

地气光在空间天文望远镜关键部位——太阳挡板的分布

陆琳 王维 孟庆宇 王栋

中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033

摘要 杂散光抑制是空间天文望远镜设计的重要部分,其中地气光的抑制较为复杂。为分析空间天文望远镜所处环境的地气光,以一典型空间天文望远镜为例,基于辐射传输理论,建立了其关键部位—太阳挡板的辐射度计算模型。基于该模型,仿真得到了不同工况下地气光在挡板处的分布特性,并计算了望远镜通光口处一次地气光和二次地气光的辐射通量。计算结果表明:对于低轨道的空间天文望远镜,太阳挡板是关键杂光源,其引入的二次地气光影响大于直接进入望远镜通光口处的一次地气光,在进行杂散光抑制设计时,应重点考虑。

关键词 光学设计;空间天文望远镜;地气光;辐照度分布;近地轨道

中图分类号 O432 文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP53.091104

Distribution of Earth-Atmosphere Radiation on Key Component of Space Based Telescope – Sunlight Baffle

Lu Lin Wang Wei Meng Qingyu Wang Dong

Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China

Abstract Suppression of stray light is a crucial part of space-based telescope (SBT) design. The suppression of earth-atmosphere radiation (EAR) is complicated. In order to analyze the EAR of SBT in its ambient environment, a computational model of EAR irradiance on sunlight baffle, which is one of the key components of SBT, is constructed by taking a typical SBT into consideration and using the irradiation transmission theory. Based on the as-constructed model, distribution character of EAR on baffle under various operating conditions is simulated. And radiant flux of primary and secondary EAR at light aperture of telescope is also calculated. The computation results indicate that sunlight baffle is the major stray light source for SBT working on low earth orbit (LEO), and the secondary EAR from sunlight baffle affects much more than the primary EAR, which directly passes into telescope at light aperture. Therefore, serious consideration on the secondary EAR from sunlight baffle should be taken into the design of stray-light suppression.

Key words optical design; space-based telescope; earth-atmosphere radiation; irradiance distribution; low earth orbit

OCIS codes 220.4830; 110.6770; 290.2648; 350.5610

1 引言

杂散光是进入成像视场的非成像光线,按照其传播路径,主要分为直接进入系统的一次杂散光,以及由系统内外部结构所引起的二次杂散光^[1]。杂散光进入探测器,会降低像面的对比度和调制传递函数,导致成像清晰度下降,甚至在像面形成杂散光斑点。从成像链路分析,杂散光是影响相机成像质量的重要因素之一。

对于工作在近地轨道的可见光空间天文望远镜^[2-3](SBT),视场外的强光源辐射,即太阳光、地气光(EAR)、月光等,是主要杂光源。其中,地气光(又称地气辐射)是指入射到地球大气的太阳辐射能中,受地球大气的散射、云层及地面的反射返回到宇宙空间的辐射光。地气光和太阳光一样,都是近地轨道航天器必

收稿日期:2016-06-27;收到修改稿日期:2016-08-10;网络出版日期:2016-08-29

作者简介:陆琳(1989—),女,硕士,研究实习员,主要从事杂散光抑制设计方面的研究。

E-mail: Lu_lin_cimp@163.com

须着重考虑并进行抑制的杂光源^[4-7]。天文望远镜以微弱目标为主要观测对象,因此需要对其杂散光水平进行精确分析并有效抑制,以保证目标信息不被杂散光淹没。针对能量最强的太阳光,如果采用光学系统内部吸收的方式进行抑制,对结构件的涂层吸收率及镜面反射率要求极高,设计及工程实现难度极大。哈勃、Euclid、SNAP 等大型遥感器^[8-9]通常采用挡板遮挡或遮光罩斜向开口等方式来抑制太阳光,以避免望远镜内表面被太阳抑制角以外的太阳光直接照亮,但由此也将引入被挡板反射从而进入通光口的二次地气光。

我国空间天文望远镜起步较晚,杂散光抑制方面的相关工作进展较少。目前公开发表的资料显示,我国空间天文望远镜的杂散光研究主要针对太阳杂散光,而且大部分集中在望远镜本体的杂散光抑制结构设计^[10-15],对于空间天文望远镜的地气光研究较少,尤其是望远镜内外部结构所引起的二次地气光。本文以一口径为 1 m 的典型近地轨道望远镜为例,针对望远镜外部的关键部位——太阳挡板,建立了地气光辐照度分布模型,根据典型工况具体分析,并分别计算了望远镜通光口处的一次地气光和太阳挡板引入的二次地气光的辐射通量。

2 仿真计算模型

工作在近地轨道的空间天文望远镜,轨道高度远小于地球半径,在分析地气光时,不能将地球简化为点光源或将地球反照光视作平行光,应将其视为扩展曲面光源,因此有必要将地球表面进行网格划分。地气光的辐照度传递模型如图 1 所示。

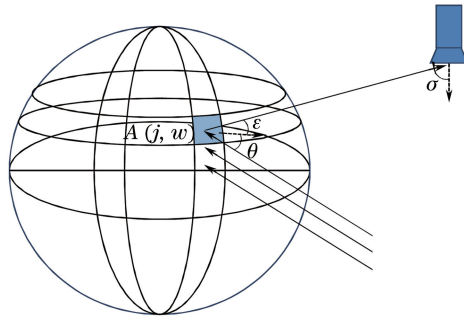


图 1 地气光的辐照度传递模型示意图

Fig. 1 Schematic diagram of irradiance transfer model of EAR

如图 1 所示,地球表面按照经纬度划分成网格, j 、 w 分别代表地表面元的经度角和纬度角; θ 表示地表面元——太阳连线(即太阳光入射的反方向)与地表面元法线之间的夹角,称为光照角; ϵ 表示地表面元——望远镜连线与地表面元法线之间的夹角,称为出射角; σ 表示望远镜——地表面元连线与望远镜光轴的夹角,称为离轴角。

由图 1 可知地气光对挡板产生杂散光的条件是 $0 < \theta, \epsilon, \sigma < \pi/2$ 。当 $\theta < \pi/2$,表明该地表面元处于太阳照区;当 $\epsilon < \pi/2$,表明该地表面元的反射光可以入射到望远镜本体上;当 $\sigma < \pi/2$,表明该地表反射光可以进入望远镜入瞳。

2.1 几何模型

以地心为基准点建立直角坐标系, XY 平面位于赤道平面, Z 轴指向北极,地球半径为 R ,地表经纬度为 (j, w) 的 A 面元坐标为 $(R \cos w \cos j, R \cos w \sin j, R \sin w)$ 。为简化处理,令太阳光垂直照射 XZ 平面,且望远镜关于 YZ 平面对称,如图 2 所示。

如图 2 所示,望远镜工作在高度为 h 的近地轨道(即点 B 距离地面高度为 h),太阳光入射的反方向与望远镜光轴夹角为 α ,天顶与望远镜光轴夹角为 β ,挡板与望远镜光轴的夹角为 γ 。则挡板与望远镜连接线中心坐标为 $(0, H \cos(\alpha - \beta), H \sin(\alpha - \beta))$,其中 $H = R + h$ 。

望远镜简化模型如图 3 所示,挡板长边为 L_1 ,短边为 L_2 ,其中短边与望远镜通光口面相连,通光口为直径 $d = L_2$ 的圆形。

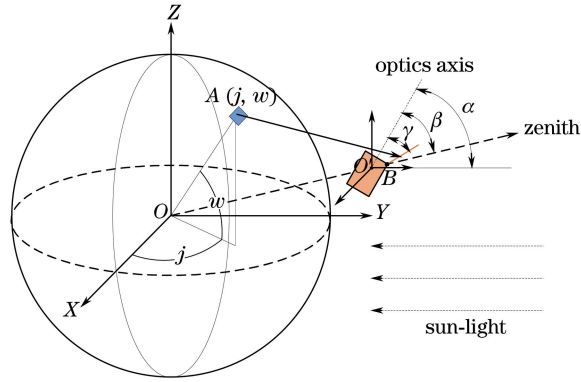


图 2 挡板辐照度计算几何模型

Fig. 2 Geometrical model of irradiance calculation on baffle

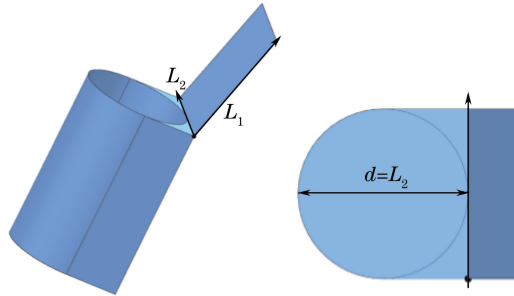


图 3 望远镜简化模型

Fig. 3 Simplified model of telescope

2.2 地气光辐射传输模型

在建模中,表面反照按照朗伯(Lambert)辐射模型计算。由图 2 可得地表面元 A 的面积为:

$$dS = \left(\frac{\pi}{180}\right)^2 R^2 \cos w \, dj \, dw, \quad (1)$$

式中 R 为地球半径。由朗伯定律^[16],该面元在挡板处产生的辐照度为:

$$dE = \frac{\eta E_s \cos \theta \cos \epsilon \cos \sigma}{\pi D^2} dS, \quad (2)$$

式中 η 为地表反照率; E_s 为太阳常数; D 为地表面元到挡板的距离。

在当前坐标系下,挡板方程为:

$$\begin{cases} [y - H \cos(\alpha - \beta)] \tan(\alpha - \gamma) - [z - H \sin(\alpha - \beta)] = 0 \\ -L_2/2 \leq x \leq L_2/2 \\ H \cos(\alpha - \beta) \leq y \leq H \cos(\alpha - \beta) + L_1 \cos(\alpha - \gamma) \end{cases}, \quad (3)$$

将挡板进行网格划分,分别计算每一地表面元在挡板面元上的杂散光贡献,累计得到每一挡板面元上总地气光辐照度,从而得到挡板上地气光辐照度分布特性。

由地气光对挡板产生杂散光的条件,即 $0 < \theta, \epsilon, \sigma < \pi/2$,来判定地气光能否入射至挡板。从图 2 中可以看出,望远镜本体对部分满足上述入射条件的地气光存在遮挡,最大遮挡轮廓为望远镜通光口面包络,为半圆半方形。则在当前坐标系下,通光口面的边界方程为:

1) 半圆形边界方程:

$$\begin{cases} [y - H \cos(\alpha - \beta)] \tan(\pi/2 - \alpha) + [z - H \sin(\alpha - \beta)] = 0 \\ x^2 + [y - H \cos(\alpha - \beta) + L_2/2 \times \cos(\pi/2 - \alpha)]^2 + [z - H \sin(\alpha - \beta) - L_2/2 \times \cos(\pi/2 - \alpha)]^2 \leq (L_2/2)^2; \\ H \cos(\alpha - \beta) - L_2 \cos(\pi/2 - \alpha) \leq y \leq H \cos(\alpha - \beta) - L_2 \cos(\pi/2 - \alpha)/2 \end{cases} \quad (4)$$

2) 半方形边界方程:

$$\begin{cases} [y - H \cos(\alpha - \beta)] \tan(\pi/2 - \alpha) + [z - H \sin(\alpha - \beta)] = 0 \\ -L_2/2 \leq x \leq L_2/2 \\ H \cos(\alpha - \beta) - L_2 \cos(\pi/2 - \alpha)/2 \leq y \leq H \cos(\alpha - \beta) \end{cases}, \quad (5)$$

通过判断地表面元—挡板面元连线与通光口所在平面的交点,是否位于通光口面包络内,来判断望远镜本体是否对地气光存在遮挡。利用 Matlab 软件建立仿真计算模型。

3 仿真计算与讨论

3.1 参数设定

以空间天文望远镜典型工况作为实例进行计算。参数设定如表 1 所示。

表 1 参数项取值

Table 1 Values of parameter items

Parameter item	Parameter value
Surface albedo η	0.3
Solar constant $E_s/(W/m^2)$	1367
Radius of the earth R/km	6371
Orbit altitude of SBT h/km	400
Entrance pupil of SBT d'/m	1

望远镜通光口径 $d=1.2\text{ m}$;望远镜的太阳抑制角为 50° (即太阳光入射的反方向与望远镜光轴夹角为 $\alpha=50^\circ$);为防止挡板反射的二次地气光直接进入至主镜,由遮光罩长度及主镜尺寸确定挡板相对光轴上翘 15° (即挡板与望远镜光轴的夹角 $\gamma=15^\circ$);根据望远镜任务规划,光轴指向天顶方向,向 Z 轴正方向偏摆范围 $0^\circ\sim 30^\circ$ (即望远镜光轴与天顶夹角 $\beta=0^\circ\sim 30^\circ$);由挡板上翘角度、太阳抑制角及望远镜通光口径尺寸,确定挡板长边 $L_1=1.4\text{ m}$,短边 $L_2=d=1.2\text{ m}$ 。

3.2 挡板上地气光分布

将挡板划分成 28×24 个 $0.05\text{ m}\times 0.05\text{ m}$ 的网格。分别选取望远镜观测任务规划中,光轴与天顶夹角 $\beta=0^\circ, 10^\circ, 20^\circ, 30^\circ$,通过计算得到在不同工况下,挡板上的地气光分布,结果如图 4 所示,图中零点为图 2 中的点 B , X 坐标轴为与通光口面相连方向,共 24 个网格, Y 坐标轴为挡板侧边方向,共 28 个网格, Z 坐标轴为辐照度,单位 W/m^2 。挡板上地气光辐射通量如表 2 所示。

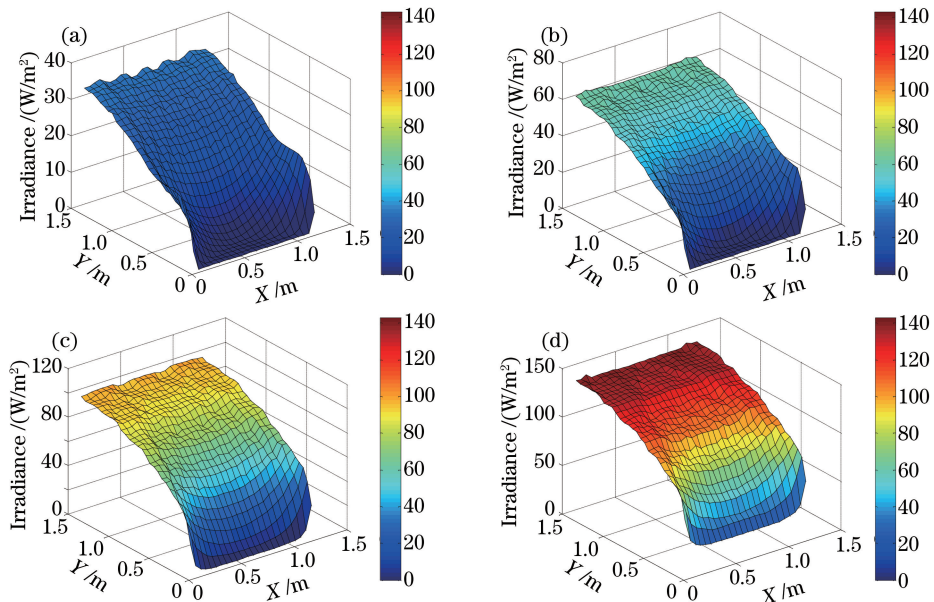


图 4 挡板上地气光辐照度分布。(a) $\beta=0^\circ$;(b) $\beta=10^\circ$;(c) $\beta=20^\circ$;(d) $\beta=30^\circ$

Fig. 4 Irradiance distribution of EAR on baffle. (a) $\beta=0^\circ$; (b) $\beta=10^\circ$; (c) $\beta=20^\circ$; (d) $\beta=30^\circ$

表 2 不同工况下,挡板上地气光辐射通量

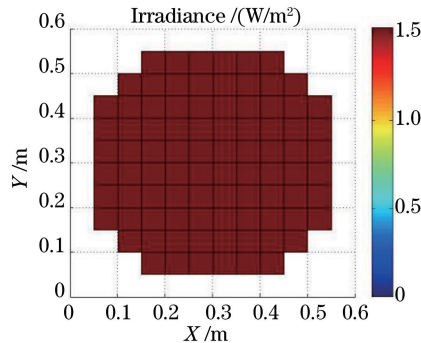
Table 2 Radiant flux of EAR on baffle under different operating conditions

Parameter item	Parameter value			
Angle between optics axis and zenith	0°	10°	20°	30°
Angle between optics axis and baffle	15°	15°	15°	15°
Angle between optics axis and sun-light	50°	50°	50°	50°
Radiant flux of EAR on baffle /W	32.01	67.03	118.15	181.90

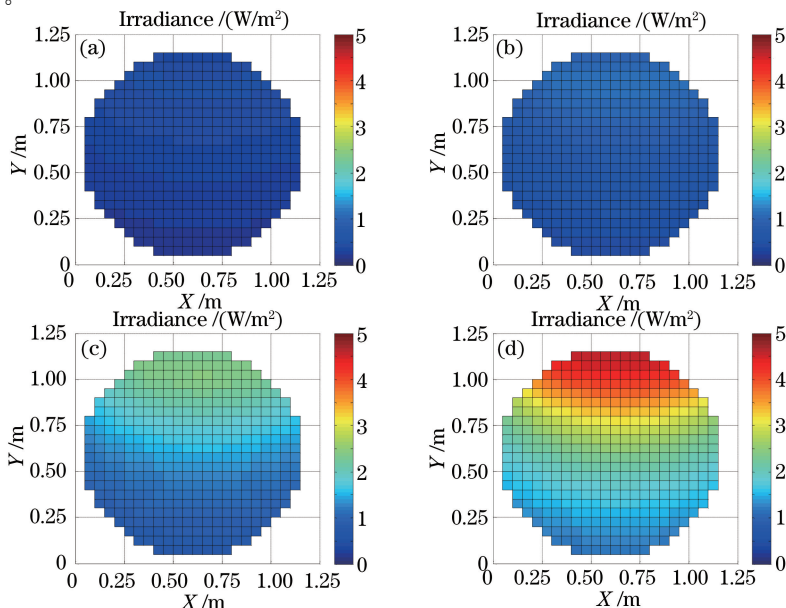
从图 4 详细给出了不同工况下挡板上的地气光辐照度分布特性,可以看出,在不同工况下,地气光的分布趋势一致,仅辐照度大小有区别。望远镜模型中,挡板底端与通光口面相连处地气光辐照度最小,越到挡板顶端辐照度越大,且相差十倍以上,可见望远镜本体对入射至挡板的地气光有很好的遮挡作用,这将直接减小挡板表面的辐射通量,从而减小进入通光口的二次地气光能量。表 2 给出了不同工况下挡板表面的地气光辐射通量,从表中可以看出,在同样的太阳抑制角和挡板上翘角度下,随着光轴与天顶夹角的增大,挡板上地气光辐射通量增加。

3.3 通光口处地气光辐射通量

天顶和光轴夹角为 30°时,直接进入通光口的一次地气光辐照度分布如图 5 所示。从图中可以看出,由于没有望远镜本体遮挡,且通光口径远小于地球半径,其一次地气光辐照度分布均匀,几乎无变化,可当作点来计算。

图 5 $\beta=30^\circ$ 时通光口处一次地气光辐照度分布Fig. 5 Irradiance distribution of primary EAR at light aperture when $\beta=30^\circ$

由 3.2 节中不同工况下挡板上的地气光辐照度分布特性,可以仿真得到通光口处挡板引入的二次地气光分布,如图 6 所示。

图 6 通光口处挡板引入的二次地气光辐照度分布。(a) $\beta=0^\circ$; (b) $\beta=10^\circ$; (c) $\beta=20^\circ$; (d) $\beta=30^\circ$ Fig. 6 Irradiance distribution of secondary EAR from baffle at light aperture. (a) $\beta=0^\circ$; (b) $\beta=10^\circ$; (c) $\beta=20^\circ$; (d) $\beta=30^\circ$

从图 6 中可以看出,不同工况下,二次地气光辐照度分布趋势一致,且随着远离挡板与通光口面连接处,辐照度增大。从数值上看,其最大值大于图 5 中通光口处一次地气光辐照度。通光口处一次地气光和二次地气光辐射通量如表 3 所示。

表 3 不同工况下,通光口处一次地气光及二次地气光辐射通量

Table 3 Radiant flux of primary and secondary EAR at light aperture under different operating conditions

Parameter item	Parameter value			
Angle between optics axis and zenith	0°	10°	20°	30°
Angle between optics axis and baffle	15°	15°	15°	15°
Angle between optics axis and sun-light	50°	50°	50°	50°
Radiant flux of primary EAR at light aperture /W	0	0	0.95	1.72
Radiant flux of secondary EAR from baffle at light aperture /W	0.38	0.86	1.67	2.79

从表 3 可知,随着天顶与光轴夹角的增大,一次地气光和二次地气光辐射通量均增大,但挡板引入的二次地气光辐射通量是一次地气光辐射通量的数倍。

4 结 论

为分析空间天文望远镜的地气光辐射,基于辐射传输理论,利用 Matlab 软件建立了其关键部位—太阳挡板上地气光分布特性的一般计算模型,并针对望远镜典型工况,量化计算了挡板上的地气光分布。再将挡板作为二次光源,计算了反射进入通光口的二次地气光辐射通量。结果表明,在任一工况下,由挡板反射引入的二次地气光通量都大于直接进入通光口的一次地气光通量,因而有必要对太阳挡板进行杂散光抑制设计,例如喷涂高吸收率的涂料,降低其反射率,或参考文献中地气光分布规律设置挡光环等。对空间天文望远镜地气光辐射的研究,可以作为地气光抑制要求的输入,为杂散光抑制设计提供依据,同时也为航天任务的设计及规划提供参考。

参 考 文 献

- 1 Cen Zhaofeng, Li Xiaotong, Zhu Qihua. Stray light analysis for optical system[J]. Infrared and Laser Engineering, 2007, 36(3): 300-304.
岑兆丰, 李晓彤, 朱启华. 光学系统杂散光分析[J]. 红外与激光工程, 2007, 36(3): 300-304.
- 2 Chen Chuangmai, Li Yexin, Zhou Wen, *et al.* An observation study on the radiation budget characteristics for earth-atmospheric system[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sun Yatseni, 2003, 42(1): 87-90.
陈创买, 李叶新, 周 文, 等. 地气系统辐射平衡特征的观测研究[J]. 中山大学学报, 2003, 42(1): 87-90.
- 3 Guo Q, Xu J M, Zhang W J. Stray light modelling and analysis for the FY-2 meteorological satellite[J]. International Journal of Remote Sensing, 2005, 26(13): 2817-2830.
- 4 Shi Bo, Li Rui, Liu Chunsheng, *et al.* Research on earth's atmosphere limb background infrared radiation characteristics [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2015, 52(12): 120101.
史 波, 李 瑞, 刘纯胜, 等. 地球大气临边背景红外辐射特性研究[J]. 激光与光电子学进展, 2015, 52(12): 120101.
- 5 Ren Guodong, Zhang Liang, Lan Weihua, *et al.* Analysis and suppression of stray radiation of shortwave infrared imaging system[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2015, 52(12): 122901.
任国栋, 张 良, 兰卫华, 等. 短波红外成像系统的杂散辐射分析与抑制研究[J]. 激光与光电子学进展, 2015, 52(12): 122901.
- 6 Shu Xingxing, Liu Weilin. Suppression of stray light in visible light optical system [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2014, 51(12): 121101.
舒星星, 刘卫林. 可见光光学系统杂散光抑制[J]. 激光与光电子学进展, 2014, 51(12): 121101.
- 7 Sun Mingzhe, Zhang Hongxin, Lu Zhenwu, *et al.* Stray light suppression of the large field of view coronagraph optical system[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2014, 51(5): 052203.
孙明哲, 张红鑫, 卢振武, 等. 大视场日冕仪光学系统杂散光抑制[J]. 激光与光电子学进展, 2014, 51(5): 052203.
- 8 Du Baolin. The study and suppression of stray radiation in space remote sensors [D]. Beijing: Beijing Institute of

Technology, 2010.

杜保林. 空间遥感器的杂散辐射研究与防护[D]. 北京: 北京理工大学, 2010.

- 9 Sholl M J, Grochocki F S, Fleming J C, *et al.* Stray light design and analysis of the SNAP telescope[C]. SPIE, 2007, 6675: 66750C.
- 10 Tan H P, Shuai Y, Xia X L, *et al.* Reliability of stray light calculation code using the Monte Carlo method[J]. Optical Engineering, 2005, 44(2): 023001.
- 11 Li Dexiong, Yan Dayuan. Stray light calculation of space remote sensors[J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 1993, 13(4): 530-537.
李德熊, 阎达远. 空间遥感器的杂光计算[J]. 北京理工大学学报, 1993, 13(4): 530-537.
- 12 Tang Yong, Lu Xin, Hao Yuncai. Suppression and analysis of stray light in a star sensor[J]. Aerospace Control, 2004, 22(3): 58-61.
唐 勇, 卢 欣, 郝云彩. 星敏传感器杂光抑制分析[J]. 航天控制, 2004, 22(3): 58-61.
- 13 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.
杜胜华, 夏新林, 孙 创. 星载多波段红外光学系统的杂散辐射分析[J]. 光子学报, 2008, 37(4): 763-767.
- 14 Xiao Xiangguo, Wang Zhonghou, Bai Jianguang, *et al.* Influence of earth radiation on photoelectric detection system based on space[J]. Acta Photonica Sinica, 2009, 38(2): 375-381.
肖相国, 王忠厚, 白加光, 等. 地表反照对天基测量相机的影响[J]. 光子学报, 2009, 38(2): 375-381.
- 15 Shen Guotu, Cai Jiguang, Yang Baocheng, *et al.* Preliminary study of theoretical simulation of sky radiation[J]. Infrared and Laser Engineering, 2006, 35(sl): 399-403.
沈国土, 蔡继光, 杨宝成, 等. 空中辐射环境理论建模初探[J]. 红外与激光工程, 2006, 35(sl): 399-403.
- 16 Smith W J. Modern optical engineering[M]. New York: McGraw-Hill, 2007.