

Katadioptrický systém G.M.Popova Hvězdárny v Úpici

Zdeněk Rail, Zbyněk Melich,
Ústav fyziky plazmatu AV ČR, v.v.i. - Toptec
Sobotecká 1660, 51101 Turnov
e-mail : melichz@jpp.cas.cz, rail@jpp.cas.cz

Abstrakt: V šedesátých letech 20. století byla navržena řada dvojrzdlových katadioptrických dalekohledů, využívajících korekčních čoček, umístěných před jejich sekundárem. Jedním z prvních návrhářů těchto přístrojů byl P.P. Argunov. Jeho návrhy byly dále rozvíjeny G.M. Popovem, J. Klevcovem a dalšími optiky. V roce 2005 byl takový dalekohled Popova o průměru 305 mm vyroben ve Vývojové optické dílně AV ČR v Turnově (dnes Ústav fyziky plazmatu AV ČR, v.v.i.-Toptec). Přístroj měl nahradit starší dalekohled Maksutov-Cassegrain o průměru 260 mm hvězdárny v Úpici, který bylo nutné zrekonstruovat. V referátu prezentujeme optický návrh systému Popova Hvězdárny v Úpici a porovnáváme jej s ekvivalentním komerčním dalekohledem typu Schmidt-Cassegraina a dalšími přístroji.

The Catadioptric System of Popov of the Observatory in Úpice

Abstract: During the Sixties of the Twentieth Century series of two-mirror catadioptric telescopes were designed with a correcting lens in front of their secondary mirror. One of the first designers of these devices was P.P. Argunov. His optical designs were further developed by G.M. Popov, J. Klevcov and other opticians. In 2005 one telescope of a Popov system of diameter 305 mm was manufactured in Development Optical Workshop of Academy of Sciences of Czech Republic (now Institute of Plasma Physics of AS CR, v.v.i.-Toptec) in Turnov. The telescope was intended to substitute an older Maksutov-Cassegrain telescope of diameter of 260 mm of observatory in Úpice which required the reconstruction. In this paper we present an optical design of the Popov's system of observatory in Úpice and compare it with an equal commercial Schmidt-Cassegrain telescope and further devices.

1. Úvod.

Od padesátých let 20. století se začalo používat prvních počítačů k návrhům optických soustav. Tehdy vznikla řada algoritmů, které bylo možné snadno programovat. Programy pak umožnily počítat parametry optických soustav a minimalizovat jejich optické vady, což předtím bylo velice zdlouhavé a v případě složitých systémů prakticky nemožné.

Počítače bylo také možné efektivně použít i pro výzkum velkého počtu variant jednoduchých optických systémů, což ušetřilo spoustu práce výpočtářů [1].

V tomto období byl hledán optický návrh dalekohledu, který by bylo možné snadno a levně vyrábět ve velkých sériích. V optickém návrhu tyto požadavky znamenají použití sférických ploch, omezit průměry čoček, a ty vyrábět z co nejlevnějších optických skel. Jak v USA, tak v bývalém SSSR vznikla myšlenka použít v dvojrzdlovém dalekohledu jednočočkový nebo vícečočkový korektor, umístěný těsně před jeho sekundární zrcadlo. Světlo pak tímto členem prochází dvakrát. Primární i sekundární zrcadla měly být sférické plochy.

V 60. letech se takovými přístroji zabýval Argunov, avšak jeho přístroje se příliš nerozšířily.

Koncem 60. let byl publikován návrh dvojrzdlového systému G.M.Popova [2] se sférickými zrcadly a s meniskovým korektorem před sekundárním zrcadlem. Korektor byl orientován konkávní plochou k primárnímu zrcadlu.

Z poloviny 70. let je známa i soustava J. Klevcova [3,5,7] se sférickým primárním zrcadlem. Místo zrcadlového sekundáru je použito Manginovo zrcadlo, před kterým je navíc umístěn meniskový korektor. Na rozdíl od Popovova systému je tato soustava aplanatická.

Asi před deseti lety se na trhu objevil fotografický dalekohled firmy Vixen, vycházející ze soustavy Sampsona. Dalekohled má elipsoidální primární zrcadlo. Sekundární zrcadlo je realizováno v podobě Manginova zrcadla. Pro korekci mimoosových vad je použit tříčočkový korektor poblíž ohniska soustavy.

Popovovy soustavy byly vyráběny jak britskou firmou Orion Optics, tak firmou Vixen. Klevcovovy dalekohledy dodává od poloviny 90. let Novosibirsk Instrument-Making Plant.

2. Dvojrzdadlové dalekohledy Popova, vyráběné ve VOD AV ČR (ÚFP AV ČR v.v.i.-Toptec) v Turnově.

Počátkem devadesátých let byly experimentálně vyrobeny dva dalekohledy Klevcov o průměru 190 mm a ohniskové vzdálenosti 1830 mm. Následně v roce 1995 jsme dokončili několik souprav optiky na dalekohled Popov 190/1550. Tyto soustavy jsou neaplanatické [4].

V roce 2000 byl pro pracoviště zakoupen optický program ZEMAX [6], který byl použit k dalšímu výzkumu optických soustav.

Bylo zjištěno, že mimoosové vady dalekohledu Popova lze radikálně zmenšit použitím dvojčočkového korektoru, umístěného před ohniskovou plochou. Sekundární zrcadlo bylo nutné mírně asférizovat. Dvě takové soustavy jsme vyrobili v roce 2004.

Následující rok, 2005, k nám byl přivezen z hvězdárny v Úpici dalekohled typu Maksutov – Cassegrain 260/2600, abychom jej zkontrolovali a zjustovali. Měření ukázala, že jeho zrcadla jsou zborcená a jejich rekonstrukce bude trvat značnou dobu. Aby nebyl narušen pozorovací program hvězdárny, navrhli jsme tuto soustavu nahradit jinou, s co nejbližšími stavebními parametry. Nejlepší variantou náhrady byl dalekohled Popov o průměru 305 mm a ohniskové vzdálenosti 2860 mm, která byla navržena tak, aby šlo využít naši základnu optických kalibrů a přípravků.

3. Konstrukce dalekohledu Popov 305/2860 úpické hvězdárny.

Nahradit dalekohled Maksutov–Cassegrainu 260/2600 za soustavu Popov 305/2860 se nám jevila jako nejjednodušší řešení. U nového přístroje jsme zachovali poloměr křivosti a průměr sférického primárního zrcadla. Toto zrcadlo jsme vyrobili o 15 mm silnější oproti původnímu, které s krajovou tloušťkou 30 mm bylo díky nižší tuhosti astigmaticky zborcené. Uložení silnějšího zrcadla do původní objímky se obešlo bez její podstatné úpravy.

Další konstrukční parametr, který jsme přibližně zachovali, byla vzdálenost mezi vrcholy primárního zrcadla a vrcholu korekčního menisku. Umožnil to dostatečný rozsah pohybu držáku sekundárního zrcadla podél optické osy soustavy. Průměr sekundárního zrcadla byl stejný jako u původního dalekohledu Maksutov-Cassegrain. Meniskový korektor byl umístěn do hliníkové objímky, zajištěn na obvodu z vnější strany kroužkem se závitem, z vnitřní strany malým osazením. Celá objímka s meniskem byla uchycena na objímku se sekundárním zrcadlem. Vnitřní osazení má funkci distančního kroužku mezi meniskem a sekundárním zrcadlem. Držák sekundáru umožňuje tento člen naklánět ve dvou osách a posouvat s ním podél optické osy. Tímto způsobem je umožněno dalekohled justovat a nastavit správnou polohu ohniskové plochy.

Pro pohodlnější pozorování je přístroj vybaven zenitálním zrcátkem se zalomením optické dráhy vystupujících paprsků o úhel 90°, je vhodné u něho použít jen okulary o průměru 1 ¼ palce. Dalekohled je umístěn v hlavní kopuli úpické hvězdárny na společné montáži s fotografickou Maksutovovou komorou 360/840 a refraktorem Merz 160/1800 a slouží pro veřejná pozorování.

Stavební parametry dalekohledu Popov hvězdárny v Úpici jsou uvedeny v tabulce č.1.

Tab. 1 Parametry neaplanatické soustavy Popova: průměr 305 mm, ohnisková vzdálenost 2860 mm, všechny plochy jsou sférické.

Povrch	Typ	Poloměr křivosti [mm]	Tloušťka [mm]	Sklo	Průměr [mm]	Kužel [mm]	Pozn.
OBJ	standard	inf	inf		0	0	
1	standard	-2077	-665	zrcadlo	305	0	
2	standard	314	-32	BK7	110	0	
3	standard	319	-1		110	0	
4	standard	-1144	1	zrcadlo	110	0	
5	standard	319	32	BK7	110	0	

STO	standard	314	948,495		110	0	
IMA	standard	-200			110	0	

Později bylo vyrobeno několik dalších soustav Popova, tentokrát již s korektorem pole a asférickým sekundárním zrcadlem.

4. Zbytkové vady dalekohledu Popov Hvězdárny v Úpici.

Dominantní optickou vadou dalekohledu Popov na jeho optické ose je sférochromatická aberace. Její charakter je typický pro soustavu, používající ke korekci meniskového korektoru, který vnáší do systému vady vyšších řádů. Toto znamená, že pro žádnou vlnovou délku nelze dosáhnout úplné kompenzace sférické aberace.

V případě dalekohledu pro úpickou hvězdárnu byl zvolen kompromis hodnoty podélné sférické aberace $ds' \approx 0.3$ mm pro zelenou spektrální čáru rtuti ($\lambda = 546.1$ nm).

Vzhledem k tomu, že k výrobě meniskového korektoru jsme použili již vyrobených kontrolních optických kalibrů o existujících poloměrech křivosti, u naší soustavy vychází nulová zóna vně průměru její apertury. V této zóně by měly paprsky všech vlnových délek společnou sečnou vzdálenost. Podélná chromatická vada dalekohledu v oboru vlnových délek od 405 nm do 768.2 nm má hodnotu cca 0.3 mm. Pro tento spektrální rozsah poskytuje přístroj na optické ose stigmatické obrazy, všechny geometrické paprsky z něho protnou ohniskovou plochu v kroužku o průměru difrakčního kroužku.

Velikost zbytkové sférochromatické vady je dána jednak přesností zhotovených sférických zrcadel a hlavně však dodržáním optických parametrů menisku. Poloměry křivosti a hlavně jejich rozdíl u dalekohledu úpické hvězdárny by neměl přesahovat rozdíl 0,2-0,3 mm. Rovněž výsledná tloušťka menisku by měla být dodržena v toleranci 0,05 mm. Není-li u vyrobeného dalekohledu opravena otvorová vada podle výpočtu, lze retušovat optickou plochu sekundáru a dosáhnout požadovanou hodnotu, i když za cenu vnesení mírného zbytkového chromatismu do systému. U dalekohledu Popov existuje i možnost opravy sférochromatické vady meniskem, u kterého konkávní i konvexní plochy menisku mají stejnou hodnotu poloměru křivosti. Tím se značně ulehčí výroba potřebných brousících, leštících a kontrolních výrobních přípravků.

Mimoosové obrazy jsou nejvíce zhoršeny komou, jejíž příčný rozměr 0.25° od optické osy má hodnotu cca 120 μ m. Astigmatismus vně optické osy je prakticky zanedbatelný.

Poloměr Petzvalovské křivosti pole úpického systému Popova má hodnotu $R = -1331$ mm, tedy konkávní ke vstupujícím paprskům. Ujijeme-li na jeho srovnání do rovinné plochy Piazzioho čočky, zlepšení obrazů hvězd v celém zorném poli bude zanedbatelné.

5. Soustavy Popova s korektorem mimoosových vad.

V polovině 90. let jsme vyrobili několik systémů typu Popov o průměru 190/1550 mm. Po zakoupení výpočetního programu Zemax jsme hledali možnost zlepšení zobrazovacích vlastností. Zjistili jsme, že dvojčočkový korektor ze stejných skel, umístěný před ohniskovou plochou, je schopen velice radikálně opravit mimoosové obrazy, avšak za cenu mírné asférizace plochy sekundárního zrcadla. Původní optický návrh umožnil použít všechny přípravky a kalibrační skla pro výrobu nové verze dalekohledu Popov s lépe vykorigovanými vadami. Nejprve jsme zkusili výrobu několika soustav o průměru 190 mm a ohniskové vzdálenosti 1655 mm. Po jejich dokončení a testech bylo následně vyrobeno několik souprav optiky s korektory pole na dalekohledy o rozměrech 305/3050 a 260/2600.

Parametry jedné z variant s korektorem jsou uvedeny v tabulce č. 2.

Tab. 2 Parametry aplanatické soustavy Popova: průměr 305 mm, ohnisková vzdálenost 3022 mm, sekundární zrcadlo má tvar zploštělého sféroidu s malou odchylkou od sféry.

Povrch	Typ	Poloměr křivosti [mm]	Tloušťka [mm]	Sklo	Průměr [mm]	Kužel [mm]	Pozn.
OBJ	standard	inf	inf		0	0	
1	standard	inf	700		0	0	
2	standard	-2077	-665	zrcadlo	305	0	
3	standard	314	-32	BK7	112	0	
4	standard	319	-1		112	0	
5	standard	-1144	1	zrcadlo	112	0,7981559	sféroid
6	standard	319	32	BK7	112	0	
STO	standard	314	745		112	0	
8	standard	637	10	BK7	70	0	
9	standard	-314	5		70	0	
10	standard	131,27	10	BK7	70	0	
11	standard	70	183,7442		70	0	
IMA	standard	-10057			50	0	

6. Vlastnosti dalekohledu Popova a jeho porovnání s ekvivalentními systémy.

Dalekohledy s čočkovými korektory, umístěnými před sekundárem, reprezentují skupinu přístrojů, vyznačující se snadnou výrobou i v hůře vybavené optické dílně. Vhodným optickým návrhem, tedy použitím vhodně navržených optických korektorů, lze redukovat velikost jejich zbytkových vad. Lze pak vyrábět i přístroje pro vizuální pozorování s malým centrálním stíněním, aby nedocházelo ke zhoršování kontrastu obrazu. Rovněž je možné navrhnout přístroje pro zobrazení středně velkých zorných polí, cca do průměru $1^\circ - 2^\circ$.

Jejich nevýhodou jsou vysoké nároky na přesnost justáže, což z nich činí přístroje nepříliš vhodné na převážení na pozorovací místa dopravními prostředky. Optimální světelnost pro jejich sférická primární zrcadla je od 1/3 nebo lépe 1/3.5. Sférochromatická vada systému Popova závisí na tloušťce korekčního menisku. Pokud se navrhuje velký dalekohled, nad průměr 400 mm, může dvojnásobný průchod světla tlustým meniskem znamenat značné ztráty absorpcí ve skle. V tomto případě je výhodnější nahradit tlustý menisek dvojčočkovým izochromatickým korektorem Argunova. Taková soustava o průměru 400 mm a ohniskové vzdálenosti 4000 mm byla realizována pro Hvězdárnu Karlovy Vary.

Srovnáváme-li dalekohled Popov 300/3000 bez korektoru s ekvivalentním dalekohledem Newton, oba dalekohledy budou na optické ose stigmatické. Dalekohled Newton bude mít příčný rozměr komatických obrazů cca čtyřikrát menší.

Komerční kompaktní Schmidt-Cassegrain nebude ani v užším oboru od 486.1 nm do 656.3 nm zobrazovat stigmaticky díky sférochromatické vadě. Příčné rozměry obrazů komy budou o 30 % větší než u dalekohledu Popov.

Ekvivalentní achromatický dublet z klasických optických skel bude mít na optické ose výraznou chromatickou vadu. Použijí-li se k výrobě čočkového objektivu nové typy skel, například OK6 nebo KzFS2 v kombinaci s fluoritem, pak barevná vada dubletu se sice radikálně zlepší, avšak v širokém oboru mezi 405 nm - 768.2 nm tato vada již nebude zanedbatelná. Většina dubletů jsou navrhovány jako aplanatické, tedy opravující komy.

Aplanatický systém Klevcova lze porovnat jen se systémem Popova s korektorem pole.

Dva dalekohledy dle návrhu J. Klevcova byly experimentálně ve VOD AVČR vyrobeny a testovány již v roce 1992.

Později byly realizovány systémy Popova v modifikacích bez i s korektorem.

V devadesátých letech tyto přístroje byly u nás neprávem přehlíženy a jejich zobrazovací vlastnosti z nepochopitelných důvodů zpochybňovány a to i v době, kdy dalekohledy z Novosibirska se velmi úspěšně prosadily na trzích ve Spojených Státech, Velké Británii, Německu, ...

7. Závěr.

Dalekohled Popov 305/2860 Hvězdárny v Úpici byl navržen jako kompromisní řešení náhrady za starší přístroj Maksutov – Cassegrain 260/2600, s maximálním využitím všech původních mechanických dílů – kompletu tubusu [8]. Poloměry křivostí optických ploch dalekohledu byly navrženy tak, aby při výrobě optických členů bylo možné použít existující obráběcí přípravky a optické kalibry. Dalekohled zobrazuje v oboru 400-700 nm na optické ose stigmaticky a jeho koma je zhruba o 30% menší než u komerčního neaplanatického dalekohledu typu Schmidt – Cassegrain. Jeho ohniskovou plochu není nutné rovnat Piazziho čočkou. Na výrobu čočkového korektoru bylo použito běžné optické sklo BK7. Centrální stínění u dalekohledu dosahuje 40%. Hlavní nevýhodou přístroje je požadavek přesné justáže všech optických ploch soustavy. Přístroj je hlavně určen pro pozorování oblohy návštěvníky hvězdárny.

Tento článek vznikl v rámci projektu č. CZ.1.05/2.1.00/03.0079 Regionální centrum speciální optiky a optoelektronických systémů TOPTEC, který je realizován za podpory Evropského fondu pro regionální rozvoj v programu OP VaVpI a Ministerstva školství, mládeže a tělovýchovy České republiky.

8. Literatura.

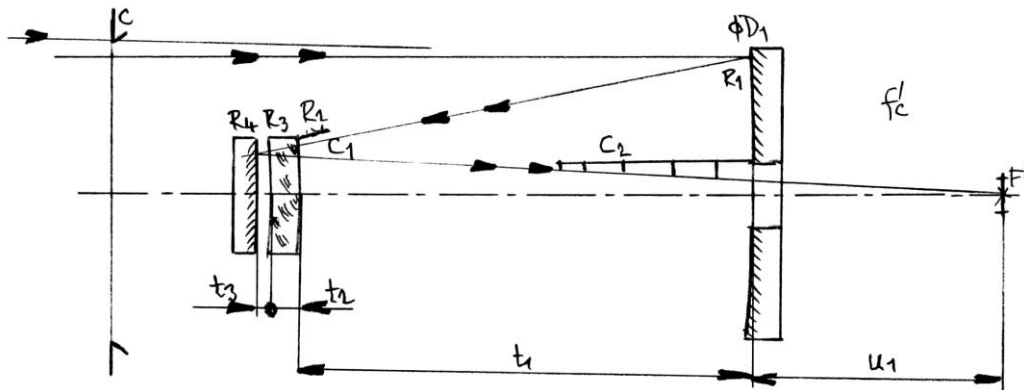
- [1] Michelson N. N., Optičeskije teleskopy, Izdatelstvo “Nauka“, Glavnaja redakcija fiziko-matematičeskoj literatury, Moskva, 1976,
- [2] Popov G. M., Sovremennaja astronomičeskaja optika, Moskva, Nauka, Glavnaja redakcija fiziko-matematičeskoj literatury, 1988
- [3] http://vega.inp.nsk.su/articles/equipment/klvsys/Klev_sys.html, Ju. A. Klevcov, 2000
- [4] Field Ralph , Maksutovs with Subaperture Correctors, Sky & Telescope, August, 1981, page 166–168.
- [5] Klevcov J. A., Perspektivy razvitiija Kassegrenovskich teleskopov s korektorom v schodjaščichsja pučkach lučej, Optičeskij žurnal, tom 71, No. 10, 2004
- [6] Optical Design Program Zemax, User’s Guide, Version 10, Focus Software, Inc., Tucson, 2005
- [7] Rutten, van Venrooij, Telescope Optics, Willmann- Bell, Inc., Richmond, Virginia, 2002
- [8] Mlejnek V., Vzpomínky na vznik a rozvoj Hvězdárny v Úpici, Hvězdárna v Úpici, Úpice, 1999, 49s.

9. Autoři.

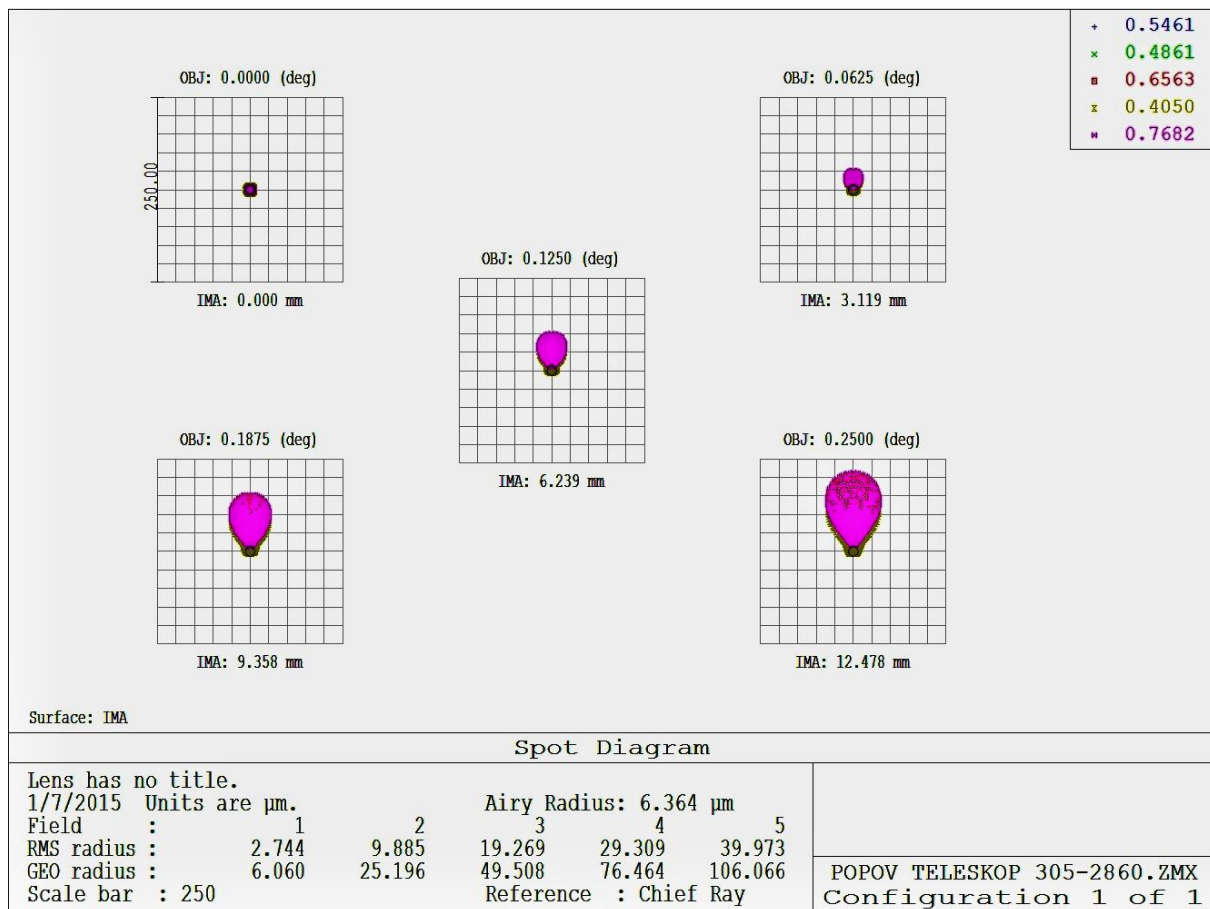
Zdeněk Rail, prom.fyz., Ústav fyziky plazmatu AV ČR, v.v.i., Regionální centrum speciální optiky a optoelektronických systémů TOPTEC, Sobotecká 1660, 511 01 Turnov, tel.: 420 487 953 904, e-mail: rail@ipp.cas.cz

Zbyněk Melich, RNDr, Ústav fyziky plazmatu AV ČR, v.v.i., Regionální centrum speciální optiky a optoelektronických systémů TOPTEC, Sobotecká 1660, 511 01 Turnov, tel.: 420 487 953 904, e-mail: melichz@ipp.cas.cz

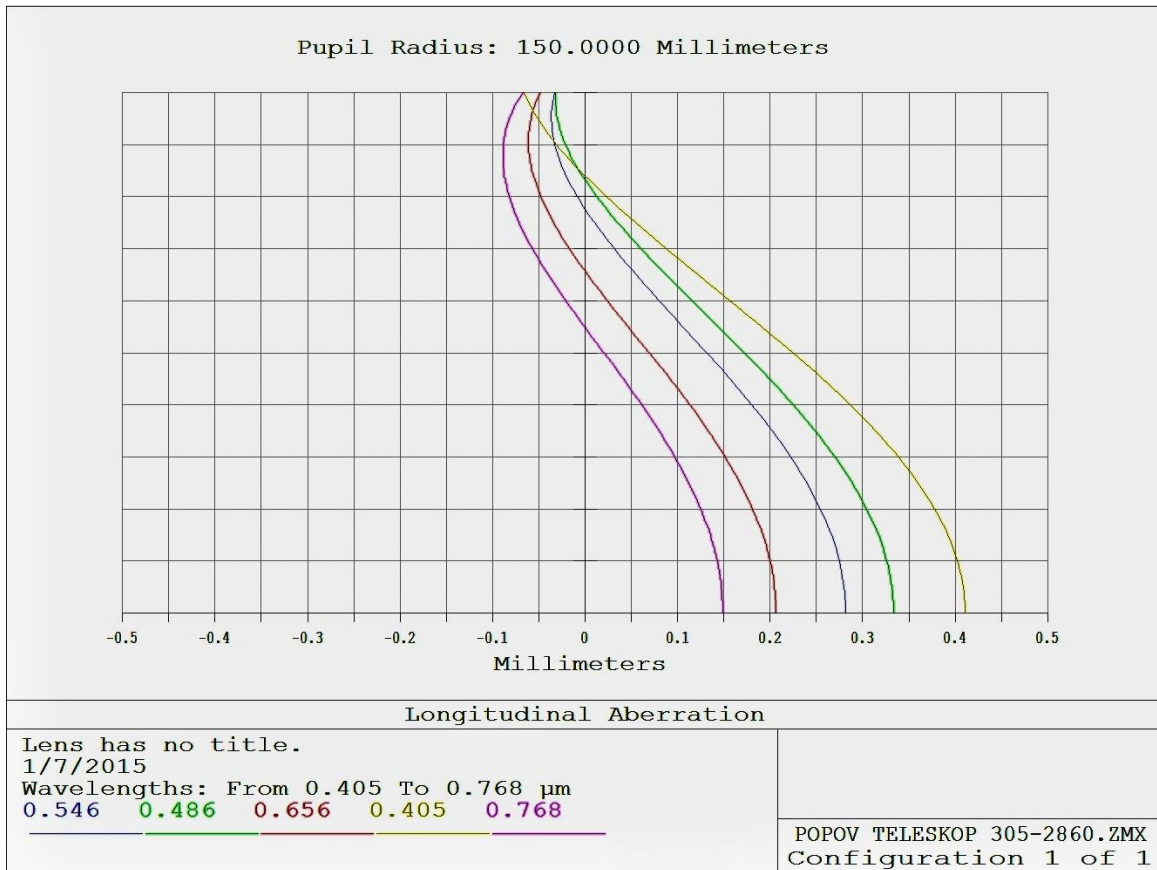
10. Obrázky.



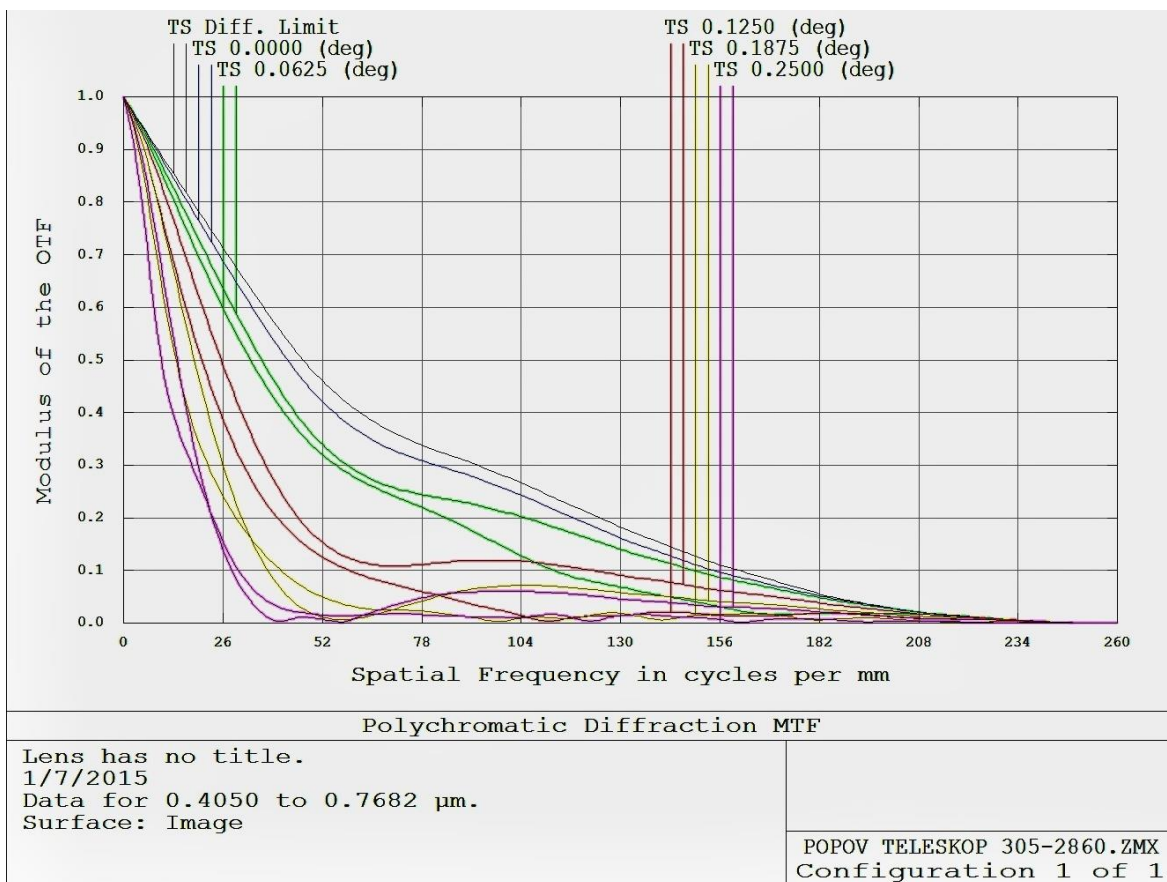
1) Schéma dalekohledu Popov



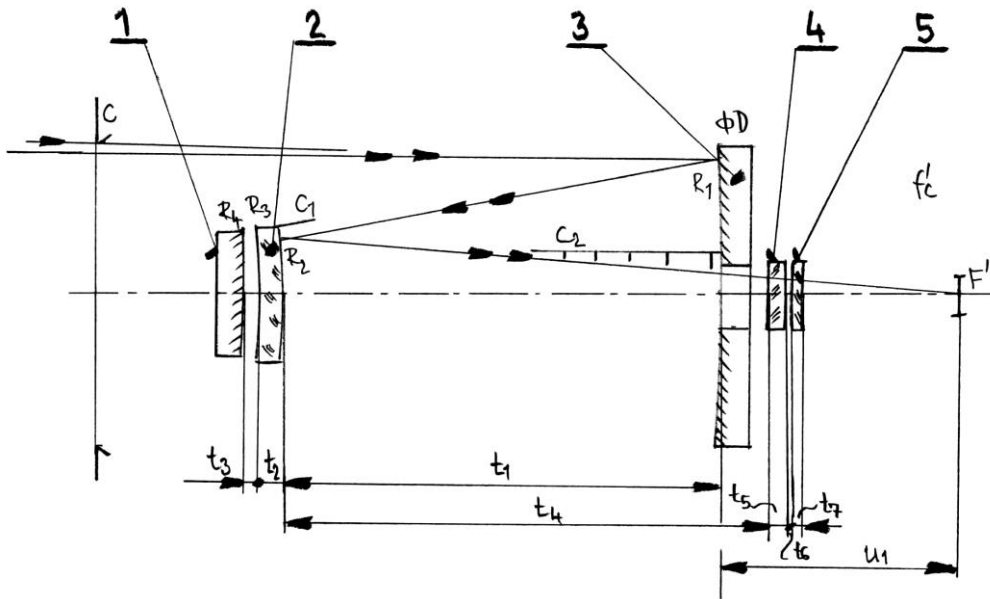
2) Spotdiagramy soustavy Popov 305/2860



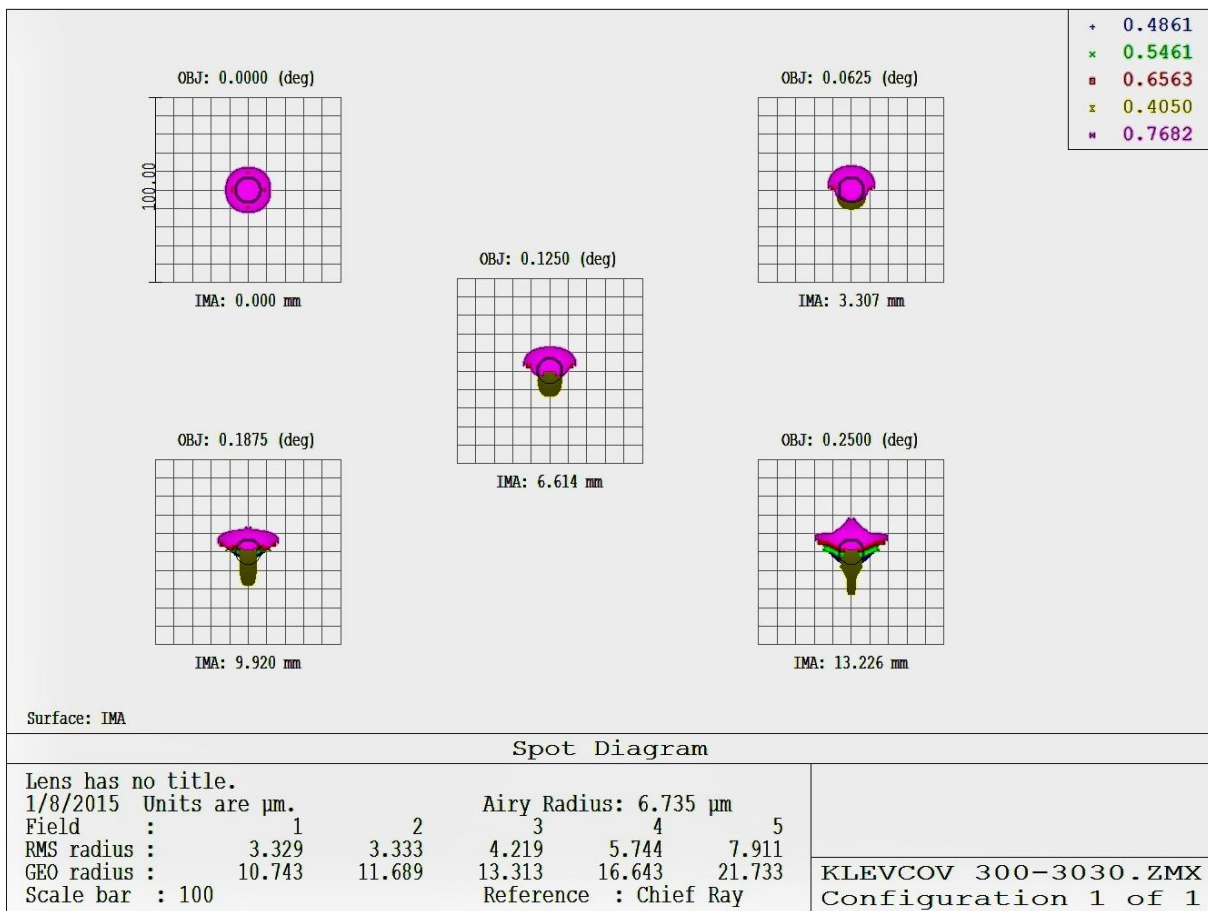
3) Sférochromatická vada soustavy Popov



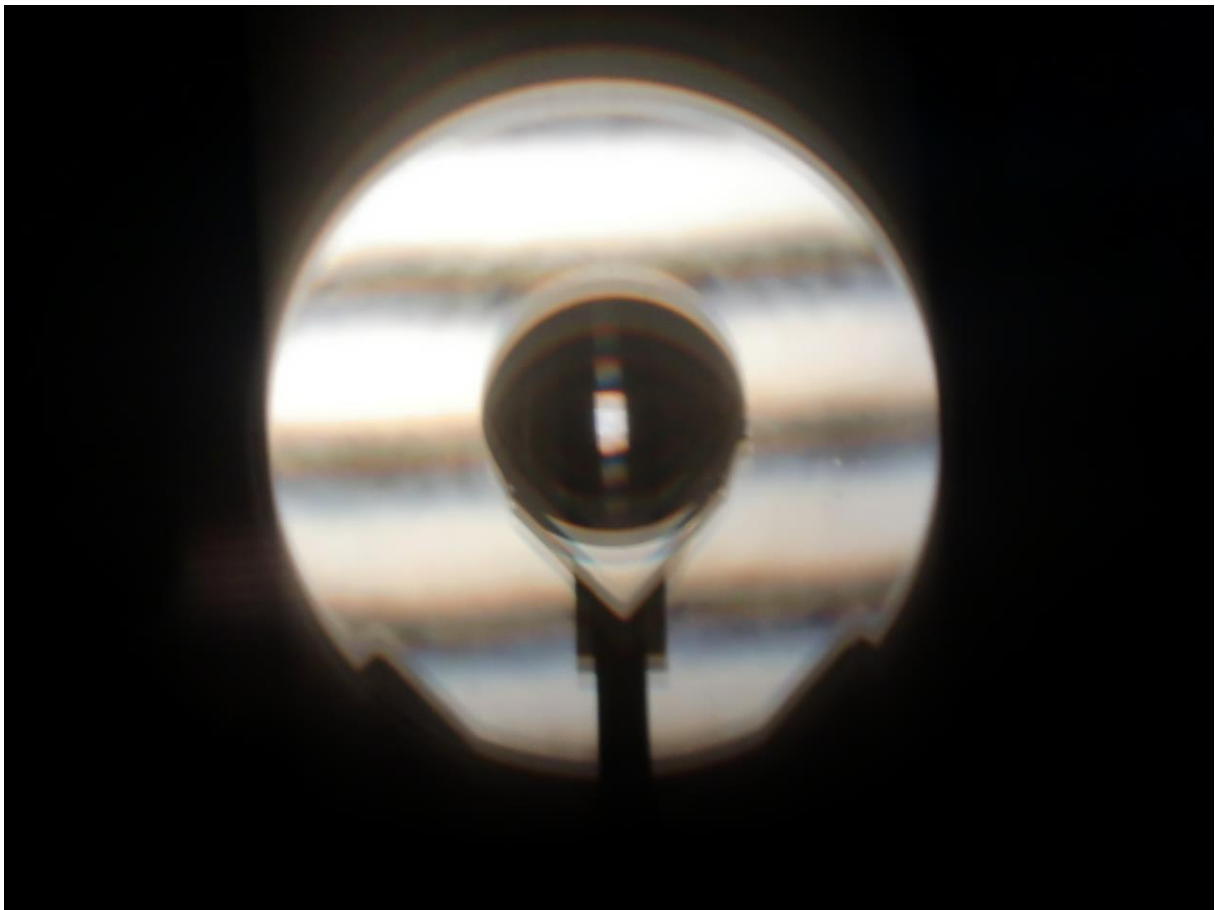
4) Přenosová funkce - MTF křivky soustavy Popov



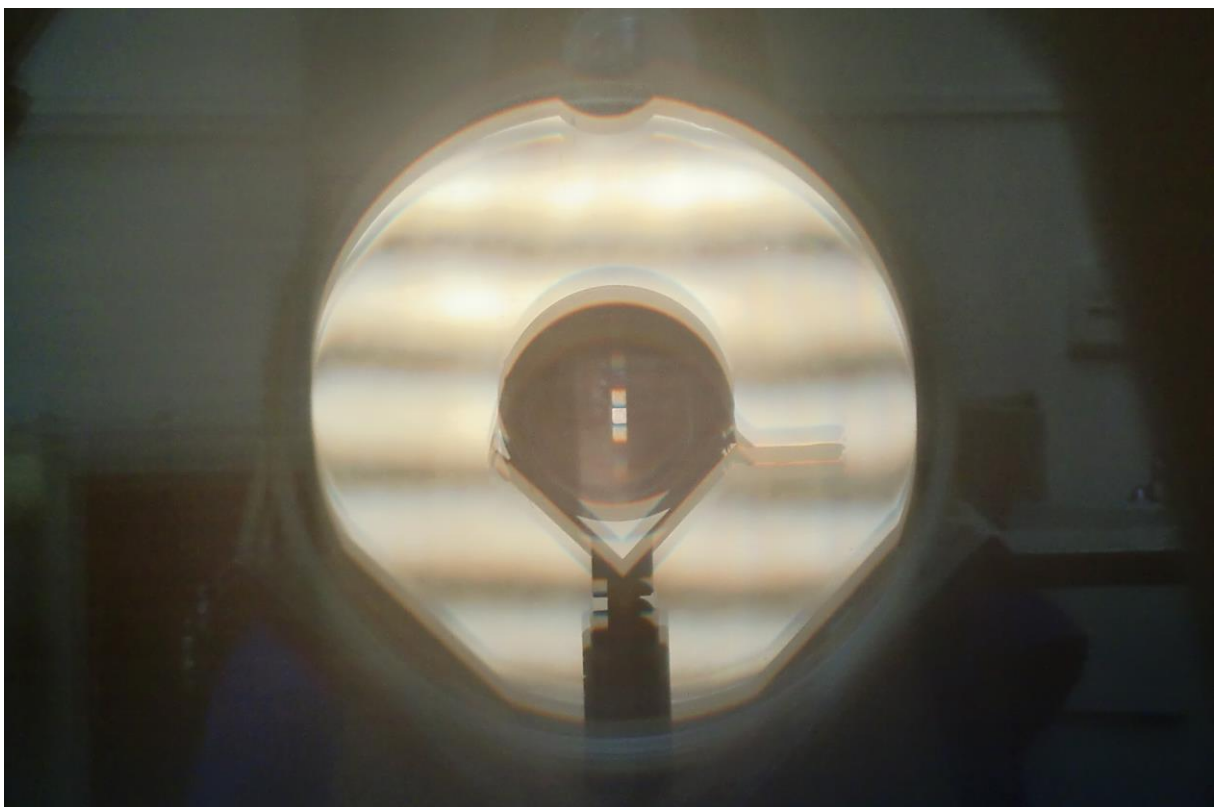
5) Schéma soustavy Popov s korektorem



6) Spotdiagramy Popov 305/3050 s korektorem



7) Ronchigram v bílém světle neaplanatické verze 190/1550



8) Ronchigram v bílém světle verze s korektorem 305/3050



9) Kontrola soustavy Popov 305/3050 s korektorem