

Dalekohledy typu Schmidt-Cassegrain (SCT)

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

Abstrakt

Dalekohledy typu Schmidt-Cassegrain

Článek popisuje analýzu zbytkových optických vad dalekohledu typu Schmidt-Cassegrain (dále jen SCT). Přestože se SCT dalekohledy vyrábějí již 30 let, problematika jejich zobrazovacích vlastností zůstává málo diskutována. V ÚFP AV ČR - VOD v Turnově bylo provedeno měření optických parametrů komerčně vyráběných dalekohledů typu SCT od firem Meade, Celestron a Carl Zeiss Jena. Z naměřených hodnot byly sestaveny modely těchto soustav pomocí programu Zemax a vypočteny jejich zbytkové vady. Bylo zjištěno, že vhodnou změnou vstupních parametrů lze dosáhnout radikálního zmenšení optických vad.

Schmidt-Cassegrain Telescopes

This paper describes analysis of residual aberrations of Schmidt-Cassegrain telescopes (SCT). Though SCTs have been produced for 30 years, problem of imaging properties is only rarely discussed. At first we have performed measurement of optical parameters of several commercially produced SCT telescopes of Meade, Celestron and Carl Zeiss Jena, then we have used measured data to construct the models of these system with the help of Zemax program and evaluate residual aberrations. We have found that it is possible to radically improve these systems by changing entry data.

1. Úvod

Od vynalezení Schmidtovy komory uplynulo již téměř 80 let. Přístroje tohoto typu se brzy zařadily k hlavním fotografickým prostředkům, jimiž astronomové získávají kvalitní širokoúhlé fotografie oblohy. Korekčních desek bylo záhy užito i u dvojjzradlových systémů, což umožnilo konstrukci celé plejády dalekohledů a fotografických komor s nejrůznějším stupněm korekce optických vad. Fundamentální práci v tomto oboru je článek Jamese Bakera [1] z počátku čtyřicátých let, ve které autor diskutoval optické vlastnosti dvojjzradlových systémů se Schmidtovou korekční deskou, umístěnou před zrcadly.

Výroba korekčních desek je velmi náročná a drahá, ale pokusila se o ni v průběhu čtyřicátých až šedesátých let i řada amatérů. Avšak v masovém měřítku byla zvládnuta až koncem šedesátých let firmou Celestron, později i Meade a dalšími, s použitím vakuového prohýbání skla. Zatímco začátkem sedmdesátých let byl vyráběn dalekohled SCT o průměru 203 mm (8 palců), dnes lze na trhu vidět systémy od průměru 127 mm (5 palců) až do průměru 560 mm (22 palců).

Cílem této práce je seznámit čtenáře o zbytkových optických vadách SCT, určujících jejich zobrazovací kvalitu. Tato problematika bývá mohutnou masovou reklamou velice často opomíjena a je jak pro amatéry, tak pro profesionály málo známá.

2. Měření dalekohledů

V průběhu deseti let jsme v naší optické laboratoři proměřovali asi deset různých typů SCT od firem Celestron, Meade a Carl Zeiss Jena. Poslední se od předchozích přístrojů podněkud lišil rozměrově.

Dalekohledy byly nejprve proměřeny na autokolimátoru jako celek v několika spektrálních čarách, pro vlnové délky 486,1 nm, 546,1 nm a 656,3 nm byla zkoumána sférická aberace. Poté u soustavy byly změřeny vzdálenosti vrcholů ploch a vzdálenost ohniska od vrcholu sekundárního zrcadla. Dalekohled byl pak rozebrán a jeho jednotlivé části měřeny samostatně. Konkávní sférické primární zrcadlo bylo měřeno Ronchi testem, pro konvexní sekundár bylo nutné složit ze dvou objektivů - dubletů kompenzační soustavu, vytvářející sbíhavou světelnou vlnoplochu. Sekundární zrcadlo bylo umístěno v soustavě tak, aby jeho střed křivosti souhlasil s ohniskem sbíhavé vlnoplochy. Test byl velice citlivý a ukázal, že plocha sekundáru je velice přesně sférická bez jakýchkoli stop retuše. Z geometrických parametrů pak byl spočten profil Schmidtovy desky [2], [3], [4] tak, aby celý systém vykazoval shodnou sférochromatickou vadu, jaká byla naměřena. V Fizeau interferometru byl snadno rozlišitelný poloměr nulové zóny desky. Ze znalosti profilu desky pak bylo možné spočítat i poloměr křivosti sférického zrcadla, se kterým by deska vytvořila stigmatickou Schmidtovu komoru. Ze skladu přesných sférických kalibrů byl vyzvednut nejbližší vhodný a s ním Schmidtova deska byla měřena jako

Schmidt - Newtonův dalekohled. Tato měření byla prováděna pro vlnovou délku 546,1 nm a ukázala vysokou kvalitu vyrobených desek. Za nejpravděpodobnější materiál, ze kterého byly vyrobeny korekční desky, bylo vzato sklo typu B270 s indexem lomu $n_d = 1,523$ a Abbeho číslem $V_d = 58,5$. Profil desky byl uvažován jako rozvoj sudých mocnin až do šestého řádu.

Ve všech případech dalekohledy vykazaly sférochromatickou vadu prakticky totožnou nebo velice blízkou s teoretickými výpočty.

3.Konstrukce SCT

První SCT, který se na trhu objevil počátkem sedmdesátých let, byl vyráběn firmou Celestron a měl průměr korekční desky 203 mm (8 palců). V ÚFP AV ČR, v.v.i.- VOD byl tento přístroj podrobně proměřen a porovnán spolu s dalšími. Ukázalo se, že prakticky všechny SCT jsou vyráběny jako zvětšeniny či zmenšeniny tohoto původního modelu.

U tohoto prvního dalekohledu byla použita sférická zrcadla. Primární a sekundární zrcadla měla ohniskové vzdálenosti zhruba 406 mm (16 palců) resp. 127 mm (5 palců), což při vzdálenosti jejich vrcholů od sebe okolo 305 mm (12 palců) dá systém o ekvivalentní ohniskové vzdálenosti zhruba 2030 mm (80 palců). Vzdálenost korekční desky od vrcholu primárního zrcadla je okolo 310 mm (12,5 palců). Nulová zóna na korekční desce má průměr 0,707 celkového průměru desky. Z těchto základních parametrů - poloměrů křivostí, vzdáleností ploch, profilů zrcadel a desky plynou i zbytkové vady systému SCT.

4.Zbytkové vady osové

Schmidtova korekční deska kompenzuje sférickou vadu pouze pro jednu vlnovou délku a vnáší do systému sférochromatickou vadu. Na optické ose dosahuje průměr chromatického kroužku pro paprsky ve spektrálním rozsahu mezi čarami F a C (vlnové délky 486,1nm, resp.656,3 nm) zhruba trojnásobku průměru difrakčního kroužku. Rozšíříme-li rozsah oboru na vlnové délky 400 nm až 760 nm, pak průměr chromatického kroužku bude dosahovat až pětinašobku difrakčního. Ve srovnání s ekvivalentním refraktorem z klasických skel, například kombinace BK7-F2, vychází sférochromatická vada SCT podstatně menší. Pro vizuální pozorování sférochromatická vada podstatně obraz nezhoršuje. (Není patrná). Při fotografování s použitím nových CCD detektorů s velikostí pixelu kolem 10 μm nebo dokonce 6,7 μm a citlivostí v rozsahu (350-1000) nm by to mohlo znamenat problémy. Na obrázku č.1 jsou zobrazeny spot-diagramy základní verze SCT o průměru 203 mm a ohniskové vzdálenosti 2030 mm.

5.Mimoosové vady

Dominantní mimoosovou vadou je koma. Její velikost je značná. Hvězda s každým milimetrem vzdálenosti od optické osy prodlouží svůj obraz o 10 μm . Ve vzdálenosti 10 mm od optické osy je tedy délka komatického obrazu hvězdy kolem 100 μm . Všechny komerčně vyráběné SCT dalekohledy od firem Celestron a Meade, kromě moderních aplanatických soustav, vykazují tuto vadu shodně.

Astigmatismus u těchto SCT je velmi malý a prakticky zanedbatelný. Použitím krátkých poloměrů křivostí, výše uvedených u verze o průměru 203 mm, vychází ohnisková plocha značně zakřivená. Petzvalovská křivost je rovna 184 mm a je konkávní vůči objektu. S použitím větších CCD detektorů o rozměrech desítek milimetrů by měla být Petzvalovská křivost kompenzována Piazzii čočkou. Rovněž pro vizuální pozorování by měl být velice uvážlivě zvolen vhodný výběr okulárů pro tyto přístroje.

6.Návrh na řešení korekce zbytkových vad

Zbytkové optické vady SCT jsou určeny vstupními parametry soustavy: poloměry křivostí, profily zrcadel a desky, vzdálenosti vrcholů ploch. Pro jejich ocenění lze zavést parametr K - koeficient prodloužení soustavy jako poměr ohniskové vzdálenosti primárního zrcadla k ekvivalentní ohniskové vzdálenosti soustavy.

Velikost sférochromatické vady u komerčních SCT se sférickými zrcadly je určena především zvoleným koeficientem prodloužení, který u nich bývá 1:5. Čím tento poměr je větší, tím větší musí být i odchylka korekční desky od planoparalelní a tím větší je i sférochromatická vada soustavy. Pro srovnání: U klasických Cassegrainových dalekohledů bývá tento parametr $K = (1:2,8 \text{ až } 1:4)$. Snížení koeficientu prodloužení u SCT užitím méně světelného primárního zrcadla, místo 1:2 třeba 1:3 až 1:3,5, by znamenalo značné zmenšení sférochromatické vady, avšak by bylo nutné dalekohled prodloužit a zvětšit centrální stínění sekundárním zrcadlem z 30 % na 37%. Je ale zajímavé, že i přes použití většího sekundárního zrcadla se radikálně zlepšil profil modulační přenosové křivky a soustava bude vykazovat obrazy s vyšším kontrastem. Na obrázku č.2 jsou spot-diagramy SCT, u něhož bylo vzato primární zrcadlo o světelnosti kolem 1:3, koeficient prodloužení soustavy K má potom hodnotu 1:3,33.

Druhým způsobem, jak zlepšit sférochromatickou vadu, je použití achromatického Schmidtova korektoru, složeného ze dvou asférických desek z korunového a flintového skla. Takto je možné dosáhnout zlepšení obrazu při zachování kompaktnosti soustavy, (primární zrcadlo o světelnosti 1:2, koeficient prodloužení $k=1:5$), avšak

výroba dvou desek by znamenala značné technologické problémy. Lze počítat s tím, že v budoucnosti pomocí počítačem řízených asfériačních strojů bude možné tyto optické prvky vyrábět. V současné době je jejich výroba velice nákladná.

Další zbytkovou vadou je koma. Její velikost je dána především asféricnostmi zrcadel a polohou vstupní pupily soustavy, která je u těchto SCT totožná s objímkou korekční desky. Se zvyšujícími se požadavky na kvalitu mimosových obrazů a velikost zorného pole firma Meade začala vyrábět aplanatickou verzi SCT, kterou označují jako LX200R teleskop. Aby bylo možné opravit komu, byl zvolen nový profil korekční desky a asféricnost sekundárního zrcadla tak, aby i druhá Seydelova suma (pro komu) byla rovna nule. Poloměry křivostí zrcadel, jejich vzdálenosti a sférický profil primárního zrcadla byly zachovány. Zbytkovou mimosovou vadou pak zůstal astigmatismus, který pro zorná pole o průměru (20-30) mm výrazně obrazy hvězd nezhoršuje. Obrázek č.3 pak ukazuje spot-diagramy takového aplanatického systému označovaného jako LX200R.

Křivost ohniskové plochy ale zůstala. Aplanatická verze SCT podstatně přizpůsobila tyto přístroje možnostem nových CCD detektorů a výrazně zlepšila jejich optické kvality. Je ale zajímavé a asi málo známé, že téhož efektu, opravy komy lze dosáhnout u původní soustavy SCT se sférickými zrcadly oddělením sekundárního zrcadla od korekční desky a zvětšením vzdálenosti desky od vrcholu primárního zrcadla zhruba o 40 %. Avšak snaha o zachování kompaktnosti přístroje je nadřazena nad jeho optické vlastnosti. Asféricace konvexní plochy znamená další technologické problémy a zároveň i zvýšení nároků na přesnost kolimace celé soustavy, což Meade vyřešil pomocí elektronických justážních prvků.

Aplanatický SCT bývá nesprávně označován jako modifikovaný dalekohled Ritchey-Chrétien, Tento systém je však čistě zrcadlový.

7.Závěr

Schmidt Cassegrainovy dalekohledy, vyráběné od sedmdesátých let, patří dnes mezi nejrozšířenější přístroje mezi amatéry. Za celou dobu výroby doznaly z optického hlediska jen poměrně málo změn. Na trhu se objevila menší série SCT o světelnosti 1:6,3 pro fotografické účely, avšak s nástupem nových CCD detektorů tyto přístroje neměly adekvátní optické kvality. Byla vyrobena i menší řada s nižším koeficientem prodloužení s primárními zrcadly o světelnosti 1:2,4, avšak ani tyto přístroje se příliš nerozšířily. Snaze zlepšit optické kvality SCT brání především zachování jejich kompaktnosti. Koncem osmdesátých let se objevila i malá série Schmidtových komor o světelnosti 1:2,2, pro které zcela jistě byly užity korekční desky z výroby Schmidt-Cassegrainů.

V současnosti SCT přístroje mají velké konkurenty v podobě dalekohledů typu Klevcov, které používají pouze sférické prvky, mají lepší osové obrazy na optické ose a navíc jsou aplanatické. Podobných soustav je velmi mnoho a lze u nich dosahovat vysoce kvalitních zobrazení díky mnoha optickým parametrům - poloměrům křivostí, vhodné volbě skel atd. Příkladem mohou být dalekohledy firmy Vixen.

Analýza soustav SCT byla prováděna pomocí programu ZEMAX.

Tato práce je řešena jako dílčí část úkolu „Podpora projektů cílového výzkumu AV ČR“, projekt 1SQ 1008 20502.

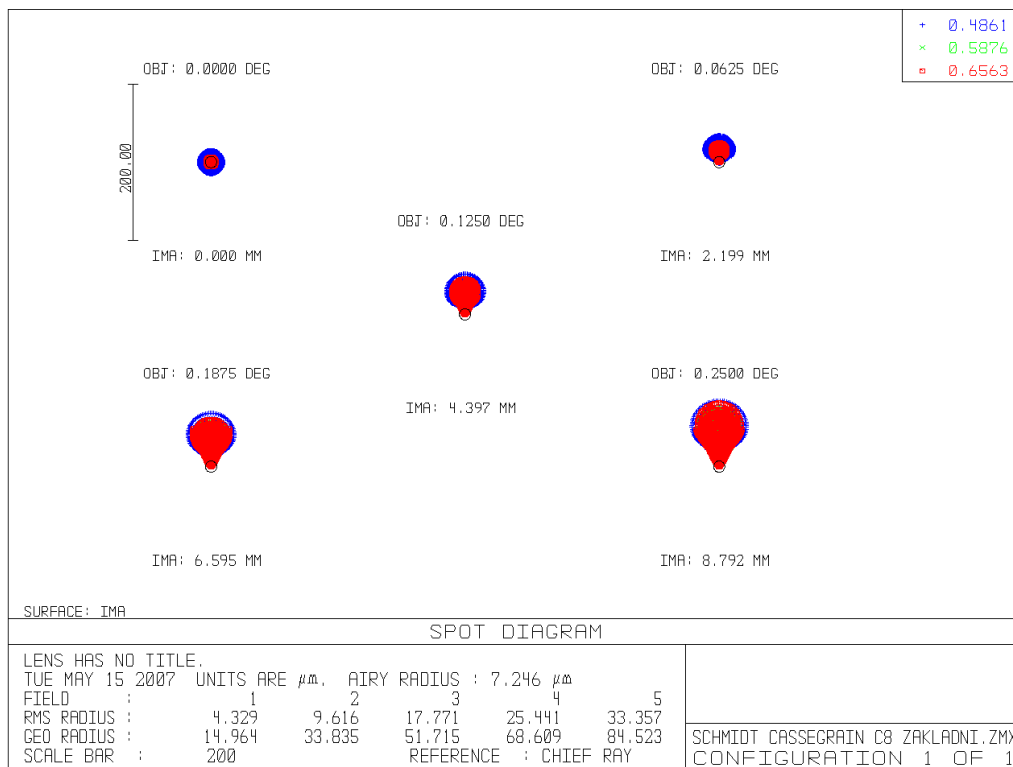
8.Použitá literatura

- [1] J.G.Baker,Proceed.Amer.Philosoph.Soc.82, (1940):332-338
- [2] S.C.B.Gascoigne,Recent Advances in Astronomical Optics,Applied Optics,Vol.12,No7, July 1973
- [3] Ruten,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

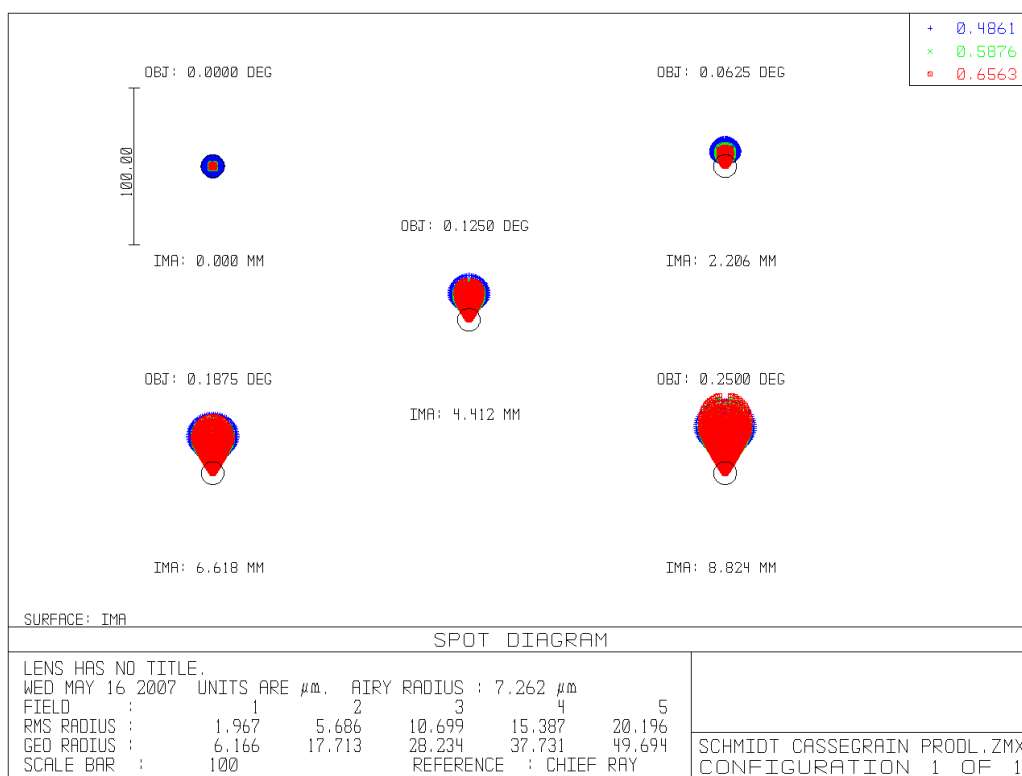
Daniel Jareš, Ing., Ústav fyziky plazmatu AV ČR, oddělení Optická diagnostika, Skálova 89, 51101, Turnov, tel 481 549 445, 737 628 009, fax 481 322 913, e-mail : jares@ipp.cas.cz, daniel.jares@yahoo.com

Lédl Vít, Ing., Ústav fyziky plazmatu AV ČR, oddělení Optická diagnostika, Skálova 89, 51101, Turnov, tel 481 549 456, 721 315 314, fax 481 322 913, e-mail : ledl@ipp.cas.cz, vit.ledl@tul.cz

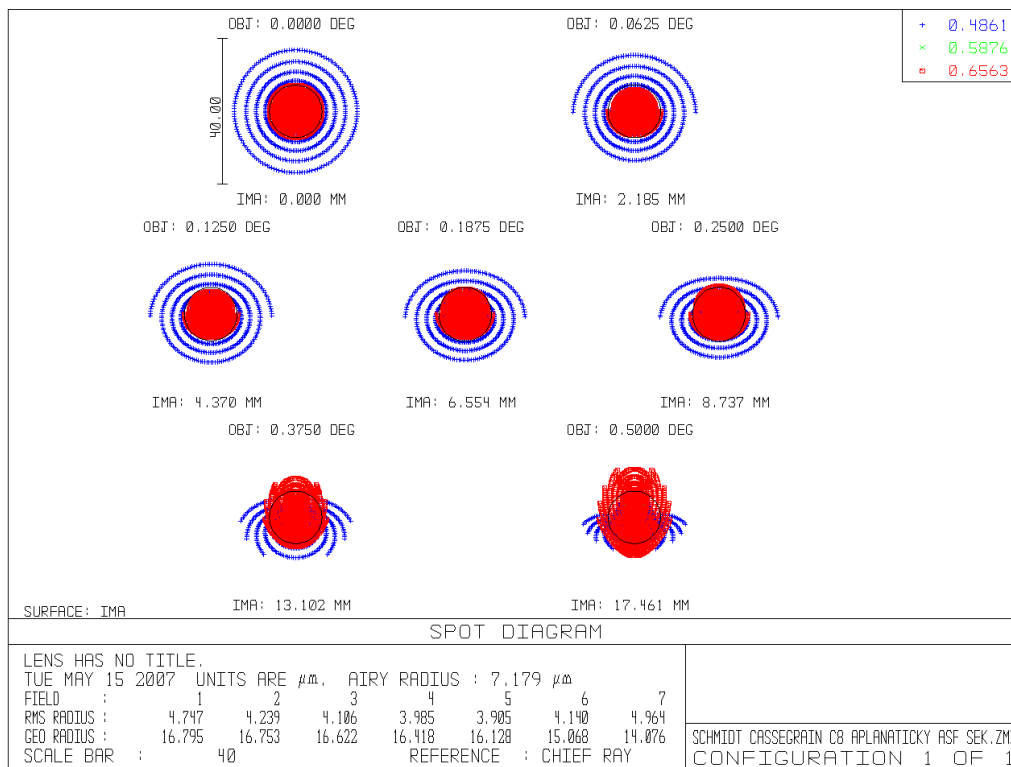
Rail Zdeněk, prom.fyz., Ústav fyziky plazmatu AV ČR, oddělení Optická diagnostika, Skálova 89, 51101, Turnov, tel 481 549 454, 723 691 504, fax 481 322 913, e-mail rail@ipp.cas.cz, zdenek.rail@yahoo.com



Obr.č.1 – Spot-diagramy základní verze SCT o průměru 203 mm a ohniskové vzdálenosti 2030 mm.



Obr.č.2 – Spot-diagramy verze SCT o průměru 203 mm a ohniskové vzdálenosti 2030 mm, a s primárním zrcadlem o světelnosti 1 : 3. Koeficient prodloužení soustavy $K = 1 : 3,33$.



Obr.č.3 – Spot-diagramy aplanatické verze SCT o průměru 203 mm a ohniskové vzdálenosti 2030 mm, označované jako LX200R.