

Korekce optických vad astronomických zrcadel

Zdeněk Rail, Daniel Jareš, David Tomka, Roman Doleček
Ústav fyziky plazmatu AV ČR, v.v.i. - oddělení Toptec
Skálova 89,51101 Turnov
e-mail : vod@ipp.cas.cz

Zorná pole světelných zrcadel jsou omezena mimoosovými vadami, zvláště komou. Použitím korekčních systémů z čoček nebo asférických desek je možné tyto mimoosové zbytkové aberace zmenšit a rozšířit zorná pole v širokém spektrálním oboru.

Tento referát se zabývá několika variantami systémů korektorů, umístěných do sbíhavého svazku zrcadel s obecnou asféricí.

The Correction of the Optical Aberrations of Astronomical Mirrors

Zdeněk Rail, Daniel Jareš, David Tomka, Roman Doleček
Ústav fyziky plazmatu AV ČR, v.v.i. - Toptec
Skálova 89,51101 Turnov
e-mail : vod@ipp.cas.cz

The fields of view of fast and large mirrors are limited by off-axis aberrations mostly by coma. The improvement of residual aberrations in broad spectral branch is possible by using of the corrector system composed of lenses or aspherical plates. This paper presents several variants of such systems placed into converging beam of mirror of common asphericity.

1. Úvod

Ve druhé polovině 19. století začali astronomové fotografovat oblohu. [1] V tehdejší době nejčastěji používanými přístroji byly refraktory. Sklářská technologie poloviny 19. století umožňovala vyrábět pouze klasická skla, se kterými nebylo možné zkonstruovat světelné objektivy s dostatečně opravenou barevnou vadou. Málo světelné čočkové dalekohledy byly vhodné pro fotografování Měsíce, Slunce, kde jejich světelnost tolik nevadila.

Při fotografování mlhovin a hvězdných polí se neúměrně prodlužovaly expoziční doby na mnoho hodin.

Pro stavbu velkých zrcadlových dalekohledů byly podnětem dva vynálezy : V polovině 19. století německý chemik Justus Liebig objevil způsob, jak z chemického roztoku vyloučit na skleněný podklad tenkou stříbrnou vrstvu s odrazivostí až 90 procent.

Druhým stimulem byla Foucaultova metoda přesného měření dutých sférických a asférických ploch. Pomocí ní bylo možné velice přesně změřit a vyrobit paraboloidické zrcadlo, se kterým bylo možné fotografovat oblohu bez zkažení obrazu barevnou vadou.

Světelnost zrcadla tak mohla být vyšší než dovozovala zbytková barevná vada objektivu o stejném průměru. Tak bylo možné tak zkrátit expoziční doby, zvětšit průměry vstupních apertur dalekohledů, avšak obrazy hvězd mimo optickou osu byly zkaženy komou.

Jedním z prvních průkopníků astronomické fotografie byl americký astronom a optik George Ritchey. Ten si plně uvědomoval nevýhody refraktorů a použil velkých a světelných zrcadel pro fotografování mlhovin a galaxií. Jeho obrázek mlhoviny v Andromedě se spoustou detailů způsobil senzaci. Ritchey se věnoval i výrobě velkých zrcadel, ke kterým patřilo 60 a 100 palcové zrcadlo pro observatoř na Mount Wilsonu. S Henrym Chrétienem je spoluobjevitelem aplanatického dvouzrcadlového systému s lépe vykorigovanými mimoosovými obrazy hvězd.

Od padesátých let minulého století se prakticky všechny velké zrcadlové dalekohledy vyrábějí jako systémy Ritchey - Chrétien s hyperboloidálními primárními a sekundárními zrcadly.

Velká a světelná zrcadla mají velmi malá zorná pole o průměrech maximálně několika milimetrů, kde hlavně koma při fotografování nezhoršuje obraz. K jejímu odstranění je nutné použít korektory – systémy čoček nebo asférických desek, umístěné do sbíhavého svazku zrcadla před jeho ohniskovou plochou.

První práce, týkající se korekčních čočkových soustav, umístěných do sbíhavého svazku paraboloidického zrcadla a k ohniskové ploše Cassegrainova dalekohledu, publikoval v roce 1913 Sampson. [1]

V roce 1922 ji rozšířil Violette o návrhy korektorů pro nově vynalezené dalekohledy Ritchey-Chrétiena, jak pro využití primárního, tak sekundárního ohniska. Ve třicátých letech Paul navrhl použít pro korekci obrazů i asférické desky. První reálný korektor navrhl a vyrobil v roce 1933 F.E.Ross pro 60 palcový paraboloid na Mount Wilsonu. [1]

Od poloviny 40. let až do poloviny 70. intenzivně počítal korektory pole Wynne, který v tomto oboru dosáhl vynikajících výsledků. Jeho optické návrhy z tehdejší doby jsou natolik nadčasové, že je lze použít i pro dnešní CCD detektory, vyžadující přísné požadavky na korekci obrazu v širokém spektrálním oboru.

2. Optické vady zrcadel

Použijeme-li k fotografování oblohy pouze paraboloidické zrcadlo, jeho dominantními vadami je koma a astigmatismus. [2] V oblasti zorného pole do jednoho stupně od optické osy převládá zhoršení, způsobené komou. Nad vzdálenost větší než jeden stupeň převládá astigmatismus.

Má-li zrcadlo obecnou asféricnost - není-li paraboloidické, k těmto vadám se připojuje i otvorová vada.

V soustavách s čočkovými korektory je dále nutné korigovat i barevnou vadu polohy a zvětšení a dále křivost pole.

Zrcadlo o asféricnosti b , ohniskové vzdálenosti f , poloměru y (polovina průměru zrcadla) se bude na optické ose zobrazovat hvězda o geometrickém průměru :

$$\text{Geometrický průměr hvězdy} = f * (1 + b) * (y^3) / (16 * f^3) \quad (1)$$

nebo v úhlových vteřinách :

$$\rho = (3600) * \arctang(1 + b) * (y^3) / (16 * f^3) \quad ['] \quad (2)$$

Příčný rozměr komatického obrazce se u zrcadla zvětšuje se vzdáleností θ od optické osy.

$$\text{Délka komatického obrazu} = f * (3 * \theta * y^2) / (4 * f^3) \quad (3)$$

nebo v úhlových vteřinách :

$$\varphi = (3600) * \arctang(3 * \theta * y^2) / (4 * f^3) \quad ['] \quad (4)$$

Příčný rozměr astigmatického obrazce se u zrcadla o poloměru y a ohniskové vzdálenosti f zvětšuje se vzdáleností θ od optické osy.

$$\text{Délka astigmatického obrazu} = f * (y * \theta^2) / (f^3) \quad (5)$$

nebo v úhlových vteřinách

$$\sigma = (3600) * \arctang(y * \theta^2) / (f^3) \quad ['] \quad (6)$$

Schéma a spotdiagramy paraboloidického zrcadla o průměru 500 mm a ohniskové vzdálenosti 2500 mm jsou na obrázcích 1 a 2.

3. Paraboloidické zrcadlo s jednoočkovým korektorem Maksutova

Nejjednodušší korektor, vytvářející s paraboloidickým zrcadlem aplanatický systém, je tlustý menisek. [3], [4] Jeho funkci popsal D.M.Maksutov v roce 1961. Někdy se toto řešení označuje jako menisková soustava Rossova.

Výpočet poloměrů křivosti menisku s použitím Seydelových sum je velice zdlouhavý, protože zavedením tloušťky menisku se zkomplikuje tvar první a druhé Seydelovy sumy pro otvorovou vadu a komu. Řešení lze zjednodušit tímto způsobem:

Zvolíme tloušťku menisku 2-3,5 procenta ohniskové vzdálenosti soustavy. Menisek bude od primárního zrcadla vzdálen $2/3$ až $4/5$ ohniskové vzdálenosti od vrcholu primárního zrcadla.

Poloměr křivosti vstupní konkávní plochy určíme tak, aby první paraxiální paprsek v menisku procházel paralelně s optickou osou.

Poloměr křivosti druhé – výstupní konvexní plochy spočteme tak, že menisek je afokální. Afokálnost znamená, že první paraxiální paprsek z menisku vystupuje se stejným úhlem vůči optické ose jako do něho vstupuje. Z poloměrů křivosti ploch, tloušťky menisku i vzdálenosti menisku od primárního paraboloidického zrcadla lze dopočítat parametry P_2 , P_3 , W_2 , W_3 , C_1 , C_2 a dosadit je do Seydelových sum S_1 , S_2 , S_1CHR pro otvorovou vadu, komu a chromatickou aberaci.

Prochází-li první paraxiální paprsek tlustým meniskem paralelně s optickou osou a je-li menisek afokální, je pro soustavu splněna podmínka achromasie $S_1CHR = 0$ a odstraněna otvorová vada $S_1 = 0$.

Koma má stejnou hodnotu $S_2 = 1/2$ jako samotné paraboloidické zrcadlo bez korektoru.

Zmenšit druhou Seydelovu sumu – kompenzovat komu, lze dosáhnout změnami poloměru křivosti vstupní konkávní plochy menisku tak, aby úhel lomu prvního paraxiálního paprsku nabýval vůči optické ose malých kladných hodnot.

Poloměr křivosti výstupní konvexní plochy menisku se dopočítá tak, aby byl afokální.

Tímto způsobem lze dosáhnout anulování i druhé Seydelovy sumy.

Zmenšení komy je nutné kontrolovat trigonometrickým výpočtem.

Aby bylo možné navrhovanou soustavu správně opticky ocenit, je nutné volit sklon šikmých paprsků ne větší než 10-15 minut. Na optické ose musí být zachována stigmatičnost soustavy.

Výpočet s použitím Seydelových sum vede vždy na menisek s mírně negativní ohniskovou mohutností.

Dodatečnou změnou poloměrů křivosti lze dosáhnout toho, že vstupní konkávní plocha má stejný poloměr křivosti jako výstupní konvexní. Výsledek je nutné kontrolovat trigonometrickým výpočtem.

Soustava o průměru 200 mm a ohniskové vzdálenosti 1000 mm má oproti ekvivalentnímu paraboloidu zorné pole, kde geometrické obrazy hvězd jsou menší nebo srovnatelné s difrakčními, třikrát větší. To znamená, že na zorném poli o průměru $1/2$ stupně jsou obrazy hvězd v systému výrazně menší než u samotného paraboloidu, avšak na kraji jednostupňového pole se velikost obrazů hvězd obou soustav srovnává.

Dominantní mimoosovou vadou aplanatické soustavy paraboloidu s meniskem Maksutova je astigmatismus, který je oproti samotnému paraboloidu třikrát větší. Ohniskové plocha systému je zakřivená, konkávní k zrcadlu. Křivost pole u paraboloidů o rozměrech do

$d = (200 - 250)$ mm a $f = (1000 - 1250)$ mm při použití CCD detektorů o rozměrech do 10×10 mm lze zanedbat.

Maksutovův korektor je velice jednoduchý, snadno vyrobitelný a dobře měřitelný pomocí interferenčních kalibrů. Oproti složitějšímu dvojčočkovému korektoru Rossa je systém s meniskovým korektorem Maksutova na optické ose a poblíž ní stigmatický.

Korekční menisek lze použít pro paraboloidy do průměru $d = (250-300)$ mm a světelností $1/4,5 - 1/6$, výborně funguje u menších průměrů primárních zrcadel - okolo

$d = (150-200)$ mm. Zlepšení obrazu na $1/2$ stupňovém poli je výrazné. Schéma a spotdiagramy soustavy paraboloidického zrcadla s korektorem Maksutova o průměru 500 mm a $f = 2500$ mm jsou ukázány na obrázcích 3 a 4.

4. Dvojčočkový korektor Rosse

Korektor navrhl F.E.Ross [1], [4], [5] začátkem 30. let minulého století, aby zlepšil zorné pole primárního zrcadla - šedesátipalcového paraboloidu o světelnosti $1/5.1$ na Mount Wilsonu. Navrhl dublet, blízký afokálnímu, vyrobený z jednoho typu skla. Čtyři poloměry křivosti čoček - čtyři volné parametry, dovolují splnit podmínku achromasie, afokálnosti a dále korekci otvorové vady a komy. Pro kompenzaci astigmatismu se u soustavy nedostává volného parametru, se kterým by bylo možné anulovat třetí Seydelovu sumu.

Provedeme-li optimalizaci optické soustavy trigonometrickým výpočtem, vidíme, že kompromisní řešení připouští barevnou vadu, nedokorigovanou otvorovou vadu a zbytkový astigmatismus.

Soustava paraboloidického zrcadla s Rossovým korektorem není na optické ose stigmatická. Jsou-li příčné rozměry hvězd o rozměrech blízkých zrnu fotografické emulze nebo rozměrům pixelů CCD detektorů, nemusí

vážně zhoršovat kvalitu obrazu. Schéma a spotdiagramy soustavy s korektorem Rosse ze stejných skel jsou ukázány na obrázcích 5 a 6.

Rossův korektor velice záhy posloužil jako výchozí soustava pro návrhy dalších, složitějších korektorů s lepší definicí obrazů, na větších zorných polích a v širším spektrálním oboru. [1]

Zlepšit optické vlastnosti dvojčočkového korektoru lze dvěma způsoby: Vyrobíme-li čočky korektoru ze stejného materiálu, pak další zmenšení obrazů hvězd lze dosáhnout odstoupením od podmínky afokálnosti. Takový korekční dublet prodlouží ohniskovou vzdálenost systému o 10 procent.

Druhá možnost zlepšení je použití dvou materiálů s vhodně vybranými indexy lomů a Abbeho čísla. Výhodné kombinace jsou FK5 - BK7, K7-FK54 nebo dvojice BK7 - FK54. [3] Schéma a spotdiagramy soustavy paraboloidu s korektorem Rosse ze skel K7 - FK54 jsou ukázány na obrázcích 7 a 8.

V tomto případě lze navrhnout korektor pole, který je optimální i jako afokální.

Komerčně nabízený Rossův korektor - MPCC je schopen poskytovat na optické ose stigmatického obrazu u paraboloidů o průměru 200 mm až od světelnosti 1/8 a nižší.

Rossův korektor byl původně navržen jako korektor komy pro paraboloid.

Opravuje komu, avšak výsledný optimalizovaný systém má nedokorigovanou otvorovou vadu, astigmatismus a malou chromatickou vadu polohy.

Možnost, jak zlepšit korekční stav této soustavy, se nabízí použitím hyperboloidického primárního zrcadla o astéričnosti od -1,25 až do -2. U těchto soustav lze použít čoček ze stejného druhu skla a korektor bude blízký afokálnímu (Di Baja řešení). Schéma a spotdiagramy na obrázcích 9 a 10.

Zvolíme-li ale spojku z korunového a rozptylku z flintového (řešení Lind), pak optimální korektor vyjde s pozitivní optickou mohutností a zkrátí ohniskovou vzdálenost soustavy o 25 procent. Schéma a spotdiagramy na obrázcích 11 a 12. S tříčočkovým korektorem lze dosáhnout i 40 procentní zkrácení ohniskové vzdálenosti.

5. Trojčočkové a čtyřčočkové korektory

První korektory pole, určené pro paraboloidy a cassegrainovská sekundární ohniska, navrhl Sampson v roce 1913 jako triplety ze stejných skel. Jeho návrhy měly nedokompenzovanou otvorovou vadu. [1], [3]

Podstatné zlepšení korektorů bylo provedeno Wynnem a Gascoignem přidáním tenkého menisku mezi dublet a primární zrcadlo. Tento systém byl zkonstruován pro palomarské pětimetrové zrcadlo a dále pro 120 palcový dalekohled Lickovy observatoře. [1]

Schéma a spotdiagramy paraboloidu s trojčočkovým korektorem jsou ukázány na obrázcích 13 a 14.

Vícečočkové korektory poskytují dostatek parametrů, se kterými lze opravit optické aberace zrcadel o obecných asféricnostech. U velkých a světelných primárních zrcadel tří a čtyřčočkové korektory vysoce kvalitně opravují obraz na velkých polích v širokém oboru

spektra od UV až po IR. Tříčočkové korektory dodává na trh firmou ASA Austria i pro amatéry.

Ještě lepší korekce lze dosahovat čtyřčočkovým korektorem s vhodně vybranými materiály čoček. Schéma a spotdiagramy soustav paraboloidu a hyperboloidu se čtyřčočkovými korektory jsou ukázány na obrázcích 15 a 16, 17 a 18.

Pro hyperboloid s asféricností -1,3 je výhodné vyrobit korektor, složený ze dvou tmelených dubletů z kombinace skel K5 a SF10. Schéma a spotdiagramy tohoto systému jsou ukázány na obrázcích 19 a 20.

S tímto korektorem lze dosahovat geometrických obrazů lepších než difrakční u hyperboloidů o průměru 500mm světelnostech 1/3,5 v širokém spektrálním oboru na zorných polích o průměrech několika stupňů. Tento korektor určený pro paraboloidy, obsahující dva tmelené dublety, se prodává pod názvem Paracorr od firmy Tele Vue.

Pro korekci vad zrcadla s obecnou sféricností je nutné použít dostatečný počet volitelných parametrů. Je-li počet čoček dostatečný a jsou-li vhodně vybrány jejich materiály, lze opravit i vady sférického zrcadla.

Na obrázcích 21 a 22 jsou ukázány schéma a spotdiagramy soustavy sférického zrcadla se šestičočkovým korektorem, dosahující geometrických obrazů srovnatelných s difrakčními.

6. Korektory s asférickými deskami ve sbíhavém svazku

Použití asférickou desku jako korektor pole poprvé navrhl v roce 1935 Paul. [1], [2]

Výhodou těchto korekčních systémů je jejich relativní jednoduchost konstrukce, avšak vysoké nároky na přesnou justáž v dalekohledu.

Korekční desky, umístěné do sbíhavého svazku světelného primárního zrcadla, mívají odchylky od planoparalelních desek stovky mikronů, takže jejich výroba klasickou technologií je velmi obtížná.

Aplanatický systém lze navrhnout pomocí dvou optických členů - asférického zrcadla a korekční desky. Každý člen disponuje jedním volným optickým parametrem, s oběma lze anulovat první dvě Seydelovy sumy - pro sférickou aberaci a pro komu. [1]

U této aplanatické soustavy vychází asféricnost primárního zrcadla značně odchylná od paraboloidu. Profil korekční desky má inverzní tvar oproti deskám, používaným v klasických Schmidových komorách. Schéma a spotdiagramy jsou ukázány na obrázcích 23 a 24.

Aby systém byl anastigmatický, je nutné navrhnout systém se třemi parametry, asféricnostmi zrcadla a dvou korekčních desek. [1]

Vhodným výběrem skel a profilů desek lze redukovat jak chromatickou vadu polohy, tak zvětšení. Jejich radikální zmenšení je možná pouze použitím achromatických desek, které jsou složeny ze dvou členů s asférickými plochami.

Výhodou asférických desek je to, že nemají tak výrazné problémy s reflexy, jaké jsou přítomny u víceočkových korektorů. Schéma a spotdiagramy jsou uvedeny na obrázcích 25 a 26.

Po zvládnutí technologie achromatické asférické korektory najdou v budoucnosti velice široké uplatnění. Zatím se používají ve velmi omezeném rozsahu. V současnosti se používají tyto tři a čtyřdeskové korektory u velkých zrcadlových dalekohledů u primárních ohnisek.

Velkých úspěchů v jejich návrzích dosáhli Wynne, Meinel a Gascoigne.

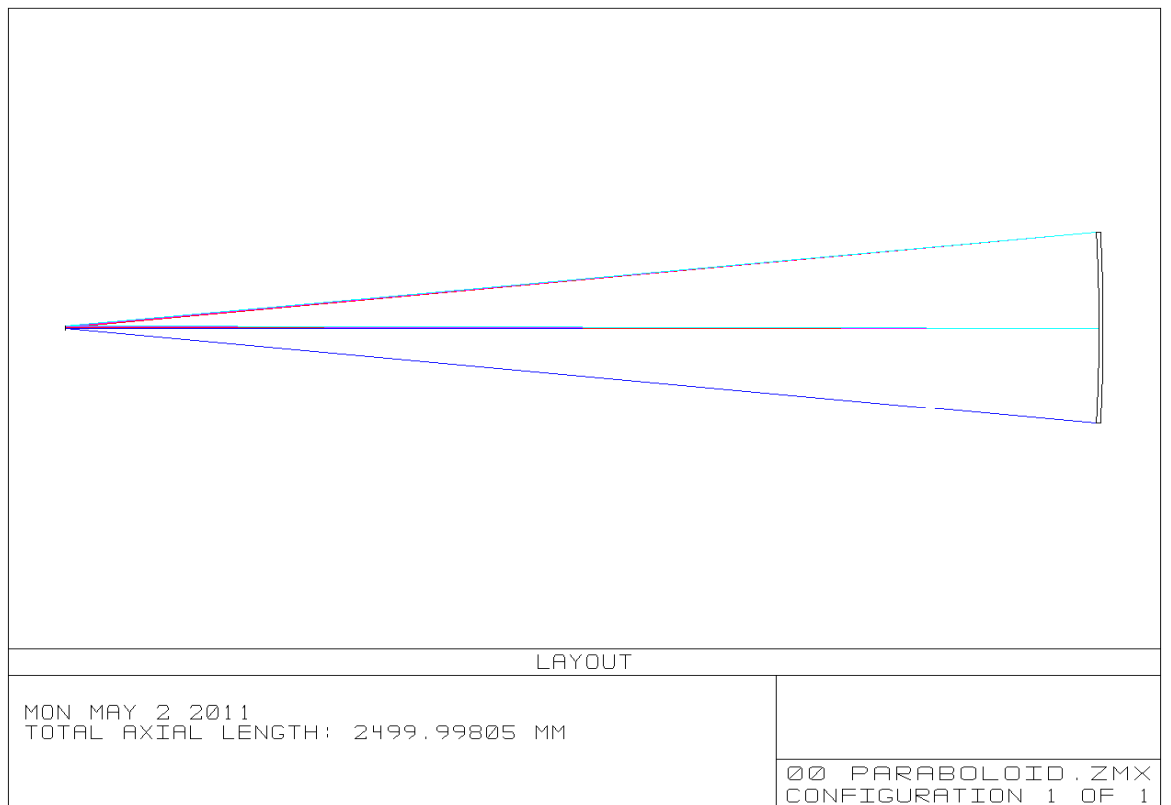
Pro výpočty obou soustav s asférickými deskami jsme použili matematický aparát v [2].

Veškeré výpočty optických soustav byly provedeny s pomocí programu Zemax. [6]

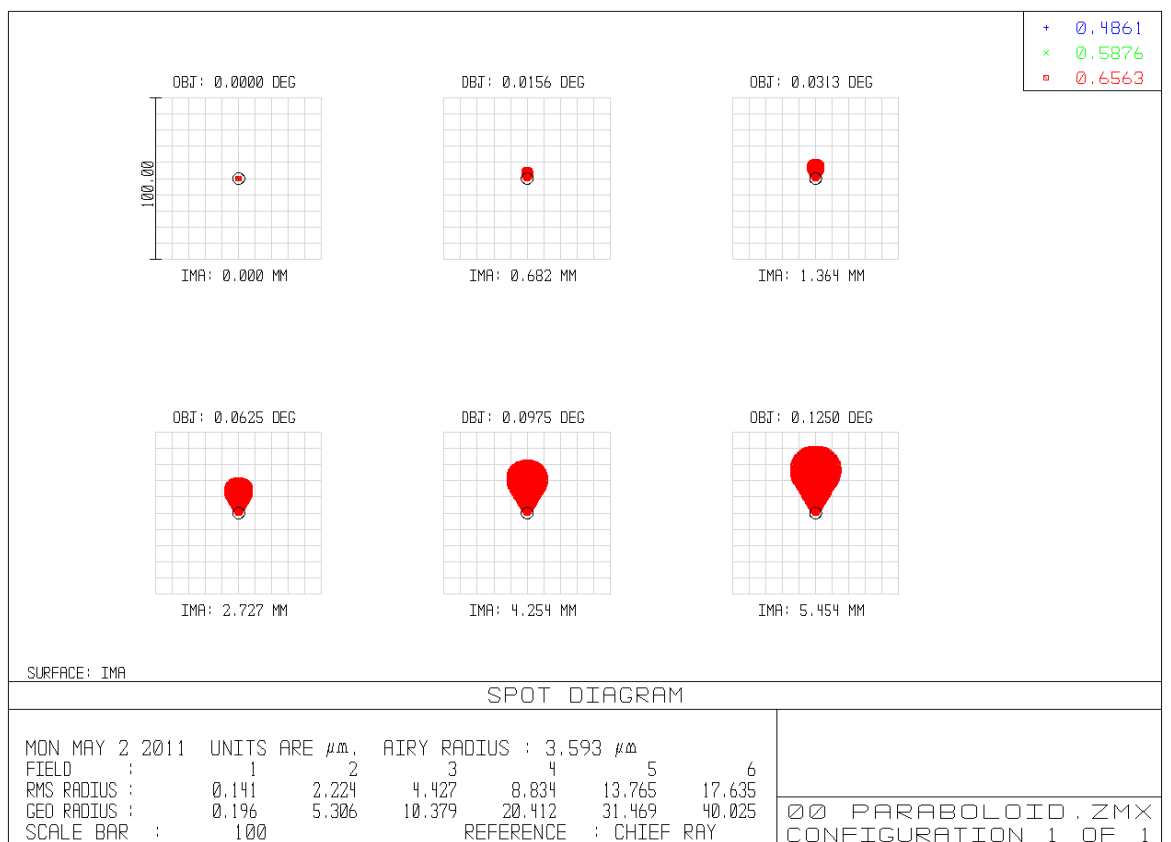
Poděkování : Tato práce byla řešena jako dílčí část výzkumného záměru, projekt AV0Z20430508, bylo využito poznatků z projektu IQS100820502.

7. Literatura

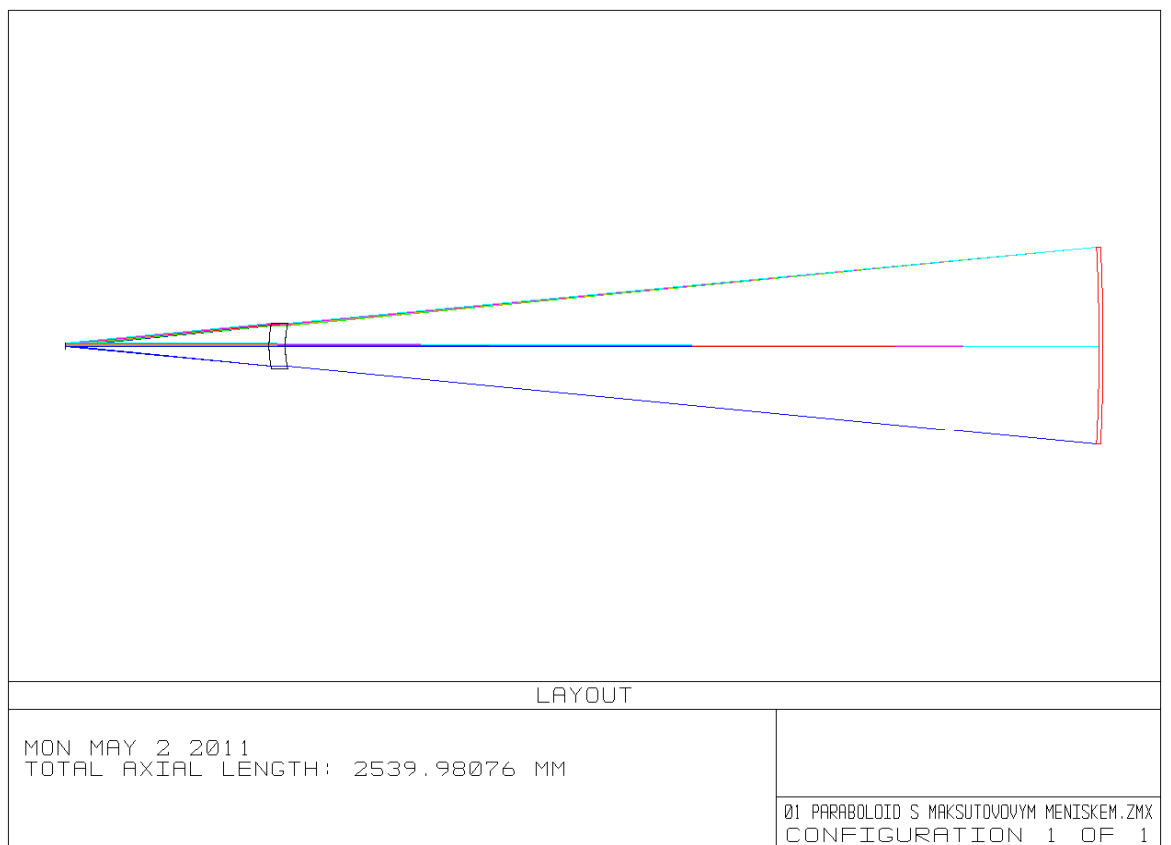
- [1] R.N.Wilson, Reflecting Telescope Optics, Springer-Verlag Berlin-Heidelberg-New York, Second Printing, 2000
- [2] S.C.B.Gascoigne, Recent Advances in Astronomical Optics, Applied Optics, Vol. 12, No. 7, July 1973
- [3] Rutten, van Venrooij, Telescope Optics, Willmann-Bell, Inc., Richmond, Virginia, 2002
- [4] N.N.Michelson, Optičeskije teleskopy, Izdatelstvo "Nauka", Glavnaja redakcija fiziko-matematičeskoj literatury, Moskva, 1976
- [5] Apenko M.I., Dubovik A., S., Prikladnaja optika, Nauka, Moskva, 1982
- [6] Optical design Program Zemax, User's Guide, Version 10, Focus Software, Inc., Tucson, 2005



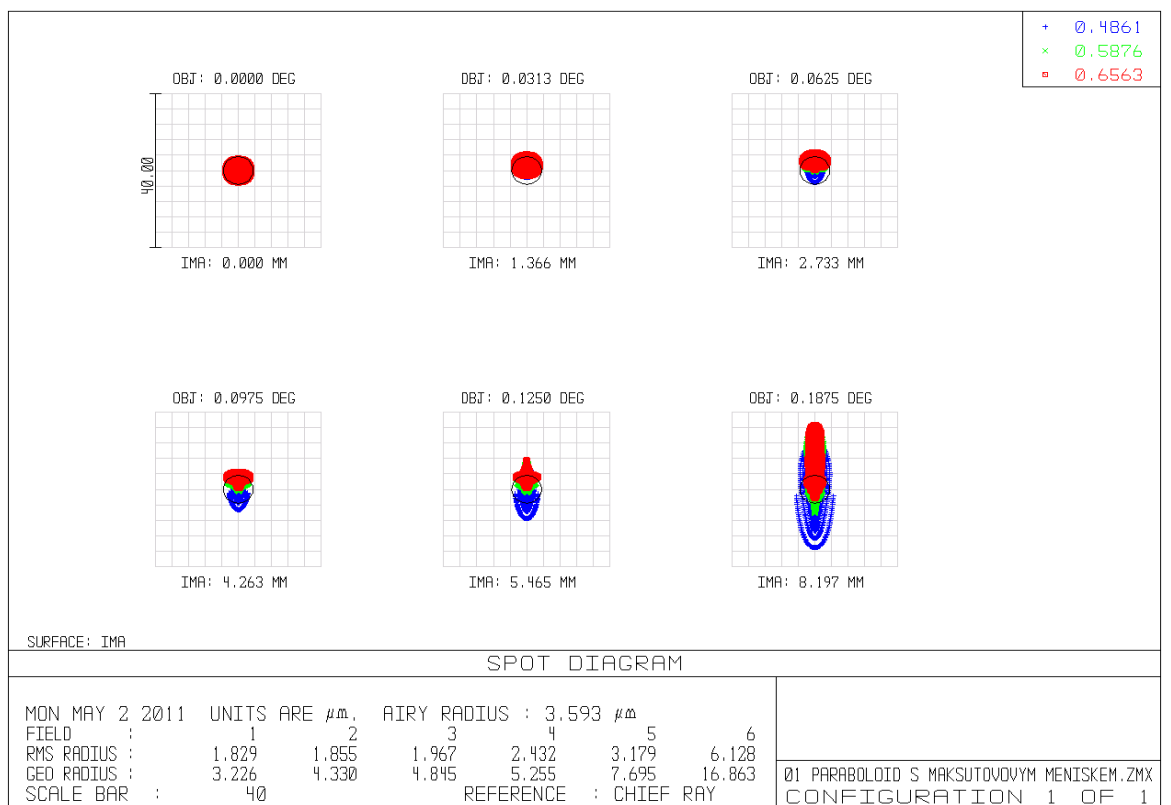
Obrázek 1. Optické schéma paprsků paraboloidu



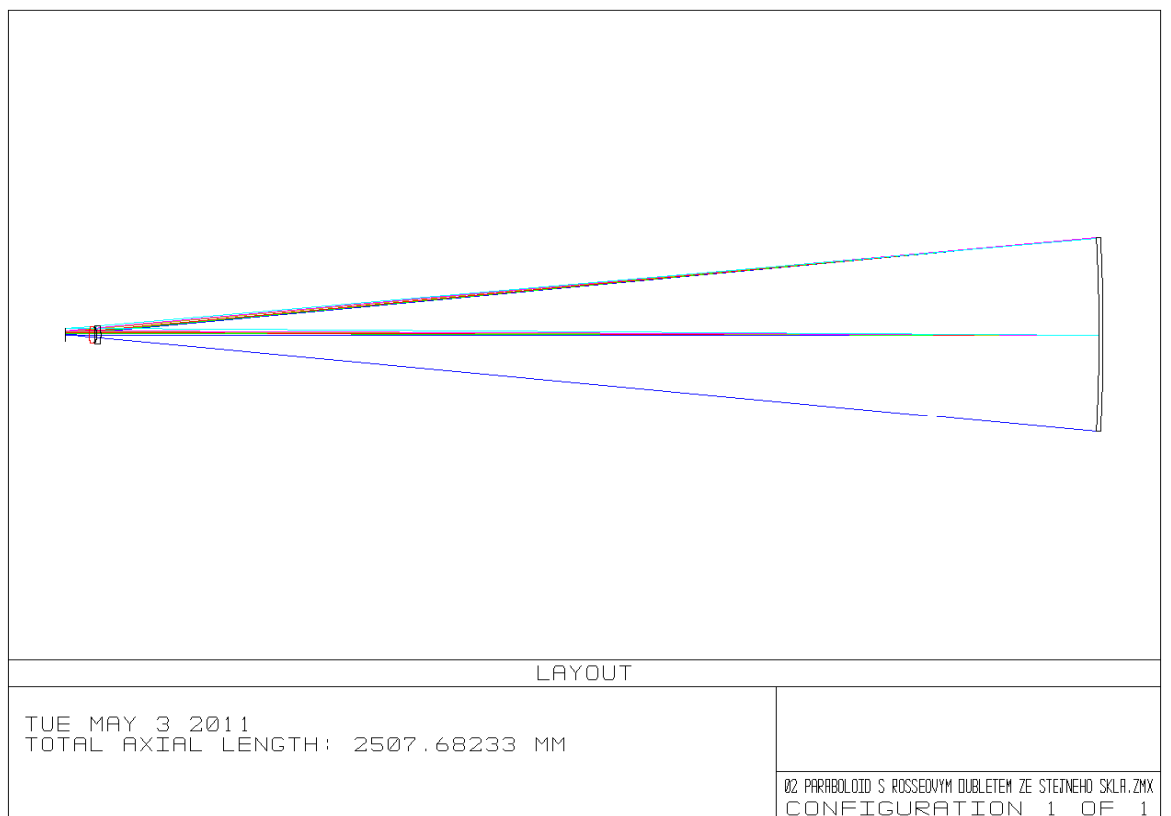
Obrázek 2. Spotdiagramy paraboloidického zrcadla 500/2500, ukazující zhoršení obrazů hvězd komou



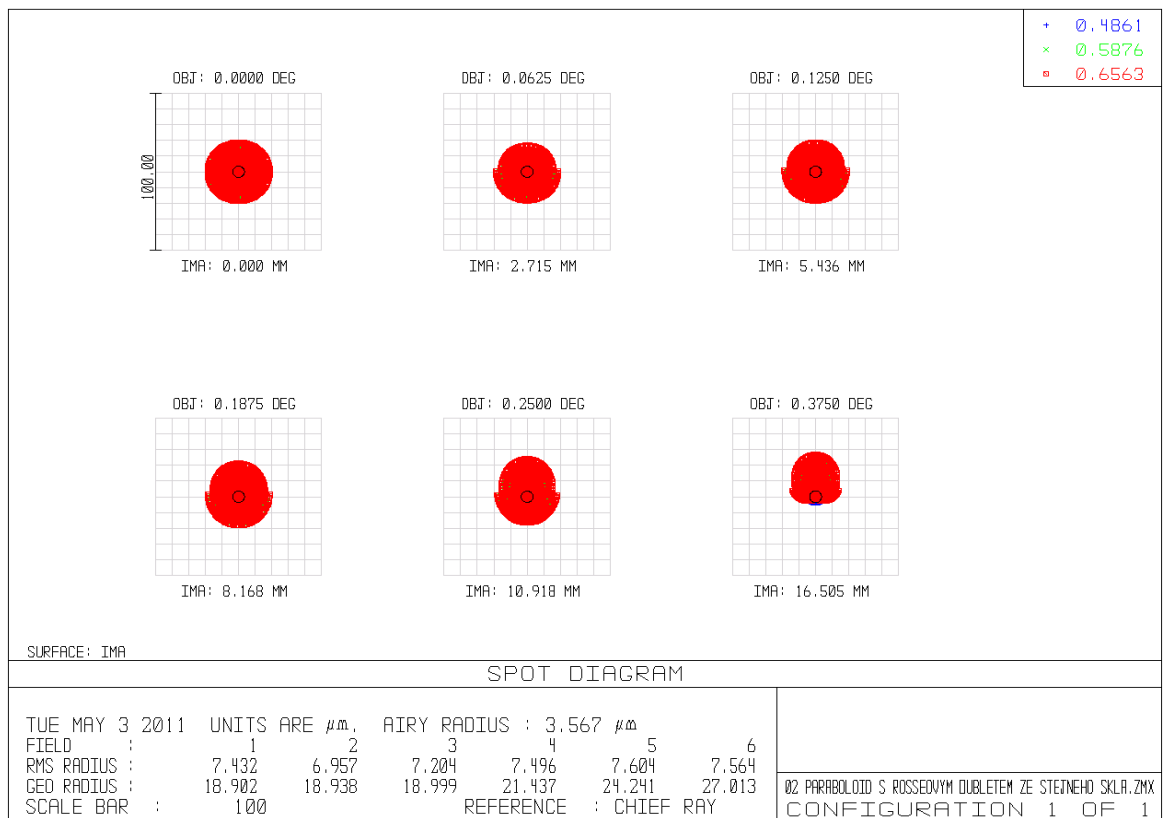
Obrázek 3. Schéma aplanatické soustavy paraboloidu a meniskového korektoru Maksutova



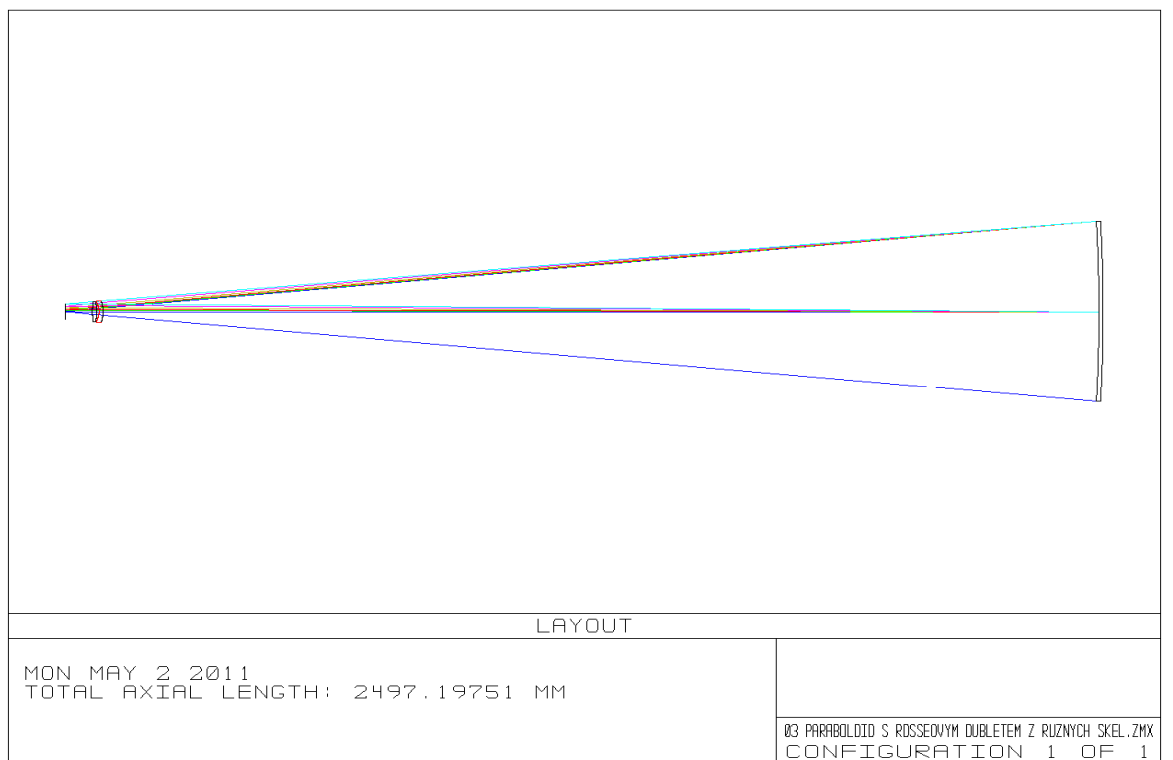
Obrázek 4. Spotdiagramy aplanatické soustavy paraboloidu a meniskového korektoru Maksutova



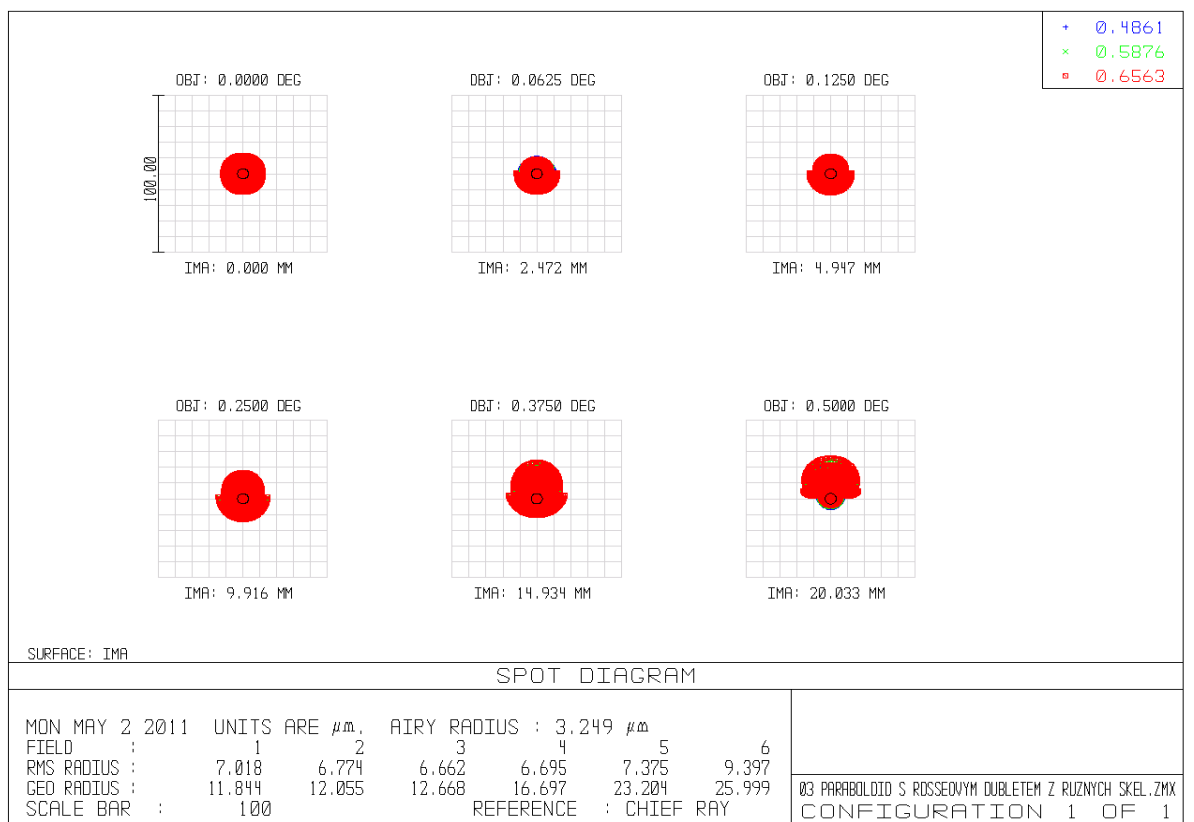
Obrázek 5. Schéma soustavy paraboloidu a korektoru Rosse s čočkami ze stejného skla



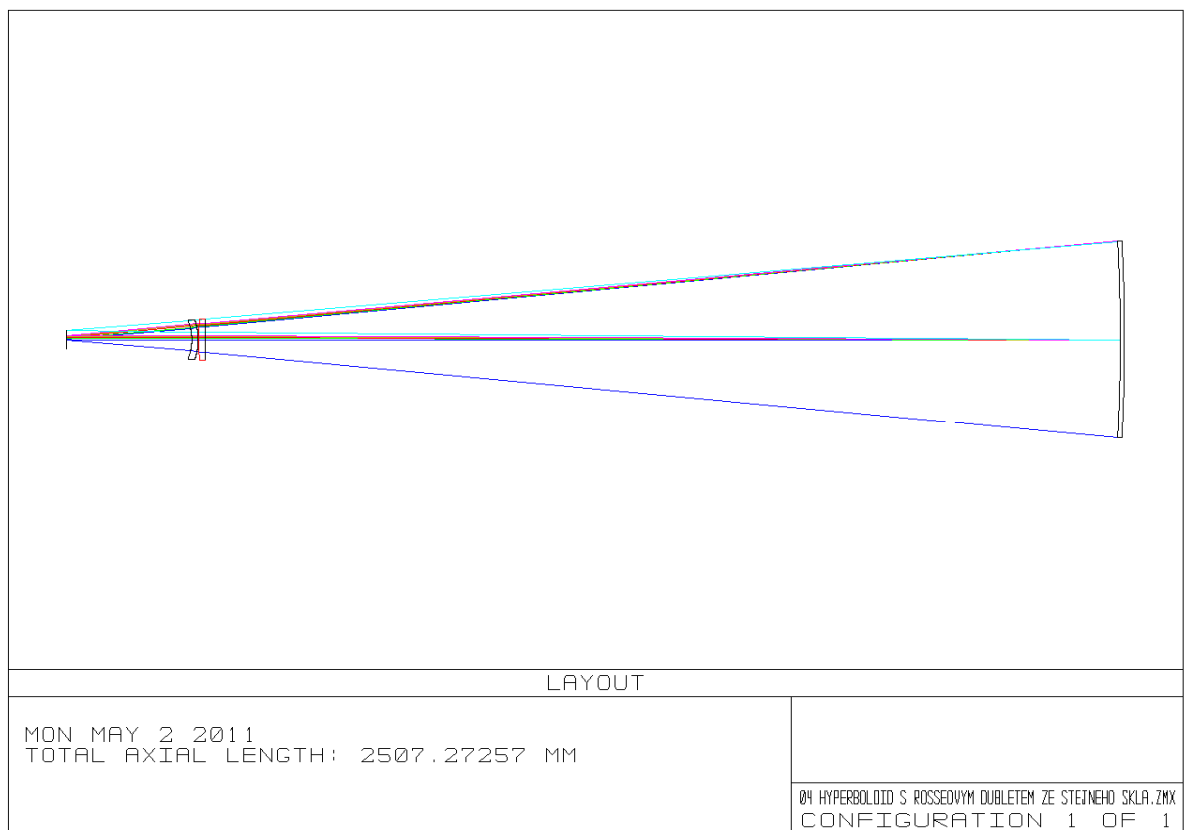
Obrázek 6. Spotdiagramy soustavy paraboloidu a korektoru Rosse s čočkami ze stejného skla



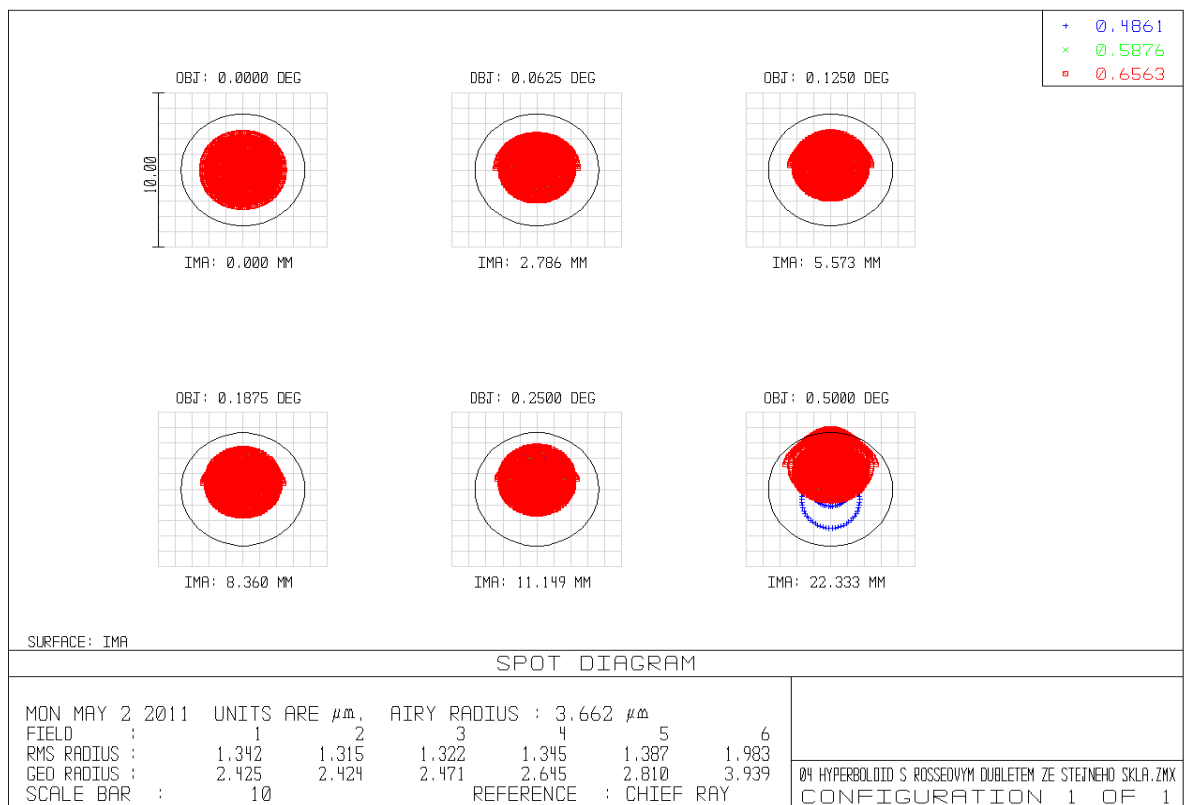
Obrázek 7. Schéma soustavy paraboloidu a korektoru Rosse s čočkami ze skel K7 - FK54



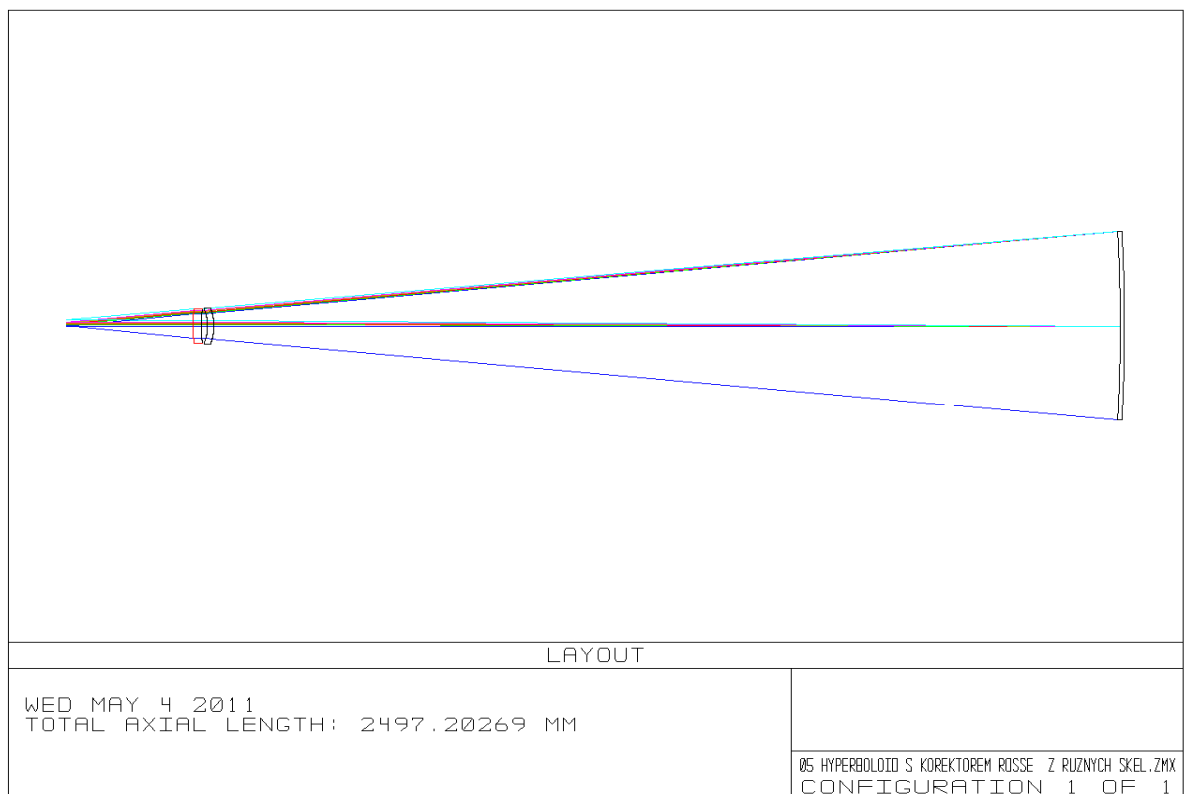
Obrázek 8. Spotdiagramy soustavy paraboloidu a korektoru Rosse s čočkami ze skel K7-FK54



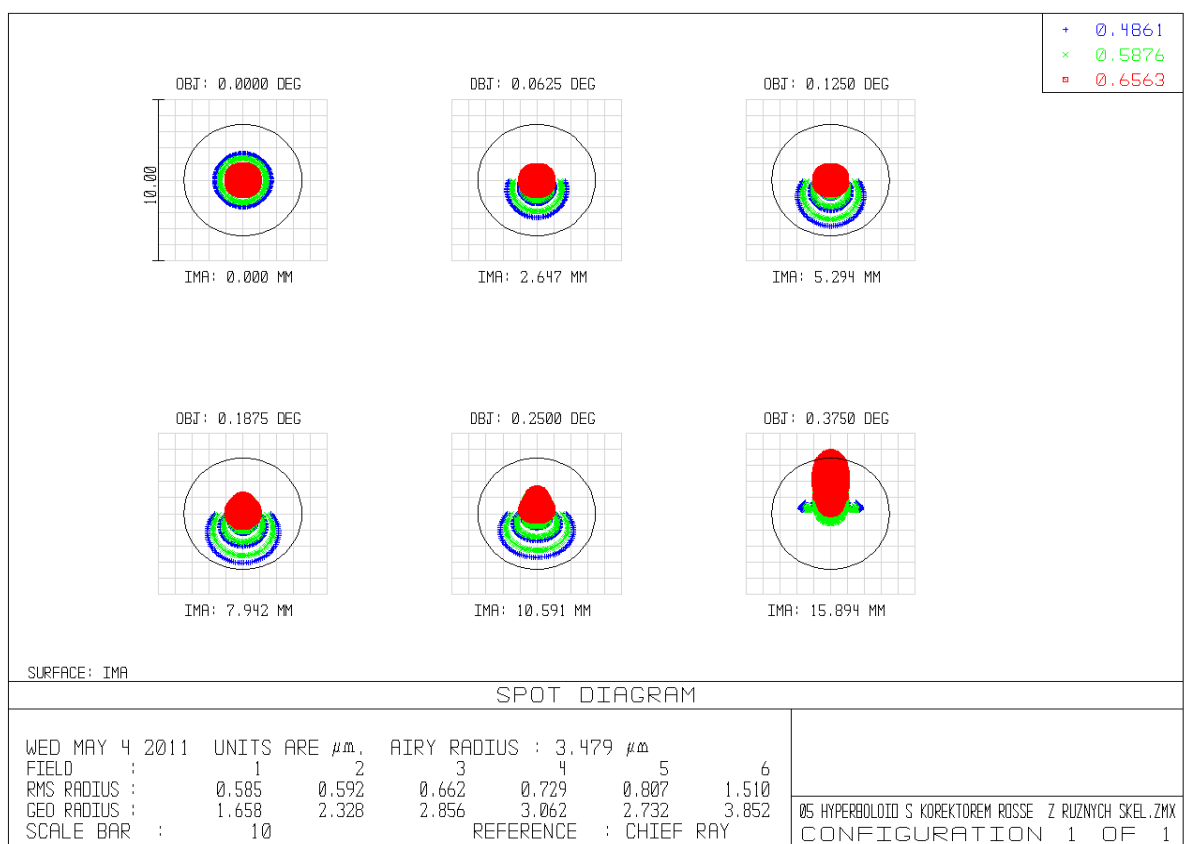
Obrázek 9. Schéma soustavy hyperboloidu a korektoru Rosse s čočkami ze stejného skla



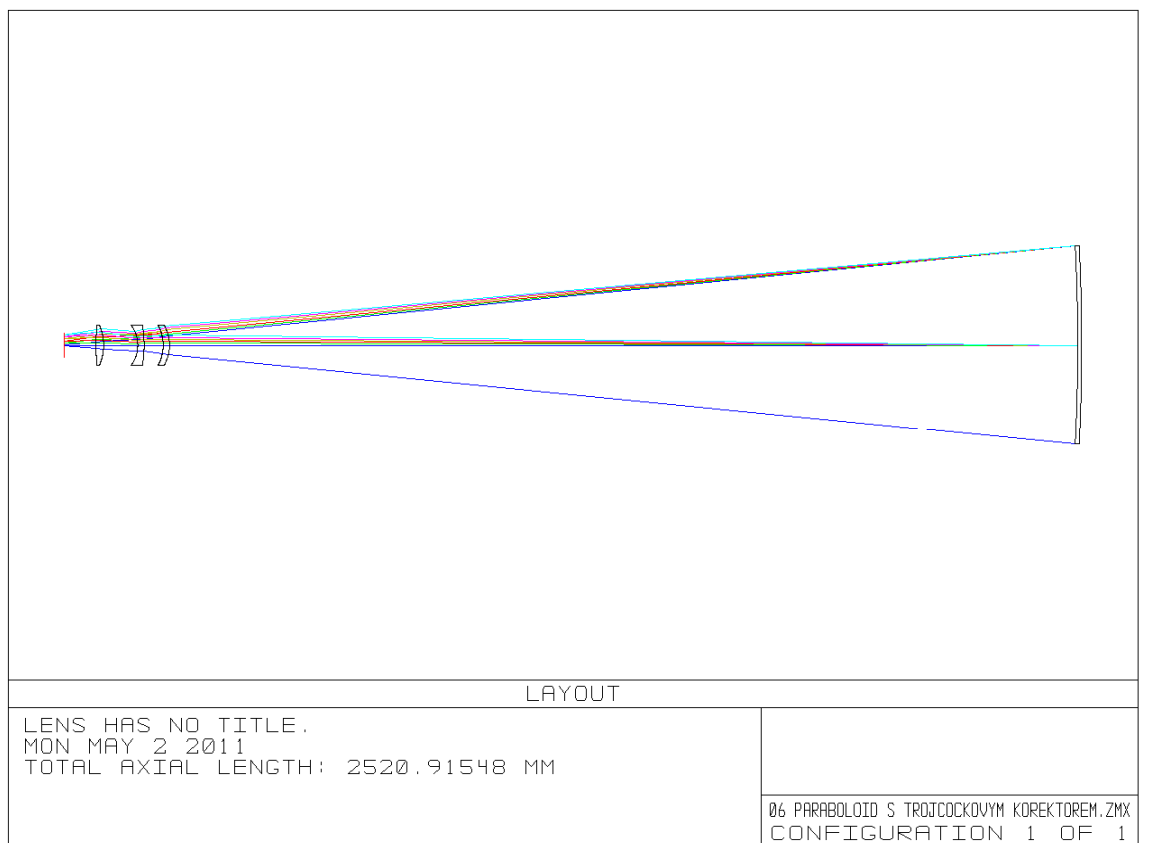
Obrázek 10. Spotdiagramy soustavy hyperboloidu a korektoru Rosse s čočkami ze stejného skla



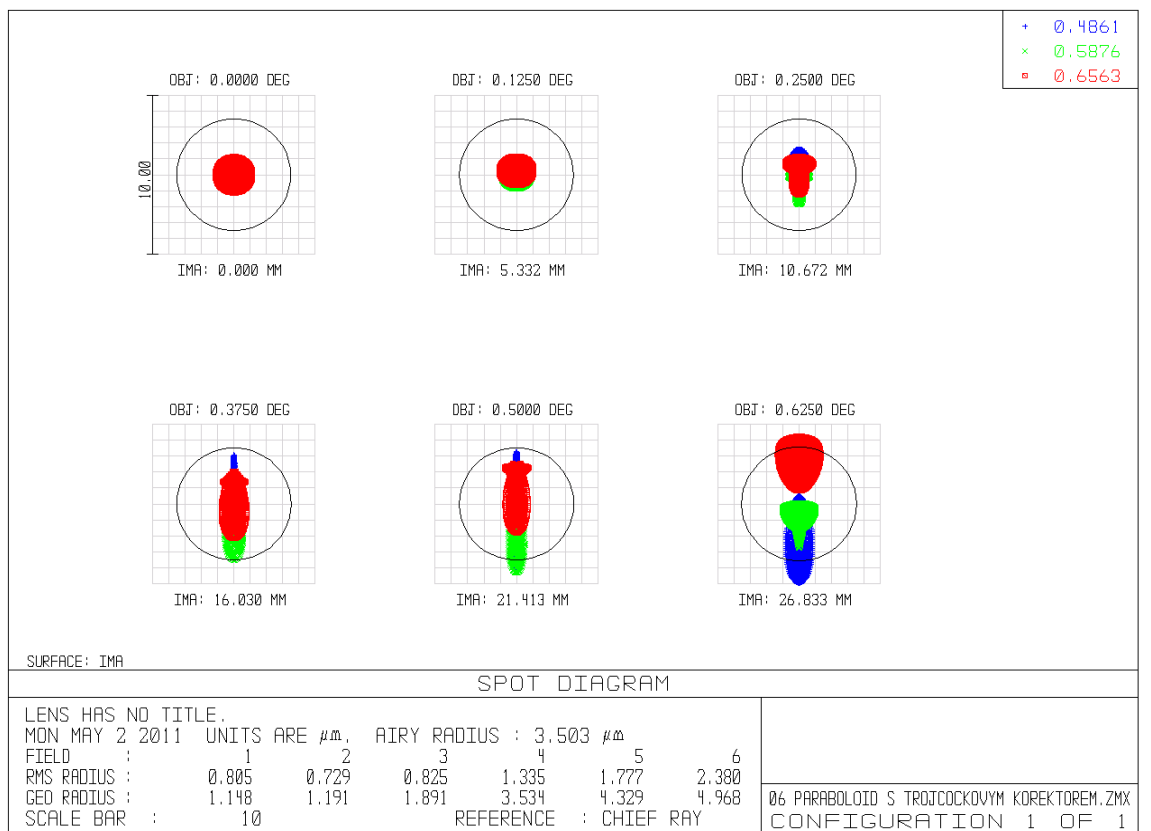
Obrázek 11. Schéma soustavy hyperboloidu a korektoru Rosse s čočkami z různých skel



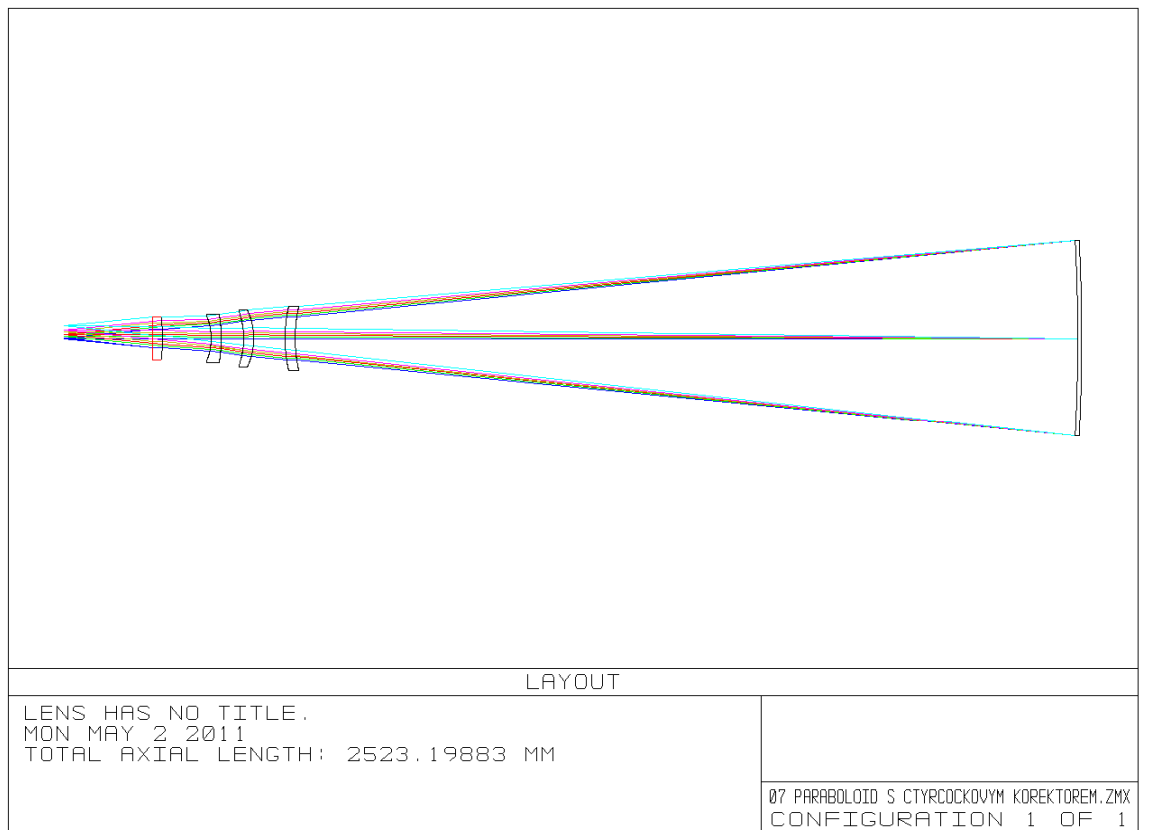
Obrázek 12. Spotdiagramy soustavy hyperboloidu a korektoru Rosse s čočkami z různých skel



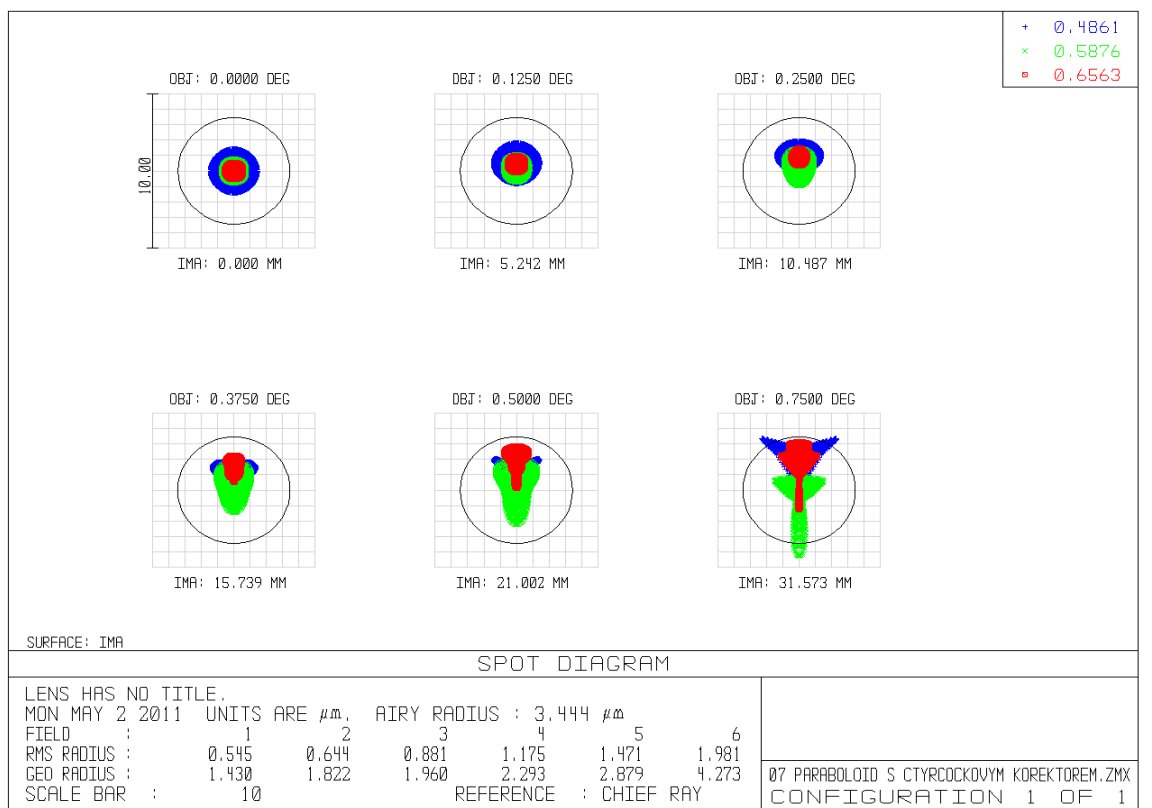
Obrázek 13. Schéma soustavy paraboloidu a tříčočkového korektoru



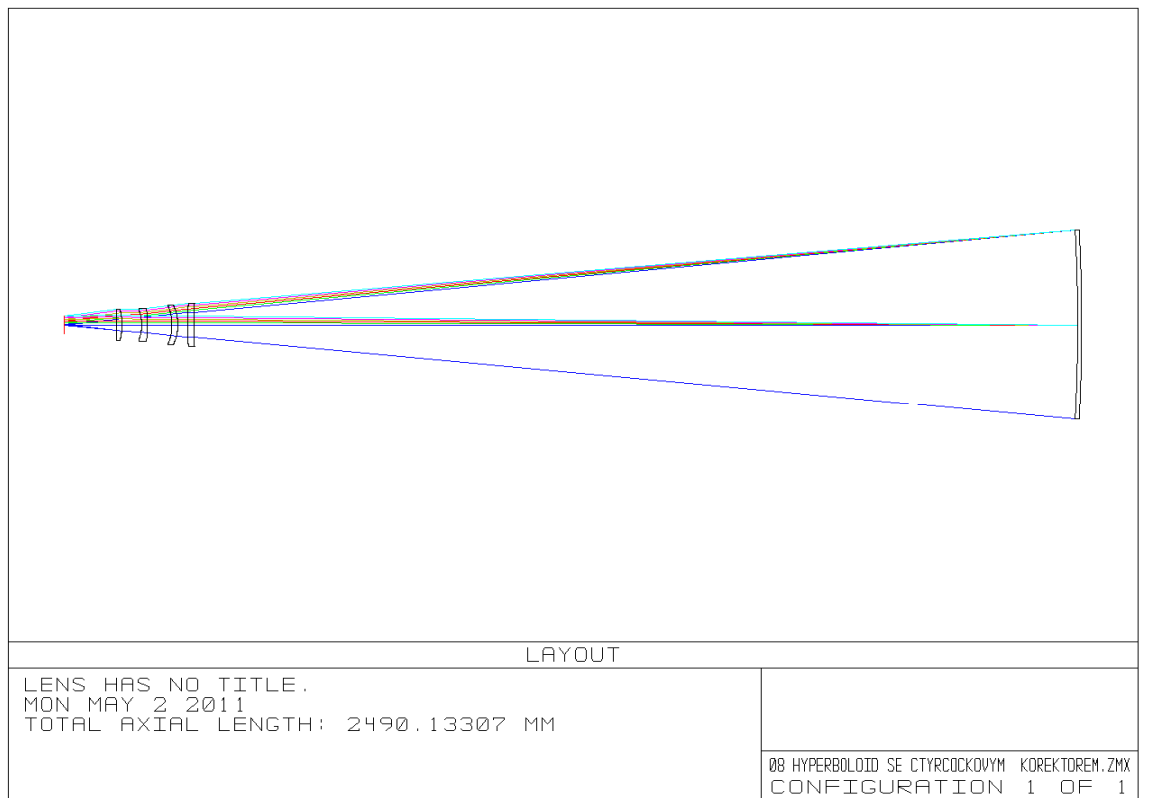
Obrázek 14. Spotdiagramy soustavy paraboloidu a tříčočkového korektoru



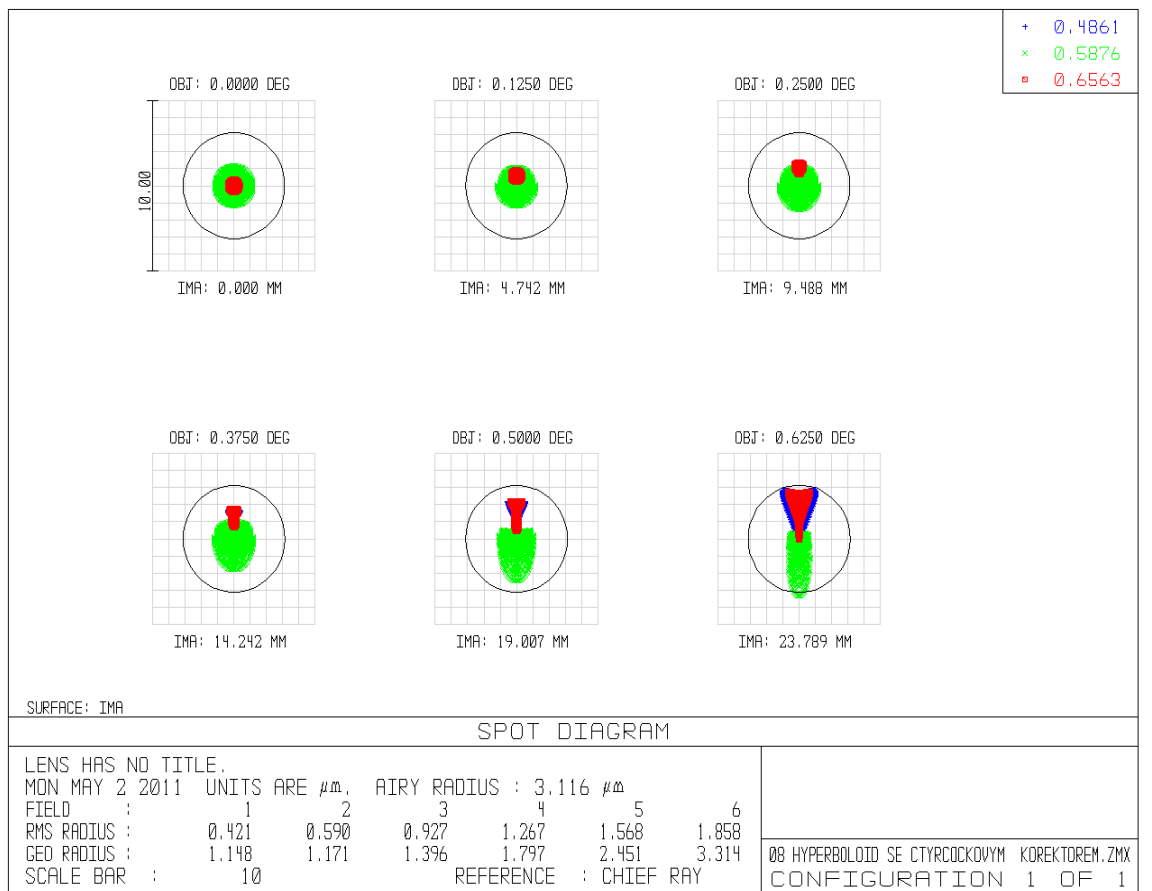
Obrázek 15. Schéma soustavy paraboloidu se čtyřčočkovým korektorem



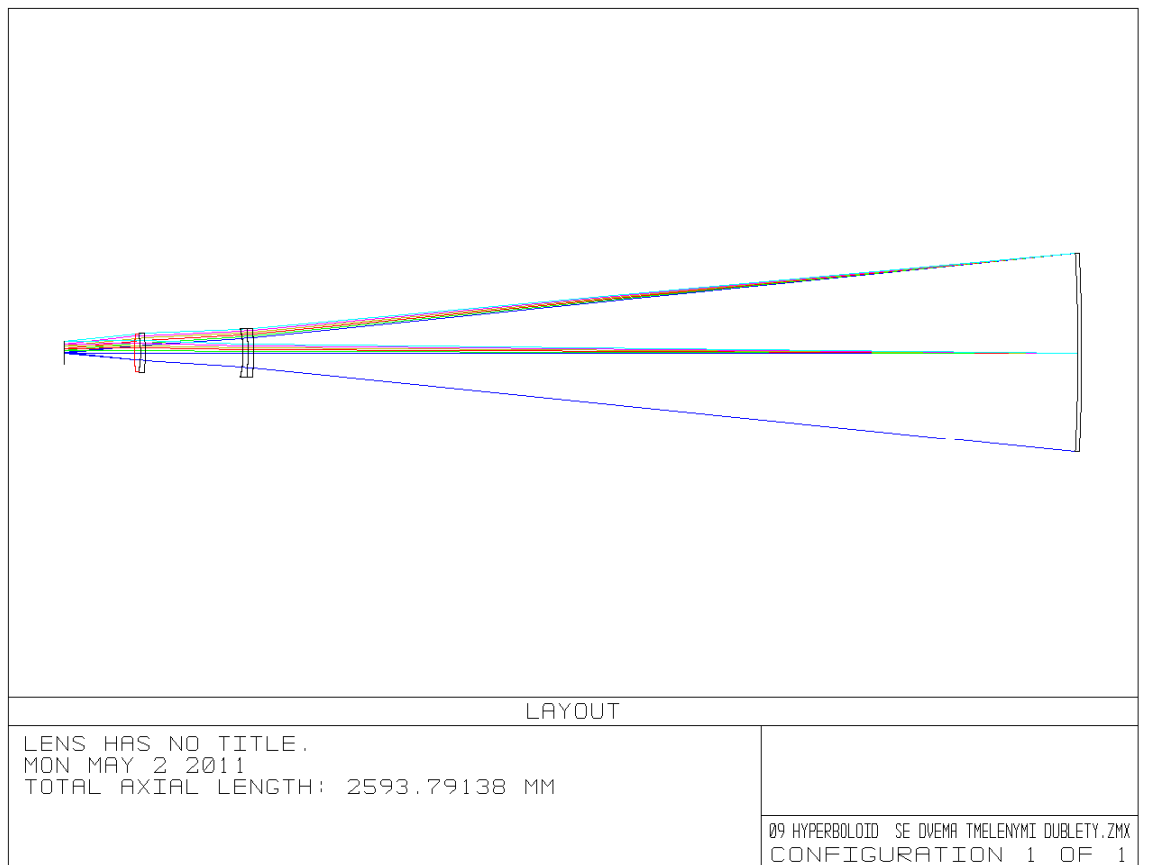
Obrázek 16. Spotdiagramy soustavy paraboloidu se čtyřčočkovým korektorem



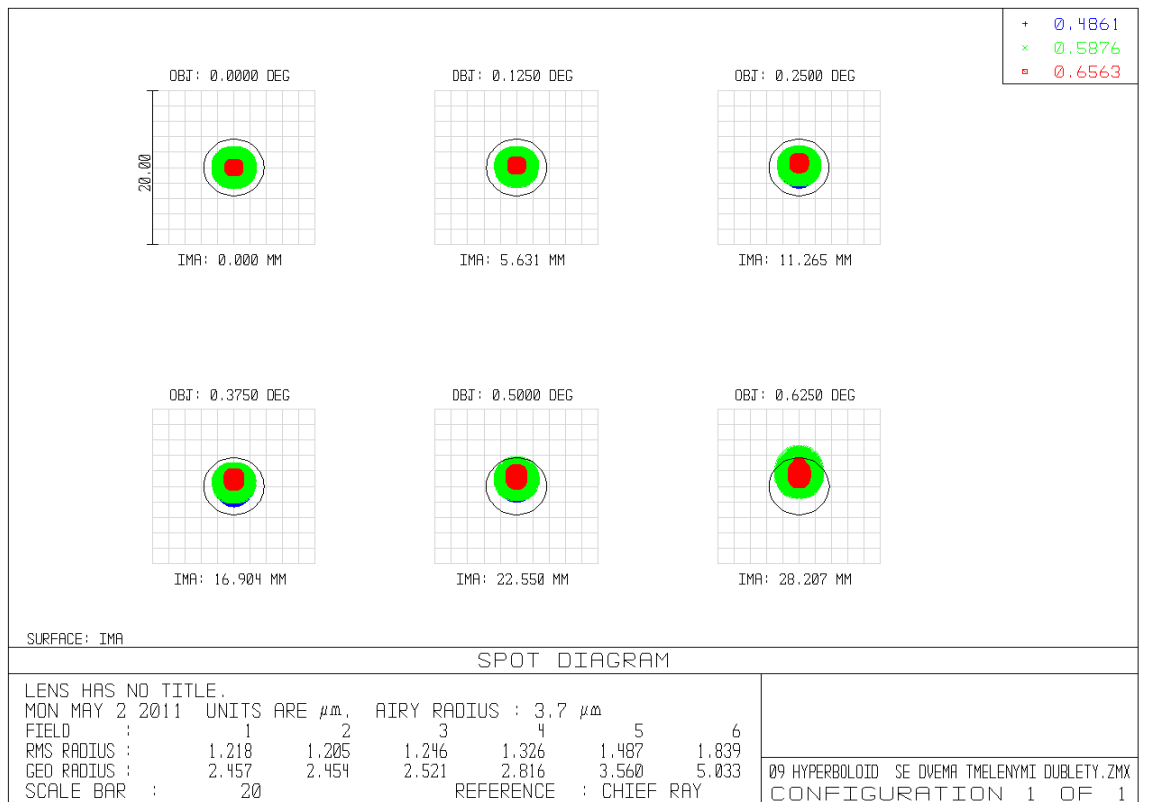
Obrázek 17. Schéma soustavy hyperboloidu se čtyřčočkovým korektorem



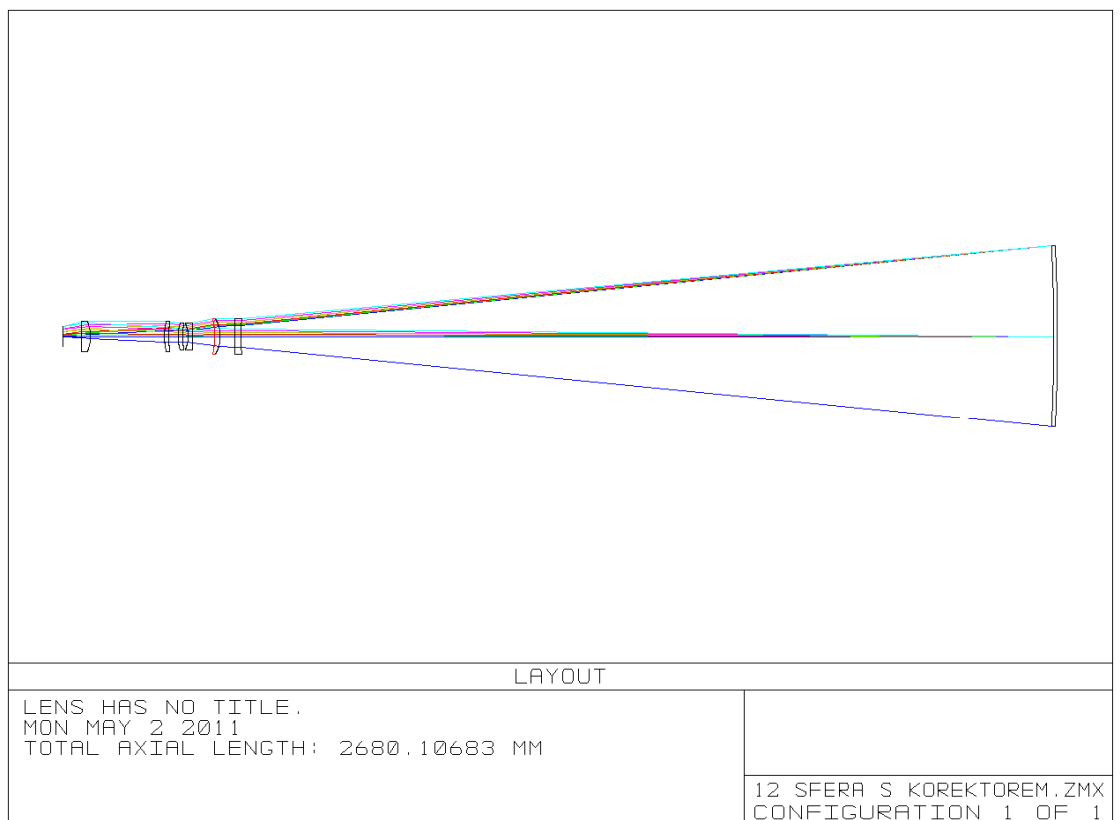
Obrázek 18. Spotdiagramy soustavy hyperboloidu se čtyřčočkovým korektorem



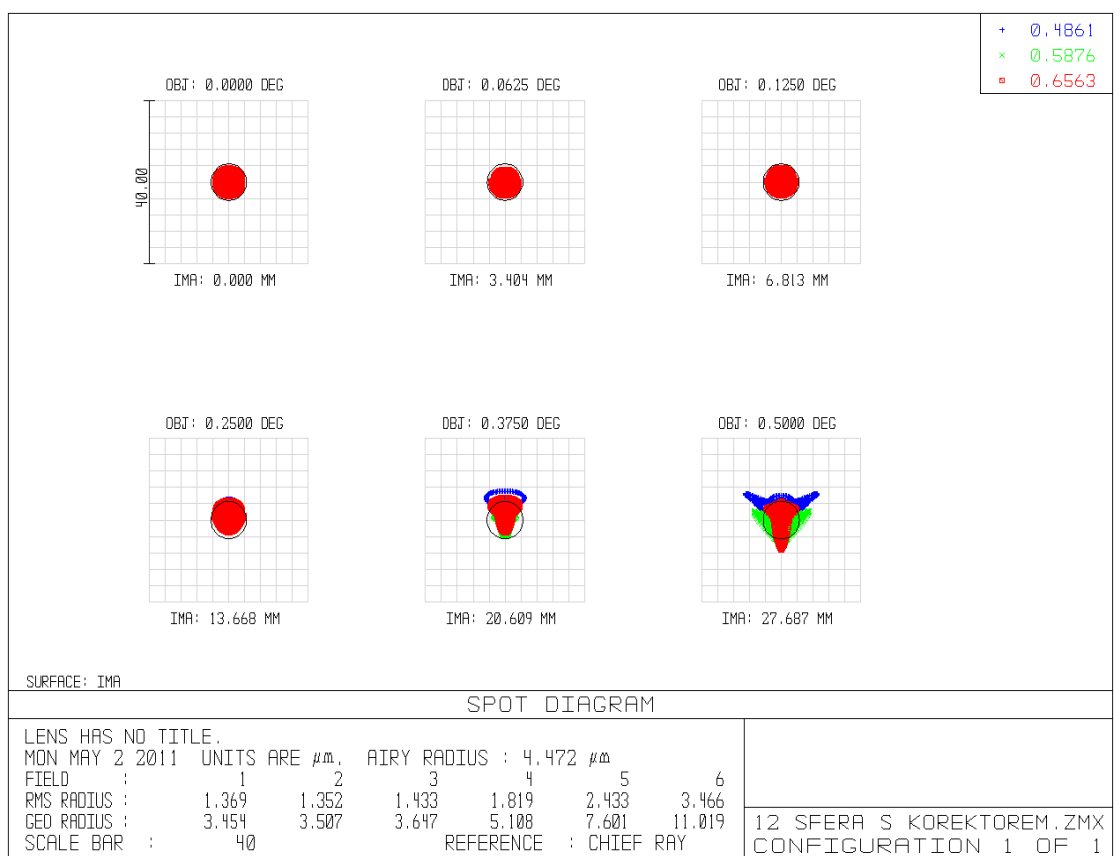
Obrázek 19. Schéma soustavy hyperboloidu s dvojčlenným tmeleným dubletem



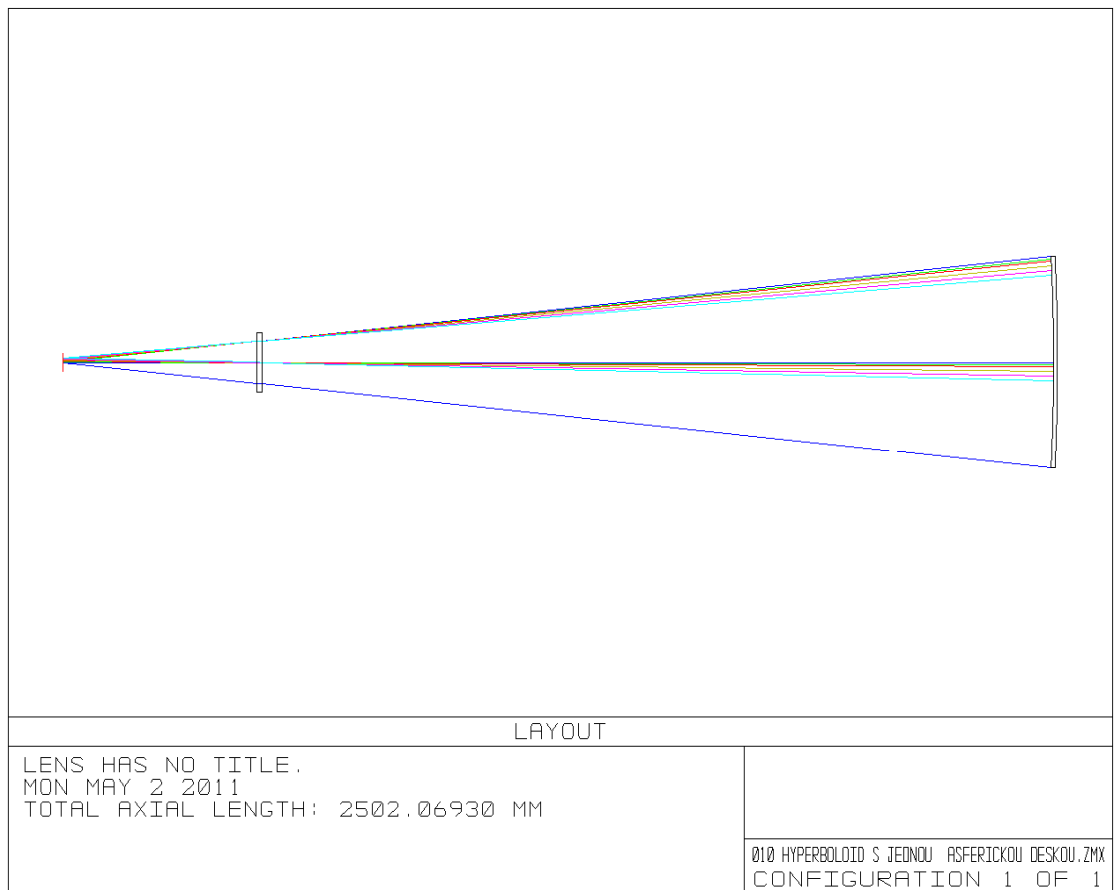
Obrázek 20. Spotdiagramy soustavy hyperboloidu s dvojčlenným tmeleným dubletem



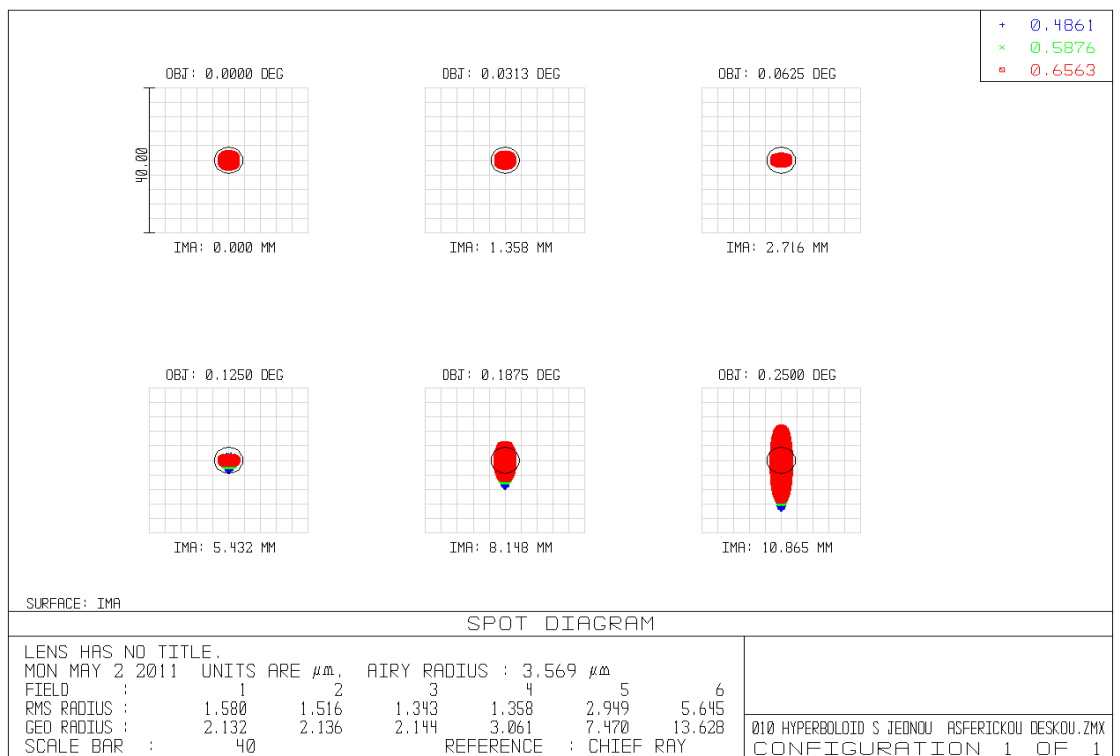
Obrázek 21. Schéma soustavy sférického zrcadla a šestičočkového korektoru



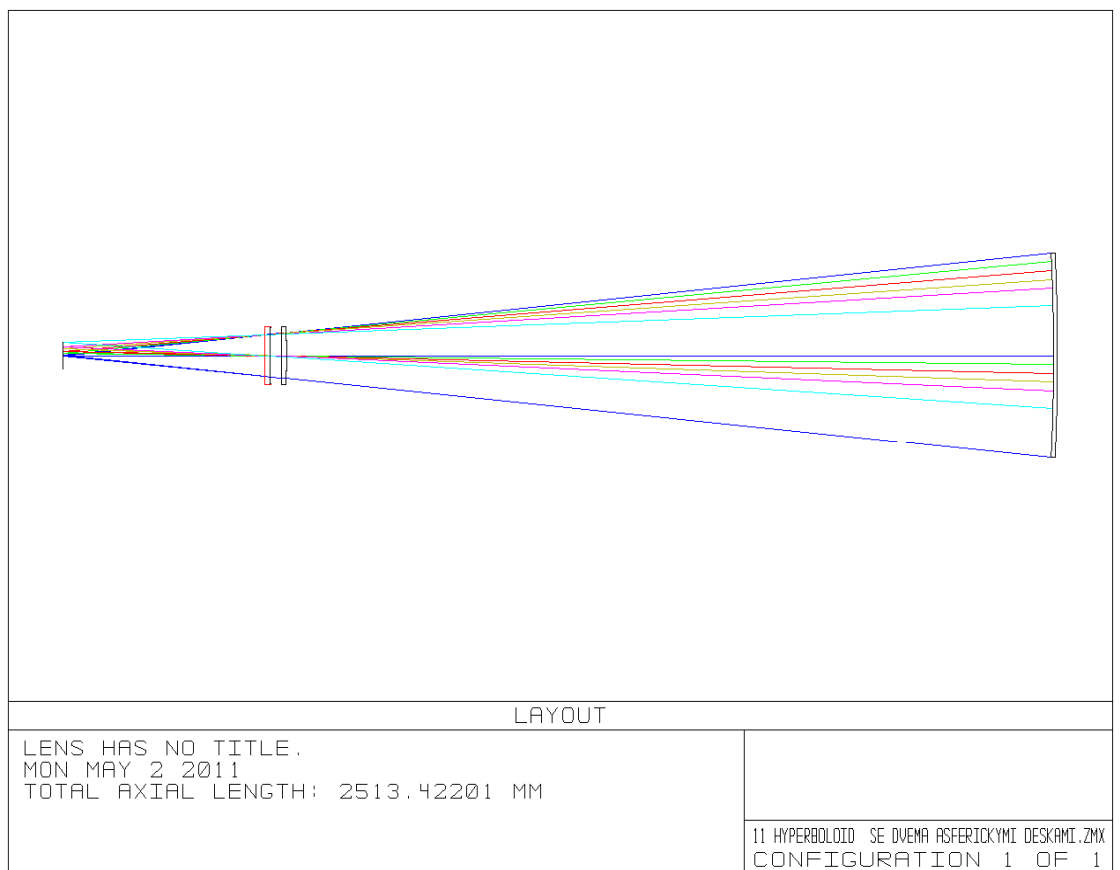
Obrázek 22. Spotdiagramy soustavy sférického zrcadla a šestičočkového korektoru



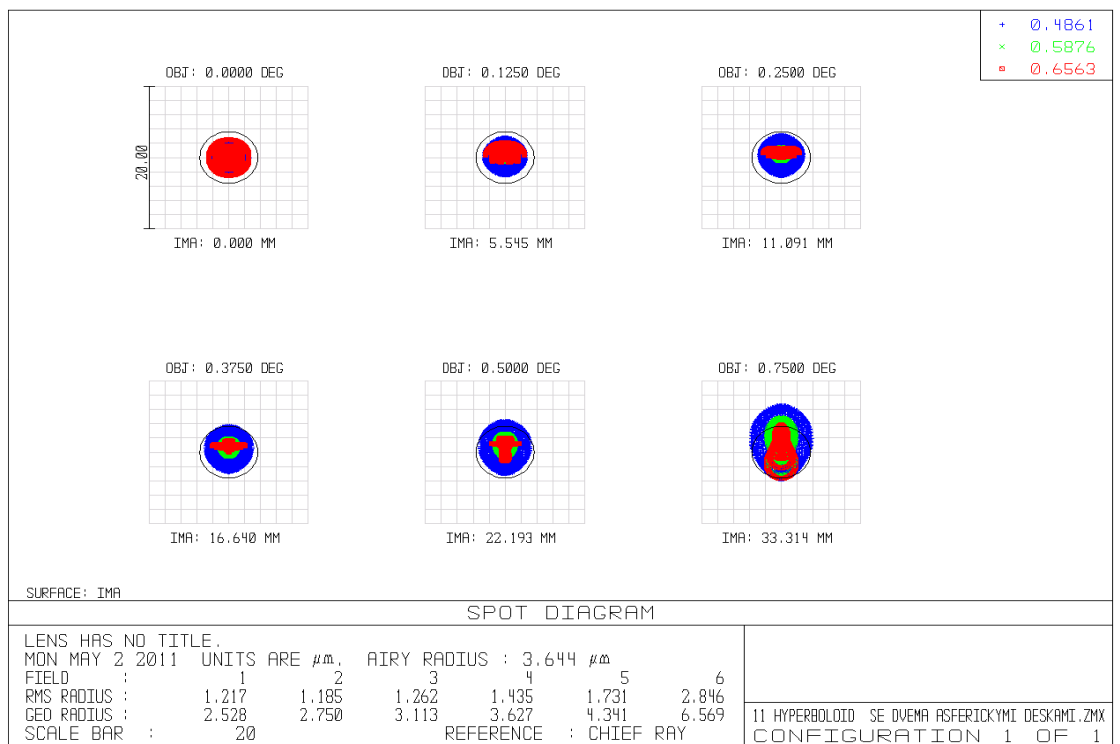
Obrázek 23. Schéma soustavy hyperboloidického zrcadla s jedním asférickým korektorem



Obrázek 24. Spotdiagramy soustavy hyperboloidického zrcadla s jedním asférickým korektorem



Obrázek 25. Schéma soustavy hyperboloidického zrcadla se dvěma asférickými korektory



Obrázek 26. Spotdiagramy soustavy hyperboloidického zrcadla se dvěma asférickými korektory.