

Korektor Volosova

Zdeněk Rail, Daniel Jareš, Vít Lédl,
Ústav fyziky plazmatu AV ČR, v.v.i. – OD, Skálova 89, 51101 Turnov
e-mail: vod@jpp.cas.cz

Abstrakt

Krátce po objevu meniskového dalekohledu Maksutova byly zkoumány optické vlastnosti dvojčočkového systému jako korektoru optických vad. Dublet byl umístěn v paralelním svazku paprsků před obecnou optickou soustavou.

Afokální korektor, složený ze dvou tenkých čoček ze stejného materiálu umožňoval u řady optických systémů radikální zmenšení zbytkových optických vad a dosažení vynikajících zobrazovacích vlastností.

Oproti Schmidtově desce má dvojčočkový korektor pouze sférické plochy a daleko volnější výrobní tolerance než menisek Maksutova.

Odvození rovnic pro výpočet parametrů korektoru provedli v roce 1943 Volosov, Galpern a Grebenščikova. Náš referát se zabývá optickými vadami soustavy zrcadla s obecnou asféricí a korektorem Volosova. Tyto systémy jsou mezi optiky a astronomy málo známé, přestože umožňují konstrukci světelných fotografických komor a dalekohledů.

The Corrector of Volosov

Soon after discovery of meniscus telescope of Maksutov optical properties of doublet corrector was researched. Doublet was placed into parallel light beam in front of common optical system.

Afocal corrector composed of two thin lenses of the same glass enables to correct optical aberrations of many systems and to reach radical improvement of their imaging properties.

Compared to Schmidt plate doublet corrector possesses only spherical surfaces and its manufacturing tolerances are much freer than meniscus of Maksutov.

Derivation of main equations was performed by Volosov, Galpern and Grebenshchikova in 1943. Our paper deals with optical aberrations of the system consisting of common aspherical mirror and corrector of Volosov. These systems are less known among opticians and astronomers but enable construction of fast cameras and telescopes.

1. Úvod

Krátce po objevu Schmidtovy a Maksutovovy komory se optici v SSSR (Volosov, Galpern a Grebenščikova) zabývali optickými vlastnostmi afokálního dubletu jako korektoru optických vad. O něco později se stejným problémem zabývali v Holandsku Lurie a ve Velké Británii Houghton.

V Maksutovově komoře jsou pro korekci optických vad k dispozici pouze čtyři parametry – dva poloměry křivosti menisku, jeho tloušťka a vzdálenost menisku od primárního zrcadla.

Naproti tomu, afokální dublet má čtyři optické parametry použitelné pro korekci optických vad soustavy za ním: poloměry křivosti ploch a v soustavě se zrcadlem jejich vzájemnou vzdálenost. Navíc, zrcadlo může být asférické, takže soustava korektoru Volosova a zrcadla má celkem šest volných parametrů pro korekci optických vad – viz obr.1.

2. Aplanatický systém korektoru Volosova se sférickým zrcadlem

Optické parametry soustavy sférického zrcadla s korektorem Volosova je možné spočítat přímo ze Seydelových sum [1], [2]. Korektor, dublet z tenkých čoček, má čtyři poloměry křivosti čoček, jejichž hodnoty lze použít jako volné parametry pro splnění čtyř podmínek.

První dva parametry použijeme pro splnění podmínek afokálnosti a achromasie.

Aby dublet byl afokální, musí mít čočky stejné hodnoty optických mohutností, avšak opačných znamének (1).

$$\varphi_1 + \varphi_2 = 0 \quad (1)$$

Podmínka achromasie má tvar (2) :

$$\varphi_1/v_1 + \varphi_2/v_2 = 0 \quad (2)$$

kde : φ_1, φ_2 jsou optické mohutnosti čoček
 v_1, v_2 jsou Abbeho čísla skla čoček

Mají-li být rovnice (1) a (2) splněny současně, musí být obě čočky vyrobeny ze stejného materiálu, takže

$$v_1 = v_2. \quad (3)$$

Další dva parametry jsou použity pro anulování první a druhé Seydelovy sumy pro opravu sférické vady a komy.

$$S_I = S_I(h_i, P_i, B_i) \quad (4)$$

$$S_{II} = S_{II}(y_i, P_i, B_i, W_i) \quad (5)$$

kde : h_i, y_i jsou výšky průsečíku prvního a druhého paraxiálního paprsku na i -té ploše
 P_i, W_i jsou příspěvky i -té plochy do Seydelovy sumy
 Jejich hodnoty závisí na indexech lomů prostředí před a za plochou, dopadových a transformovaných úhlech prvního a druhého paraxiálního paprsku a poloměru křivosti plochy.
 B_i reprezentuje příspěvek asféricity plochy. Sférické zrcadlo má hodnotu $B_i = 0$

Výpočet optických parametrů je možné provádět podle [1] nebo [2].

Metodika výpočtu :

Na začátku výpočtu zvolíme vzdálenost d_4 korektoru od sférického primárního zrcadla. Toto zrcadlo má hodnoty příspěvků do Seydelových sum $P_5 = 1/4$, $W_5 = 1/2$. Z těchto třech hodnot spočítáme P_{1k}, W_{1k} , které jsou v Seydelových sumách součty příspěvků P_i, W_i ploch korektoru. Seydelovy sumy (4) a (5) poté upravíme na tvarové rovnice, z nichž vyjdou poloměry křivosti ploch korektoru. Během výpočtu lze volit optické mohutnosti čoček, rozhodnout, zda vstupní čočka je spojka nebo rozptylka a ovlivňovat jejich tvary.

Při podrobnějším rozboru tvarů čoček lze najít i řešení korektoru, kde $R_1 = -R_3$ a $R_2 = -R_4$.

Malou odchylkou od podmínky $R_1 = -R_3$, změnami R_1 lze měnit sférochromatickou vadu soustavy.

Z hlediska technologie výroby je toto řešení ekonomicky velmi výhodné. Díky stejně velkým, ale opačným hodnotám poloměrů křivosti ploch se zjednoduší výroba měřících kalibrů a brusných podložek.

Korektor s výše uvedenými parametry čoček se v literatuře označuje jako Houghton nebo Lurie–Houghton, jak v jednozrcadlovém, tak i ve dvojjzrcadlovém systému [3].

3. Zbytkové optické vady aplanatické soustavy

Sférochromatická vada podstatně závisí na optických mohutnostech čoček korektoru. Vzhledem k tomu, že optické mohutnosti čoček lze během výpočtu libovolně měnit, můžeme jimi tuto vadu ovlivňovat. Lze najít řešení, u kterého je pro jednu vlnovou délku zcela opravena otvorová vada a paprsky všech vlnových délek se protínají v jedné zóně. Tento typ korekce je typický pro soustavu se Schmidovu korekční deskou. Pro jiné hodnoty optických mohutností čoček korektoru je možné obdržet korekce s nevykompenzovanými vadami vyšších řádů, které jsou charakteristické pro soustavy s menisky. Koma v soustavě korektoru Volosova se sférickým zrcadlem je zcela kompenzována. Astigmatismus kompenzován není [4].

Vyjádříme-li třetí Seydelovu sumu, dostaneme podmínku (6):

$$S_{III} = (d_4 - 2)^2 \quad (6)$$

kde d_4 je vzdálenost korektoru od primárního zrcadla

Z rovnice (6) vyplývá, že chceme-li anulovat astigmatismus, musíme umístit korektor do středu křivosti zrcadla, protože $d_4 = 2$. S přibližováním dubletu ke středu křivosti se však hodnota W_{ik} blíží k nule, ale tento parametr se ve tvarových rovnicích upravených ze Seydelových sum (4) a (5) vyskytuje ve jmenovateli. Křivosti ploch tak nabývají vysokých hodnot a navíc vzrůstají vady vyšších řádů. Při volbě $d_4 = 1,8 * f$ vychází soustava se sférickým zrcadlem prakticky dokonale anastigmatická – viz obr.2. Je-li však korektor umístěn od primárního zrcadla ve vzdálenosti rovné její ohniskové vzdálenosti $d_4 = 1$, pak přístroj má stejný zbytkový astigmatismus jako ekvivalentní paraboloidické zrcadlo - viz obr.3.

Petzvalovská křivost soustavy je rovna ohniskové vzdálenosti přístroje. Ohnisková plocha vychází směrem k zrcadlu konvexní.

4. Anastigmatický systém korektoru Volosova s asférickým primárním zrcadlem

Abychom anulovali třetí Seydelovu sumu a získali anastigmatický systém, je nutné k rovnicím přidat další parametr, například asféricnost primárního zrcadla B_5 . Zavedením parametru B_5 dojde k jednoznačnému stanovení hodnoty vzdálenosti korektoru vůči vrcholu primárního zrcadla d_4 , čímž je splněna třetí Seydelova suma. Ostatní parametry P_{ik}, W_{ik} počítáme z první a druhé Seydelovy sumy. Stejně jako u aplanatické verze je možné volit optické mohutnosti čoček. Lze také nalézt takové tvary čoček, u kterých je $R_1 = -R_3$ a $R_2 = -R_4$. Malou odchylkou od podmínky $R_1 = -R_3$, změnami R_1 lze měnit polohu nulové zóny korektoru, která je společná pro paprsky všech vlnových délek.

Je důležité napsat vztah mezi asféricností primárního zrcadla a vzdáleností korektoru od zrcadla.

Zvolíme-li primár paraboloidický, vychází vzdálenost d_4 rovna ohniskové vzdálenosti systému – viz obr.4 a 5. Je-li primární zrcadlo hyperboloidické, korektor bude k zrcadlu blíže - viz obr. 6 a 7. Vzdálenost korektoru od elipsoidálního zrcadla se bude pohybovat v intervalu od $d_4 = f$ do $d_4 = 2 * f$ - viz obr. 8 a 9.

Sférické primární zrcadlo podle podmínky (6) bude mít korektor umístěn v jeho středu křivosti.

V praxi se ukazuje, že soustava s $d_4 = 1,8 * f$ se sférickým zrcadlem má zanedbatelný astigmatismus.

Soustavy s nejlépe vykorigovanými vadami vycházejí pro asféricnosti primárního zrcadla

$\sigma_5 = -0,1$ až $\sigma_5 = -0,3$ a vzdálenosti $d_4 = 1.5 * f$ až $d_4 = 1.3 * f$.

5. Zbytkové optické vady anastigmatu

Zbytkové optické vady anastigmatické soustavy jsou prakticky totožné jako u Schmidovy soustavy o stejných rozměrech. Vhodnou volbou optických mohutností čoček korektoru je možné dosáhnout pro jednu vlnovou délku opravy sférické vady pro všechny řády nebo naopak připustit vady vyšších řádů tak, aby nezhoršovaly zobrazovací vlastnosti přístroje. Tvar zbytkové sférochromatické vady je možné zvolit tak, aby byl podobný profilu průběhu vady ve Schmidově nebo Maksutovově komoře. Anastigmatická komora o průměru 1800 mm a světelnosti 1/5 vykreslí zorné pole o průměru 6 stupňů s geometrickými obrazy hvězd srovnatelnými s difrakčními. Stejně velká Schmidova nebo Maksutovova komora by měla zobrazovací vlastnosti horší.

6. Závěr

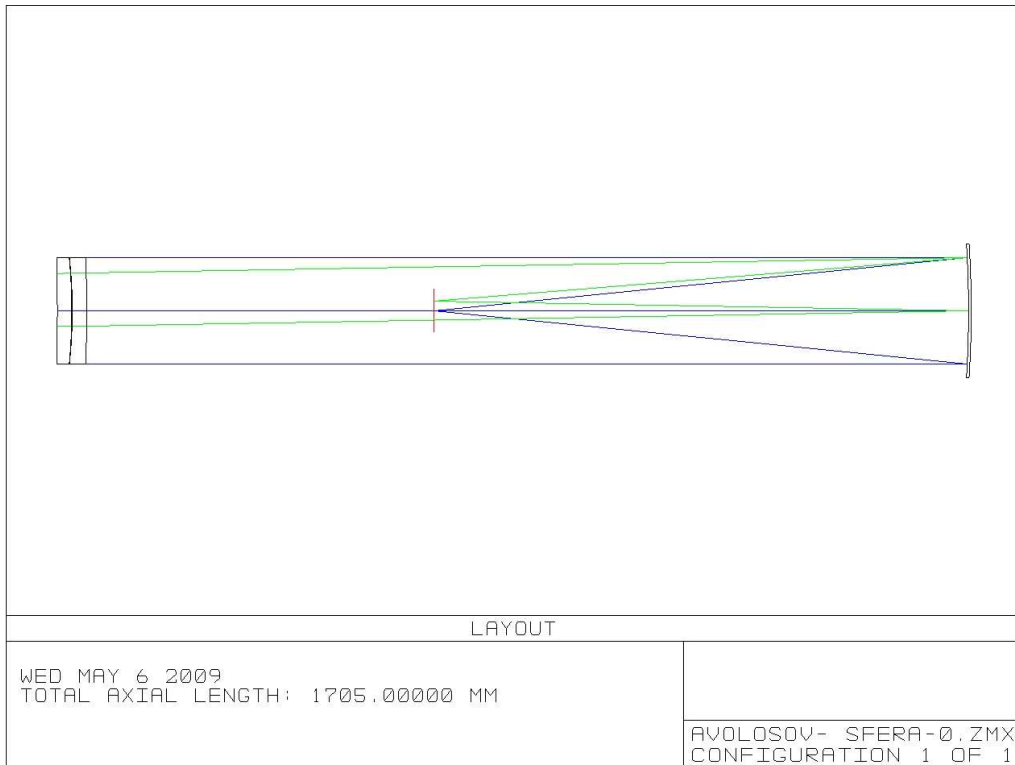
Výroba korektoru, který se skládá ze dvou čoček se sférickými povrchy je mnohem jednodušší díky volnějším tolerancím než technologicky náročná výroba Schmidovy desky nebo Maksutovova menisku, přičemž se dosáhne srovnatelných nebo lepších korekcí obrazu.

Optické výpočty byly prováděny v programu ZEMAX [5].

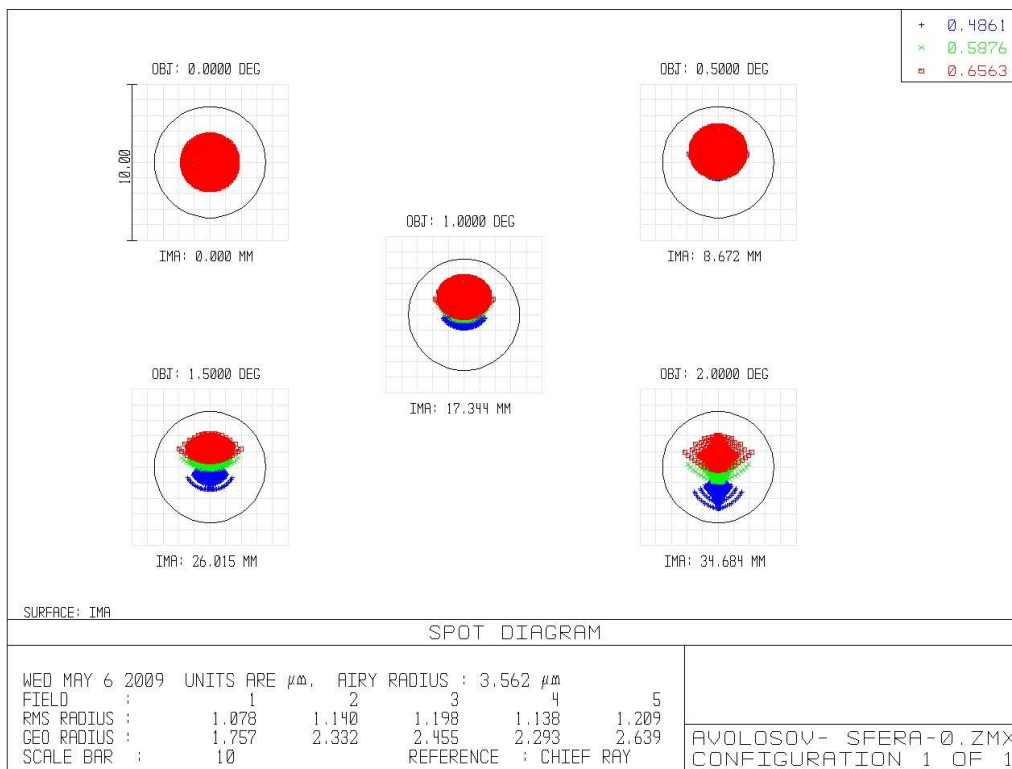
Příložené obrázky ukazují optimalizované soustavy o průměru 200 mm a ohniskové vzdálenosti 1000 mm.

7. Literatura

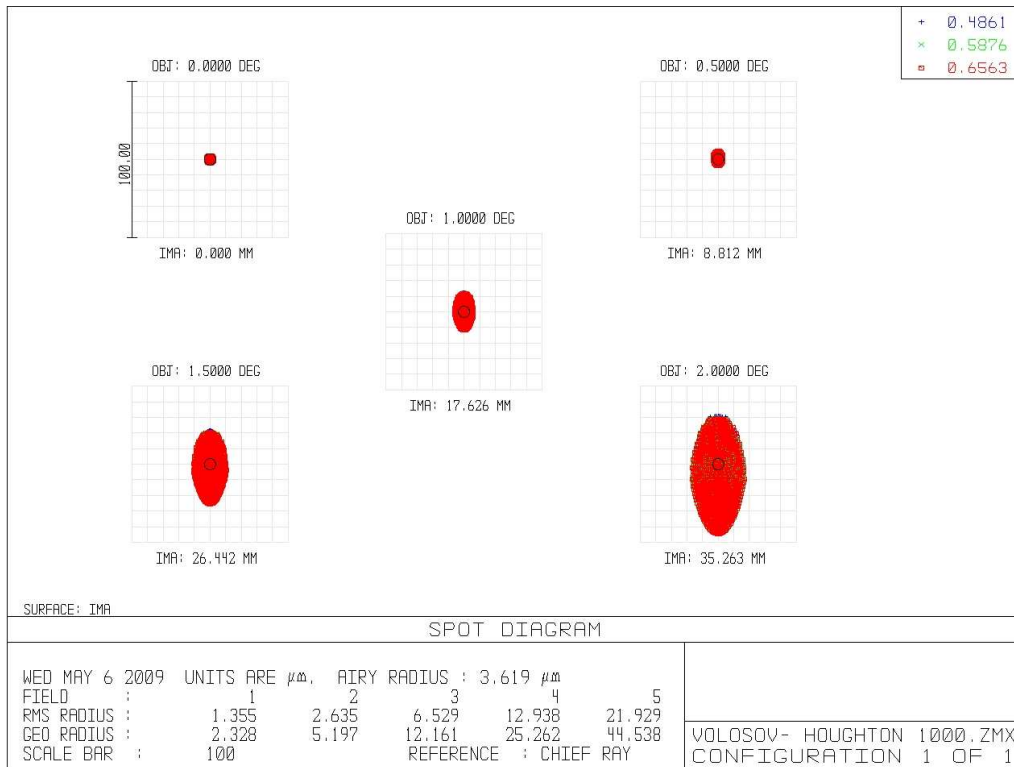
- [1] Volosov D.S., Metody rasčeta složnych fotografičeskich sistem, OGIZ, Leningrad, 1948
- [2] Apenko M.,I., Dubovik A.,S., Prikladnaja optika, Nauka, Moskva, 1982
- [3] Rutten van Venrooij, Teleskope Optics, Willmann-Bell, Inc., Richmond, Virginia, 2002
- [4] Maksutov D.D., Izgotovljenije i issledovanije astronomičeskoj optiki, Nauka, Moskva, 1984
- [5] Optical design Program Zemax, User's Guide, Version 10, Focus Software, Inc., Tucson, 2005



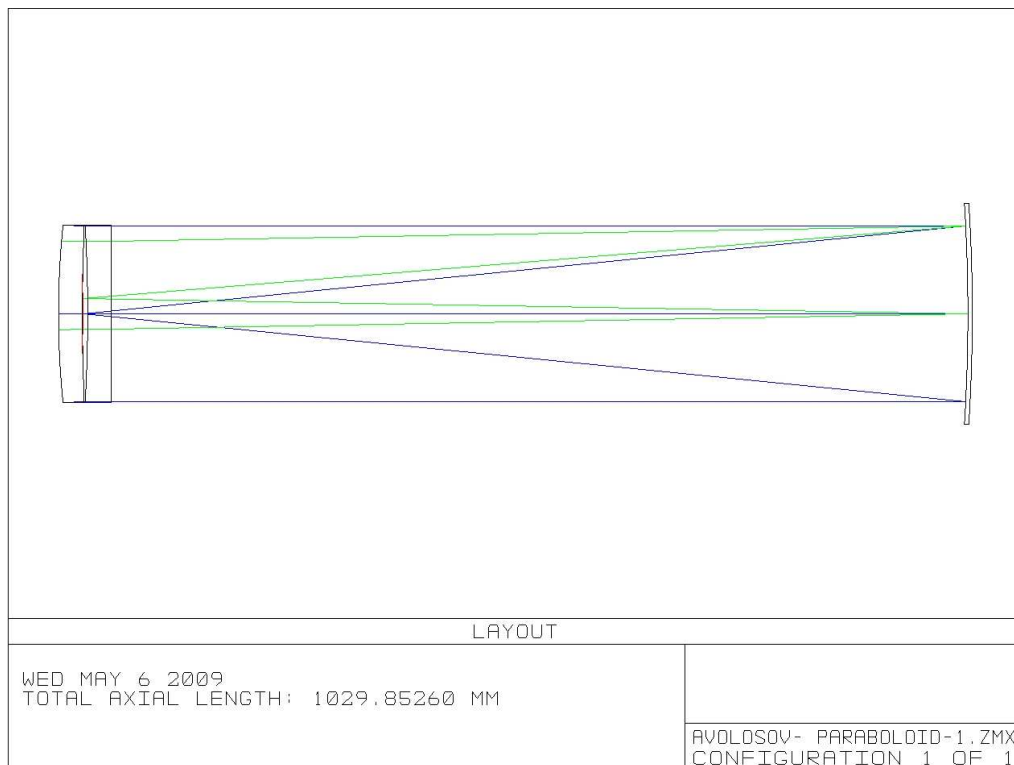
obr.1 – schéma jednozrcadlové soustavy s korektorem Volosova



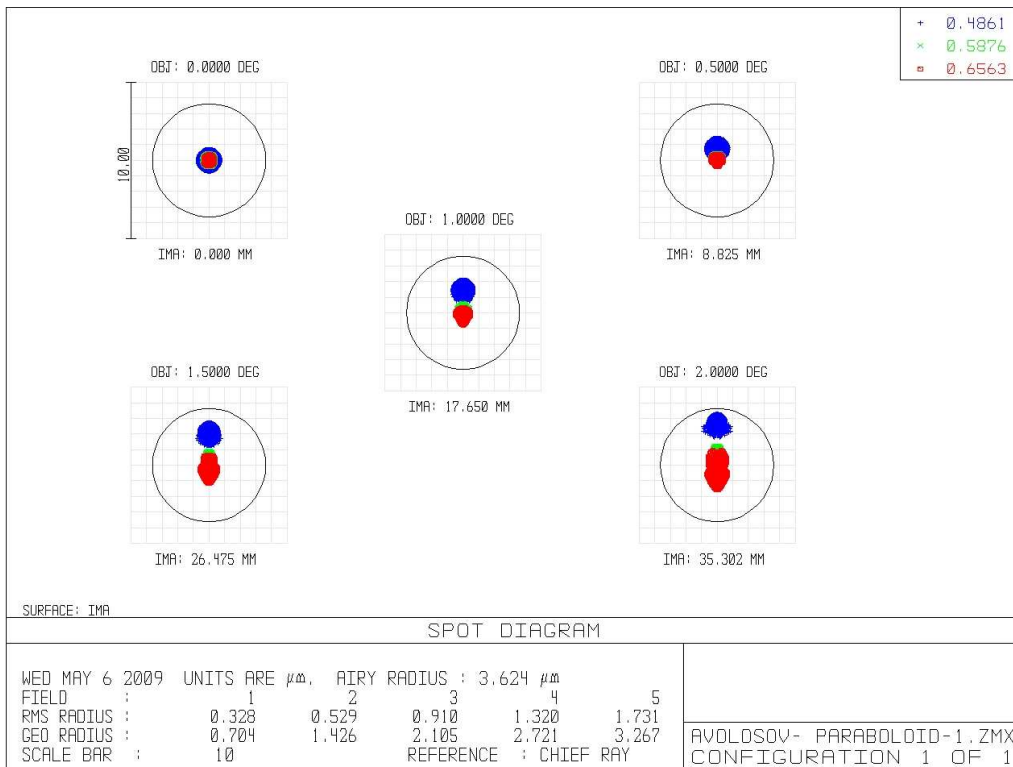
obr.2 – spot-diagramy jednozrcadlové soustavy s korektorem Volosova



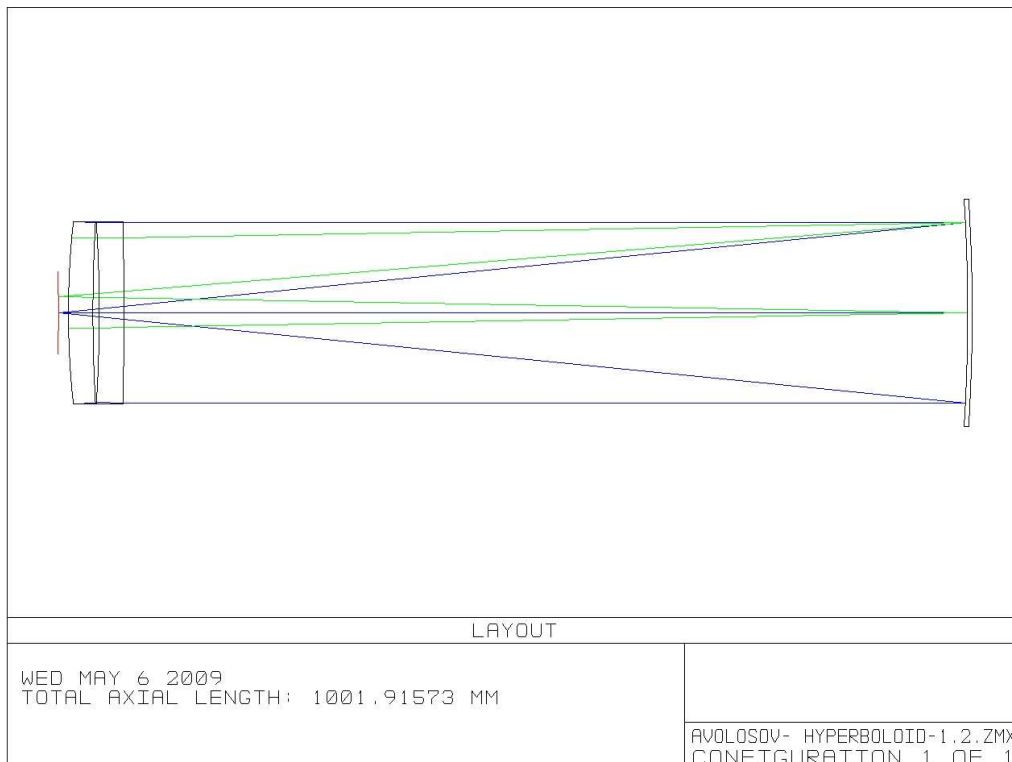
obr.3 – spot-diagramy soustavy Volosova, u kterého je vzdálenost korektoru od zrcadla rovna jeho ohniskové vzdálenosti. Dominantní mimoosovou vadou je astigmatismus.



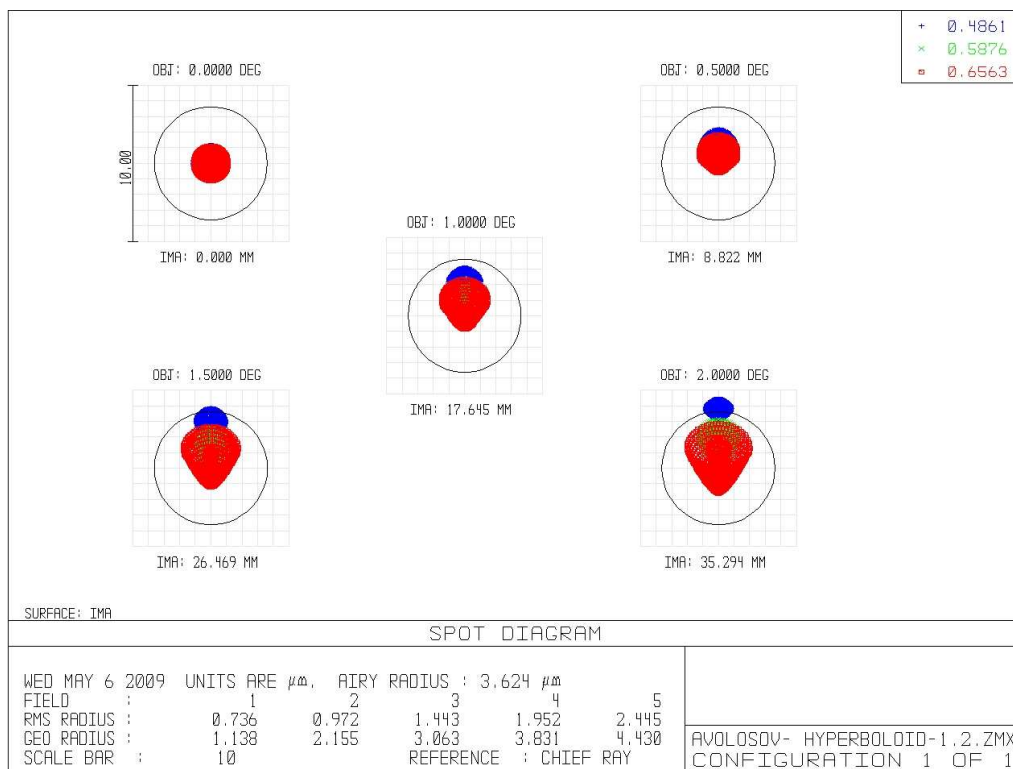
obr.4 – schéma anastigmatické soustavy s paraboloidickým zrcadlem a korektorem Volosova



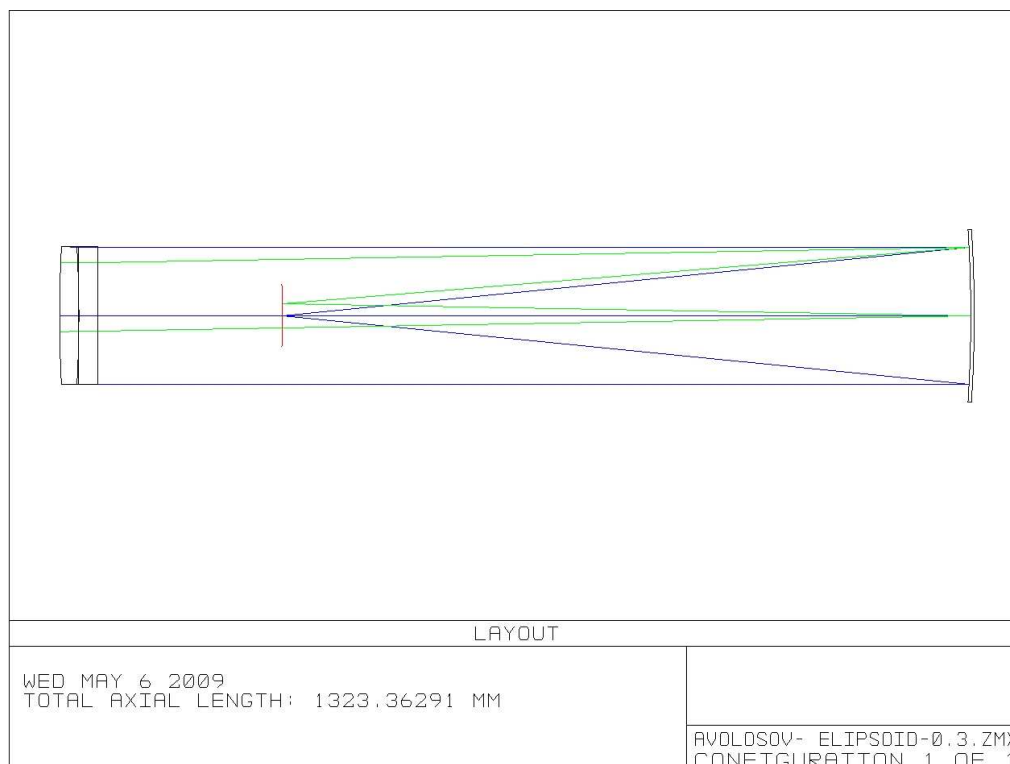
obr.5 – spot-diagramy anastigmatické soustavy s paraboloidickým zrcadlem a korektorem Volosova



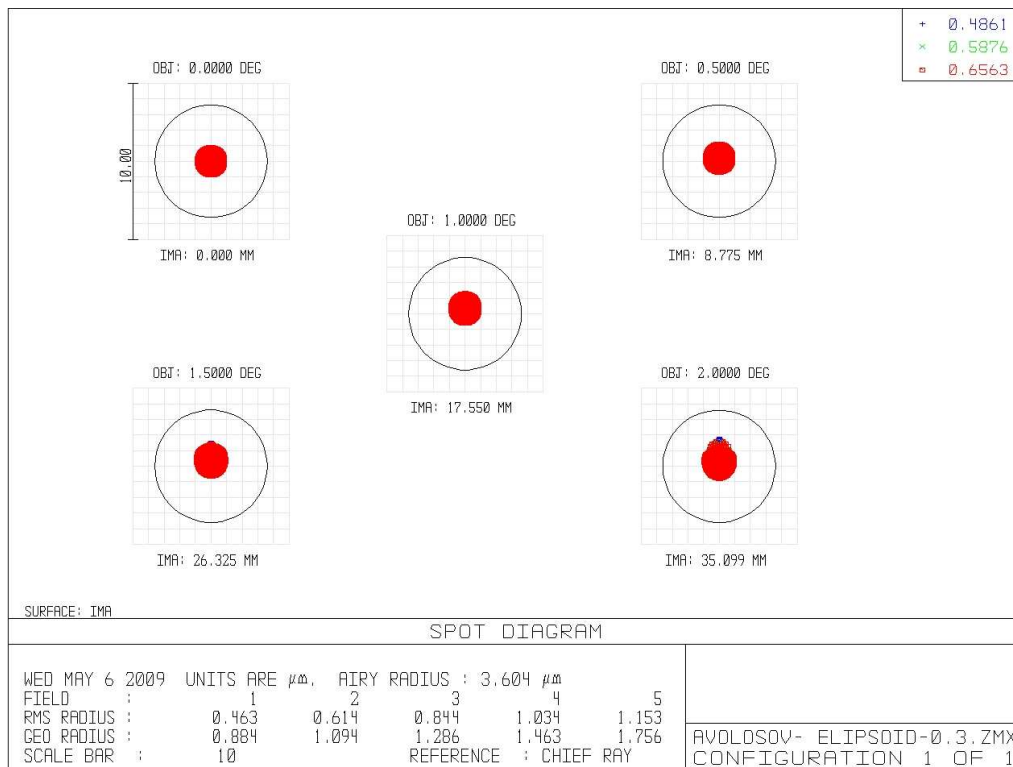
obr.6 – schéma anastigmatické soustavy s hyperboloidickým zrcadlem a korektorem Volosova



obr.7 – spot-diagramy anastigmatické soustavy s hyperboloidickým zrcadlem a korektorem Volosova



obr.8 – schéma anastigmatické soustavy s elipsoidálním zrcadlem a korektorem Volosova



obr.9 – spot-diagramy anastigmatické soustavy s elipsoidálním zrcadlem a korektorem Volosova