

Zobrazovací soustava pro spektrograf s vícekanálovým Šolcovým filtrem

Daniel Jareš, Vít Lédl, Zdeněk Rail

*Při řešení slunečního spektrografu s vícekanálovým filtrem Šolcova typu byl proveden rozbor možných zobrazovacích soustav. Bylo rozhodnuto použít mimoosé Maksutovovy soustavy bez centrálního clonění, která splňuje požadavky na zachování měřítka obrazu Slunce mezi vlnovými délkami 380 nm až 760 nm. Dalekohled poskytuje výborný kontrastní obraz, podobný obrazu apochromatického objektivu. Průměr objektivu je d140 mm, ohnisková vzdálenost f^*2000 mm.*

Imaging system for spectrograph with multichannel Šolc filter

Solving of solar spectrograph telescope, we have made research of possible imaging systems for spectrograph with multichannel Šolc filter. We have decided to use off-axis unobstructed Maksutov telescope, which is able to meet our demands for constant solar image scale in wavelength from 380 nm to 760 nm. This telescope provides good image contrast similar to apochromatic objective lens uses only classical materials. Diameter of the objective is d140 mm, focal length is f^*2000 mm.

1. Úvod

Komplikovaný vícekanálový filtr Šolcova typu, který bude umožňovat pozorování Slunce nejméně v šesti vlnových délkách, bude vyžadovat řešení značných problémů při jeho výrobě i používání. Patří k nim přeladování z jedné čáry na druhou, tepelná stabilizace atd. Zásadní při zobrazení Slunce filtrem bude vyvinutí adekvátní optické soustavy [1, 2], pro zobrazení v nezvykle širokém spektrálním rozsahu vlnových délek. Zobrazovací soustava dalekohledu je sestavena z vlastního objektivu, dále kolimátoru, komplexu úzkopásmového filtru, za kterým následuje zobrazovací objektiv a detektor.

Zkušenosti získané s návrhem zmenšené varianty dalekohledu DOT [3] (Dutch Open Telescope) pro sluneční oddělení Astronomického ústavu v Ondřejově ukazují na skutečnost, že systém by měl být optimalizován jako celek a ne tak, aby se skládal postupně z jednotlivých dílů od různých výrobců, přestože byly navrženy a zhotoveny ve vysoké kvalitě. Jedině optimalizací optické soustavy jako celku lze dosáhnout komplexní kvality dokonalého zobrazení celou soustavou konstruovaného chromosférického dalekohledu. Dlouholeté zkušenosti s výrobou přesných optických prvků ve Vývojové optické dílně v Turnově je zárukou, že soustava jako celek bude zhotovena kvalitně.

2. Varianty zobrazovacích soustav

Hlavním optickým dílem chromosférického dalekohledu, vedle vlastního monochromátoru, je zobrazující objektiv. Jeho kvalita zobrazení musí zajistit požadované rozlišení na slunečním disku, tedy v zorném poli nejméně 30 úhlových minut. S ohledem na předešlé zkušenosti se stavbou obdobných přístrojů a požadavek zobrazení celého disku Slunce, byl pro objektiv zvolen optický průměr d140 mm a ohnisková vzdálenost f^*2000 mm, takže primární obraz Slunce získáme o průměru cca 19 mm. Teoretická rozlišovací schopnost objektivu uvedeného průměru je 0,7 úhlové sekundy.

Při hledání vhodné soustavy objektivu bylo přihlédnuto k nutnosti zajistit co nejmenší chromatickou vadu polohy, která by měnila měřítka obrazů v různých vlnových délkách. Díky selektivní absorpci plynu sluneční atmosféry je úhlový průměr Slunce v různých vlnových délkách různý. Pro čáru KII (vlnová délka 394.3 nm) je sluneční atmosféra propustnější než pro čáru H-alfa (vlnová délka 656.3 nm), tedy při pozorování například v K-čáře uvidíme do sluneční atmosféry hlouběji než v čáře H-alfa. Zobrazené Slunce v K-čáře se bude jevit pod menším úhlovým průměrem.

Pro primární zobrazení v chromosférickém dalekohledu je používáno mnoho typů objektivů [1, 2]. Uvažovali jsme o nejčastěji používaném klasickém objektivu Fraunhoferova typu, dle obr. 1. K jeho konstrukci lze použít chemicky odolných skel BK7- F2 a provést korekci jako achromát. Takový objektiv by vyhovoval k zobrazení pro dvě vlnové délky nebo další, k nim blízké. Protože propusti univerzálního filtru však budou téměř rovnoměrně rozloženy v celém viditelném oboru, bylo by nutné objektiv přeostřovat.

Rozdíl ohniskových vzdáleností klasického achromatického pro čáry C a D (656 nm a 587 nm) činí zhruba 1/2000 celkové ohniskové vzdálenosti, tedy pro f^*2000 mm jde o hodnotu přibližně $ds' = 1$ mm.

Výhodnější by bylo použít apochromatický objektiv, konstruovaný například ze skel BaLF4-KzF2-K7, obr. 2, s rozdílem asi 1/4000 až 1/6000 ohniskové vzdálenosti, tedy $ds' = 0,3$ mm.

V praxi se často doporučuje jako zobrazující díl Kutterova soustava, obr. 3, sestavená ze dvou [4] nebo tří zrcadel [7]. Protože soustava nepoužívá refrakční členy, je plně achromatická. Podrobným propočtem Kutterova systému o světelnosti 1:30, což umožňují moderní výpočetní programy, však zjistíme nepřijatelně velkou sekundární či terciální kómu, podstatně větší než je difrakční limit. Z tohoto důvodu se takové řešení stalo nevyhovujícím.

Nejllepší výsledky s ohledem na korekce sférochromatické vady, kómy a funkce přenosu kontrastu byly získány u navržené varianty mimoosého systému Maksutova.

3. Optimální soustava objektivu

Klasická Maksutovova soustava – obr. 4, reprezentuje z hlediska optických vad stabilní řešení, kdy tolerance na poloměry křivostí ploch a vzdálenosti nejsou tak kritické jako u apochromatického objektivu. Námí navržený objektiv je varianta Maksutovovy soustavy [5, 6]. Využívá se mimoosé řešení, u kterého nedochází ke stínění primárního zrcadla – obr. 5. Sférochromatická vada našeho objektivu dosahuje pro ohniskovou vzdálenost $f'2000$ mm hodnotu pouze $ds'=0,03$ mm, pro spektrální rozsah mezi 380 nm až 760 nm. Z grafu spot diagramů vyplývá, že obrazy v zorném poli velikosti disku Slunce jsou menší než difrakční limit, který je vyjádřen difrakčním kroužkem o průměru 20 μ m. To lze též odečíst na grafu přenosové funkce objektivu, kde na ose x je vyjádřena rozlišovací schopnost v čarách na mm a na ose y je vynesena kontrast obrazu.

Celý objektiv se skládá pouze ze dvou členů: z excentricky zhotoveného menisku, který je klínový a z

přesného sférického zrcadla. Objektiv bude mít mechanickou délku 2750mm. Excentrický menisek je výrobně náročná součást, neboť je vyráběn jako díl s potřebnou klínovitostí. Použité sklo je nutné kontrolovat na nepřítomnost závad typu bublinek a šlír, které by narušily kvalitu zobrazení. Jemně leštěné optické plochy menisku budou povrstveny širokou antireflexní vrstvou, se zbytkovou odrazností pod 1 %. Náročná bude realizace mechanických dílů k zajištění dostatečně přesné prostorové justáže optických členů. Při návrhu byly kontrolovány pozice vzdušných obrazů vzniklých odrazy od optických ploch v I. i II. řádu. Tyto „duchy“ nezasahují do obrazového prostoru.

Současná úroveň kontroly obráběných optických ploch pomocí třísořadnicového měřicího stroje v operacích přesného broušení a s pomocí sférointerferometru, resp. stínovými metodami, při leštění, umožňuje při požadované péči realizovat díly shodné s teoretickým tolerančním výpočtem. Uvedený objektiv je v současné době vyráběn.

Soustava chromosférického dalekohledu bude doplněna pomocnými rovinnými zrcadly k zahnutí optické dráhy do žádaného směru – obr. 6. Optika kolimačního objektivu a zobrazujícího objektivu se v současné době vyvíjí, přičemž zobrazující soustava spolu s filtrem bude optimalizována jako celek. Očekáváme, že výroba rozměrově malých čoček pro kolimátor a zobrazující objektiv nebude činit výrobní problémy. Jako snímací člen bude používána CCD kamera od fy SoftHard Technology s.r.o, s 2/3“ čipem SONY ICX285AL. Uvedený čip má rozměr 10,2 mm x 8,3 mm a obsahuje matici 1376 x 1038 pixelů o rozměru 6,5 μ m x 6,5 μ m.

Světelnější verze výše popsaného mimoosého objektivu, například 1 : 10, velmi vhodná pro pozorování planet a Měsíce, by nepochybně byla důstojným konkurentem moderních apochromátů.

Při návrzích a propočtech uvedených optických soustav byl používán program ZEMAX [7].

4. Závěr

V příspěvku byly uvedeny možnosti řešení vstupního objektivu chromosférického dalekohledu s předpokladem zobrazení celého disku Slunce na CCD čip kamery. Byly konzultovány pro tyto účely používané klasické objektivy. Naším návrhem je použití atypického řešení objektivu v podobě mimoosého Maksutovova systému bez centrálního zaclonění. Navržený objektiv průměru d140 mm a s ohniskovou vzdáleností $f'2000$ mm dosahuje špičkové kvality v uvažovaném pracovním rozsahu vlnových délek od 380 nm do 760 nm.

Práce je řešena jako dílčí část úkolu „Podpora projektů cíleného výzkumu AV ČR“, projekt 1SQ100820502.

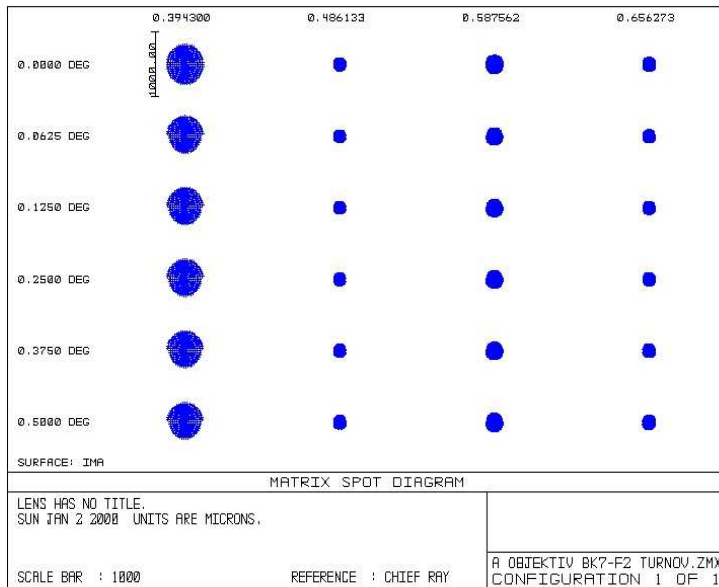
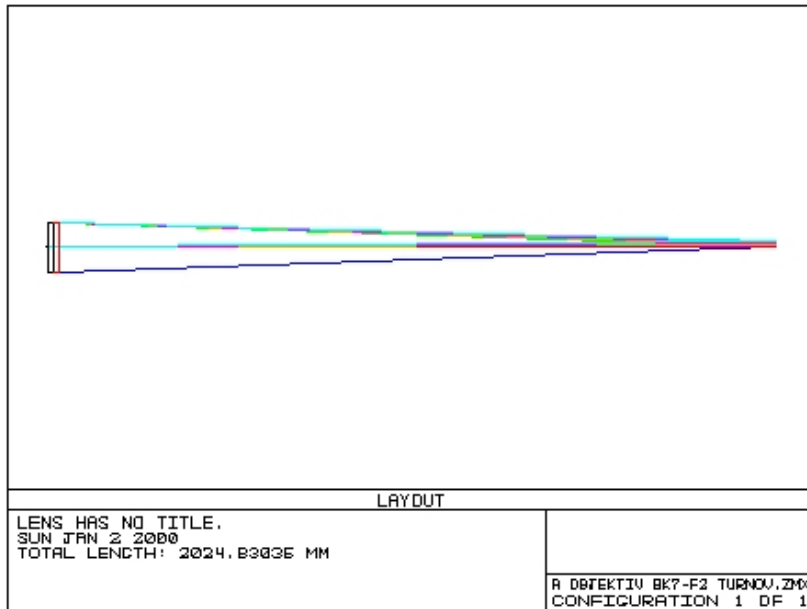
5. Literatura:

- [1] Kuiper G.P., The Sun, The University of Chicago Press, Chicago, Illinois, 1953 (Překlad Dž. Kojper, Solnce, Izdatelstvo innostrannoj literatury, Moskva, 1957.
- [2] Rutten van Venrooij, Telescope Optics, Willmann-Bell, Inc., Richmond, Virginia, 2002.
- [3] Rail Z., Melich Z., Projekt optické části slunečního robotnického dalekohledu, interní zprava ÚFP AV ČR, oddělení optické diagnostiky, Turnov 2006.
- [4] Šolc I., Kutterova soustava, Říše hvězd, 55, 1974, s. 209-215.
- [5] Volosov d.s., Metody rasčota složnych fotografičeskich sistem, OGIZ, Leningrad 1948.
- [6] Maksutov D.D., Izgotovljenije i issledovanije astronomičeskoj optiki, Nauka, Moskva 1984.
- [7] Optical Design Program Zemax, User's Guide, Version 10, Focus Software, Inc., Tuscon 2005.

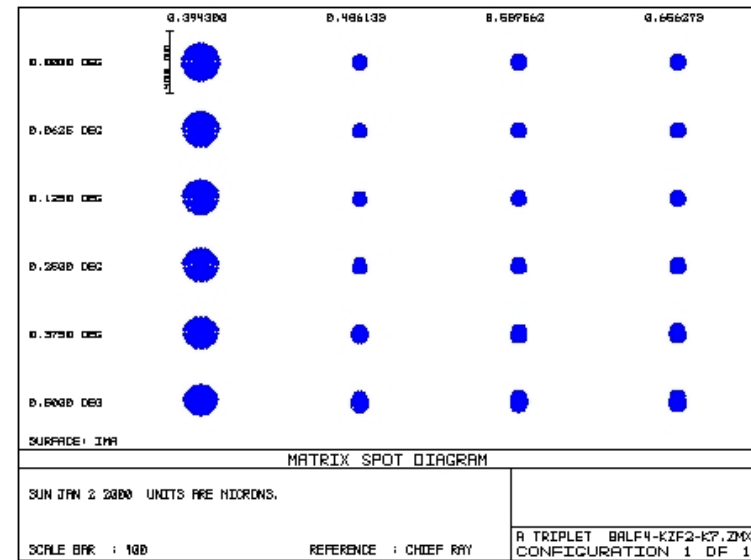
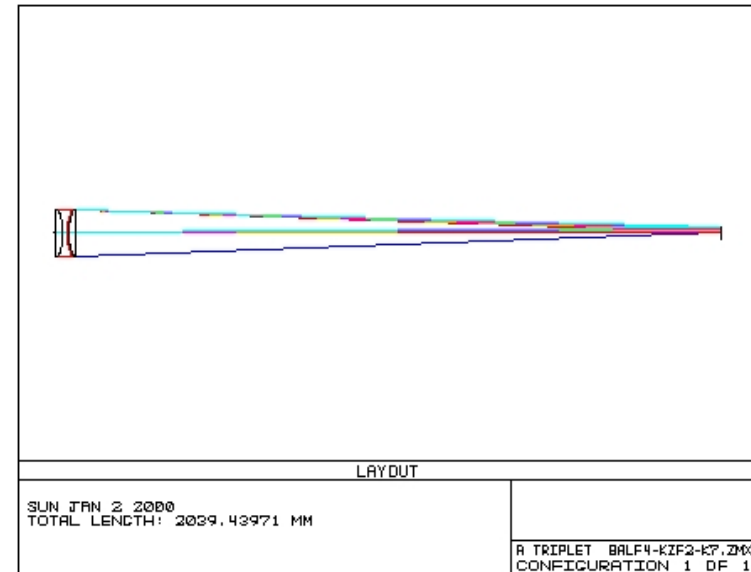
Daniel Jareš, Ing. , Ústav fyziky plazmatu AV ČR, oddělení Optická diagnostika, Skálova 89, 511 01 Turnov, tel. 481 322 22, fax. 481 322 622, email: jares@ipp.cas.cz

Lédl Vít, Ing. , Ústav fyziky plazmatu AV ČR, oddělení Optická diagnostika, Skálova 89, 511 01 Turnov, tel. 481 322 22, fax. 481 322 622, email: ledl@ipp.cas.cz

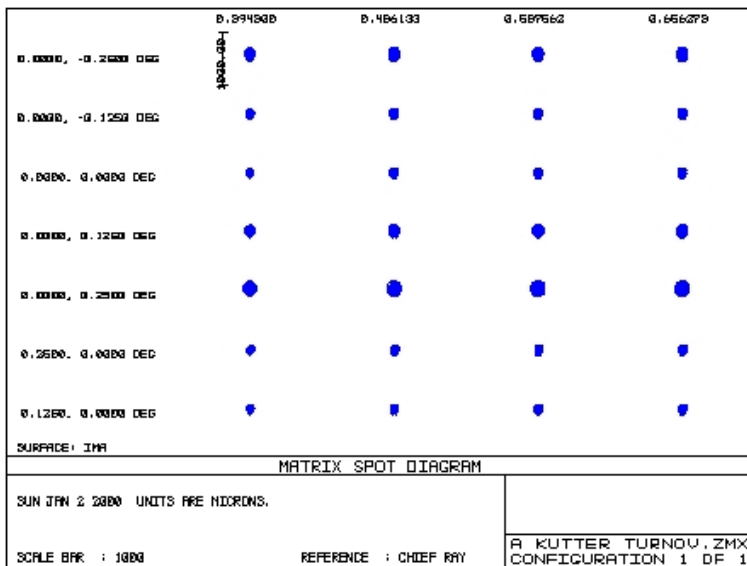
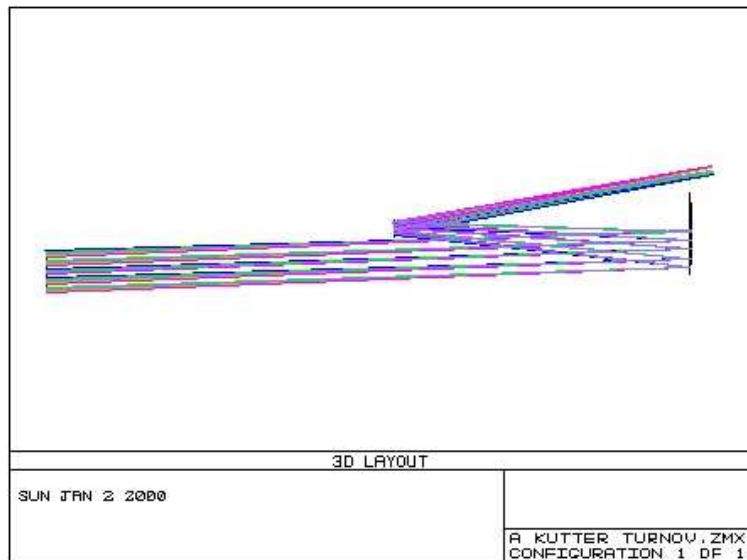
Rail Zdeněk, pro.fyz., Ústav fyziky plazmatu AV ČR, oddělení Optická diagnostika, Skálova 89, 511 01 Turnov, tel. 481 322 22, fax. 481 322 622, email: rail@ipp.cas.cz



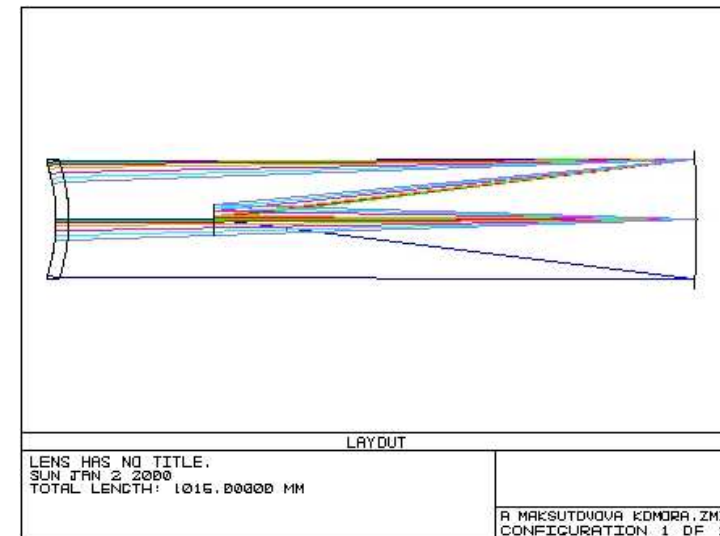
Obr. 1. – Schéma a spot diagramy objektivu Fraunhoferova typu.



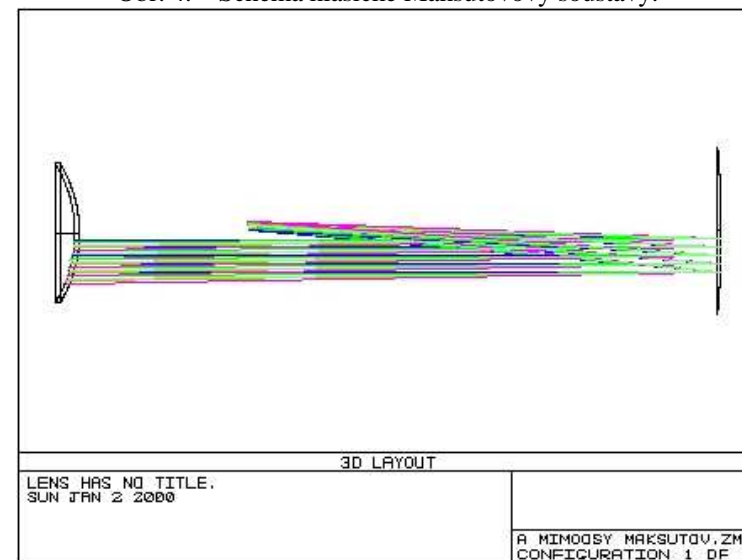
Obr. 2. – Schéma a spot diagramy tripletu BaLF4 – KzF2 – K7.



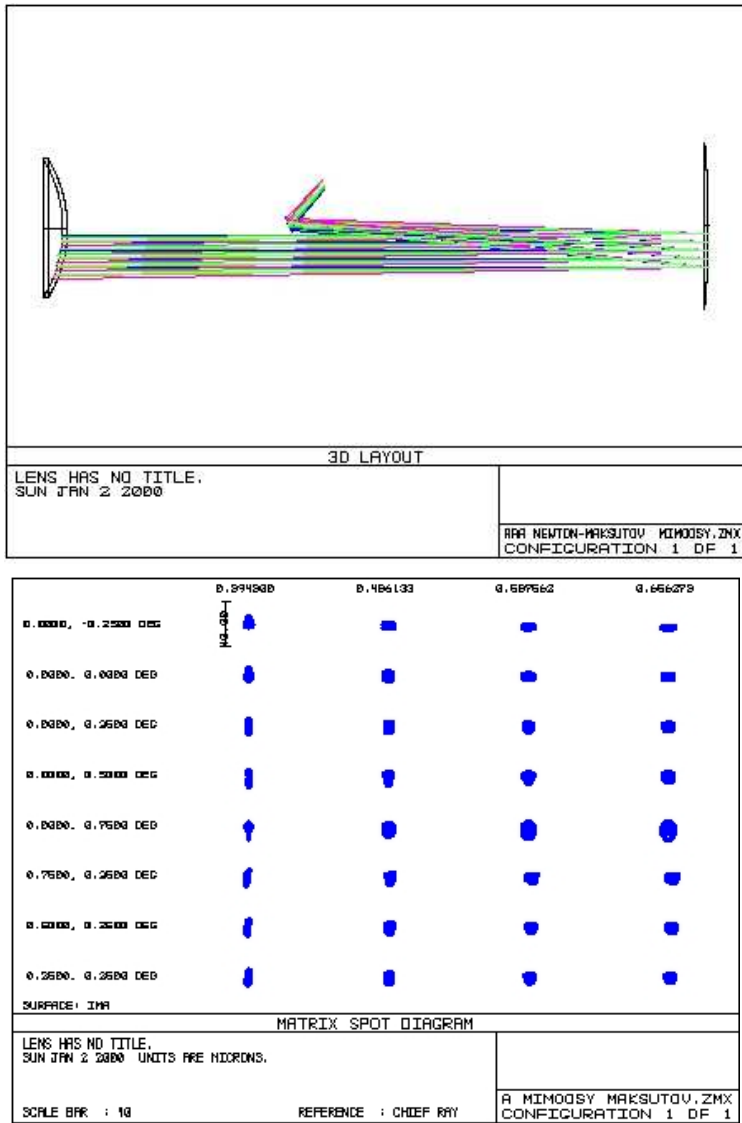
Obr. 3. – Schéma a spot diagramy Kutterovy soustavy.



Obr. 4. – Schéma klasické Maksutovovy soustavy.



Obr. 5. – Schéma mimoosé Maksutovovy soustavy.



Obr. 6. – Schéma a spot diagramy mimoosé Maksutovy soustavy s pomocným zrcátkem.