

Meniskové dalekohledy

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

1. Úvod.

Koncem 30. let minulého století dostal D.D. Maksutov od Ministerstva školství SSSR zadání sestrojít levný a snadno vyrobitelný dalekohled, aby jej ve výuce fyziky a astronomie mohla používat každá škola v SSSR.

Na základě zadání Maksutov vyhodnotil technologické možnosti výroby optických soustav v SSSR a rozhodl se pro dvojradačlový systém.

Výhodou tohoto systému je, že se skládá pouze ze dvou optických ploch, je kompaktní a má nejlepší poměr mezi cenou a zobrazovacími vlastnostmi. Nevýhodou je technologicky náročná výroba optických ploch, které jsou asférické a odrazné vrstvy jsou korozivní a citlivé na mechanické poškození.

Aby Maksutov zabránil poškození optických ploch, rozhodl se umístit před zrcadla do tubusu dalekohledu planoparalelní desku, která by je ochránila.

Na základě dalších úvah zjistil, že planoparalelní deska může být zaměněna za menisek, kterým lze ovlivňovat optické vady celé soustavy. Asférické plochy zrcadel tak mohly být nahrazeny jednodušeji vyrobitelnými sférickými plochami, aniž by došlo ke zhoršení zobrazovacích vlastností dalekohledu.

Toto zjištění bylo podnětem ke vzniku zcela nového typu dalekohledů, které se nazývají meniskové.

První meniskový dalekohled, vyrobený na začátku 2. světové války v SSSR, měl průměr 100 mm a ohniskovou vzdálenost 850 mm. Meniskus byl otočen konvexní plochou vpřed a na jeho zadní konkávní ploše bylo napařeno malé kruhové sekundární zrcátko. Jednalo se tedy o dvojradačlovou zafokální soustavu.

Cílem tohoto referátu je seznámit čtenáře s optickými vlastnostmi klasických meniskových dalekohledů, za které se považují Maksutovova komora a obecný Maksutov-Cassegrain, respektive jeho verze označovaná jako Simak.

2. Optický návrh klasické Maksutovovy komory

Analytický výpočet optických parametrů tohoto systému ze Seidelovy teorie je velice obtížný. Zavedení tloušťky menisku značně zkomplikuje tvary Seidelových sum, hlavně první a druhé pro sférickou vadu a komu. Jednoduše vychází pouze podmínka achromasie (1)

$$(R_1 - R_2) / d = (n_d^2 - 1) / n_d^2 \quad (1)$$

R_1 ... poloměr křivosti vstupní plochy menisku

R_2 ... poloměr křivosti výstupní plochy menisku

d ... středová tloušťka menisku

n_d ... index lomu materiálu menisku pro vlnovou délku $\lambda = 587$ nm

Optické parametry Maksutovovy komory lze snadno spočítat pomocí empirických vztahů. Nejčastěji se používají rovnice pro systémy s tloušťkou menisku rovnou 1/10 jeho průměru [1]. Existují i vzorce pro soustavy s obecnými tloušťkami menisku [2].

Po výpočtu poloměrů křivosti ploch a vzdálenosti menisku od primárního zrcadla je nutné provést kontrolní trigonometrický výpočet [3], jinak v systému mohou zůstat velké zbytkové vady. Je-li tomu tak, pak optima jejich korekce dosáhneme dodatečnými změnami optických parametrů. V současnosti se celý výpočet, optimalizace a kontrola soustavy řeší pomocí optických výpočetních programů, například OSLO, ZEMAX atd.

3.Zbytkové vady Maksutovovy komory

Sférická vada

Tvar křivky sférické vady má pro všechny typy meniskových soustav téměř stejný průběh, který je podobný písmenu S. Je to způsobeno přítomností vad vyšších řádů. Viz obrázek č.1. Aby tyto vady příliš nezhoršovaly rozlišovací schopnost soustavy, je nutné v optických návrzích vždy nalézt kompromis mezi jejím průměrem a světelností. Vady vyšších řádů závisejí na tloušťce menisku a jeho zakřivení, čím je tloušťka menisku menší a zakřivení ploch vyšší, tím více zhoršují zbytkovou sférickou vadu.

Chromatická vada

Splňuje-li menisek podmínku achromasie (1), pak se paraxiální paprsky všech vlnových délek protnou v jediném bodě na optické ose. Pro lepší korekci chromatické vady je výhodnější, aby k tomuto stavu došlo v zóně o výšce $0,707 * Y_0$, kde $Y_0 = D/2$ a D je průměr menisku. Podmínka optimální achromasie (2) má přibližný tvar podle [4]

$$(R_1 - R_2) / d = 0,975 * (n_d^2 - 1) / n_d^2 \quad (2)$$

Barevná vada polohy závisí na tloušťce menisku. Čím je tloušťka menisku větší, tím větší je i vada. Tloušťka menisku se volí v rozmezí (1/7 - 1/12) jeho průměru. Pro komory do průměru (400 - 600) mm a světelnosti (1/3,5 - 4) je barevná vada oproti vadám vyšších řádů zanedbatelná. Vady vyšších řádů lze redukovat větší tloušťkou menisku, například (1/7 - 1/8) jeho průměru. Velice důležitou vlastností achromatického menisku je to, že jeho sférická aberace chromatických svazků je málo závislá na indexu lomu použitého skla. Při výrobě je možné použít různé typy optických skel s podobnými indexy lomu (například BK7, K7, K5 atd.), aniž by došlo ke zhoršení zobrazovacích vlastností. Tento fakt výrobu podstatně zlevňuje.

Koma

Vzdálenost menisku vůči zrcadlu určuje zbytkovou koma. Pro její úplnou opravu existují dvě řešení polohy menisku vzhledem k zrcadlu. První varianta má menisek konkávní plochou dopředu ve vzdálenosti přibližně $2 * R_1$ za středem křivosti zrcadla. Druhá varianta je s meniskem obráceným konvexní plochou dopředu a umístěným ve stejné vzdálenosti $2 * R_1$ před středem křivosti zrcadla. Druhá varianta má delší stavební délku, a proto se v praxi nepoužívá.

Astigmatismus

Klasická Maksutovova komora je aplanatický systém, astigmatismus v ní není zcela kompenzován. Ten je dominantní mimoosovou vadou, omezující zorné pole komory. K anulování třetí Seidelovy sumy je potřeba použít další dva optické parametry - index lomu skla n_d a tloušťka menisku d. Pro reálné hodnoty indexů lomu skel mezi (1,4 - 1,5) vychází menisek velice tenký a tudíž i obtížně vyrobitelný. Navíc by byl velmi zakřiven a vnesl by do soustavy velké vady vyšších řádů.

Petzvalova křivost

Ohnisková plocha je v Maksutovově komoře zakřivena a pro fotografování velkých zorných polí je nutné použít prohýbaných filmů nebo rovnat Petzvalovu křivost pomocí Piazzioho čočky s kladnou optickou mohutností. Tento člen však vnáší do Maksutovovy komory zanedbatelnou koma, která je tím větší, čím je tato čočka vzdálenější od ohniskové plochy. Proto je výhodnější umístit tuto čočku co nejbližší ohniskové ploše. To však klade značné nároky na čistotu ploch čočky i na její antireflexní vrstvy.

4.Optický návrh Maksutov-Cassegrainu, varianta Simak

Empirické vztahy pro dvojzrcadlový meniskový systém odvozeny nebyly. Optické parametry obecného Maksutov-Cassegrainu – Simaku, lze spočítat takto :

V předběžném návrhu zvolíme zrcadlovou část jako koncentrický systém, zrcadla mají společný střed křivosti. Achromatický menisek bude splňovat podmínku (1).

Nejvýhodnější tloušťka menisku je $(1/8 - 1/12) * D$, kde D je jeho průměr. Poloměr křivosti R_1 vstupní konkávní plochy menisku zvolíme $1,5 * D$ a vrchol této plochy bude ležet ve vzdálenosti $2 * R_1$ od středu křivosti koncentrického systému zrcadel blíže k zrcadlům.

Po výpočtu poloměrů křivosti ploch a vzdálenosti menisku od primárního zrcadla je nutné provést kontrolní trigonometrický výpočet [3], jinak v systému mohou zůstat velké zbytkové vady. Je-li tomu tak, pak optima jejich korekce dosáhneme dodatečnými změnami optických parametrů včetně vzdálenosti primárního zrcadla od sekundárního.

V současnosti se celý výpočet, optimalizace a kontrola soustavy řeší pomocí optických výpočetních programů, například OSLO, ZEMAX atd.

Také u Simaku, lze umístit menisek konkávní plochou směrem vzad ve vzdálenosti $2 * R_1$ před středem symetrie. Obě varianty orientace a umístění menisku jsou z hlediska optických vad rovnocenné, avšak druhá, s delší stavební délkou, se nepoužívá.

5. Zbytkové vady Maksutov-Cassegrainu, varianta Simak

Sférická vada

Optimálně sférická vada u Simaku je mírně nedokorigovaná a je kompromisem mezi osovými a mimosovými vadami, to znamená, že okrajové paprsky protnou optickou osu blíže než středové. Stejně jako u Maksutovovy komory, tak i pro daný průměr Maksutov-Cassegrainu existuje limitní maximální světelnost soustavy, od které se začínají výrazně uplatňovat vady vyšších řadů. Při optickém návrhu by se toto mělo brát v úvahu.

Chromatická vada

Chromatická vada polohy se u Simaků s optimálně navrženými menisky uplatňuje málo. Tyto dalekohledy lze při světelnosti 1 : 10 vyrábět až do průměrů 600 mm při dosažení osových difrakčních obrazů pro celý viditelný a blízký infračervený obor. U mimoosových obrazů je dominantní chromatická vada zvětšení, uplatňující se ve vzdálenostech větší než jeden stupeň od optické osy.

Velice důležitou vlastností achromatického menisku je, že jeho sférická aberace chromatických svazků je málo závislá na indexu lomu použitého skla. Při výrobě je možné použít různé typy optických skel s podobnými indexy lomu (například BK7, K7, K5 atd.), aniž by došlo ke zhoršení zobrazovacích vlastností, což výrobu podstatně zjednodušuje.

Koma

Poloha menisku v soustavě určuje zbytkovou koma. Pro její úplnou opravu existují dvě polohy menisku vzhledem ke středu koncentrické soustavy zrcadel. První řešení má menisek konkávní plochou dopředu ve vzdálenosti přibližně $2 * R_1$ za společným středem křivostí zrcadel. Druhá varianta má menisek obrácen konvexní plochou dopředu a umístěn ve stejné vzdálenosti $2 * R_1$ před středem křivostí zrcadel. Tato varianta s delší stavební délkou se nepoužívá.

Astigmatismus

Simak je aplanatický systém, ale zbytkový astigmatismus se u něho projevuje ve vzdálenostech větších než jeden stupeň od optické osy. Jeho velikost vzrůstá s tloušťkou menisku, ale pro většinu reálných systémů nereprezentuje tato vada významné zhoršení obrazů.

Petzvalova křivost

Ohnisková plocha v Simaku je konkávně zakřivena směrem k předmětu a pro fotografování velkých zorných polí je nutné použít zakřivených filmů nebo ji srovnat pomocí Piazzioho čočky. Tento člen má negativní optickou mohutnost. Vzdálenost čočky od ohniskové plochy by měla být co nejmenší.

6. Modifikace meniskových dalekohledů

Jednozrcadlové meniskové systémy

Spot diagramy klasické Maksutovovy komory o průměru 200mm a ohniskové vzdálenosti 600 mm jsou ukázány na obrázku č.2. .

Pro fotografování na filmovou emulsi s rozlišovací schopností 0,03 mm odvodil Maksutov vztah mezi průměrem komory a její maximální světelností. Její hodnota se v případě použití CCD detektorů s pixely (0,005 – 0,010) mm snižuje.

V praxi se nejčastěji setkáváme s klasickou Maksutovovou komorou nebo s její zkrácenou variantou Maksutov -Newtonem, ve které je menisek posunut blíže k primárnímu zrcadlu. Eliptické sekundární zrcadlo je připevněno přímo k menisku, takže v soustavě odpadají rušivé ohybové obrazce způsobené držákem sekundárního zrcadla.. Systém není aplanatický, koma v něm dosahuje zhruba poloviny velikosti, která je u paraboloidického zrcadla stejného průměru a ohniskové vzdálenosti..U vizuálních přístrojů se světelností (1 : 5 - 1 : 6) zbytková koma tolik nevádí, avšak fotografické komory s vyšší světelností, např. (1 : 3 - 1 : 3,5) je nutné konstruovat jako aplanatické.

Aby se u zkráceného Maksutov-Newtonu plně odstranila koma, bylo by nutné asféricizovat primární zrcadlo do tvaru zploštělého sféroidu o excentricitě zhruba $+0.2$.

Takový systém by měl mimosové obrazy zhoršeny pouze astigmatismem, vzrůstajícím s asféricíností primárního zrcadla. Petzvalova křivost obrazového pole by byla menší než u klasické Maksutovovy komory.

Sférochromatickou vadu lze opravit asféricací jedné z ploch menisku nebo zrcadla. Je také možné přidat před menisek Schmidtovu desku, která opravuje vady vyšších řádů. Oproti klasickému systému se obrazy radikálně zlepšují. Vložením sférické desky se však do Maksutovovy komory vnese chromatismus zvětšení. Spot diagramy systému se Schmidtovou deskou jsou na obrázku č.3.

Dvojjzrcadlové meniskové systémy

Z dvojjzrcadlových systémů má nejlépe opraveny vady systém Simak se sekundárním zrcadlem odděleným od menisku. Je aplanatický a radikálně opravuje i astigmatismus. Takový dalekohled o průměru 200mm je možné zkonstruovat do světelnosti až $1 : 8$ tak, že na zorném poli o průměru dvou stupňů jsou geometrické obrazy hvězdy lepší než difrakční. Spot diagramy tohoto systému jsou na obrázku č.4. Zmenšíme-li světelnost Simaku na $1:10$, je možné navrhnout dalekohled až do průměru 600 mm, který bude mít na optické ose difrakční obrazy a na okraji dvoustupňového pole budou s nimi srovnatelné. Dosáhnout takové úrovně korekce optických vad u ekvivalentního refraktoru s objektivem s fluoritovými čočkami či z moderních ED skel je velice obtížné.

Posuneme-li menisek blíže k zrcadlu, je možné na úkor aplanacie získat kompaktní systém se sekundárním zrcadlem, upevněným za menisek. Systém přestává být aplanatický a mimosové obrazy jsou zhoršeny komou. Při světelnosti ($1 : 12 - 1 : 15$) zhoršení obrazu komou tolik nevádí. Systém je označován jako Rumak. Spot diagramy Rumaku o průměru 200mm a ohniskové vzdálenosti 3000mm jsou zobrazeny na obrázku č.5.

Pro menší průměry do 150 mm a světelnosti ($1 : 13 - 1 : 20$) publikoval americký optik Gregory v 50. letech 20. století návrh Spot-Maksutova, u něhož je sekundár přímo tvořen odraznou ploškou, napařenou na vnitřním konvexním povrchu menisku. V současné době se s touto variantou setkáváme na trhu nejčastěji. Spot-Maksutovy, vyráběné od konce 50.let s názvem Questar získaly velkou oblibu mezi amatéry a byly využívány i profesionálními astronomy. Tato varianta má ze všech výše uvedených největší zbytkové vady. Spot diagramy Spot-Maksutova o průměru 200mm a ohniskové vzdálenosti 3000 mm, zhoršené komou, jsou ukázány na obrázku č.6.

Zlepšit zobrazovací vlastnosti Spot-Maksutova lze pomocí dalšího parametru, asféricílosti primárního zrcadla. U dalekohledů do průměru 150 mm je toto zbytečné, ale pro průměry větší než (200 – 250) mm je asféricizace primárního zrcadla nutná, zvláště, je-li přístroj určen pro fotografování větších zorných polí. Vynikajících výsledků s aplanatickým Spot-Maksutovem o průměru 250 mm a ohniskovou vzdálenosti 3700 mm, redukovanou na 2600 mm, dosáhl Roland Christen [5], majitel firmy Astrophysics. Tuto soustavu s asféricíností primárního zrcadla o hodnotě cca $(-0,20)$ poprvé navrhl v Oděse Valerij Děrjužin

7. Závěr

Meniskové systémy umožňují konstruovat přístroje pro široké spektrum využití. Mají velké možnosti kompenzace optických vad. Na jedné straně lze navrhnout přístroje s vysokým kontrastem pro pozorování planet, detailů na Slunci, hvězd, na druhé straně lze navrhnout kamery se zorným polem o průměru několika desítek stupňů pro široký spektrální obor. Dosud nedocenené jsou jejich mimosové varianty.

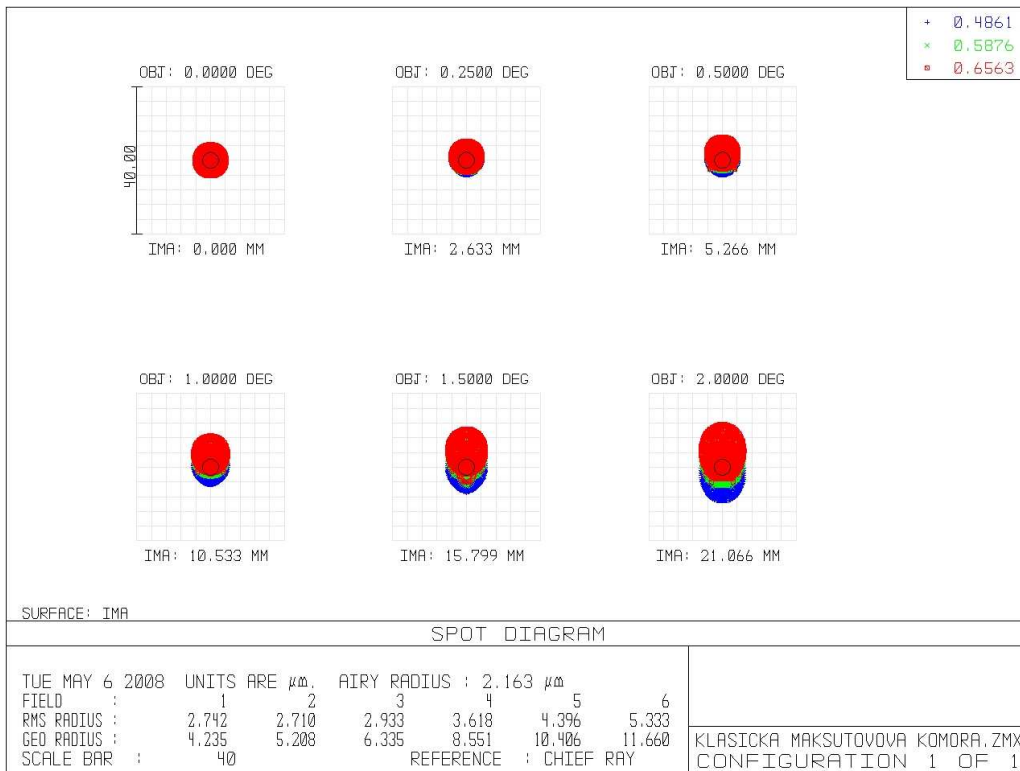
Práce je řešena jako dílčí část úkolu „Podpora projektů cílového výzkumu AV ČR“, číslo 1SQ100820502.

8. Literatura

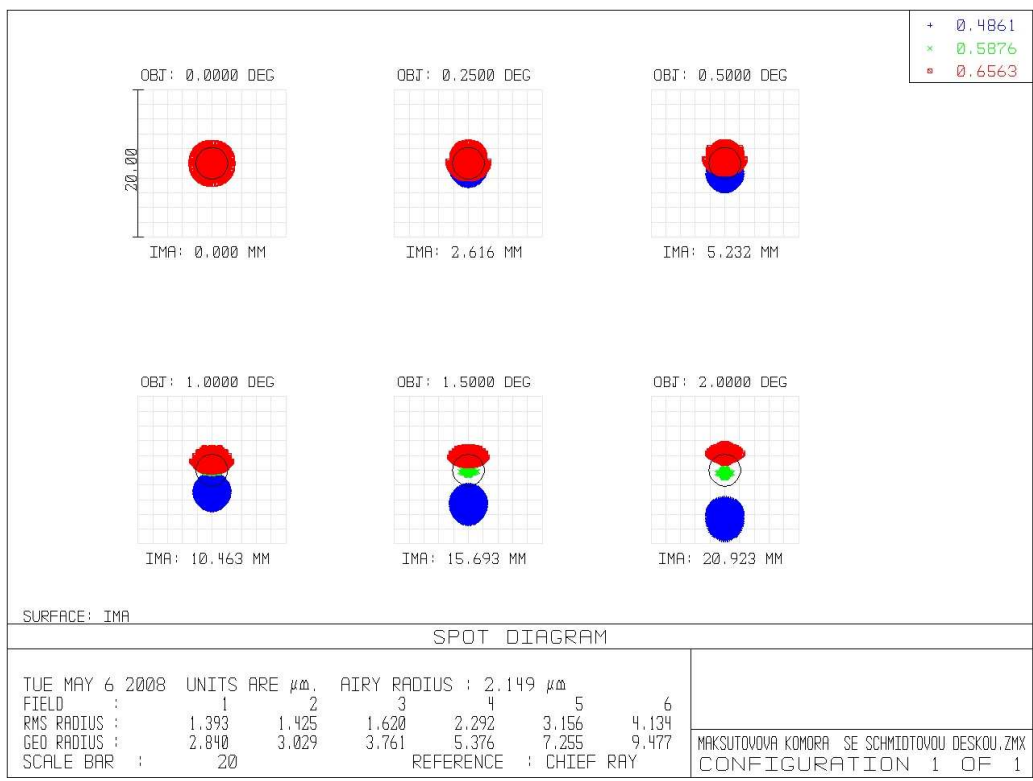
- [1] N.N.Michelson, Optičeskije teleskopy, Izdatelstvo "Nauka", Glavnaja redakcija fiziko-matematičeskoj literatury, Moskva, 1976
- [2] D.S.Volosov, Metody rasčeta složnych fotografičeskich sistem, OGIZ-GOSTECHIZDAT, Moskva, 1948
- [3] M.M.Rusinov, Techničeskaja optika, M.M.Rusinov, MAŠGIZ, Moskva, 1961
- [4] Rutten, van Venrooij, Telescope Optics, Willmann-Bell, Inc., Richmond, Virginia, 2002
- [5] <http://geodata.com.csun.edu/~voltaire/roland/>



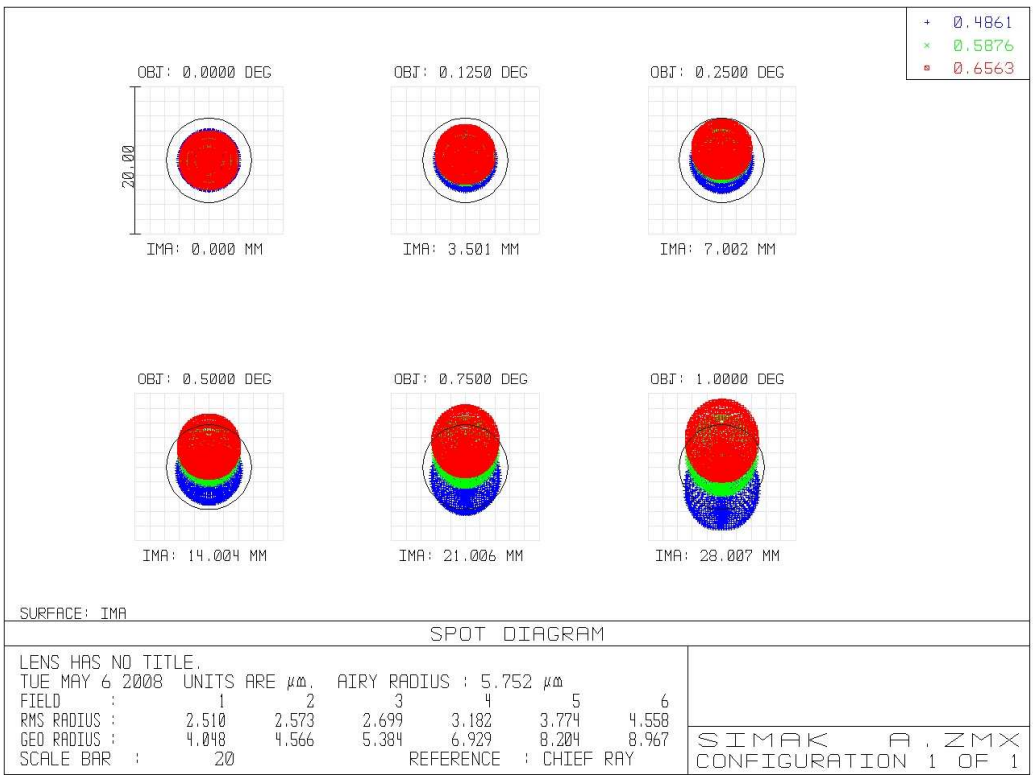
Obr.1. – sférická vada meniskového dalekohledu; pro 3 vlnové délky



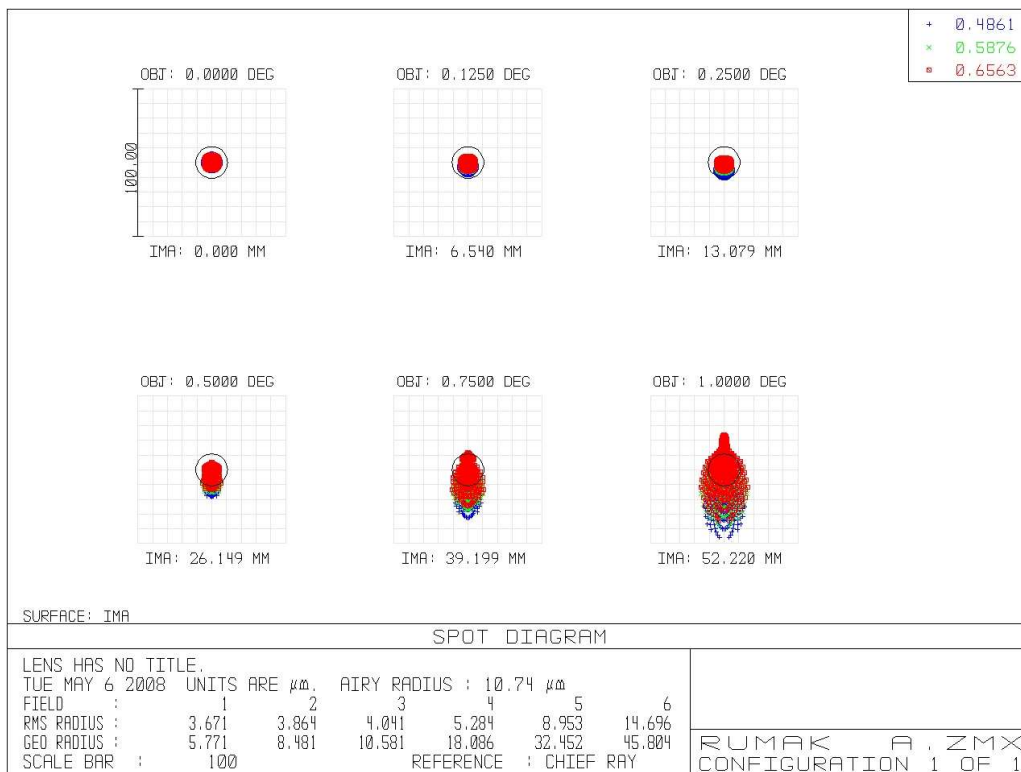
Obr.2. – spotdiagramy Maksutovovy komory průměr 200 mm, ohnisková vzdálenost 600 mm



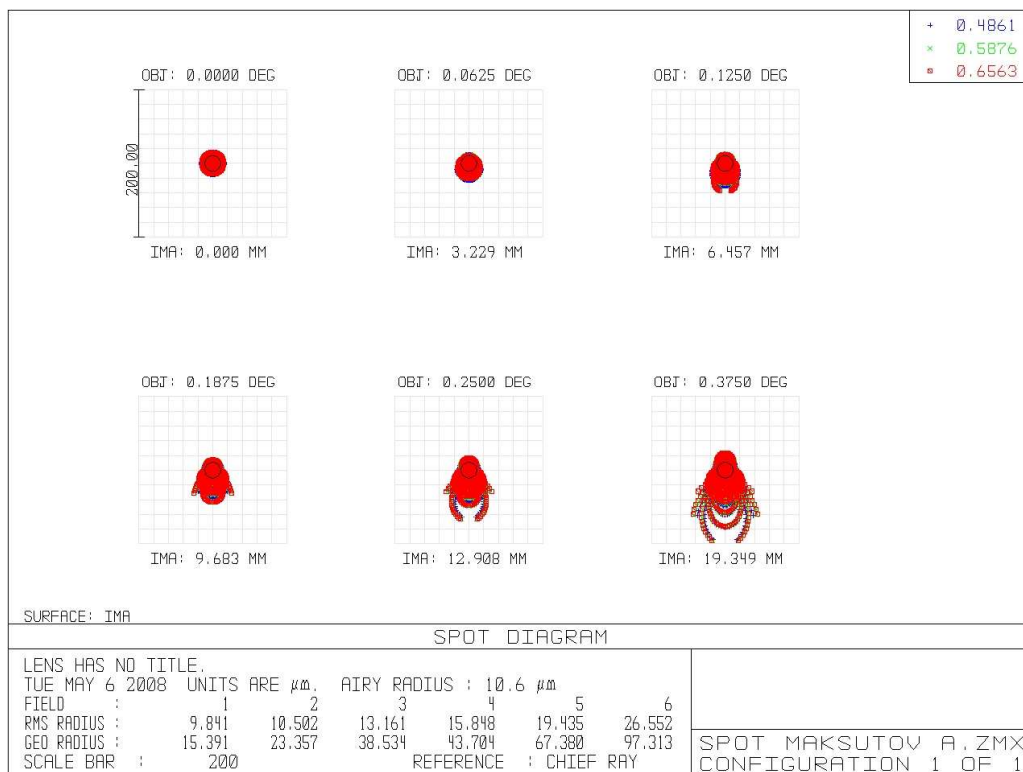
Obr.3. – spotdiagramy varianty Maksutovovy komory se Schmidtovou deskou, průměr komory 200 mm, ohnisková vzdálenost 600 mm



Obr.4. – spotdiagramy Simaku, průměr dalekohledu 200 mm, ohnisková vzdálenost 1600 mm



Obr.5. – spotdiagramy Rumaku, průměr dalekohledu 200mm, ohnisková vzdálenost 3000 mm



Obr.6. – spotdiagramy Spot-Maksutova, průměr dalekohledu 200 mm, ohnisková vzdálenost 3000 mm