

DOI: 10.3969/j.issn.1673-6141.2019.02.001

## 多角度偏振成像仪杂散光仿真分析

韩琳<sup>1</sup>, 李双<sup>1\*</sup>, 洪津<sup>1</sup>, 骆冬根<sup>1</sup>, 孙亮<sup>1</sup>, 张苗苗<sup>1,2</sup>

(1 中国科学院安徽光学精密机械研究所中国科学院通用光学定标与表征技术重点实验室, 安徽 合肥 230031;

2 中国科学技术大学, 安徽 合肥 230026 )

**摘要:** 杂散光仿真分析是保证多角度偏振成像仪获取高精度偏振辐射数据的关键手段之一。根据仪器光学系统的自身特点, 分析了杂散光的主要来源。针对采用点源透过率法难以适用于大视场光学系统杂散光分析的问题, 介绍了基于黑斑法原理进行杂散光仿真分析的方法。借助杂散光分析软件 LightTools, 建立仪器的三维几何模型及光学属性, 采用选定视场点反向光线追迹的方法仿真分析得到光机系统的视场外和视场内杂散光系数。分析结果表明, 杂散光主要来源于成像视场范围内, 且中心视场受到的杂散光影响最大, 杂散光系数为 3.27%, 达到了设计指标要求。此外, 采用近轴光线和实际光线正向追迹, 模拟得到局部杂光和全局杂光的能量分布, 为后期的图像杂散光校正研究提供了理论依据与指导。

**关键词:** 多角度偏振成像仪; 黑斑法; 反向光线追迹; 全局杂光; 局部杂光

中图分类号: O439

文献标识码: A

文章编号: 1673-6141(2019)02-0081-08

## Stray Light Simulation and Analysis of Directional Polarization Camera

HAN Lin<sup>1</sup>, LI Shuang<sup>1\*</sup>, HONG Jin<sup>1</sup>, LUO Donggen<sup>1</sup>, SUN Liang<sup>1</sup>, ZHANG Miaomiao<sup>1,2</sup>

(1 Key Laboratory of Optical Calibration and Characterization, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics,

Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China;

2 University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China)

**Abstract:** Stray light simulation and analysis is one of the key means to ensure high-accuracy polarization radiation data of the directional polarization camera. According to the structural and operating principle of optical system, the dominated resource of the stray light is analyzed. For the difficulty of applying point-source transmittance method to analyze stray light in large field optical system, method for analysis of stray light based on the principle of black spot is presented. Instrumental three-dimensional geometry model and

**基金项目:** Supported by National Natural Science Foundation of China (国家自然科学基金, U1331111), Key Project of the 13th Five-Year Plan of Hefei Institute of Physical Science Chinese Academy of Sciences (中国科学院合肥物质科学研究院十三五规划重点支持项目, Y73H9P1801), Key Laboratory of Modern Optical Technology in Jiangsu Province (江苏省现代光学技术重点实验室开放课题, KJS1605)

**作者简介:** 韩琳 (1991 - ), 女, 江苏泰州人, 硕士, 研究实习员, 主要从事偏振遥感仪器的光学设计方面的研究。

**E-mail:** hanlin1102@aiofm.ac.cn

**导师简介:** 李双 (1976 - ), 男, 河北唐山人, 博士, 副研究员, 主要从事偏振光谱遥感探测技术方面的研究。

**E-mail:** shli@aiofm.ac.cn

**收稿日期:** 2018-09-30; **修改日期:** 2018-12-28

optical property are established by software of LightTools. The influence of stray light inside and outside the field-of-view of optical-mechanical system is simulated respectively by means of selected field point backward tracing. The result shows that the effect of stray light mainly comes from inside the field-of-view, and on-axis field is influenced mostly. The stray light coefficient is 3.27% which satisfies the requirement of design index. In addition, global stray light and local stray light are simulated by on-axis and real ray forward tracing which provides a theoretical basis and guidance for subsequent image stray light correction.

**Key words:** directional polarization camera; black spot; backward ray tracing; global stray light; local stray light

## 1 引言

杂散光是通过光学系统到达像平面不参与成像有害的光, 主要包括鬼像、一次散射光、直接照射光、多次散射光和边缘衍射光等<sup>[1-3]</sup>。对于不同类型的光学系统, 杂散光相当于系统的噪声, 直接影响光学系统的成像质量, 导致像面调制传递函数的下降, 严重时真实目标像会被杂散光湮没。杂散光分析是保证仪器测量精度与信噪比的关键因素之一。

杂散光评估一直是光学仪器研制过程中的重要环节, 研究方法一般有理论的模拟仿真、杂散光的测试以及校正<sup>[2-5]</sup>。国内外一些研究机构已开发了多种杂散光分析软件, 如 ASAP、Tracepro、LightTools 等。常见的杂散光评价函数有点源透过率、杂散光系数等, 不同的评价方式与仪器的自身特点、杂散光抑制手段有关。Sholl 等<sup>[6]</sup>分析了 SNAP 望远镜杂散光情况, 主要包括太阳、地球和月球辐射、镜面粗糙及污染引起的散射、衍射等, 通过外遮光罩与挡光环等方式抑制杂散光, 利用 ASAP 软件建立模型并分析计算了杂散光的大小。Mazzoli 等<sup>[7]</sup>对 ASPIICS 日冕观测仪的杂散光进行了深入研究, 分析了杂散光来源, 设计了外遮光罩与内置隔板等消杂散光结构, 模拟了外遮光罩边缘形成的衍射斑分布情况。上述仪器的光学系统均为小视场成像, 入瞳的大小与位置是恒定的, 杂散光分析均采用点源透过率的评价方式。Laherrere 等<sup>[8]</sup>对偏振多角度传感器 (Polarization and directionality of earth's reflectance, POLDER) 的杂散光进行了测试和校正, 将像面的杂散光分为一类杂光、二类杂光, 同时利用算法进行了杂散光的校正, 但是并未给出定量化的理论分析结果。对于多角度偏振成像仪光学系统, 入瞳的大小和位置随着视场的变化而变化, 特别是离轴角外的入瞳位置与大小难以确定, 因此点源透过率的评价方式不再适用。

本文结合多角度偏振成像仪的工作原理和光路结构特点, 介绍了光学系统杂散光的成因。针对点源透过率难以适用于评价大视场光学系统杂散光的问题, 给出基于黑斑法原理分析杂散光的方法, 该方法不受仪器自身特点的约束, 能够直观地体现杂散光的大小。在此基础上, 利用 LightTools 软件中建立仪器的三维几何模型, 采用像面选定视场点反向光线追迹的方法仿真得到成像视场外和视场内的杂散光系数。此外, 根据全局杂光和局部杂光形成的原因不同, 利用正向光线追迹, 给出全局杂光和局部杂光的能量分布情况。

## 2 光学系统及杂散光成因分析

### 2.1 光学系统特点

多角度偏振成像仪采用超广角成像物镜结合面阵探测器的技术方案, 利用滤光 - 检偏组件分时获取大气气溶胶和云多光谱多角度偏振辐射数据, 指标参数如表 1。成像物镜的光学结构如图 1, 光学系统采用

反远距结构, 孔径光阑位于中间, 经过负光焦度的前组与正光焦度的后组, 将目标成像到焦平面上。

表 1 镜头设计参数

Table 1 Design parameters of lens

Item	Specification
Effective focal length(mm)	4.83
F/#	4
Field of view(°)	118.6
Spectral wavelength(nm)	443 490 565 670 763 765 865 910
Pixel( $\mu\text{m}$ )	22.5

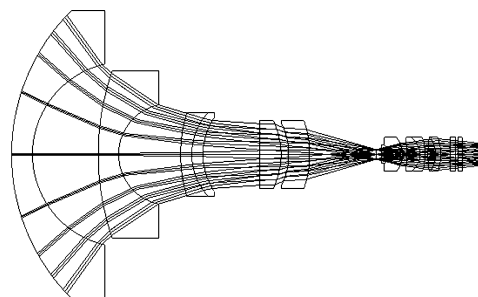


图 1 光学系统结构

Fig.1 Layout of optical system

为了提高像面照度均匀性与畸变校正, 在不影响像质的情况下, 系统第二块透镜引入抛物面。对于不同视场的光束, 光线位于前组透镜不同的孔径区域, 由此, 不同视场的光束互相之间不会产生混叠。同时, 合理地引入光瞳像差, 使得入瞳面积随着视场角的扩大而增大, 入瞳的位置也随着视场角的变化而变化。因此, 理论上视场外的光束很难到达入瞳, 可以期望视场外的杂散光影响很小。由于偏振片与滤光片特性对入射角度的敏感性, 光学系统满足像方远心。

### 2.2 杂散光成因分析

根据光源与光学系统的相对位置, 杂散光可以分为外杂光和内杂光<sup>[9]</sup>。外杂光缘于外部辐射源(如太阳、地球、地气辐射等)经光学及结构件多次反射、散射或衍射到达探测器的辐射。内杂光缘于恒温热源、高温光学表面等的内部辐射源经光学及结构件的反射、折射或衍射传播到达探测器的辐射。多角度偏振成像仪单个光谱通道光机自发辐射极弱, 可不考虑内杂光, 光学系统主要杂散光为来自地球的外杂光。

为了区分成像范围与非成像范围形成的杂散光影响, 将杂散光分为成像视场外和视场内杂散光。视场外杂散光主要是视场外大角度入射光线直接或间接通过入瞳而到达探测器形成的。视场内引起杂散光的光路较为复杂, 将滤光片 / 偏振片、探测器焦平面之间的多次反射形成的杂散光作为局部杂光, 形成机理如图 2 所示, 这里示意了 CCD 与最近四个平板表面之间反射形成的杂散光。将透镜表面及透镜边缘反射、结构件散射等形成的杂散光作为全局杂光。

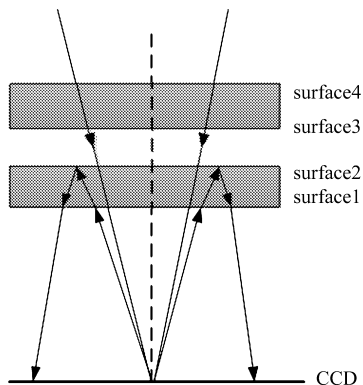


图 2 局部杂光形成原理示意图

Fig.2 Schematic diagram of local stray light formation

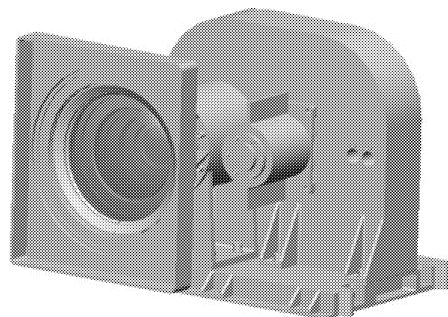


图 3 多角度偏振成像仪光机模型

Fig.3 Opto-mechanical model of directional polarization camera

点源透过率、杂散光系数是描述光学系统杂散光抑制性能的常用参数。点源透过率的大小与入瞳处的辐照度有关,然而对于多角度偏振仪这类大视场光学系统,入瞳的位置和大小均与视场有关,离轴角外的入瞳难以确定,因此点源透过率的评价方式不再适用。杂散光系数的定义为放在亮度均匀扩展光屏上的理想黑斑,在光学系统像面上形成黑斑像中心的辐照度与黑斑移去时像面上对应位置辐照度之比<sup>[10]</sup>。其实质为探测器上杂光的能量占所有到达探测器总能量的比例,不受仪器自身特点的限制,能够直观地体现杂散光的大小。因此,采用基于黑斑法原理的方法分析杂散光的影响。仪器不同的波段杂散光的分析方法一致,详细介绍了杂散光影响最大的光谱通道 910 nm 波段。

### 3 杂散光仿真分析

#### 3.1 视场外杂散光

视场外的杂散光,即成像范围外的杂散光,通过设置遮光罩和消杂光光阑等措施加以抑制。受限于大视场角入射的光线,采用如星载反射式望远物镜敞口式的遮光罩结构<sup>[11-12]</sup>是不实际的。考虑到多角度偏振成像仪的结构尺寸以及成像视场限制,遮光罩采用内圆外方的结构。为了更好地抑制杂光,在不影响光路的情况下,在第二块透镜与第三块透镜之间设置消杂光光阑。利用 LightTools 软件建立对机械结构做简化近似处理的光机模型,示意图如图 3 所示,主要由遮光罩、成像物镜组件、消杂光光阑、检偏/滤光组件、焦面组件、立板和底座等部分组成。

光线追迹主要有两种方式:正向追迹和反向追迹<sup>[13]</sup>。对于大视场光学系统的杂散光分析,若期望得到探测器上所有像元的能量分布,当采用正向网格追迹的方式模拟。由于每个视场光束的口径与光学系统前组透镜的通光孔径相比甚小,即各个视场均为细光束成像,存在需要追迹的光线数量多、光线到达探测器的概率低、计算耗时长、模拟误差大等问题。因此,采用像面选定视场点反向光线追迹的模拟分析方法,有利于提高分析效率和计算精度。

为了模拟视场外杂散光的影响,将环形面光源放置在镜头前 200 mm 处,物方入射辐射通量为 1000 W,环形面光源内外半径分别为 430 mm 和 665 mm。探测器接收面大小为 11.44 mm×8.05 mm,位于焦平面位置。光学与结构元件的光学属性具体参数列于表 2。

表 2 光学与结构元件的光学属性

Table 2 Optical property of optical and mechanical element

Number	Element	Optical property
1	Lens surface	Reflectance 2%, Transmittance 98%
2	Mechanical structural surface	Reflectance 5%, Absorptivity 95%
3	Band-pass filter surface	Reflectance 2%, Transmittance 98%
4	Attenuation filter surface	Reflectance 2%, Transmittance 14.04%
5	Detector photo-surface	Reflectance 25%, Transmittance 75%

根据杂散光系数的定义,分别追迹有黑斑和无黑斑像面对应位置的像面辐照度,光线追迹的功率阈值设为  $1 \times 10^{-7}$  W/mm<sup>2</sup>,光线追迹数 500 万。经过蒙特卡罗随机光线追迹,有黑斑和无黑斑像面中心视场的辐照度分别为  $1.36 \times 10^{-11}$  W/mm<sup>2</sup> 和  $4.53 \times 10^{-5}$  W/mm<sup>2</sup>,计算得到杂散光系数为 0.00003%。从模拟的结果来看,视场外的杂散光能量很低,基本可以忽略不计。这是由于视场外的光线大部分被遮光罩抑制,同

时由于入瞳的限制, 能够达到入瞳的光线非常少, 再经过透镜的折射、反射和散射, 最终到达探测器的能量被大大削弱。

### 3.2 视场内杂散光

由光学元件和机械结构表面反射和散射等引起的视场内杂散光, 采用镀减反膜、结构件表面发黑等措施进行抑制。为了模拟分析视场内的杂散光, 将圆形面光源置于前置物镜前 200 mm 处, 假定物方入射辐射通量为 1000 W, 光源半径为 430 mm, 这样能够保证光源的出射光线充满光学系统的视场与入瞳。视场内杂散光分析与视场外的方法类似, 限于篇幅不再赘述。经过模拟分析, 视场内杂散光系数随视场的变化曲线如图 4 所示, 可以看出杂散光系数随着视场的增大呈下降趋势, 中心视场受杂散光的影响最大, 杂散光系数为 3.27%, 满足设计指标要求。

## 4 局部杂光和全局杂光分析

### 4.1 局部杂光

由于光学系统像方远心的特点, 带通滤光片、衰减滤光片以及探测器光敏面之间的反射形成鬼像, 即局部杂光, 它是一种局部效应, 将像点扩散成一个圆形光斑。当光线经过四次及以上的反射后, 能量非常低, 可以忽略, 因此仅考虑二次反射的情况。建立成像模型, 假定透镜表面透过率为 100%, 滤光片和探测器光敏面的光学属性如表 2 所示, 经过正向光线追迹, 光敏面与滤光片二次反射形成的中心视场处局部杂光光斑能量分布如图 5 所示, 可以看出真实像周围存在多个代表不同能量的光斑亮环, 亮环半径越大, 能量越低。经过分析, 最接近中心视场实像的局部杂光圆形光斑半径占 22 个像元, 能量为中心视场实像的  $10^{-7}$  量级。

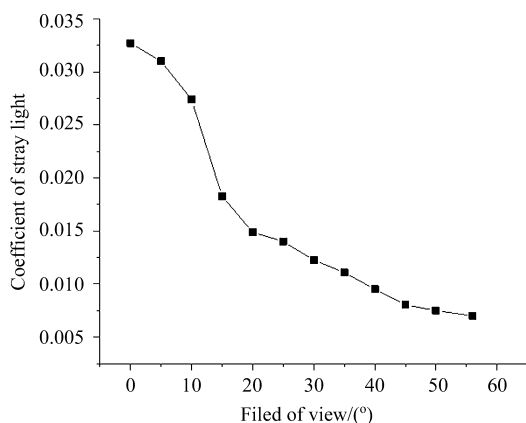


图 4 杂散光系数随视场的变化关系图

Fig.4 Variation of stray light coefficient with field

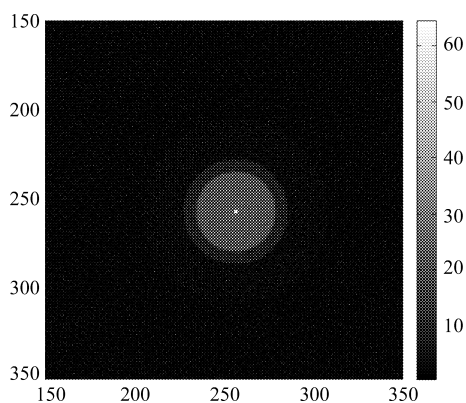


图 5 局部杂光能量分布

Fig.5 Local stray light energy distribution

### 4.2 全局杂光

全局杂光是分布在全像面上的杂散光, 它呈现一种全局效应, 主要包含鬼像以及真实像周围的亮环等。鬼像源于光学元件表面菲涅尔反射光束在像面形成的光斑<sup>[14]</sup>, 仅考虑二次反射光形成的鬼像。利用 ZEMAX 软件进行鬼像路径分析<sup>[15]</sup>, 整个系统共有 153 个形成鬼像的光线路径, 鬼像的路径、聚焦位置以及能量大小均与视场有关。

中心视场的鬼像将真实像扩散成一个圆形光斑, 类似于局部杂光的效应。当鬼像入瞳与近轴光束入瞳之比大于 10 时, 孔径光阑遮挡大部分鬼像能量, 尽管某些鬼像与探测器距离非常接近, 但是到达探测器的

能量非常微弱,可以忽略不计。当鬼像光束孔径与近轴光束孔径之比小于 10 时,取距离探测器表面最近的 5 个鬼像,按照鬼像光斑到探测器表面距离从近到远排列,得到影响最大的前 5 个鬼像的位置以及照度情况,如表 3 所列,其中 surface1 和 surface2 分别为第一次反射面和第二次反射面。从表中可以看出,第三个面和第一个面之间反射产生的鬼像对真实像的影响最大,因此需要加以控制,可以进一步降低第三面的反射率,以减小鬼像的能量。中心视场鬼像的能量是一个叠加的计算过程,利用近轴光线的正向追迹,中心视场鬼像照度与真实像照度比值为 0.508%。

表 3 中心视场鬼像的位置与照度分布

Table 3 Position and illuminance distribution of on-axis field ghost image

No.	Surface1	Surface2	Distance (mm)	Semi-diameter (mm)	Illuminance (W/mm <sup>2</sup> )	Ghost illuminance (W/mm <sup>2</sup> )
1	5	1	-0.00596	0.0043	271.19	0.143
2	3	1	-0.0356	0.0067	271.19	0.231
3	5	3	0.113	0.051	271.19	0.145
4	2	1	0.0186	0.062	271.19	0.175
5	3	2	1.048	0.12	271.19	0.145

轴外视场鬼像的分析与中心视场鬼像分析类似,同样仅考虑二次反射形成的鬼像。如图 6 所示是某一轴外视场下第一个面和第三个面、第二个面和第三个面反射产生的鬼像,轴外视场的鬼像不再是对自身视场真实像点的能量叠加,而是对其他视场像点能量产生了影响,从而造成视场之间的串扰形成虚假信号。

为了研究轴外视场鬼像在像面的分布情况,采用实际光线正向追迹鬼像的方法。光线数目设置为 10 万根,能量阈值设置为  $10^{-7}$ ,选取子午方向视场为  $30^\circ$ 、 $46^\circ$ 、 $54^\circ$  的三个视场,真实像点和鬼像在像面上的照度如图 7(a)、(b) 所示。可以看出,鬼像与真实像点不在同一个像素位置,鬼像与真实像点的能量比值为  $10^{-4}$  量级。虽然鬼像的相对能量比正常光要小很多,但当目标光为强光源时,此能量可能会产生背景噪声。除了鬼像之外,真实像周围还可能存在一圈亮环,它是透镜台阶面或孔径边缘经过光学系统在像面形成的像,引起亮环的光路较为复杂,可以通过透镜边缘涂消光漆等手段加以控制。

## 5 结论

对多角度偏振成像仪光学系统的杂散光分布情况进行了量化分析。针对点源透过率难以适用于评价该系统杂散光的问题,介绍了基于黑斑法原理的评价方法。借助杂散光分析软件 LightTools 中选定视场点反向光线追迹,有效地提高了仿真的精度与计算效率。该分析方法对大视场成像系统杂散光分析具有借鉴和实用参考价值。仿真得到成像视场外和视场内的杂散光系数,表明中心视场受到的杂散光影响最大,杂

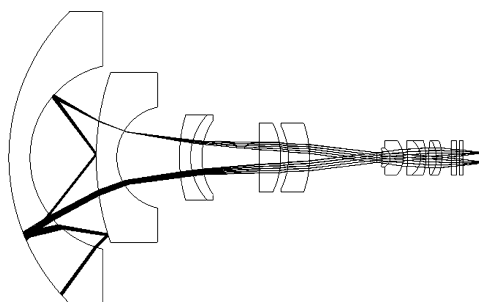


图 6 鬼像路径示意图

Fig.6 Schematic diagram of ghost optical path

散光系数为 3.27%, 杂散光水平满足指标要求。另外, 重点模拟了局部杂光和全局杂光 (主要是鬼像) 的表现特征以及能量分布情况, 为后期图像杂散光校正提供一定的理论基础。此外, 由于多角度偏振成像仪搭载在卫星上, 在杂散光分析中还应考虑午夜前后太阳光是否会直接入侵或由其他载荷反射进入仪器等因素的影响, 这些更深层次的问题将在后续的工作中开展。

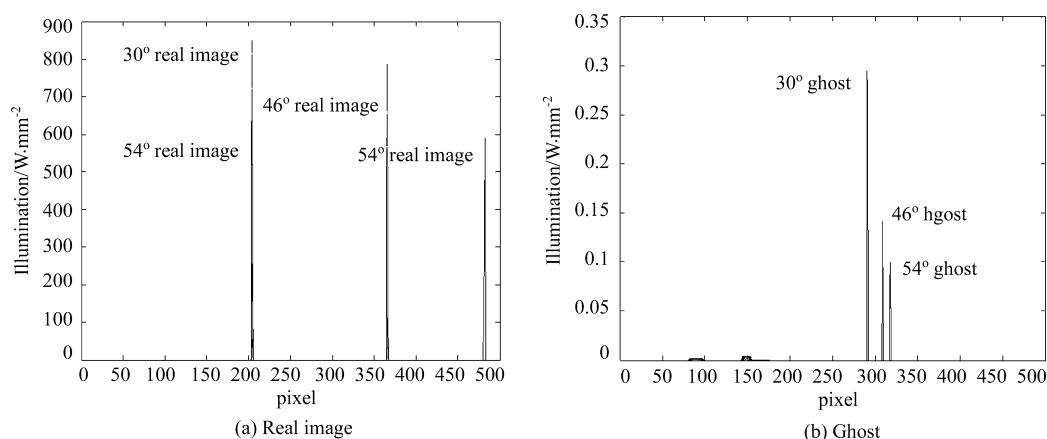


图 7 真实像与鬼像照度分布。(a) 真实像点; (b) 鬼像

Fig.7 Real image and ghost illuminance distribution. (a) real image; (b) ghost image

## 参考文献:

- [1] Zhang Yimo. *Applied Optics* [M]. Beijing: China Machine Press, 1982(in Chinese).  
张以谟. 应用光学 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1982.
- [2] 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.
- [3] Du Shenghua, Xia Xinlin, Sun Chuang. Analysis on stray radiation of multi-spectral infrared remote sensor [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, **37**(4): 763-767(in Chinese).  
杜胜华, 夏新林, 孙创. 星载多波段光学系统的杂散辐射分析 [J]. 光子学报, 2008, **37**(4): 763-767.
- [4] Niu Jinxing, Zhou Renkui, Liu Zhaohui, et al. Analysis of stray light caused by thermal radiation of infrared detection system [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(8): 2267-2271(in Chinese).  
牛金星, 周仁魁, 刘朝晖, 等. 红外探测系统自身热辐射杂散光的分析 [J]. 光学学报, 2010, **30**(8): 2267-2271.
- [5] Yuan Yukai. Stray light suppressing measure of optical system [J]. *Journal of Atmospheric and Environmental Optics*, 2007, **2**(1): 6-10(in Chinese).  
原育凯. 光学系统杂散光的消除方法 [J]. 大气与环境光学学报, 2007, **2**(1): 6-10.
- [6] Sholl M J, Grochoci F S, Fleming J C, et al. Stray light design and analysis of the SNAP telescope [C]. *Optical Modeling and Performance Predictions III*, 2007, **6675**: 66750C.
- [7] Mazzoli A, Landini F, Vivès S, et al. Stray light analysis and optimization of the ASPIICS/PROBA-3 formation flying solar coronagraph [C]. *Space Telescopes and Instrumentation 2010: Optical, Infrared, and Millimeter Wave*, 2010, **7731**: 773146.

- [8] Laherrere J-M, Poutier L, Bret-Dibat T, *et al.* POLDER on-ground stray light analysis, calibration, and correction [C]. *Proceedings of SPIE*, 1997, **3221**: 132-140.
- [9] Li Yan, Liu Jianfeng. Research on integrative suppression of internal and external stray light in infrared optical remote sensor [J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, **33**(9): 0928002(in Chinese).  
李 岩, 刘剑峰. 红外光学遥感器内杂散光和外杂散光的综合抑制研究 [J]. *光学学报*, 2013, **33**(9): 0928002.
- [10] Li Xiaoping, Wang Gang, Hu Tingliang. High-precision stray light measurement system analysis [J]. *Infrared Technology*, 2011, **33**(9): 521-524(in Chinese).  
李晓平, 王 钢, 胡亭亮. 高精度杂散光测量系统分析 [J]. *红外技术*, 2011, **33**(9): 521-524.
- [11] Du B L, Li L, Huang Y F. Stray light analysis of an on-axis three-reflection space system [J]. *Chinese Optics Letters*, 2010, **8**(6): 569-572.
- [12] Park J O, Jang W K, Kim S H, *et al.* Stray light analysis of high resolution camera for a low-earth-orbit satellite [J]. *Journal of the Optical Society of Korea*, 2011, **15**(1): 52-55.
- [13] Liu Y, An X Q, Wang Q. Accurate and fast stray radiation calculation based on improved backward ray tracing [J]. *Applied Optics*, 2013, **52**(4): B1-B9.
- [14] Grabarnik S. Optical design method for minimization of ghost stray light intensity [J]. *Applied Optics*, 2015, **54**(10): 3083-3089.
- [15] Cao Huabao, Lu Xingqiang, Fan Dianyuan. Ghost analysis for complex optical system based on ZEMAX [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2010, **37**(5): 1236-1239(in Chinese).  
曹华保, 卢兴强, 范滇元. 用 ZEMAX 完成复杂光学系统的鬼像分析 [J]. *中国激光*, 2010, **37**(5): 1236-1239.