ANALÝZA PRŮCHODU PAPRSKOVÝCH SVAZKŮ KOUTOVÝM ODRAŽEČEM

P. Kytka, J. Novák

ČVUT v Praze, Fakulta stavební, katedra fyziky

Práce se zabývá analýzou průchodu paprsků koutovým odražečem, což je typ hranolu, který je běžně používán v inženýrské geodézii pro měření. V práci je teoreticky popsán způsob chodu paprsků a je provedena komplexní analýza vlivu nepřesností jednotlivých úhlů hranolu na chybu odchylky vystupujícího paprsku po jeho průchodu hranolem s využitím výpočetního prostředí MATLAB.

1. Úvod

Určení odchylky paprsku po průchodu různými optickými členy je jednou ze základních úloh geometrické optiky, která slouží pro navrhování optických přístrojů a soustav. Přesnost výroby jednotlivých členů je základním faktorem, který společně s fyzikálními parametry navrhovaných optických soustav limituje výslednou kvalitu zobrazení. Optické hranoly jsou optické prvky z průhledného optického prostředí s rovinnými plochami, které mezi sebou svírají určité předem definované úhly. Při průchodu paprskových svazků se využívá jak lomu tak především odrazu na stěnách. Primárním úkolem hranolů v optických přístrojích je poté změna směru a orientace procházejících paprskových svazků pomocí odrazu a lomu světla na funkčních plochách hranolu. Hranoly jsou součástí mnoha přesných optických měřicích přístrojů. Důležitou otázkou pro praxi je to, jak se projeví chyby jednotlivých úhlů hranolu na výsledné odchylce paprsku, což souvisí též s úlohou přesného měření úhlů optických hranolů. Vzhledem k tomu, že výroba každého optického prvku je vždy ztížena určitou chybou, nechovají se vyrobené optické prvky tak, jak by se měly teoreticky chovat. Je proto velmi důležité pro praxi znát vliv chyb jednotlivých optických prvků. V praxi jsou úhly hranolů vždy zatíženy chybami, které vznikají v procesu výroby. Tyto úhlové chyby hranolu jsou podstatnou složkou při posuzování kvality hranolu a rozhodují o možné aplikaci hranolu v různých přístrojích. Někdy se chyby úhlů u vyrobených hranolů navzájem kompenzují a je tedy nutno posoudit kvalitu hranolu komplexně s ohledem na jeho využití.

V rámci této práce se zaměříme na průchod paprsků koutovým odražečem, což je typ hranolu, který je běžně používán v inženýrské geodézii pro měření. V práci je teoreticky popsán způsob chodu paprsků u zvoleného hranolu. Dále je provedena komplexní analýza vlivu nepřesností jednotlivých úhlů hranolu na chybu odchylky vystupujícího paprsku po jeho průchodu hranolem s využitím výpočetního prostředí MATLAB.

2. Průchod paprskových svazků hranolem

Určení odchylky paprsku po průchodu různými optickými členy je jednou ze základních úloh geometrické optiky, která slouží pro navrhování optických přístrojů a soustav. Přesnost výroby jednotlivých členů je základním faktorem, který společně s fyzikálními parametry navrhovaných optických soustav limituje výslednou kvalitu zobrazení [1]. Optický hranol si lze obecně představit jako soustavu rovinných ploch, které mezi sebou svírají určité úhly. Primárním úkolem hranolů v optických přístrojích je poté změna směru a orientace procházejících paprskových svazků pomocí odrazu a lomu světla na funkčních plochách hranolu. Důležitou otázkou pro praxi je to, jak se projeví chyby jednotlivých úhlů hranolu na výsledné odchylce paprsku, což souvisí též s úlohou přesného měření úhlů optických hranolů.

Vzhledem k tomu, že výroba každého optického prvku je vždy ztížena určitou chybou, nechovají se vyrobené optické prvky tak, jak by se měly teoreticky chovat. Je proto velmi důležité pro praxi znát vliv chyb jednotlivých optických prvků. V praxi jsou úhly hranolů vždy zatíženy chybami, které vznikají v procesu výroby. Tyto úhlové chyby hranolu jsou podstatnou složkou při posuzování kvality hranolu a rozhodují o možné aplikaci hranolu v různých přístrojích. Někdy se chyby úhlů u vyrobených hranolů navzájem kompenzují a je tedy nutno posoudit kvalitu hranolu komplexně s ohledem na jeho využití.

Nejprve se budeme zabývat popisem průchodu paprsku obecným optickým hranolem, definovaným vektorovou bází normálových vektorů lámavých a odrazných ploch. Budeme předpokládat, že *stěny hranolu jsou dokonale rovinné plochy*, tj. omezíme se na geometrickou teorii průchodu paprsku hranolem a zanedbáme možné deformace stěn hranolu, které ovlivňují kvalitu zobrazení a způsobují též odchylky procházejících paprsků [2,3]. Jak již bylo řečeno, při průchodu paprsku optickým hranolem dochází k jeho lomu resp. odrazu na jedné nebo více funkčních plochách hranolu. Pro směrový vektor $\mathbf{s}'$ lomeného paprsku na dané ploše poté podle zákona lomu platí [1,4]

$$\mathbf{s}' = \frac{n}{n'}\mathbf{s} + \left(\sqrt{1 - \left(\frac{n}{n'}\right)^2 [1 - (\mathbf{sg})^2]} - \frac{n}{n'}\mathbf{sg} \right)\mathbf{g}\,. \tag{1}$$

kde **s** je jednotkový směrový vektor dopadajícího paprsku, **g** je jednotkový vektor normály k ploše, na které nastává lom, n je index lomu prvního prostředí a n' je index lomu druhého prostředí. Pro odraz na funkčních plochách optického hranolu poté můžeme podle zákona a odrazu psát pro směrový vektor odraženého paprsku [1,4]

$$\mathbf{s}'' = \mathbf{s} - 2(\mathbf{s}\cdot\mathbf{g})\mathbf{g}\,, \tag{2}$$

kde vektor $\mathbf{g}$ značí jednotkový normálový vektor k dané ploše, na které nastává odraz. Postupným využitím předchozích vztahů již můžeme provést propočet paprsku libovolným typem hranolu. V dalším se zaměříme pouze na případ koutového odražeče.

3. Koutový odražeč

Koutový odražeč je optický hranol, který tvoří pravoúhlý trojhran (rovnoramenný čtyřstěn). V ideálním případě paprsek, který vstupuje na čelní stěnu hranolu (podstavu trojhranu) se třikrát odráží na jednotlivých stěnách hranolu a poté vystupuje zpět čelní stěnou v přesně opačném směru, tj. úhlová odchylka dopadajícího paprsku je rovna 180°. Koutový odražeč nachází široké pole působnosti v řadě odvětví vědy a techniky, např. pro přesná měření délek, apod. U ideálního hranolu jsou tři úhly pravé a pro další tři vychází $\sin\omega = \sqrt{6}/3$, $\cos\omega = 1/\sqrt{3}$. Všechny úhly jsou však v praxi zatíženy určitými chybami, způsobenými výrobním procesem hranolu. Podle výše uvedených vztahů pro lom a odraz světla na rozhraní hranolu lze opět pro odchylku paprsku po průchodu koutovým odražečem, jenž je vyroben z materiálu o indexu lomu n, psát následující rovnice:

Lom 1 ($\mathbf{s}_0 \to \mathbf{s}_1$):
$$\mathbf{s}_1 = \frac{1}{n}\mathbf{s}_0 - \left(\sqrt{1 - \left(\frac{1}{n}\right)^2 [1 - (\mathbf{s}_0\mathbf{g})^2]} + \frac{1}{n}\mathbf{s}_0\mathbf{g} \right)\mathbf{g}\,, \tag{3}$$

Odraz 1 ($\mathbf{s}_1 \to \mathbf{s}_2$):
$$\mathbf{s}_2 = \mathbf{s}_1 - 2(\mathbf{s}_1\cdot\mathbf{g}_1)\mathbf{g}_1\,, \tag{4}$$

Odraz 2 ($\mathbf{s}_2 \to \mathbf{s}_3$):
$$\mathbf{s}_3 = \mathbf{s}_2 - 2(\mathbf{s}_2\cdot\mathbf{g}_2)\mathbf{g}_2\,, \tag{5}$$

Odraz 3 ($\mathbf{s}_2 \to \mathbf{s}_3$):
$$\mathbf{s}_4 = \mathbf{s}_3 - 2(\mathbf{s}_3\cdot\mathbf{g}_3)\mathbf{g}_3\,, \tag{6}$$

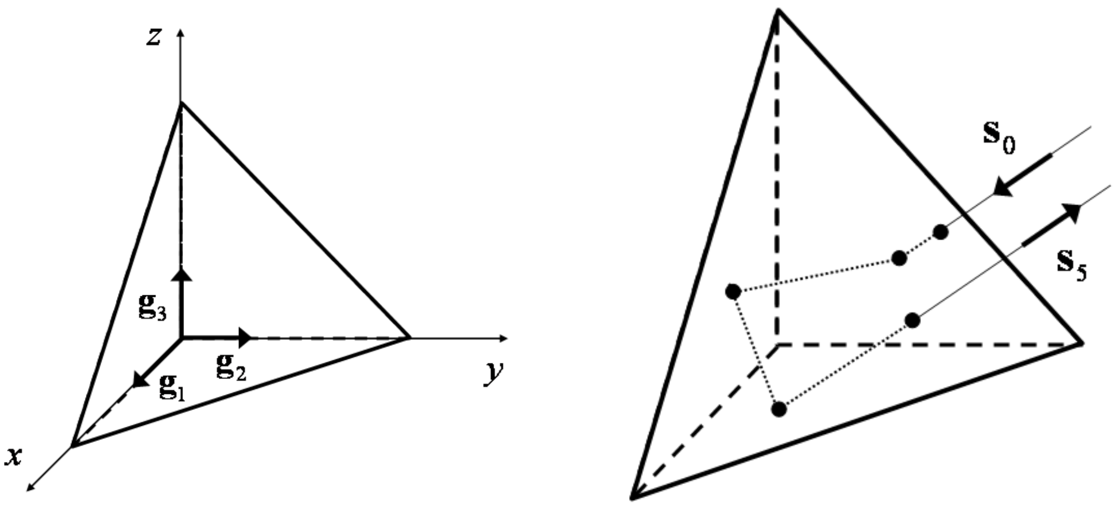
Lom 2 ($\mathbf{s}_4 \to \mathbf{s}_5$):
$$\mathbf{s}_5 = n\mathbf{s}_4 + \left(\sqrt{1 - n^2[1 - (\mathbf{s}_4\mathbf{g})^2]} - n\mathbf{s}_4\mathbf{g}\right)\mathbf{g}\,, \tag{7}$$

kde $\mathbf{g}_1, \mathbf{g}_2, \mathbf{g}_3$ jsou jednotkové normálové vektory ke stěnám hranolu, na kterých nastává odraz a $\mathbf{g}$ je jednotkový normálový vektor k čelní (vstupní) ploše hranolu. Pomocí uvedených vztahů lze modelovat průchod obecného paprsku vyšetřovaným hranolem a vliv nepřesností výroby jednotlivých úhlů hranolu na výslednou odchylku vystupujícího paprsku. Situace je schématicky znázorněna na obr.1. Podle uvedeného obrázku platí pro jednotkové normálové vektory k jednotlivým funkčním plochám hranolu, že

$$\mathbf{g}_1 = (1,0,0), \quad \mathbf{g}_2 = (0,1,0), \quad \mathbf{g}_3 = (0,0,1), \quad \mathbf{g} = (1,1,1)/\sqrt{3}. \tag{8}$$

Odchylku ϑ vstupujícího a vystupujícího paprsku poté jednoduše můžeme určit ze vztahu

$$\cos\vartheta = \frac{\mathbf{s}_0 \cdot \mathbf{s}_5}{\|\mathbf{s}_0\| \cdot \|\mathbf{s}_5\|}. \tag{9}$$



Obr.1: Průchod paprsku koutovým odražečem

Podle uvedených obecných vektorových vztahů byl vytvořen software, který umožňuje pomocí geometricko-optické teorie analyzovat odchylku vystupujícího paprsku v závislosti na výrobní přesnosti hranolu.

Průchod paprsku koutovým odražečem s použitím vektorového počtu můžeme též vyjádřit analyticky. Budeme-li předpokládat, že odrazné plochy jsou dokonale rovinné a v dalším budeme uvažovat pouze trojnásobný odraz na těchto plochách hranolu. Nechť $\mathbf{g}_1$, $\mathbf{g}_2$ a $\mathbf{g}_3$ jsou jednotkové vektory kolmé těmto plochám, přičemž se uvažuje pravotočivá souřadná soustava. Dále nechť vektory $\mathbf{g}'_1$, $\mathbf{g}'_2$ a $\mathbf{g}'_3$ jsou rovnoběžné s průsečíkem ploch, takže budou platit vztahy:

$$\mathbf{g}'_1 = \frac{\mathbf{g}_2 \times \mathbf{g}_3}{\Delta}, \qquad \mathbf{g}'_2 = \frac{\mathbf{g}_3 \times \mathbf{g}_1}{\Delta}, \qquad \mathbf{g}'_3 = \frac{\mathbf{g}_1 \times \mathbf{g}_2}{\Delta},$$

kde $\Delta = [\mathbf{g}_1\mathbf{g}_2\mathbf{g}_3] = (\mathbf{g}_1 \times \mathbf{g}_2)\mathbf{g}_3$ značí smíšený součin vektorů. Nechť dopadající paprsek s jednotkovým směrovým vektorem $\mathbf{s}_1$ postupně protíná jednotlivé plochy tak, že jsou po jednom, dvou a tří odrazech užitím zákona lomu ve vektorovém tvaru jeho směry $\mathbf{s}_2, \mathbf{s}_3$ a $\mathbf{s}_4$. Kombinací vektorových rovnic zákona odrazu pro výsledný směr $\mathbf{s}_4$ na výstupu odražeče dostaneme:

$$
\begin{aligned}
\mathbf{s}_4 &= \mathbf{s}_1 - 2(\mathbf{s}_1\cdot\mathbf{g}_1)\mathbf{g}_1 - 2(\mathbf{s}_1\cdot\mathbf{g}_2)\mathbf{g}_2 - 2(\mathbf{s}_1\cdot\mathbf{g}_3)\mathbf{g}_3 + 4(\mathbf{s}_1\cdot\mathbf{g}_1)(\mathbf{g}_1\cdot\mathbf{g}_2)\mathbf{g}_2 + \\
&+ 4(\mathbf{s}_1\cdot\mathbf{g}_1)(\mathbf{g}_1\cdot\mathbf{g}_3)\mathbf{g}_3 + 4(\mathbf{s}_1\cdot\mathbf{g}_2)(\mathbf{g}_2\cdot\mathbf{g}_3)\mathbf{g}_3 - 8(\mathbf{s}_1\cdot\mathbf{g}_1)(\mathbf{g}_1\cdot\mathbf{g}_2)(\mathbf{g}_2\cdot\mathbf{g}_3)\mathbf{g}_3.
\end{aligned}
$$

Předchozí rovnice se dá upravit tak, že oddělíme členy s chybami různých řádů s využitím vlastností vektorů $\mathbf{g}_1$, $\mathbf{g}_2$, $\mathbf{g}_3$ a vektorů $\mathbf{g}_1'$, $\mathbf{g}_2'$, $\mathbf{g}_3'$, které tvoří reciproký systém. Po úpravě tak lze obdržet výsledný vztah

$$
\begin{aligned}
\mathbf{s}_4 &= -\mathbf{s}_1 - 2\Delta[(\mathbf{g}_2\cdot\mathbf{g}_3)\mathbf{g}_1' - (\mathbf{g}_3\cdot\mathbf{g}_1)\mathbf{g}_2' + (\mathbf{g}_1\cdot\mathbf{g}_2)\mathbf{g}_3']\times\mathbf{s}_1 + 2(\mathbf{s}_1\cdot\mathbf{g}_2)(\mathbf{g}_2\cdot\mathbf{g}_1)(\mathbf{g}_1-\mathbf{g}_1') + \\
&+ 2(\mathbf{s}_1\cdot\mathbf{g}_3)(\mathbf{g}_3\cdot\mathbf{g}_1)(\mathbf{g}_1-\mathbf{g}_1') + 2(\mathbf{s}_1\cdot\mathbf{g}_3)(\mathbf{g}_3\cdot\mathbf{g}_2)(\mathbf{g}_2-\mathbf{g}_2') + 2(\mathbf{s}_1\cdot\mathbf{g}_1)(\mathbf{g}_1\cdot\mathbf{g}_2)(\mathbf{g}_2-\mathbf{g}_2') + \\
&+ 2(\mathbf{s}_1\cdot\mathbf{g}_1)(\mathbf{g}_1\cdot\mathbf{g}_3)(\mathbf{g}_3-\mathbf{g}_3') + 2(\mathbf{s}_1\cdot\mathbf{g}_2)(\mathbf{g}_2\cdot\mathbf{g}_3)(\mathbf{g}_3-\mathbf{g}_3') - 8(\mathbf{s}_1\cdot\mathbf{g}_1)(\mathbf{g}_1\cdot\mathbf{g}_2)(\mathbf{g}_2\cdot\mathbf{g}_3)\mathbf{g}_3.
\end{aligned}
\tag{10}
$$

Tento výsledek je přesný pro libovolnou hodnotu úhlů tří odrazných ploch. Protože však koutový odražeč má plochy přibližně kolmé, potom rozdíly $(\mathbf{g}_1-\mathbf{g}_1')$, $(\mathbf{g}_2-\mathbf{g}_2')$ a $(\mathbf{g}_3-\mathbf{g}_3')$ jsou malé. Malé hodnoty jsou také součiny $(\mathbf{g}_1\cdot\mathbf{g}_2)$, $(\mathbf{g}_1\cdot\mathbf{g}_3)$, $(\mathbf{g}_2\cdot\mathbf{g}_3)$. To znamená, že ve vztahu (10) jsou hodnoty za prvním členem výrazu veličiny velikosti druhého řádu, které lze pro malé chyby úhlů (jež se v praxi vyskytují) zanedbat.

Jestliže tedy $\Delta\alpha_{1,2}$, $\Delta\alpha_{1,3}$, $\Delta\alpha_{2,3}$ označíme malé absolutní chyby pravých úhlů mezi jednotlivými stěnami koutového odražeče (dané výrobní přesností hranolu), pak lze psát:

$$\mathbf{g}_2\cdot\mathbf{g}_3 = \cos\left(\frac{\pi}{2}-\Delta\alpha_{2,3}\right) = \sin\Delta\alpha_{2,3},$$

$$\mathbf{g}_3\cdot\mathbf{g}_1 = \sin\Delta\alpha_{3,1},$$

$$\mathbf{g}_1\cdot\mathbf{g}_2 = \sin\Delta\alpha_{1,2}.$$

Protože se jedná v praxi o úhly velikostí několika vteřin, lze použít aproximaci $\sin\alpha \approx \alpha$. Substitucí předchozích vztahů a uvážením pouze členu velikosti prvního řádu potom dostaneme pro výsledný vektor paprsku

$$\mathbf{s}_4 = -\mathbf{s}_1 + 2\mathbf{s}_1\times\left(\Delta\alpha_{2,3}\mathbf{g}_1 - \Delta\alpha_{1,3}\mathbf{g}_2 + \Delta\alpha_{1,2}\mathbf{g}_3\right). \tag{11}$$

Toto je explicitní tvar výrazu pro směr odraženého paprsku $\mathbf{s}_4$, vyjádřený pomocí veličin dopadajícího paprsku, za předpokladu malých úhlových chyb koutového odražeče. Pro úplný popis průchodu paprsku musíme ještě započítat lom na vstupní ploše hranolu.

4. Simulace průchodu paprsků koutovým odražečem

Nechť úhly, které svírají jednotlivé stěny koutového odražeče, jsou označeny $\alpha_{1,2},\alpha_{2,3},\alpha_{3,1}$. V případě ideálního hranolu budou všechny úhly pravé. Na základě velikosti těchto úhlů můžeme určit jednotkové normálové vektory $\mathbf{g}_1$, $\mathbf{g}_2$, $\mathbf{g}_3$ k jednotlivým stěnám hranolu. Zvolme např. $\mathbf{g}_2 = (0,1,0)$, $g_{13} = 0$. Dále platí

$$\mathbf{g}_1\cdot\mathbf{g}_2 = g_{12} = \cos\alpha_{1,2}, \quad \mathbf{g}_2\cdot\mathbf{g}_3 = g_{32} = \cos\alpha_{2,3},$$

$$\mathbf{g}_1\cdot\mathbf{g}_3 = g_{11}g_{31} + g_{12}g_{32} + g_{13}g_{33} = \cos\alpha_{3,1},$$

$$\|\mathbf{g}_1\| = g_{11}^2 + g_{12}^2 + g_{13}^2 = 1, \qquad \|\mathbf{g}_3\| = g_{31}^2 + g_{32}^2 + g_{33}^2 = 1.$$

Pomocí předchozích vztahů poté obdržíme pro zbývající tři složky normálových vektorů

$$g_{11} = \sin\alpha_{1,2}, \qquad g_{31} = \frac{\cos\alpha_{3,1} - \cos\alpha_{1,2}\cos\alpha_{2,3}}{\sin\alpha_{1,2}}, \qquad g_{33} = \sqrt{\sin^2\alpha_{2,3} - g_{31}^2}.$$

Abychom provedli statistickou analýzu vlivu chyb jednotlivých úhlů na chybu odchylky paprsku vystupujícího z hranolu, provedeme počítačovou simulaci náhodných chyb úhlů hranolu. Na počátku simulace určíme odchylku ϑ a směrový vektor $\mathbf{s}_5$ pro ideální hranol (tj. hranol, kdy chyba velikosti úhlů je nulová). Budeme předpokládat, že chyby $\Delta\alpha_{1,2}, \Delta\alpha_{2,3}, \Delta\alpha_{3,1}$ jednotlivých úhlů jsou dány normálním rozdělením s nulovou střední hodnotou a směrodatnými odchylkami $\delta\alpha_{1,2}, \delta\alpha_{2,3}, \delta\alpha_{3,1}$, tj.

$$\Delta\alpha_{1,2} \in N(0, \delta\alpha_{1,2}), \quad \Delta\alpha_{2,3} \in N(0, \delta\alpha_{2,3}), \quad \Delta\alpha_{3,1} \in N(0, \delta\alpha_{3,1}).$$

Jednotlivé úhly koutového odražeče tedy budou mít hodnotu

$$\alpha'_{1,2} = \alpha_{1,2} + \Delta\alpha_{1,2}, \qquad \alpha'_{2,3} = \alpha_{2,3} + \Delta\alpha_{2,3}, \qquad \alpha'_{3,1} = \alpha_{3,1} + \Delta\alpha_{3,1}.$$

Po průchodu hranolem získáme jednotkový směrový vektor $\mathbf{s}'_5$ a odchylku ϑ' vstupujícího a vystupujícího paprsku poté jednoduše určíme ze vztahu

$$\cos\vartheta' = \mathbf{s}_0 \cdot \mathbf{s}'_5.$$

Simulace se provádí pro velký počet opakování (výpočet odchylky ϑ' pro různé hodnoty $\alpha'_{1,2}, \alpha'_{2,3}, \alpha'_{3,1}$) a následně se dá určit střední hodnota $\overline{\vartheta}$ a rozptyl hodnot σ_ϑ^2 odchylky ϑ'. Úhlovou odchylku paprsku mezi počítačově simulovaným případem a ideálním případem získáme jednoduše ze vztahu

$$\cos\delta\vartheta = \mathbf{s}_5 \cdot \mathbf{s}'_5.$$

Budeme-li chtít statisticky zpracovat nejen velikost úhlové odchylky $\delta\vartheta$, ale i její směr φ v rovině kolmé na vektor $\mathbf{s}_5 = (s_{5,1}, s_{5,2}, s_{5,3})$, potom zavedeme jednotkové vektory

$$\mathbf{t}_5 = \frac{(-s_{5,2}, s_{5,1}, 0)}{\sqrt{s_{5,1}^2 + s_{5,2}^2}}, \qquad \mathbf{b}_5 = \mathbf{s}_5 \times \mathbf{t}_5.$$

Úhel φ v rovině kolmé na vektor $\mathbf{s}_5$ lze poté vypočítat z následujících vztahů

$$\mathbf{r} = (\mathbf{t}_5 \cdot \mathbf{s}_5)\mathbf{t}_5 + (\mathbf{b}_5 \cdot \mathbf{s}_5)\mathbf{b}_5, \qquad r = \|\mathbf{r}\| = \sin\delta\vartheta, \qquad \cos\varphi = \frac{\mathbf{r} \cdot \mathbf{t}_5}{\sin\delta\vartheta}.$$

Poté lze výsledné odchylky zpracovat statisticky nejen podle velikosti, ale i podle jejich směru. Předpokládejme nyní případ ideálního koutového odražeče

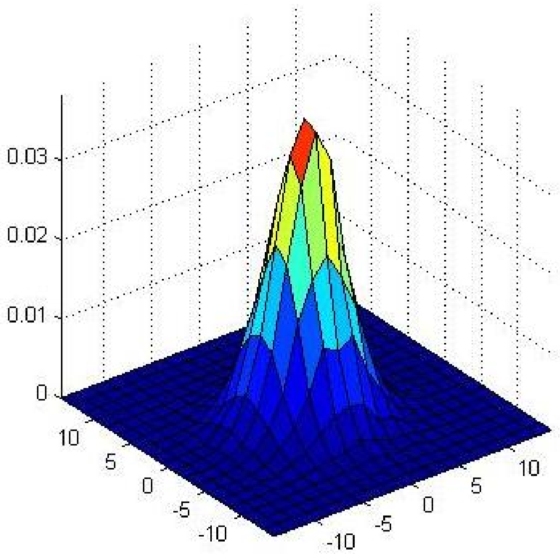
$$\alpha_{1,2} = \alpha_{2,3} = \alpha_{3,1} = 90^\circ.$$

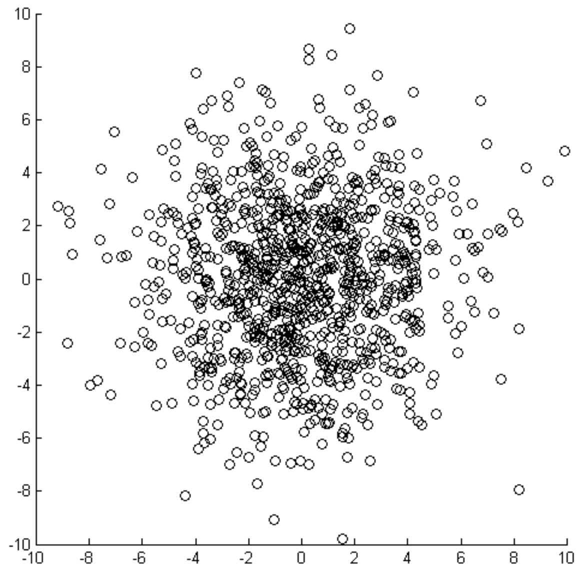
Předpokládejme dále, že vstupní směr paprsku je $\mathbf{s}_0 = -(1,1,1)/\sqrt{3}$. Provedená simulace úhlových odchylek jednotlivých úhlů hranolu $\Delta\alpha_{1,2}, \Delta\alpha_{2,3}, \Delta\alpha_{3,1}$ a výpočet směrodatné odchylky $\sigma_{\delta\vartheta}$ je uveden v tabulce 1 pro zvolené hodnoty směrodatné odchylky úhlových chyb $\delta\alpha_{1,2} = \delta\alpha_{2,3} = \delta\alpha_{3,1} = \delta\alpha$.

Tabulka 1: Závislost směrodatné odchylky $\sigma_{\delta\vartheta}$ na chybách úhlů hranolu $\delta\alpha$

$\delta\alpha$ ['']	$\sigma_{\delta\vartheta}$ ['']
1	2.01
5	10,08
10	20,15
15	30,14
20	39,92
25	50,29
30	60,24
35	70,15
40	79,24
45	90,21
50	98,80
55	108,72
60	118,18

Směrovou závislost a velikost úhlových odchylek $\delta\vartheta$ vystupujících paprsků je možno graficky zobrazit pomocí rozdělení relativní četnosti odchylek nebo v polárních souřadnicích jako bodový graf v rovině (obr.2).





Obr.2: Zobrazení rozdělení úhlových odchylek $\delta\vartheta$

5. Závěr

V práci byla provedena teoretická analýza průchodu paprsků koutovým odražečem. Byl zkoumán vliv nepřesností jednotlivých úhlů hranolu na chybu odchylky vystupujícího paprsku po jeho průchodu hranolem. Dále byla provedena statistická analýza daného problému s využitím výpočetního prostředí MATLAB.

6. Literatura

[1] A.Mikš : Aplikovaná optika 10 - Geometrická a vlnová optika. Vydavatelství ČVUT, Praha 2000.

[2] A.Mikš: Interferometrické metody vyhodnocování sférických ploch v optice, Jemná mechanika a optika, 2000, roč. 46, č. 1, s. 29-35.

[3] A.Mikš, J.Novák: Testing of Plano-Optical Elements. Optica Applicata, 2003, 33 (3), 391-402.

[4] E.Kašpar: Optické hranoly, Zvláštní otisk Sborníku Masarykovy akademie práce, r.22, č.125.

Petr Kytka, Fakulta stavební ČVUT v Praze, Thákurova 7, 16629 Praha 6, email: p.kytka@seznam.cz

Ing.Jiří Novák, Ph.D., katedra fyziky, Fakulta stavební ČVUT v Praze, Thákurova 7, 16629 Praha 6, email: novakji@fsv.cvut.cz