charakterizuje zobrazovací vlastnosti optické soustavy je *optická funkce přenosu (OTF - Optical Transfer Function)* [1] jejíž modul - *funkce přenosu kontrastu (MTF - Modulation Transfer Function)* nám udává, s jakým kontrastem budou jednotlivé struktury předmětu, charakterizované prostorovou frekvencí  $R$ , udanou počtem čar na jednotku délky (např. čar/mm), optickou soustavou zobrazeny. Kontrast předmětu  $K_L$  a kontrast obrazu  $K_E$  jsou definovány vztahy

$$K_L = \frac{L_{\max} - L_{\min}}{L_{\max} + L_{\min}}, \quad K_E = \frac{E_{\max} - E_{\min}}{E_{\max} + E_{\min}},$$

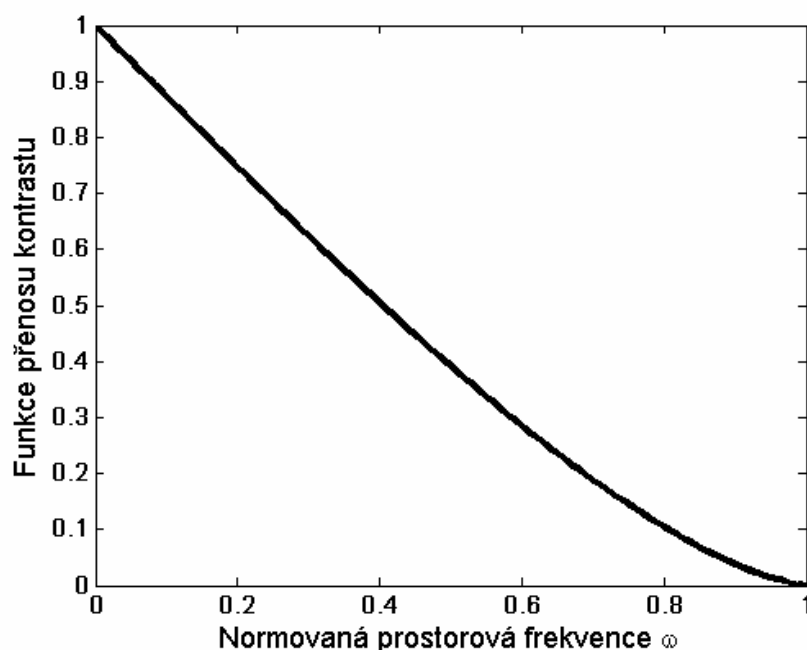
kde  $L_{\max}$  a  $L_{\min}$  značí maximální a minimální hodnotu jasu předmětu a  $E_{\max}$  a  $E_{\min}$  značí maximální a minimální hodnotu osvětlení v obrazové rovině. Pro funkci přenosu kontrastu pak platí

$$\text{MTF} = K_E/K_L.$$

V případě fyzikálně dokonalé optické soustavy (tj. soustavy bez aberací) s rovnoměrně propustnou pupilou kruhového tvaru a malou numerickou aperturou dostáváme pro funkci přenosu kontrastu (obr.1) [1]

$$\text{MTF}(\omega) = \frac{2}{\pi} \left( \arccos \omega - \omega \sqrt{1 - \omega^2} \right), \quad \omega \in \langle 0, 1 \rangle,$$

kde  $\omega = \lambda c R$  je normovaná prostorová frekvence,  $\lambda$  je vlnová délka záření,  $c$  je clonové číslo optické soustavy a  $R$  je prostorová frekvence (vyjádřená např. v čarách/mm).



Obr.1: Funkce přenosu kontrastu fyzikálně dokonalé optické soustavy

V případě reálné optické soustavy, zatížené aberacemi, se tvar funkce přenosu kontrastu změní, což závisí především na aberacích a parametrech optické soustavy (obecně dochází ke zhoršení přenosových charakteristik optické soustavy). Předmět může mít velmi složitou strukturu a jeho jednotlivé části se mohou vyznačovat různou jemností a kontrastem struktury. Optická soustava není schopna jednotlivé struktury předmětu zobrazit se stejným kontrastem a obraz bude tedy mít vždy horší kontrast než předmět, přitom hrubší struktury předmětu budou zobrazeny s větším kontrastem než jemné struktury.

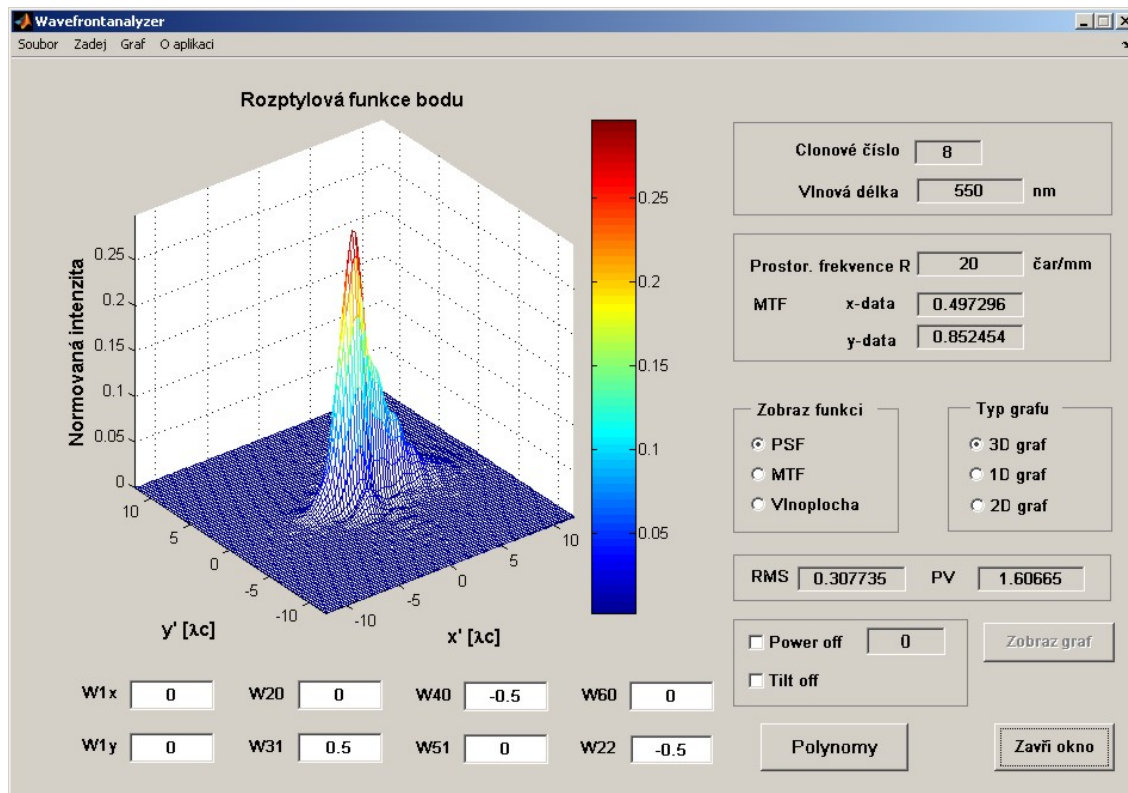
*Rozlišovací schopnost* optické soustavy je potom dána maximální prostorovou frekvencí  $R_{\max}$ , kterou daná optická soustava přeneše s nulovým kontrastem. Opět pro případ fyzikálně dokonalé optické soustavy s rovnoměrně propustnou pupilou kruhového tvaru je mezní (krajní) prostorová frekvence  $R_{\max}$ , kterou je optická soustava schopna přenést, dána vztahem [1]

$$R_{\max} = 1/\lambda c.$$

Volíme-li tedy vlnovou délku  $\lambda$  např. v mm, potom je prostorová frekvence  $R$  dána v čarách/mm. Z předchozího vztahu můžeme určit, kolik čar/mm je schopna fyzikálně dokonalá optická soustava (tj. ideální případ) s clonovým číslem  $c$  rozlišit při zobrazení světlem o vlnové délce  $\lambda$ .

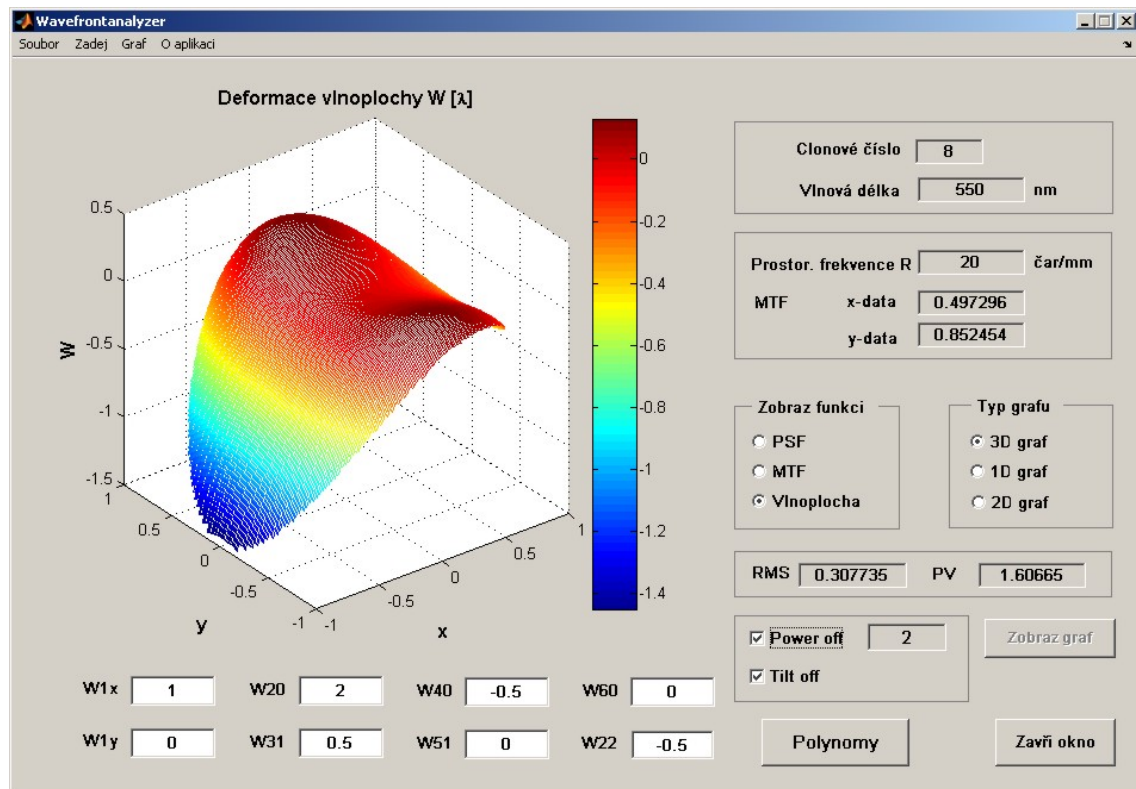
### 3 Software pro analýzu tvaru vlnoplochy

V práci byl vytvořen software pro počítačovou simulaci a analýzu tvaru vlnoplochy, vytvořený ve výpočetním systému MATLAB. Tento software umožňuje výpočet, analýzu a následnou vizualizaci nejdůležitějších charakteristik pro hodnocení kvality obrazu (PSF, MTF). Na základě měřených či počítačově simulovaných dat (tvaru vlnoplochy) lze provádět jejich další zpracování. Je tak možné jednoduše sledovat vliv aberací optických soustav na hodnotu rozptylové funkce bodu a funkce přenosu kontrastu. Lze také modelovat vliv jednotlivých typů primárních vad optických soustav na výslednou kvalitu obrazu. Dále je možné sledovat na hodnotě funkce přenosu kontrastu, jak se mění rozlišení reálných optických soustav, zatížených aberacemi.

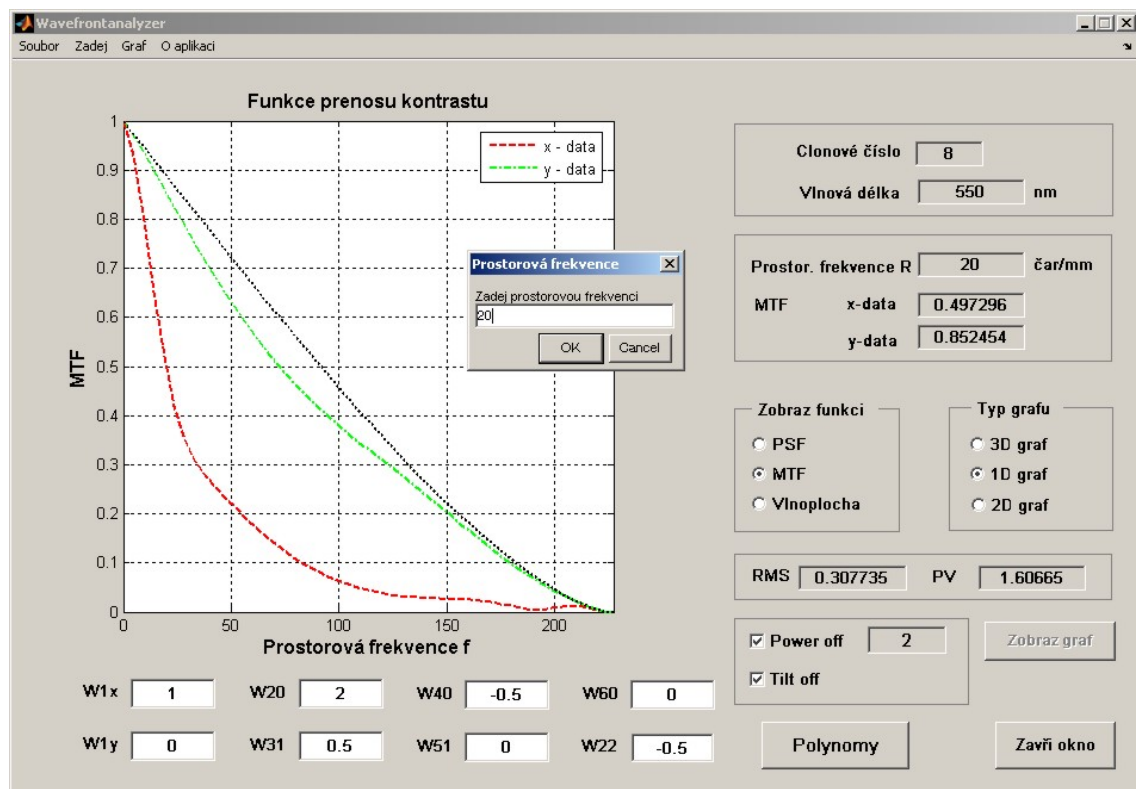


Obr.2: Software pro analýzu vlnoplochy – PSF

Na obr.2 je znázorněn případ výpočtu a zobrazení rozptylové funkce bodu reálné optické soustavy na základě počítačově simulované vlnové aberace optické soustavy. Deformace vlnoplochy (vlnová aberace) je počítačově modelována pomocí základních Seidelových polynomů pro popis aberací optických soustav (obr.3).



Obr.3: Výukový software pro analýzu vlnoplochy – tvar vlnoplochy  $W$



Obr.4: Výukový software pro analýzu vlnoplochy – MTF

Program umožňuje zobrazit různé typy grafů (3D, 2D a 1D graf) a vypočítat důležité charakteristiky vlnoplochy (RMS, P-V). Je též možno zadávat clonové číslo, vlnovou délku a prostorovou frekvenci  $R$ , pro kterou chceme určit hodnoty MTF. Na obr.4 je znázorněn případ výpočtu funkce přenosu kontrastu reálné optické soustavy s pomocí vytvořeného počítačového programu.

Software též umožňuje provedení analýzy měření tvaru vlnoplochy pro různé měřicí metody. Dále je možno provádět velmi jednoduchou a názornou vizualizaci vlivu základních typů vad optických soustav na výslednou kvalitu zobrazení a software tak může být vhodným doplňkem výuky aplikované optiky.

#### **4 Závěr**

V práci byl v prostředí MATLAB vytvořen software pro analýzu tvaru vlnoplochy a počítačovou simulaci a analýzu charakteristik kvality zobrazení u optických soustav. Software umožňuje velmi jednoduchou a názornou vizualizaci vlivu základních typů vad optických soustav na výslednou kvalitu zobrazení.

*Práce byla vypracována v rámci projektu MSM6840770022 Ministerstva školství ČR.*

#### **Literatura**

- [1] Mikš A.: *Aplikovaná optika 10*, Vydavatelství ČVUT, Praha 2000.
- [2] Mikš, A. - Novák, J.: *Education of Optics with Matlab*. Proceedings of SPIE Vol.5259, Washington: SPIE, 2003, s. 260-266.
- [3] Novák, J. - Pultarová, I. - Novák, P.: *Základy informatiky - počítačové modelování v Matlabu*. Vydavatelství ČVUT, Praha 2005.

---

Ing. Jiří Novák, PhD., Katedra fyziky, Fakulta stavební ČVUT v Praze, Thákurova 7, 166 29 Praha 6.  
tel: 224354345, fax: 233333226, e-mail: novakji@fsv.cvut.cz

Ing. Pavel Novák, Katedra fyziky, Fakulta stavební ČVUT v Praze, Thákurova 7, 166 29 Praha 6.  
tel: 224354345, fax: 233333226, e-mail: xnovakp9@fsv.cvut.cz