

REALIZACE BAREVNÉHO KONTRASTU DEFEKTŮ V OPTICKÉ PROSTOVĚ-FREKVENČNÍ OBLASTI SPEKTRA

Antonín Mikš, Jiří Novák

Fakulta stavební ČVUT, katedra fyziky
Thákurova 7, 166 29 Praha 6

1. Úvod

V technické praxi se často vyskytuje problém zjistit defekty ploch optických prvků a jiných technických ploch. Nejčastějšími defekty jsou povrchové škráby, nebo vady materiálu z kterého jsou vyšetřované prvky zhotoveny. Pokud se jedná o hrubé defekty, není obtížné je zjistit již pouhým okem. Problém však nastává u jemných defektů, které jsou okem již těžko postřehnutelné a pro jejich detekci je nutno zvolit speciální režim pozorování. Jedná se např. o jemné škráby, bubliny a šlíry optických prvků jako jsou čočky, hranoly, planparalelní desky, zrcadla atd. Při vizuálních metodách zjišťování těchto defektů získáme pouze kvalitativní informaci o přítomnosti určitého defektu, nemáme však možnost tento defekt kvantitativně vyhodnotit, nebo jen nepřímým srovnáním s podobným defektem na srovnávacím prvku, kterým je nejčastěji referenční destička s defekty uměle vytvořenými a předem změřenými. V hromadné výrobě, kdy je požadována stoprocentní kontrola každého vyráběného prvku dochází k tomu, po určité době je zrak, osoby provádějící kontrolu, unaven a není schopen spolehlivě kontrolu dále provádět.

Jak je známo z optiky, dochází při interakci vlnového pole s vyšetřovaným předmětem k narušení vlastností vlnového pole a toto narušení je závislé na vlastnostech vyšetřovaného předmětu např. na jeho defektech. Umíme-li nějakým způsobem popsat vazbu mezi defektem vyšetřovaného předmětu a poruchou vlnového pole, můžeme určit velikost a charakter defektu ze změřené poruchy vlnového pole. Dále je výhodné umět nějakým způsobem označit místo, na vyšetřovaném předmětu, kde se defekt nachází. Jde tedy o to ne jen zjistit, že na vyšetřovaném předmětu se nachází nějaký defekt, ale určit také jeho charakteristické parametry (např. tloušťku rýhy) a místo na předmětu, kde se tento defekt vyskytuje a nějakým způsobem tento defekt zviditelnit.

V předložené práci je ukázán jeden způsob detekce výše popsaných defektů s možností jejich kvantitativního vyhodnocení a zviditelnění pomocí barevného kontrastu realizovaného metodami optického zpracování informace v prostorově-frekvenční oblasti spektra.

2. Transformace vlnového pole optickou soustavou

Zabývejme se nyní problematikou určení stavu pole v libovolné rovině nacházející se za optickou soustavou známe-li pole v libovolné rovině nacházející se před optickou soustavou [1,2,3]. Tato problematika je velmi důležitá a to zejména v oblasti optických metod zpracování informace.

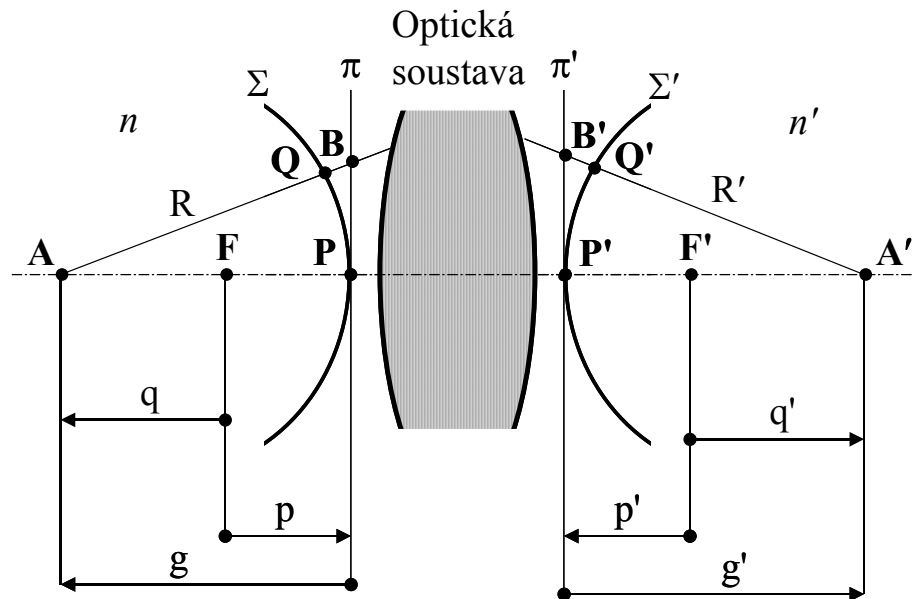
Určeme si nejprve vliv optické soustavy na jí transformované vlnové pole. Na obr.1 je znázorněna vyšetřovaná situace. Předpokládejme, že na optickou soustavu dopadá vlnoplocha Σ se středem v bodě A, která je optickou soustavou transformována na vlnoplochu Σ' se středem v bodě A'. Body A a A' jsou opticky sdružené body t.j. bod A' je obrazem bodu A vytvořeného optickou soustavou. Nechť dále π a π' jsou dvě libovolné roviny, které se nacházejí ve vzdálenostech p resp. p' od předmětového F resp. obrazového F' ohniska optické soustavy. Vlnoplocha Σ protíná optickou osu soustavy v bodě P roviny π a vlnoplocha Σ' protíná optickou osu soustavy v bodě P' roviny π' . Předpokládejme nyní, že známe stav pole v rovině π a chceme určit stav transformovaného vlnového pole v rovině π' . Potřebujeme tedy určit optickou dráhu mezi bodem B ležícím v rovině π a bodem B' ležícím v rovině π' . Jak plyne z definice vlnoplochy, jsou optické dráhy všech paprsků mezi dvěma pevnými vlnoplochami konstantní [1,2]. Nechť AB a AP jsou dva paprsky vycházející z bodu A protínající rovinu π v bodech B a P a vlnoplochu Σ v bodech Q a P. Těmto paprskům pak v obrazovém prostoru

optické soustavy odpovídají paprsky $\overline{B'A'}$ a $\overline{P'A'}$, které protínají vlnplochu Σ' v bodech Q' a P' . Vzhledem k tomu, že body Q, Q', P a P' leží na vlnplochách, jsou jejich optické dráhy (součin geometrické dráhy a indexu lomu prostředí) stejné a platí

$$[QQ'] = [PP'] ,$$

kde hranatými závorkami značíme optickou dráhu [1,2]. Pro optickou dráhu $[BB']$ pak platí

$$[BB'] = [QQ'] - [QB] - [B'Q'] = [PP'] - [QB] - [B'Q'] .$$



Obr.1 Transformace vlnplochy optickou soustavou

Podle **obr.1** platí

$$[QB] \approx -n \frac{x_B^2 + y_B^2}{2g} , \quad [B'Q'] \approx n' \frac{x_B'^2 + y_B'^2}{2g'} ,$$

kde (x,y) značí pravoúhlé souřadnice. Je-li m_P příčné zvětšení mezi rovinami π a π' , potom platí

$$x_B' = m_P x_B , \quad y_B' = m_P y_B$$

a tedy

$$[BB'] \approx [PP'] - \frac{x_B^2 + y_B^2}{2} \left(\frac{n' m_P^2}{g'} - \frac{n}{g} \right) . \quad (1)$$

Vztah (1) je obecným vyjádřením dráhového rozdílu zavedeného optickou soustavou při transformaci vlnového pole touto soustavou. Vztah (1) můžeme podstatně zjednodušit *volíme-li za vztahné roviny π a π' hlavní roviny optické soustavy*, potom platí $m_P = m_H = 1$. Uvážíme-li, že pro tento případ platí zobrazovací rovnice vztahená na hlavní body optické soustavy, tedy

$$\frac{n'}{g'} - \frac{n}{g} = \frac{n'}{f'} ,$$

kde f' je ohnisková vzdálenost optické soustavy, dostáváme pro dráhový rozdíl $[BB']$ následující vztah

$$[BB'] \approx [PP'] - n' \frac{x_B^2 + y_B^2}{2f'}. \quad (2)$$

Pro stav pole v bodě $B'(x'_B, y'_B)$ pak platí

$$U(x'_B, y'_B) = U(x_B, y_B) \exp ik_0 [BB'] = U(x_B, y_B) \exp ik_0 [PP'] \exp \left(-ik_0 n' (x_B^2 + y_B^2) / 2f' \right), \quad (3)$$

kde $U(x_B, y_B)$ je stav pole v bodě B. Vzhledem k tomu, že optická dráha $[PP']$ na optické ose soustavy je konstantní, můžeme přibližně předpokládat, že je rovna celistvému násobku vlnové délky světla a položit $\exp ik_0 [PP'] = 1$. Předcházející vztah se nám pak zjednoduší, platí

$$U(x'_B, y'_B) = U(x_B, y_B) \exp \left(-ik(x_B^2 + y_B^2) / 2f' \right), \quad (4)$$

kde jsme označili $k = n' k_0$ jako vlnové číslo v obrazovém prostředí. Vztah (4) nám umožňuje určit transformaci vlnového pole mezi hlavními rovinami optické soustavy.

Nyní můžeme přistoupit k obecnému řešení námi vyšetřované problematiky určení stavu pole v libovolné rovině nacházející se za optickou soustavou známe-li pole v libovolné rovině nacházející se před optickou soustavou.

Na **obr.2** je znázorněna situace zobrazení předmětu $f(x_1, y_1)$ optickou soustavou umístěnou v rovině (x_2, y_2) . Popisuje-li pole $U(x_1, y_1)$ vlnové pole v rovině těsně před předmětem, který je popsán funkcí $f(x_1, y_1)$, potom pole těsně za předmětem je dáno vztahem

$$U^+(x_1, y_1) = U(x_1, y_1) f(x_1, y_1).$$

Z roviny (x_1, y_1) do roviny (x_2, y_2) se pole šíří podle zákonů difrakce světla, kde v rámci Fresnelovy aproximace platí

$$U^-(x_2, y_2) = C_1 \iint_{\text{předmět}} U^+(x_1, y_1) \exp \left[\frac{ik}{2d_1} \left((x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2 \right) \right] dx_1 dy_1,$$

kde

$$C_1 = -\frac{i \exp(ikd_1)}{\lambda d_1}.$$

Označíme-li

$$h_{12}(x_1, y_1) = \exp \left[\frac{ik}{2d_1} \left((x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2 \right) \right],$$

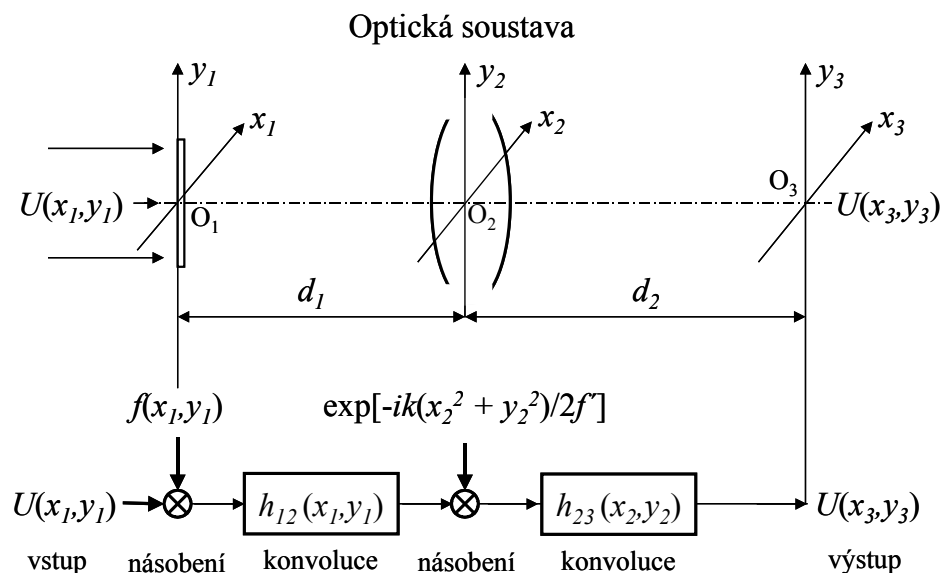
potom můžeme předcházející vztah psát ve tvaru konvoluce, platí

$$U^-(x_2, y_2) = C_1 \iint_{\text{předmět}} U^+(x_1, y_1) h_{12}(x_1, y_1) dx_1 dy_1.$$

Optická soustava, jak jsme si již dříve ukázali, provádí transformaci pole následujícím způsobem

$$U^+(x_2, y_2) = U^-(x_2, y_2) \exp \left[-ik(x_2^2 + y_2^2) / 2f' \right],$$

kde f' je ohnisková vzdálenost optické soustavy.



Obr.2 Zobrazení optickou soustavou

Nyní opět přejdeme z roviny (x_2, y_2) do roviny (x_3, y_3) difrakcí, tj. pomocí vztahu

$$U(x_3, y_3) = C_2 \iint_{\text{pupila}} U^+(x_2, y_2) h_{23}(x_2, y_2) dx_2 dy_2,$$

kde

$$C_2 = -\frac{i \exp(ikd_2)}{\lambda d_2},$$

$$h_{23}(x_2, y_2) = \exp\left[\frac{ik}{2d_2}((x_3 - x_2)^2 + (y_3 - y_2)^2)\right].$$

Pomocí tohoto obecného postupu můžeme provést analýzu zobrazení libovolného optického systému.

Ve zvláštním případě, kdy je předmět umístěn v předmětové ohniskové rovině optické soustavy a $U(x_1, y_1) = 1$ a pole vyšetřujeme v obrazové ohniskové rovině optické soustavy, tj. $d_1 = d_2 = f'$, platí

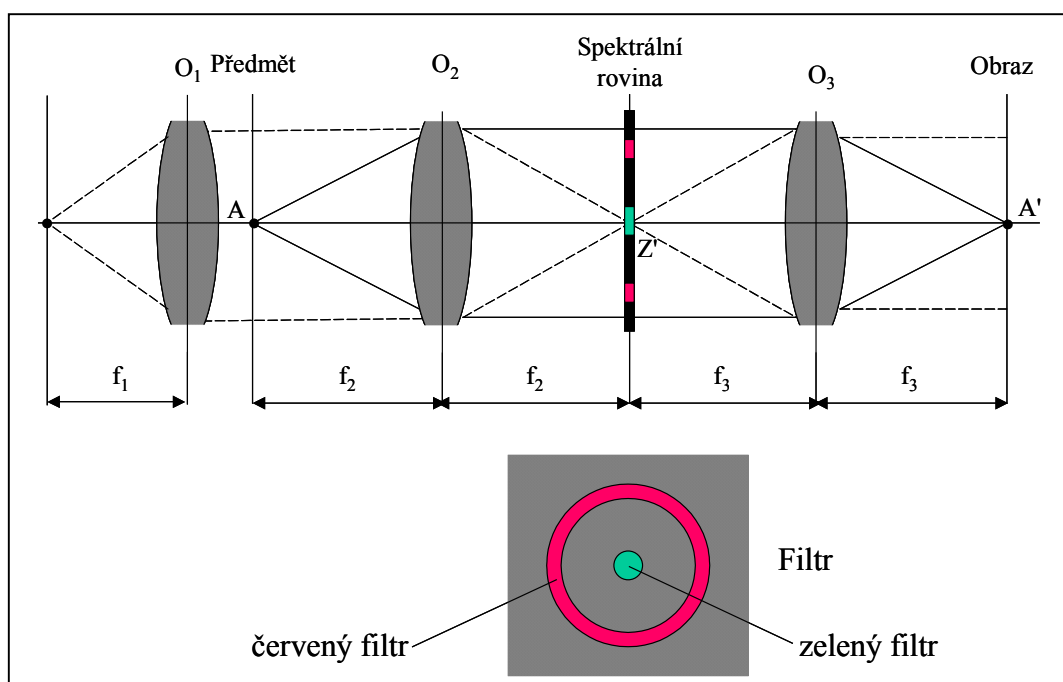
$$U(x_3, y_3) = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} f(x_1, y_1) \exp[-ik(x_1 x_3 + y_1 y_3)/f'] dx_1 dy_1.$$

Vidíme, že v tomto případě je pole $U(x_3, y_3)$ dáno Fourierovou transformací funkce $f(x_1, y_1)$, která nám popisuje vlastnosti předmětu. Jak je z tohoto vztahu patrné, můžeme pomocí optické soustavy realizovat Fourierovu transformaci. Těto vlastnosti optických soustav se využívá v systémech pro optické zpracování informace.

3. Realizace barevného kontrastu defektů v optické prostorově-frekvenční oblasti spektra

Princip metody, jejíž experimentální realizace je znázorněna na **obr.3**, spočívá ve využití metody barevné diskriminace jednotlivých prostorově-spektrálních frekvencí vlnového pole pomocí vhodné optické soustavy, jejíž funkce je následující. V předním ohnisku objektivu O_1 se nachází zdroj polychromatického světla, kterým je vyšetřovaný předmět, nacházející se za objektivem O_1 osvětlen. Za předmětem se nachází objektiv O_2 , v jehož předním ohnisku leží předmět. V zadním ohnisku objektivu O_2 , kde se podle předcházejícího vytváří prostorově-frekvenční spektrum předmětu, je

umístěn prostorově-frekvenční filtr s barevně diskriminovanými frekvenčními pásmy. Za tímto filtrem se nachází objektiv O_3 , který vytváří obraz předmětu ve své zadní ohniskové rovině (filtr leží v přední ohniskové rovině objektivu O_3). Vhodnou volbou a barevnou diskriminací prostorově-frekvenčních pásem filtru docílíme toho, že defekty předmětu se budou barevně odlišovat od předmětu a to v místech, kde se tyto defekty nacházejí, neboť světlo interagující s defektem bude procházet jinou částí spektrální roviny než světlo defektem neovlivněné. Vložení další optické soustavy (složené z částečně propustného zrcadla, skloněného pod úhlem 45° k optické ose soustavy, dalších objektivů, prostorového filtru a detektoru světla) za spektrální rovinu, můžeme kvantitativně vyhodnocovat velikosti defektů vyšetřovaného předmětu. Vyhodnocení obrazu je pak prováděno pomocí výpočetního prostředí MATLAB.



Závěr

V předložené práci byl ukázán jeden způsob detekce výše defektů vyšetřovaných předmětů s možností jejich kvantitativního vyhodnocení a zviditelnění pomocí barevného kontrastu realizovaného metodami optického zpracování informace v prostorově-frekvenční oblasti spektra.

Práce byla vypracována v rámci projektu MSM6840770022 Ministerstva školství ČR.

Literatura

- [1] A.Mikš: *FYZIKA 2 – Elektromagnetické pole*, Vydavatelství ČVUT, Praha 2005.
- [2] A.Mikš: *Aplikovaná optika 10*, Vydavatelství ČVUT, Praha 2000.
- [3] J.W.Goodman: *Introduction to Fourier Optics*. McGraw-Hill, New York, 1968.

Prof.RNDr.Antonín Mikš,CSc, Katedra fyziky, Stavební fakulta ČVUT, Thákurova 7, 166 29 Praha 6 - Dejvice. tel: 224354948, fax: 233333226, e-mail: miks@fsv.cvut.cz

Ing.Jiří Novák, PhD, Katedra fyziky, Stavební fakulta ČVUT, Thákurova 7,166 29 Praha 6 - Dejvice. tel: 224354435, fax: 233333226, e-mail: novakji@fsv.cvut.cz