

# Vliv komy na přesnost měření optických přístrojů

Antonín Mikš  
Katedra fyziky, FSv ČVUT, Praha

*V práci je vyšetřován vliv meridionální komy na přesnost měření optickými přístroji a to na základě difrakční teorie optického zobrazení. Vliv komy na rozptylovou funkci bodu optické soustavy je analyzován pomocí systému MATLAB. Je ukázáno, že v případě optických systémů určených pro měřicí přístroje je nutno je korigovat tak, aby se hodnota Strehlovy definice blížila k jedné.*

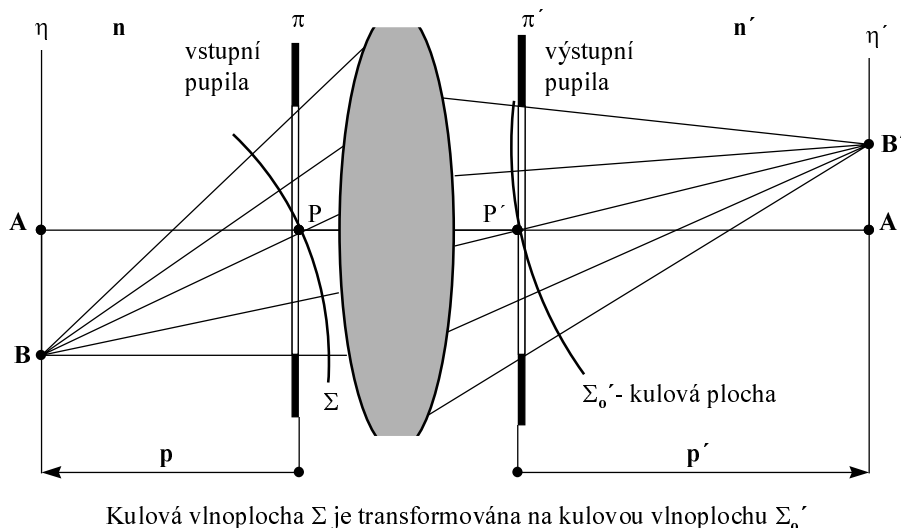
## 1. Úvod

V technické praxi se používá celá řada optických přístrojů sloužících pro měření délkových rozměrů a to např. v oblasti strojírenství a geodézie. Typickými představiteli těchto přístrojů jsou měřicí mikroskopy, profilprojektory, teodolity a nivelační přístroje. Základním prvkem těchto přístrojů je optická soustava složená z objektivu a záměrného obrazce, jehož motiv závisí na účelu, pro který je přístroj určen. V důsledku difrakce světla a vzhledem k tomu, že každá optická soustava je zatížena zbytkovými aberacemi [1,2], nebude obrazem bodu bod, ale difrakční obrazec (rozptylová funkce bodu) vyznačující se určitým rozdělením energie. V důsledku toho, bude obraz měřeného bodu na předmětu posunut o určitou hodnotu vzhledem k poloze ideálního obrazového bodu. V důsledku toho nejsme schopni přesně změřit daný předmět a to i v případě, kdy je záměrný obrazec (např. stupnice) přesně vyroben. Přesnost měření bude tím menší, čím větší budou hodnoty zbytkových aberací optické soustavy. Základní aberace, která nám ovlivňuje přesnost měření je koma [1,2]. Úkolem tohoto článku je ukázat vliv komy na přesnost měření optickými přístroji.

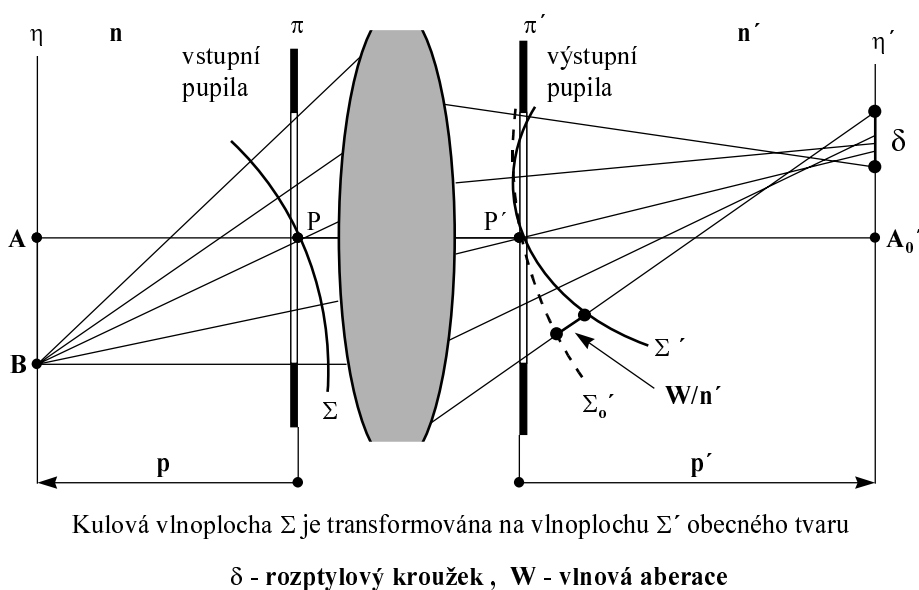
## 1. Zobrazení optickou soustavou

Na **obr.1** je znázorněno zobrazení ideální optické soustavy [1,2,3,4]. Uvažujme např. mimoosový bod B, z kterého vychází kulová vlnoplocha  $\Sigma$ . Vzhledem k tomu, že *ideální optická soustava zobrazuje bod opět jako bod*, bude kulová vlnoplocha  $\Sigma$ , po průchodu optickou soustavou, transformována opět na kulovou vlnoplochu  $\Sigma_0'$  se středem v bodě B', který je obrazem bodu B. Paprsky vycházející z bodu B budou, po průchodu optickou soustavou, protínat obrazovou rovinu  $\eta'$  v bodě B'.

Zabývejme se nyní zobrazením reálnou optickou soustavou, tj. optickou soustavou zatíženou aberacemi. Na **obr.2** je znázorněno zobrazení takovouto soustavou. Uvažujme opět mimoosový bod B, z kterého vychází kulová vlnoplocha  $\Sigma$ . Po průchodu reálnou optickou soustavou se kulová vlnoplocha  $\Sigma$  transformuje na vlnoplochu  $\Sigma'$  obecného tvaru. Odchylku W vlnoplochy  $\Sigma'$  od ideální kulové vlnoplochy  $\Sigma_0'$  nazýváme *vlnovou aberací* optické soustavy. Paprsky vycházející z bodu B, se po průchodu optickou soustavou nebudou protínat v jednom bodě, ale obrazovou rovinu  $\eta'$  protnou v řadě různých bodů tvořících tzv. *rozptylový kroužek*. Čím větší bude vlnová aberace optické soustavy, tím větší bude velikost  $\delta$  rozptylového kroužku.



**Obr.1 Zobrazení ideální optickou soustavou**



**Obr.2 Zobrazení reálnou optickou soustavou**

Polohu obrazové roviny  $\eta'$  volíme tak, aby procházela bodem  $A_0'$ , který je ideálním obrazem osového bodu A.

Aberace optických soustav vznikají z několika příčin a to v důsledku lomu a odrazu světla na plochách optické soustavy, nedokonalostí výroby a montáže optických soustav a vadami materiálu, z kterého jsou optické prvky vyráběny.

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 (rozptylová funkce bodu)**, vyznačující se určitým rozdělením energie. *Rozdělení energie v difrakčním obrazci závisí na vlnové délce světla, tvaru pupily, clonovém čísle a aberacích optické soustavy.*

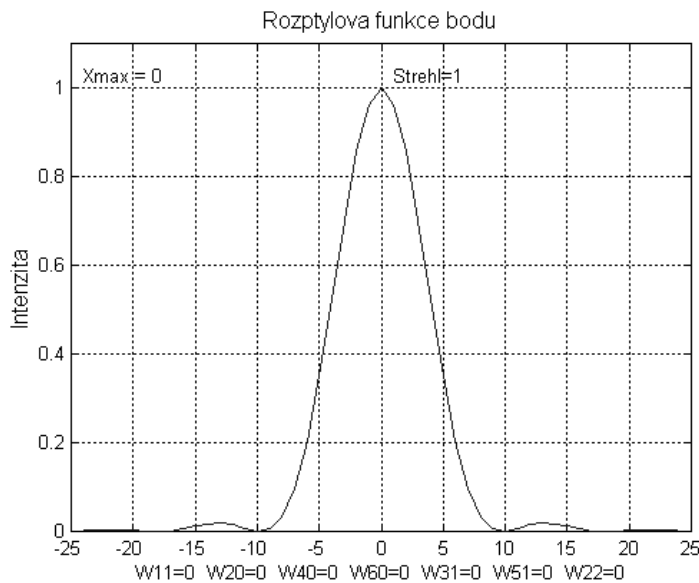
### 3. Vliv komy na tvar difrakčního obrazce

Všimněme si nyní vlivu komy na tvar difrakčního obrazce. Pro vlnovou aberaci v případě komy platí [1]

$$W = \frac{\delta y'_{mk}}{6c} r^3 \cos \varphi = W_{31} r^3 \cos \varphi,$$

kde  $r$  a  $\varphi$  jsou polární souřadnice v rovině výstupní pupily optické soustavy,  $\delta y'_{mk}$  je meridionální koma a  $c$  je clonové číslo optické soustavy.

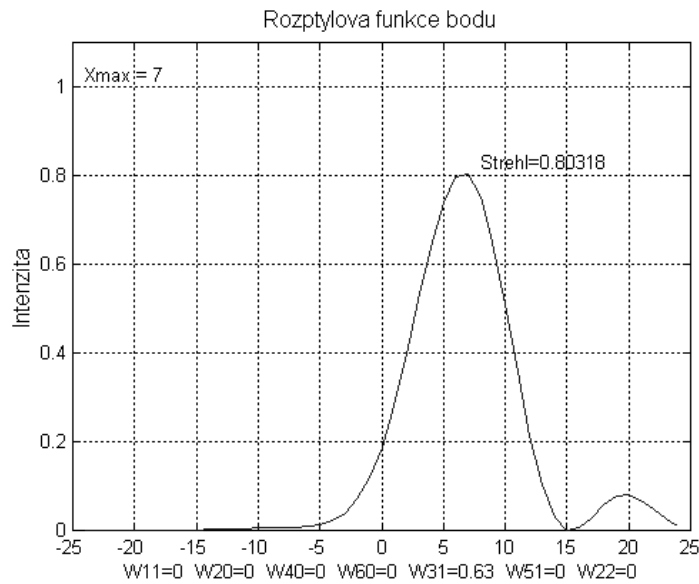
Difrakční obrazec je v případě komy nesymetrický a maximum intenzity se nachází v určité vzdálenosti od středu difrakčního obrazce, který by vytvořila optická soustava bez aberací. V důsledku této nesymetrie dochází k nepřesnosti při měření optickými přístroji, neboť za obraz bodu považuje detektor (např. oko nebo CCD senzor) místo, kde je intenzita světla v difrakčním obrazci maximální. Na **obr.3** je znázorněno rozdělení intenzity v difrakčním obrazci v případě fyzikálně dokonalé optické soustavy tj. soustavy bez aberací.



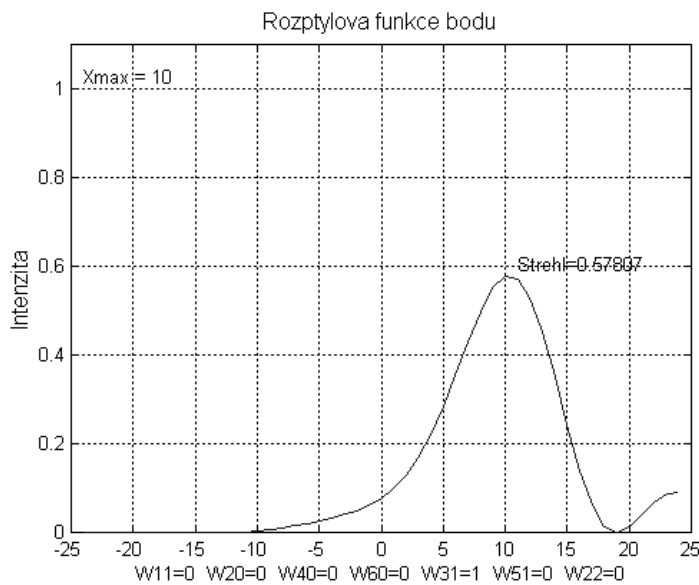
**Obr.3** Rozptylová funkce fyzikálně dokonalé optické soustavy

Poměr maximální hodnoty intenzity v difrakčním obrazci k maximální hodnotě intenzity v difrakčním obrazci fyzikálně dokonalé optické soustavy nazýváme *Strehlovou definicí*. Podle Strehla [5,1,2,3] se zobrazení optické soustavy prakticky neliší od zobrazení fyzikálně dokonalé optické soustavy, je-li Strehlova definice větší než 0,8 (*Strehlovo kritérium*). Na **obr.4** je znázorněno rozdělení intenzity v difrakčním obrazci v případě optické soustavy zatížené komou o velikosti  $W_{31}=0,63\lambda$ , kde  $\lambda$  je vlnová délka světla. Vidíme, že maximum rozptylové funkce se posunulo o hodnotu  $x_{max} = 7$  (v jednotkách  $0,122\lambda c$ ), vzhledem k poloze maxima ( $x_{max} = 0$ ) rozptylové funkce fyzikálně dokonalé soustavy. Strehlova definice má hodnotu 0,80 a zobrazení je tedy dokonalé. Na **obr.5** je znázorněno rozdělení intenzity v difrakčním obrazci v případě optické soustavy zatížené komou o velikosti  $W_{31}=1\lambda$ . Maximum rozptylové funkce se posunulo o hodnotu  $x_{max} = 10$ , vzhledem k poloze maxima rozptylové funkce fyzikálně dokonalé soustavy.

Strehlova definice má hodnotu 0,57 a zobrazení je tedy značně horší než v předcházejícím případě.



**Obr.4 Rozptylová funkce soustavy zatížené komou  $W_{31}=0,63\lambda$**



**Obr.5 Rozptylová funkce soustavy zatížené komou  $W_{31}=1\lambda$**

Pro přesné měřicí přístroje požadujeme, aby hodnota Strehlovy definice byla větší než 0,8. V krajním případě tj. pro  $W_{31}=0,63\lambda$  je centrální maximum rozptylové funkce posunuto o hodnotu  $y_0 = 0,85\lambda c$  vzhledem k poloze maxima rozptylové funkce fyzikálně dokonalé soustavy, což je chyba v určení polohy měřeného bodu zapříčiněná meridionální komou optické soustavy o velikosti  $\delta y'_{mk} = 3,8\lambda c$ . Vyjádříme-li si nyní  $y_0$  pomocí meridionální komy, dostáváme v obecném případě

$$y_0 = 0,22 \delta y'_{mk} .$$

**Příklad:** máme určit chybu určení vzdálenosti v případě nitkového dálkoměru, jehož objektiv má ohniskovou  $f = 0,2$  m a průměr vstupní pupily  $D = 50$  mm, zaměřeného na lať ve vzdálenosti  $s = 100$  m před přístrojem. Měření je prováděno světlem o vlnové délce  $550$  nm. Je-li  $y' = 2$  mm vzdálenost rysek na záměrné stupnici a  $y$  velikost úseku na lati, potom pro vzdálenost  $s$  platí

$$s = (f/y')y.$$

Diferenciací tohoto vztahu dostáváme

$$\delta s = (f/y')\delta y = (s/y')\delta y'.$$

Pro  $\delta y' = y_0 = 0,85\lambda c = 0,00187$  mm dostáváme  $\delta s = 93$  mm. Vidíme, že vliv komy na přesnost měření je dosti velký a je proto nutno její hodnotu co nejvíce zmenšit.

#### 4. Závěr

Na základě difrakční teorie optického zobrazení byl vyšetřován vliv komy na přesnost měření optickými přístroji. Pomocí systému *MATLAB* byla provedena analýza vlivu komy na rozptylovou funkci optické soustavy. Na příkladě nitkového dálkoměru bylo demonstrováno, že i v případě optické soustavy splňující Strehlovo kritérium je vliv komy na přesnost určení vzdálenosti značně velký. V případě měřicích optických přístrojů je proto nutné korigovat jejich soustavy tak, aby se hodnota Strehlovy definice blížila k jedné.

#### Literatura

- [1] A.Mikš: *Aplikovaná optika 10*. Vydavatelství ČVUT, Praha 2000.
- [2] B.Havelka: *Geometrická optika I*. NČSAV, Praha, 1955.
- [3] M.Born, E.Wolf, *Principles of Optics*. Oxford University Press, New York, 1964.
- [4] M.V.Klein: *Optics*. John Wiley & Sons, Inc., New York, 1970.
- [5] K.Strehl: *Die Theorie des Fernrohrs auf Grund der Beugung des Lichtes*. J.A.Barth, Leipzig 1984.

Doc.RNDr.Antonín Mikš,CSc , Katedra fyziky, FSv ČVUT, Thákurova 7, 166 29 Praha 6.  
Tel: (02) 24354948, Fax: (02) 3333 3226, E-mail: miks@fsv.cvut.cz