

50 BiN 望远镜杂散光分析及控制方案

李陶然^{1,2}, 姜晓军¹

- (1. 中国科学院光学天文重点实验室(国家天文台), 北京 100012;
2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 杂散光会影响星像信噪比,降低系统测光精度。为保证 50 BiN 望远镜高精度测光观测的要求,对 50 BiN 望远镜进行了详细的杂散光分析。在 TracePro 软件中建立精确的仿真模型,计算望远镜本身的点源透过率 PST 值。根据其特点设计了主镜遮光筒内的挡光环。由于杂散光的不均匀性对“较差测光”系统影响很大,因此着重分析后,结合 MATLAB 软件验证了挡光环效果。结果表明:添加挡光环后,CCD 像面的杂散光辐照度标准差得到明显改善。在离轴角大于 30°时,PST 值均在 10⁻¹⁰ 量级,相比无挡光环的情况下降了 3~4 个数量级。由此说明,添加挡光环可以有效提高望远镜消杂散光的能力。该挡光环可应用于其他天文望远镜,可以在 50 BiN 观测网络中广泛推广和应用。

关键词: 杂散光; 50 BiN 望远镜; 点源透过率; 挡光环; 杂散光辐照度

中图分类号: P111.21;O439 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2015)12-3615-06

Stray light analysis and control for 50 BiN telescopes

Li Taoran^{1,2}, Jiang Xiaojun¹

- (1. Key Laboratory of Optical Astronomy, National Astronomical Observatories, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100012, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Stray light would reduce the signal to the noise ratio and photometric accuracy of astronomical observations. To ensure the high accuracy photometry of 50 BiN telescopes, the detailed stray light analysis was described. The accurate simulation model of 50 BiN telescopes was built in TracePro and the point source transmittance value of the original optical system was calculated. The vanes inside the primary baffle were designed according to characteristic of the telescopes. Stray light uniformity was analyzed intensively, which played an important role in "differential photometry" system, stray light uniformity on focal plane was analyzed with MATLAB. These vanes were tested and verified to be effective with MATLAB and TracePro. The analysis results indicate that, at different incident angles, the stray light irradiance standard deviation on CCD focal plane is improved with the help of vanes. For the stray light sources located at the off-axis angle larger than 30°, the PSTs of the optical system are approximately 10⁻¹⁰ orders of magnitude. With the help of the vanes inside the primary baffle, the PSTs are declined 3-4 orders. These results show that vanes could improve the ability of stray light suppression

收稿日期:2015-04-05; 修订日期:2015-05-03

基金项目:国家自然科学基金(11303042)

作者简介:李陶然(1987-),男,博士生,主要从事天文望远镜杂散光分析与控制方面的研究。Email:litaoran@bao.ac.cn

导师简介:姜晓军(1970-),男,研究员,博士生导师,博士,主要从事天文技术与方法方面的研究。Email:xjjiang@bao.ac.cn

and apply to the other telescopes in 50 cm binocular network as well as other astronomical telescopes.

Key words: stray light; 50 BiN telescope; point source transmittance; vanes; stray light irradiance

0 引言

作为国际恒星观测网络(SONG^[1])项目的关键成员,中国科学家提出充分利用 SONG 计划的网络平台,以低成本构建宽视场、高精度、长时间基线的恒星测光观测网络(50 cm Binocular Network, 50 BiN^[2])。该项目将在 SONG 计划的北半球 4 个节点各加入一套 50 cm 双筒望远镜,实现高精度同时双色测光,获得前所未有的长时间基线恒星观测的时域数据。这是国内独立提出的科学思想,也是国内主导的地面天文全球化网络观测系统。

50 BiN 科学目标的实现有赖于高精度的测光观测($m_v=15$,测光精度为 8‰),而杂散光是影响测光精度的关键因素之一^[3],这就要求望远镜具有较高的杂散光抑制水平。但是 50 BiN 所用的商业望远镜本身的杂散光抑制水平不能满足需求且没有相关说明数据,因此文中对 50 BiN 光学系统进行了详细的杂散光分析,并设计出挡光环以进一步加强抑制杂散光的能力,使其满足高精度的科学目标。

1 50 BiN 望远镜系统介绍

50 BiN 所使用的望远镜主镜口径为 500 mm,焦距为 $f/95$, R-C 系统,两台完全相同的望远镜分别安装在赤道仪两侧。所用 CCD 像元尺寸 $13.5 \mu\text{m}$,视场 $20' \times 20'$ 。该望远镜有主镜和副镜遮光筒。为保证整个 CCD 像面上的优良视场,在主镜后端加有平场镜。

基于望远镜的真实尺寸及各部件装配关系,在 Solidworks 软件中精确建立模型如图 1 所示。相比于传统封闭式望远镜,50 BiN 采用的桁架结构具有以下几方面优点:

- (1) 减轻望远镜重量,降低赤道仪载重负荷;
- (2) 有利于主镜区域通风,改善镜面 seeing;
- (3) 对于 50 BiN 的全开式圆顶,采用和桁架结构可以降低风载,避免望远镜抖动。

但是,开放式桁架结构的望远镜不利于杂散光

控制,在月夜影响尤其严重。对于固定的杂散光源,使用平场改正等图像处理方法即可修正杂散光的影响,但仍有杂散光引起的随机起伏。而灰月夜时,望远镜相对于杂散光源(月光)的角度时刻变化,图像处理方便不足以修正杂散光的影响,所以需要改造望远镜光路,阻挡杂散光线到达像面,降低杂散光的影响。

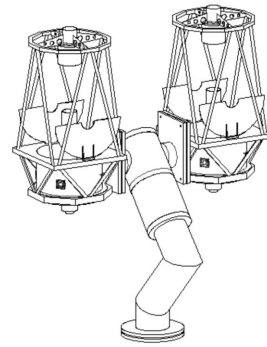


图 1 50 BiN 望远镜仿真模型

Fig.1 Simulation model of 50 BiN telescope

2 50 BiN 杂散光分析

50 BiN 杂散光分析是使用光线模拟软件 TracePro 来完成的。它采用蒙特卡洛方法,将杂散光线在望远镜内部的传播看作随机过程,并追迹每一条光线,最后统计出杂散光在望远镜内部及像面的分布^[4]。

2.1 杂散光源分析

杂散光是望远镜视场外到达光学系统像面的非成像光线。对于 50 BiN 望远镜,杂散光来源于月光、非目标星光、天空背景及圆顶内的反射/散射光等。由于采用了全开式圆顶,月光等平行光入射的杂散光线对测光精度的影响最大,而其他杂散光源的影响非常小,可以忽略。

2.2 建立光线追迹模型

由于 50 BiN 望远镜两镜筒完全一致,且不互相干扰,因此在仿真过程中只考虑一个镜筒即可。在 TracePro 中设置望远镜中各表面的材料特性如表 1

所示。其中 A 、 B 、 g 为 ABg 模型中的拟合参数。镜面相关参数是根据美国 IR Spatial Radiometer 主镜表面 BRDF 参数得出的,符合一般镜面的散射特性^[5]。其余涂黑表面材料特性的选取综合了参考文献[6]中的工作及 TracePro 的材质库,符合当前涂黑工艺的特点。经计算,改变材料的 A 、 B 、 g 数值对最终杂散光水平趋势无影响。

表 1 50 BiN 杂散光分析模型材料特性参数

Tab.1 Stray light analysis model of surface properties for 50 BiN

Surface type	Re-flectance	Absorp-tance	A	B	g	Refer-ences
Mirror surface	90%	2%	$6.385e^{-6}$	0.000 1	2.172	[6-7]
Black surface	2%	90%	0.063 7	0.1	0	[6,8]

2.3 杂散光分析

2.3.1 杂散光传播路径分析

根据杂散光分析的一般步骤,首先从像面进行反向光线追迹以确定关键表面(由像面发出的光线可以直接或经过镜面反射照射到的表面)^[3]。在像面设置发散角为 23° 的面光源,使光线恰好通过主镜中心孔。光线发射特性为朗伯体特性,出射光线方向随机分布,光线条数为 1 000 根。用此光源进行光线追迹,找出关键表面。

其次从杂散光源入射方向进行光线追迹以确定直接照射面(被杂散光线直接或经镜面反射照射到的表面)。关键表面和直接照射面的共同部分即为一次散射表面,杂散光线主要是沿一次散射路径传播。系统内的主要一次散射路径有:

- (1) 主镜反射面-副镜反射面-像面;
- (2) 主镜反射面-副镜反射面-主镜遮光筒内壁-像面;
- (3) 主镜反射面-副镜遮光筒内壁-像面;
- (4) 主镜反射面-副镜遮光筒下沿-副镜遮光筒内壁-像面;
- (5) 主镜反射面-主镜室内壁-副镜反射面-像面;

对以上所有一次散射表面做重点采样,目标表面设置为 CCD 焦面或焦面经过镜面反射的像。通过设置重点采样,可以用较少的人射光线实现仿真效果,节省时间,避免计算机的高负荷工作。

2.3.2 评价杂散光水平

对望远镜系统,最常见的杂散光评价函数是点

源透过率 PST(Point Source Transmission)和规范化的点源辐照度透过率 PSNIT(Point Source Normalized Irradiance Transmittance)。根据 50BiN 系统结构,便于确定杂散光线入射的有效孔径,故采用与入瞳有关的 PST 作为评价函数。PST 定义为望远镜视场外离轴角为 θ 的点源目标辐射经过望远镜光学系统后,在像面产生的辐照度 $E_i(\theta)$ 与入瞳处的辐照度 E_e 的比值^[5]。

$$PST = E_i(\theta) / E_e \quad (1)$$

在 TracePro 中对杂散光源为 $0^\circ \sim 70^\circ$ (当离轴角大于 70° ,到达像面的杂散光线很少,可忽略)之间 20 个离轴角度作光线追迹,入射光线约 50 万根(经仿真计算得出,在入射光线约 50 万根以上时,PST 值趋于稳定),光线能量阈值设置为 10^{-13} ^[7],计算不同离轴角下的 PST 值并绘制 PST 曲线,如图 2 所示。

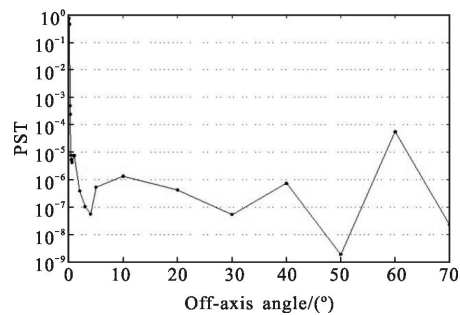


图 2 50 BiN 望远镜 PST 曲线

Fig.2 50 BiN telescope PST curve

从图中可以看出,当杂散光源位于视场外时(离轴角大于 0.2357°)时,PST 值迅速下降。视场外的大部分光线能量被望远镜内部表面散射,经过镜面反射到达像面的能量非常小。在 $4^\circ \sim 10^\circ$ 之间,PST 值有一段上升的趋势,经过光线追迹分析,发现主要是由主镜遮光筒内表面的反射及散射引起的。随着离轴角的继续增加,PST 值逐渐下降。当离轴角为 30° 时,由于 50 BiN 的主镜室具有一定高度,在此角度下入射的杂散光线不会直接照射到主镜上。由于 50 BiN 是开放的桁架结构,杂散光会经桁架和主镜遮光筒内表面随机散射到系统内,所以当离轴角大于 30° ,PST 曲线出现较大波动。

2.3.3 杂散光均匀性分析

“较差测光(differential photometry)”是实测天体物理中的一种常用测光方法。用来计算光度恒定的比较星和临近被测星的星等差(可忽略观测时的大气

条件差异),得到被测星的光度变化。天空背景强度的均匀性是影响“较差测光”精度的重要因素^[9]。假设两颗星在像面的流量分别为 E_1 、 E_2 ,由于杂散光的存在使其中一颗星的流量增加 $x(x>1)$ 倍,则

$$E_2' = xE_2 \quad (2)$$

较差星等即存在大小为 $\Delta m' - \Delta m = -2.5 \lg x$ 的误差,均方根(RMS)的比值为:

$$\frac{\text{RMS}'}{\text{RMS}} = \sqrt{\frac{\sum \Delta m'^2}{\sum \Delta m^2}} = \sqrt{\frac{\sum_i \left(\lg \frac{E_{2i}}{E_{1i}} + \lg x \right)^2}{\sum_i \left(\lg \frac{E_{2i}}{E_{1i}} \right)^2}} \quad (3)$$

TracePro 提供了每个表面的光线入射表格,涵盖光线在该表面的位置、能量、光线路径等信息。记录从视场外开始(便于区分成像光线和杂散光线)到 70° 之间 15 个离轴角入射下的望远镜像面光线特性,计算出杂散光线在像面分布的均匀性。

统计各角度入射时每条光线的辐照度,计算杂散光在整个像面的辐照度标准差如图 3 所示。

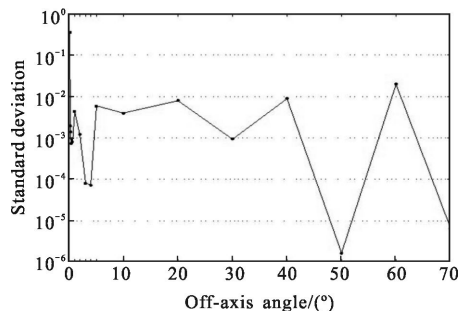


图 3 CCD 像面杂散光辐照度标准差

Fig.3 Stray light irradiance standard deviation on CCD focal plane

从图 3 中可以看出,杂散光辐照度标准差随着离轴角的增大无明显变化趋势,随机性很强,没有明确的分布规律。

将 CCD 像面(27.6mm×27.6mm)分成 4 个区域,使用 MATLAB 软件统计像面上所有光线(共 572 351 根光线)的辐照度值和位置坐标,计算的杂散光位置分布。每个区域的光线数量、所占整个像面辐照度百分比及标准差见表 2。

从表 2 可以看出,杂散光在 50 BiN 像面分布的均匀性一般,其中区域 3 和区域 4 所占辐照度百分比差别较大,为 12.2%。4 个区域内的辐照度标准差很接近,最高为 1.6‰,接近整个像面的标准差水平 1.5‰。在 4 个区域内,杂散光光线数量分布较为均

匀,差别较小。

表 2 光线数量、辐照度百分比及标准差

Tab.2 Number of rays, irradiance percentage and standard deviation

Area	Rays number	Irradiance percentage	Standard deviation
1	147 258	22.2%	1.5%
2	146 761	22.2%	1.5%
3	139 391	33.9%	1.6%
4	138 941	21.7%	1.3%

另外,在区域 1、2 上可以看到有对称的环条纹。通过 TracePro 及 MATLAB 软件仿真发现当入射光线离轴角小于 0.7° 均有此类条纹。这些条纹是由入射光线经主镜-副镜遮光筒下沿-主镜遮光筒到达像面形成的杂散光线。光线垂直入射时,由于副镜遮光筒外沿部分总有一定的面积,因此会形成圆形条纹,如图 4 所示。随着入射角度的增加,圆形条纹渐渐远离视场形成环状条纹。

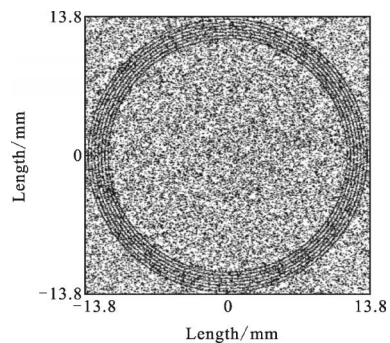


图 4 入射时 CCD 像面光线分布

Fig.4 Rays distribution on CCD focal plane from off-axis angle

3 杂散光控制

3.1 杂散光控制方案

消杂散光的原则是尽量移除关键表面,减少直接照射表面^[3]。通过分析杂散光传播路径可知,对像面杂散光贡献最多的一次散射路径中的(1)和(2)(见 2.3.1 小节)。在这两个传播路径上,只能对主镜遮光筒内壁部分结构做改进。除了使用高吸收率涂

料,还可以在主镜遮光筒内设置挡光环,有效减少关键表面的面积,避免主镜副镜的反射光线直接到达像面,增加光线散射次数,降低散射光线能量。

3.2 挡光环设计方法

如图 5 所示,光线 a 为视场边缘光线,由主镜遮光筒外沿入射。 AB 是从主镜遮光筒外沿到底部的连线, AB 与光线 a 的交点即是第一个挡光环所在的位置,这样可以阻挡从遮光筒外沿以最小角度入射的杂散光。连接该交点与 C 并延长,交遮光筒与 D ,连接 AD 于光线 a 的交点即为第二个挡光环所在的位置^[10]。以此类推,由于第 7 个远离主镜方向挡光环的宽度太小,故最终采用 6 级挡光环。

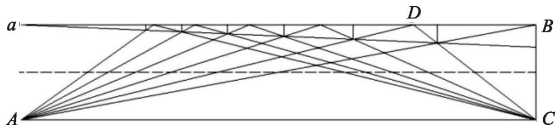


图 5 主镜遮光筒内挡光环

Fig.5 Vanes inside the primary baffle

3.3 挡光环效果分析

在 TracePro 中对添加挡光环后的 50 BiN 望远镜进行光线追迹,按照之前的方法,分析望远镜的消杂散光水平,对比添加挡光环前后的 PST 曲线如图 6 所示。

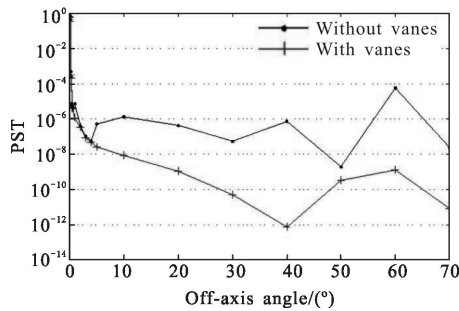


图 6 添加挡光环前后 PST 曲线

Fig.6 PST curves with/without vanes

从图中可以看出,在主镜遮光筒内添加挡光环后,PST 曲线整体上比之前平滑一些,并消除了离轴角 1° 时 PST 的突增现象。当离轴角小于 40° ,挡光环阻挡了由主镜遮光筒内壁散射到像面的大部分杂散光线,PST 迅速下降。当离轴角为 $40^\circ\sim 60^\circ$ 时,PST 有上升的趋势,这仍然是由望远镜桁架散射造成的,杂散光线经桁架随机散射到系统内。由于挡光环的

存在,虽然 PST 曲线仍有上升趋势,但整体上 PST 值比添加挡光环前低很多。添加挡光环后,当离轴角大于 20° 时,PST 值平均下降 3~4 个数量级。当离轴角大于 30° 时,PST 值均在 10^{-10} 量级,满足高精度观测的要求。

与前面的分析方法相同,对比两种情况下杂散光在整个像面的辐照度标准差,如图 7 所示。可以看出在添加挡光环后,CCD 像面辐照度标准差从整体上呈下降趋势,相比无挡光环有很大改善。

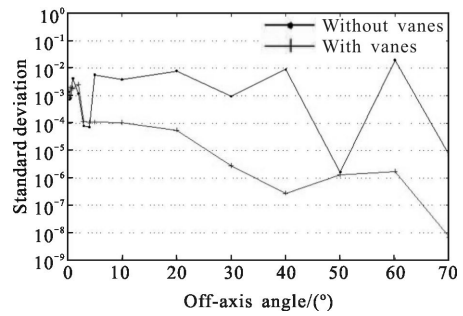


图 7 CCD 像面杂散光辐照度标准差对比

Fig.7 Comparison of stray light irradiance standard deviation on CCD focal plane

分析添加挡光环后 CCD 像面的区域辐照度和标准差分布,统计每条光线的辐照度和位置。添加挡光环后像面上共有 388 800 根光线,比添加前减少了 32.1%,消光效果明显。添加挡光环前区域 1、2 中的环状条纹不再出现。像面能量分布的均匀性未得到有效改善,各区域所占辐照度百分比仍有差别。整个像面的标准差为 1.4% ,相比添加挡光环前下降了 0.1% 。添加挡光环后像面杂散光分布及每个区域的具体数值分别如图 8 和表 3 所示。

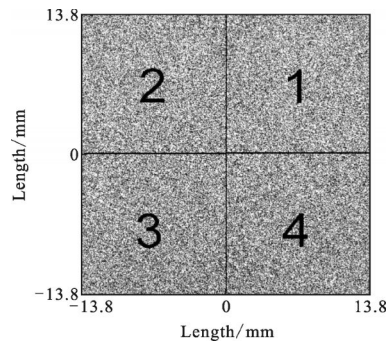


图 8 添加挡光环后 CCD 像面杂散光分布

Fig.8 Stray light distribution on CCD focal plane with vanes

表 3 添加挡光环后光线数量、辐照度百分比及标准差
Tab.3 Number of rays, irradiance percentage and standard deviation with vanes

Area	Rays number	Irradiance percentage	Standard deviation
1	91 051	19.9%	1.4%
2	90 755	18.8%	1.2%
3	103 572	30.5%	1.6%
4	103 422	30.8%	1.6%

4 结 论

文中对 50 BiN 望远镜建立了精确的仿真模型,并做出详细的杂散光分析。同时根据分析结果和望远镜具体结构设计出主镜遮光筒内的挡光环。重新对添加挡光环后的望远镜进行杂散光分析,计算系统的点源透过率 PST。相比无挡光环的情况,PST 平均下降了 3~4 个数量级。在离轴角大于 30°时,PST 值均在 10^{-10} 量级,满足高精度观测的需求。并且,添加挡光环后,整个像面的标准差得到明显改善。由此说明,添加挡光环后有效的提高了望远镜抑制杂散光的能力。同时,由于桁架结构望远镜的共性,此挡光环可应用于其他高精度测光的望远镜,可以在 50 BiN 观测网络中推广和应用。

参考文献:

- [1] Grundahl F, Arentoft T, Frandsen S, et al. Stellar observations network group [J]. *Communications in Asteroseismology*, 2008, 157: 273–278.
- [2] Deng Licai, Xin Yu, Zhang Xiaobin, et al. SONG China project-participating in the global network [C]//Proceedings of the International Astronomical Union 8.S288, 2012: 318–319.
- [3] Siegmund W A, Limmongkol S, Hull C L, et al. Sloan digital sky survey 2.5 m telescope: light baffles [C]//Astronomical Telescopes & Instrumentation. International Society for Optics and Photonics, 1998: 653–664.
- [4] Likeness B K. Stray light simulation with advanced Monte Carlo techniques [C]//SPIE/SPSE Technical Symposium East. International Society for Optics and Photonics, 1977: 80–88.
- [5] Li Ting. Research on optical system of the lunar-based optical telescope (LOT) [D]. Xi'an: Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics of Chinese Academy of Science, 2007. (in Chinese)
李婷. 月基光学天文望远镜(LOT)的光学系统研究 [D]. 西安: 中国科学院西安光学精密机械研究所, 2007.
- [6] Zhao Fei, Wang Sen, Deng Chao, et al. Stray light control lens for Xinglong 1-meter optical telescope [J]. *Opt Precision Eng*, 2010, 18(3): 513–520. (in Chinese)
赵飞, 王森, 邓超, 等. 兴隆 1 m 光学望远镜消杂散光系统 [J]. *光学精密工程*, 2010, 18(3): 513–520.
- [7] Li Ting, Yang Jianfeng, Ruan Ping, et al. Stray light analysis of the lunar-based optical telescope [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, 36(S1): 136–141. (in Chinese)
李婷, 杨建峰, 阮萍, 等. 月基光学天文望远镜(LOT)的杂散光分析 [J]. *光子学报*, 2007, 36(S1): 136–141.
- [8] Yan Peipei, Li Gang, Liu Kai, et al. Stray light suppression of different ground-based photoelectric detection systems [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(3): 917–922. (in Chinese)
闫佩佩, 李刚, 刘凯, 等. 不同结构地基光电探测系统的杂散光抑制 [J]. *红外与激光工程*, 2015, 44(3): 917–922.
- [9] Zhao Fei, Wang Sen. Study of stray light for the Xinglong 1-meter optical telescope [J]. *Astronomical Research & Technology*, 2010, 7(2): 158–167. (in Chinese)
赵飞, 王森. 兴隆 1 m 光学望远镜杂散光效应研究 [J]. *天文研究与技术: 国家天文台台刊*, 2010, 7(2): 158–167.
- [10] Wang Wenfang, Yang Xiaoxu, Jiang Kai, et al. Stray light analysis of catadioptric infrared optical system with large field [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(1): 138–142. (in Chinese)
王文芳, 杨晓许, 姜凯, 等. 大视场红外折反光学系统杂散光分析 [J]. *红外与激光工程*, 2013, 42(1): 138–142.