Zobrazovací funkce

Bodová rozptylová funkce (Point Spread Function – PSF, funkce obrazu bodu)

PSF je funkce, která popisuje prostorové rozdělení normované intenzity, které systém vytvoří v rovině registrace obrazu při zobrazování bodového zdroje.

Bodová rozptylová funkce

$$I_N(X',Y') = \frac{|a(X',Y')|^2}{|a(0,0)|^2}$$

$a(X',Y')$ . . . komplexní amplituda ve vyšetřovaném bodu obrazové roviny

$a(0,0)$ . . . komplexní amplituda v paraxiálním obrazovém bodu

Pro normované pupilové souřadnice (X_p,Y_p) a normované obrazové souřadnice (X',Y') je komplexní amplituda určena jako Fourierova transformace pupilové funkce:

$$a(X',Y') = FT\{P(X_p,Y_p)\}$$

Kritéria hodnocení bodového zobrazení

Strehlovo kriterium

Určuje pokles intenzity v centru difrakčního obrazce (bod X'=Y'=0) způsobený vadami hodnoceného systému (nebo rozostřením) ve srovnání s intenzitou v centru Airyho disku, vytvořeného fyzikálně dokonalým systémem, který má stejný obrazový aperturní úhel jako systém hodnocený. Kriterium je použitelné pro hodnocení zobrazení ovlivněného malými vlnovými vadami.

Obecný tvar Strehlova kriteria

$$D = \frac{\left| \int\limits_{-\infty}^{+\infty}\int P_0(X_p, Y_p)\ \exp[ikW(X_p, Y_p)]\ dX_p dY_p \right|^2}{\left| \int\limits_{-\infty}^{+\infty}\int P_0(X_p, Y_p)\ dX_p dY_p \right|^2}$$

Strehlova kriterium pro OS s homogenně propustnou kruhovou pupilou:

$$P_0(X_p, Y_p) = \begin{matrix} 1 & pro & X_p^2 + Y_p^2 \le 1 \\ 0 & pro & X_p^2 + Y_p^2 > 1 \end{matrix}$$

$$D = \left| \frac{1}{\pi} \int\limits_0^1 \int\limits_0^{2\pi} \exp[ikW(R_p, \varphi_p)]\ R_p dR_p d\varphi_p \right|^2$$

Analýza vlivu malých deformací vlnoplochy

Pro malé hodnoty vlnových vad můžeme Strehlovo kriterium určit s použitím tří členů rozvoje:

$$\exp(ikW) \approx 1 + ikW - \frac{(kW)^2}{2}$$

Přibližný tvar Strehlova kriteria (člen s W^4 byl zanedbán)**:**

$$D = 1 - k^2[\langle W^2 \rangle - \langle W \rangle^2]$$

$$\langle W \rangle = \frac{1}{\pi}\int_0^1\int_0^{2\pi} W \ R_p dR_p d\varphi_p,$$

$$\langle W^2 \rangle = \frac{1}{\pi}\int_0^1\int_0^{2\pi} W^2 R_p dR_p d\varphi_p.$$

Systém bez optických vad: D=1
Přípustný pokles Strehlova kriteria: D>0.8

Za předpokladu stálé energie v obrazu bodu pokles hodnoty Strehlova kriteria signalizuje rozšíření centrálního maxima difrakčního obrazce nebo nárůst intenzity ve vedlejších maximech. Dá se tedy využít jako míra degradace obrazu bodu způsobená optickými vadami nebo rozostřením.

Přípustné rozostření fyzikálně dokonalého systému

Vlnová vada způsobená rozostřením: $W_{020} = A_{020} R_p^2, \qquad A_{020} = -u^2 \Delta Z'/2$

Strehlovo kriterium pro rozostření: $D = 1 - \frac{1}{12} k^2 A_{020}^2$

U fyzikálně dokonalého systému jakýkoliv posuv roviny registrace obrazu mimo paraxiální obrazovou rovinu vede k degradaci obrazu. Připustný posuv této roviny můžeme určit z poklesu hodnoty Strehlova kriteria, který ještě může být akceptován (obvykle se připouští pokles D=0.8).

Přípustné rozostření

$$\Delta Z'_{\max} = \pm\sqrt{2.4}\,\frac{\lambda}{u^2\pi} \approx \pm\frac{\lambda}{2u^2}$$

S rostoucím aperturním úhlem OS se zmenšuje rozměr difrakčního obrazu bodu (poloměr Airyho disku je nepřímo úměrný aperturnímu úhlu) ale současně výrazně rostou nároky na přesnost polohy detektoru, který registruje obraz (přípustný defokusační posuv je nepřímo úměrný druhé mocině aperturního úhlu).

Optimální zaostření

U OS se zbytkovými optickými vadami může být jejich degradační účinek částečně eliminován vhodným posuvem roviny registrace obrazu vzhledem k paraxiální obrazové rovině. Optimální výběr tohoto posuvu je možné provést pomocí Strehlova kriteria.

Vlnové vady OS, které mají být kompenzovány optimálním zaostřením: W_S

Vlnová vada způsobená přeostřením: $W_{020} = A_{020} R_p^2$

Celková vlnová vada: $W = W_S + A_{020} R_p^2$

Strehlovo kriterium pro celkovou vlnovou vadu: D

Podmínka optimálního zaostření:

$$\boxed{\frac{\partial D}{\partial A_{020}} = 0}$$

Koeficient optimálního zaostření pro vlnovou vadu W_S :

$$A_{020} = 6\ [\langle W_S \rangle - 2\langle W_S R_p^2 \rangle]$$

Koeficient optimálního zaostření pro vlnovou vadu W_S :

$$\Delta Z'_{OPT} = \frac{12}{u^2}\ [2\langle W_S R_p^2 \rangle - \langle W_S \rangle]$$

Optimální zaostření při sférické vadě 3. řádu

Vlnová vada pro sférickou vadu 3. řádu:

$$W_S = A_{040} R_P^4$$

$$\langle W_S \rangle = \frac{1}{3} A_{040},$$

$$\langle W_S R_P^2 \rangle = \frac{1}{4} A_{040}$$

$\Rightarrow$

Koeficient optimálního zaostření:

$$A_{020} = -A_{040}$$

Optimální zaostřovací posuv:

$$\Delta Z'_{OPT} = \frac{2}{u^2} A_{040}$$

Strehlovo kriterium pro sférickou vadu 3. řádu:

$$D = 1 - \frac{4}{45} k^2 A_{040}^2$$

Podélná složka sférické vady 3. řádu:

$$\Delta Z'_S = \frac{4}{n' u^2} A_{040} R_P^2$$

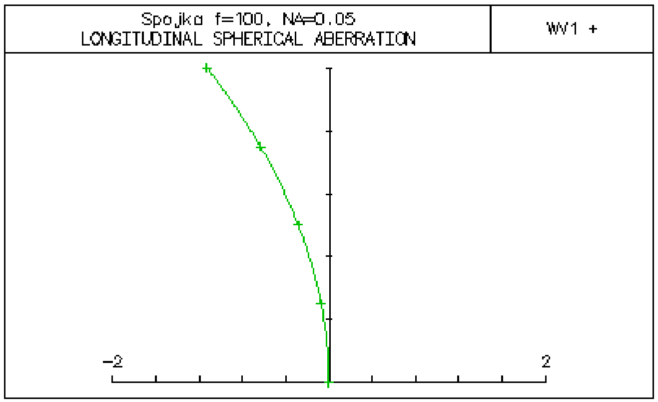
Největší přípustná hodnota sférické vady 3. řádu (pro D=0.8):

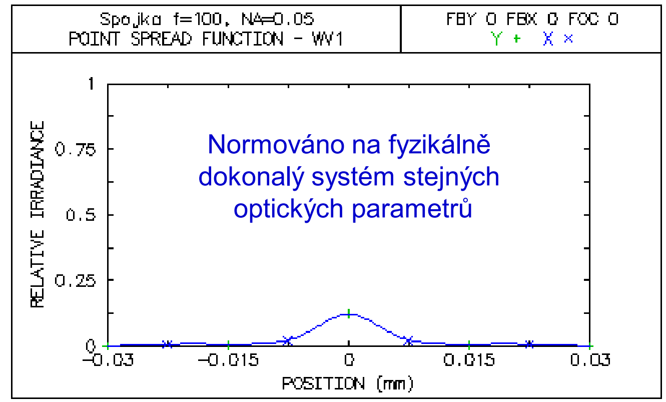
$$\Delta Z'_{S\,MAX} \approx \pm \frac{\lambda}{n' u^2}$$

Demonstrace optimálního zaostření v programu OSLO

Nekorigovaný průběh sférické vady – plankonvexní spojka

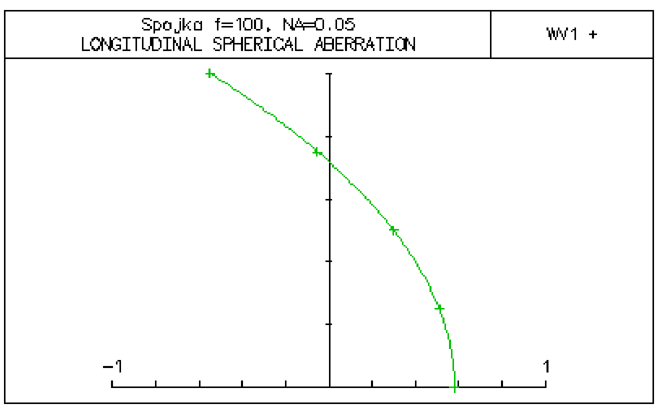
Paraxiální obrazová rovina

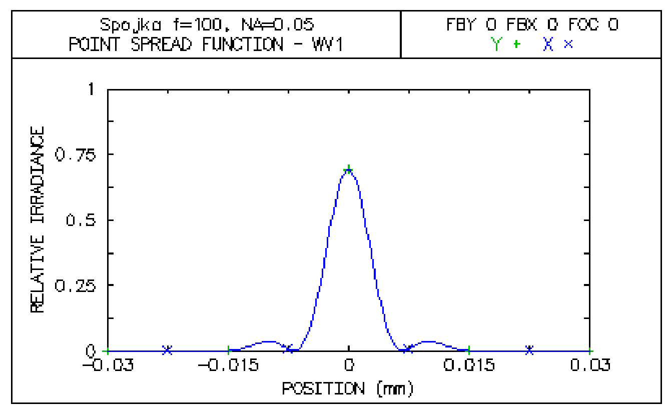




Optimální obrazová rovina

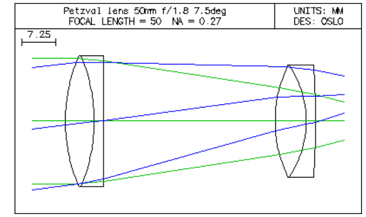
(poloha určena výpočtem pomocí extrému Strehlova kriteria)



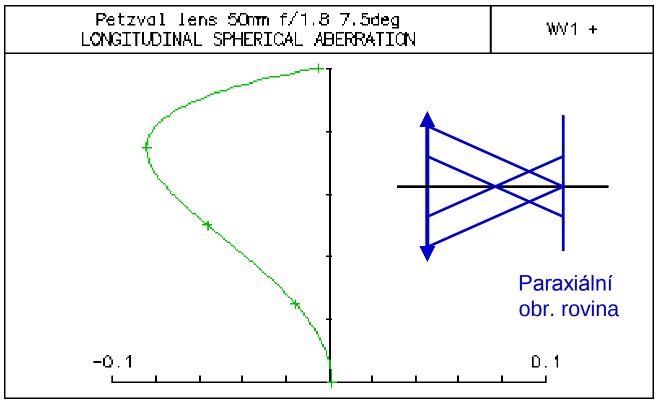


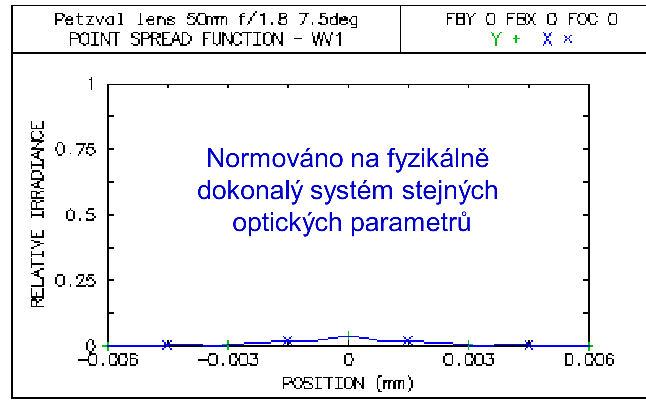
Demonstrace optimálního zaostření v programu OSLO

Korigovaný průběh sférické vady – Petzvalův objektiv



Paraxiální obrazová rovina





Optimální obrazová rovina

(poloha určena minimalizací RMS OPD v programu OSLO)