

# 地球静止轨道相机 SBIRS GEO-1 光机结构的设计与仿真

王 威<sup>1,2</sup> 陈凡胜<sup>1</sup> 崔 坤<sup>1,2</sup> 蒋范明<sup>1,2</sup>

(<sup>1</sup> 中国科学院上海技术物理研究所, 上海 200083; <sup>2</sup> 中国科学院大学, 北京 100049)

**摘要** 天基红外预警卫星系统是美国构建空间防御体系的重要组成部分,首颗静轨卫星 SBIRS GEO-1 于 2011 年 5 月发射升空。为美国及其盟国提供全球范围内高时间分辨率和空间分辨率的红外监视、导弹预警等。通过对 SBIRS GEO-1 卫星光机系统的调研,实现改进型短轴施密特光学结构的设计仿真,成像质量接近衍射极限,奈奎斯特频率处(14.3 lp/mm)全谱段调制传递函数(MTF)设计平均值为 0.847;并就其可展开式外遮光罩进行论证,分析了不同时刻对太阳杂光和外热流的抑制效果,满足系统设计的要求。研究内容为我国空间探测红外成像系统的研制提供了一定的参考。

**关键词** 成像系统;光机系统;短轴施密特结构;可展开外遮光罩

中图分类号 O436 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL201441.s116005

## Opt-Mechanical System Design and Simulation of SBIRS GEO-1 —— a Geostationary Camera

Wang Wei<sup>1,2</sup> Chen Fansheng<sup>1</sup> Cui Kun<sup>1,2</sup> Jiang Fanming<sup>1,2</sup>

(<sup>1</sup> Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China)  
(<sup>2</sup> University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract** Space based infrared system (SBIRS) is an important part of American's space defense system, the first of which is called SBIRS GEO-1, in geostationary orbit, launched in May 2011. GEO-1 provides infrared detective and missile warning etc. With high resolution and real-time observing in worldwide. An improved short-axis Schmitt optical structure is designed and simulated based on the study of SBIRS GEO-1 opt-mechanical. Its image quality approaches diffraction limit, with average value of modulation transfer function (MTF) designed spectrum of 0.847 at the Nyquist frequency (14.3 lp/mm). Besides, the deployable outer sunshield servo system is demonstrated, the inhibitory effect of sun stray-light and external thermal flux are analyzed in different time. The results can meet system design requirements. The GEO-1 study provides a certain reference for the infrared imaging system development of our space exploration.

**Key words** imaging systems; opt-mechanical system; short-axis Schmitt structure; deployable outer sunshield

**OCIS codes** 110.3080; 110.6770; 220.4830; 280.4788

## 1 引 言

当今,随着空间技术的不断发展,高空预警卫星在战略防御系统中发挥着越来越重要的作用,而地球静止轨道相机以其高时间分辨率的凝视成像而受

到广泛关注。作为一套全球性导弹防御探测系统,“天基红外系统”地球静止轨道卫星(SBIRS GEO)系列是美国新一代导弹预警卫星的重要组成部分,它将替换原有的“国防支援计划(DSP)”卫星<sup>[1]</sup>,为

收稿日期: 2013-09-01; 收到修改稿日期: 2013-10-01

基金项目: 中国科学院知识创新工程(O9KBD013G0)

作者简介: 王 威(1987—),男,博士研究生,主要从事空间红外光学成像光学系统设计、仿真与分析等方面的研究。

E-mail: wangweisitp@163.com

导师简介: 陈凡胜(1978—),男,博士,研究员,主要从事空间红外弱小目标探测系统总体技术方面的研究。

E-mail: cfs@mail.sitp.ac.cn(通信联系人)

本文电子版彩色效果请详见中国光学期刊网 www.opticsjournal.net

美国及其盟友提供全球红外事件观测、导弹发射预报等功能。本文通过整理和分析该卫星的相关文献资料,在已有参数、模型的基础上对 GEO-1 光机结构进行了仿真和论证分析。仿真和分析结果为我国空间遥感仪器光机结构的设计提供了一定的参考。

## 2 相机整体方案

GEO-1 卫星的主要任务是通过侦查、定位,精确跟踪来袭导弹的主动段,获取实时、可靠的全球范围内导弹或其他装置在发射、助推飞行和下落阶段的红外数据,为导弹的预报和拦截提供技术支持。为了实现上述系统目标,GEO-1 卫星在探测器选择和光机结构设计方面采取了一些不同于目前在轨卫星的新形式。

GEO-1 卫星首次采用双探测器工作模式,同时配备了高速扫描型探测器和凝视型探测器<sup>[2]</sup>。扫描型探测器采用线阵推扫方式实现快速全球覆盖搜索,完成对区域内导弹尾焰红外辐射的初步探测;凝视型探测器则采用大型焦平面阵列,对由扫描探测器传输的目标区域的红外辐射变化进行连续不间断的探测,获取详细的目标信息<sup>[3-4]</sup>。通过扫描和凝视探测器的配合工作,实现实时、精确的探测和跟踪,因此极大地提高了对低能级辐射的小型导弹的探测能力。

为了实现双探测器工作模式的载荷要求,GEO-1 卫星采用了不同于目前大多数在轨卫星的光机结构。光学结构方面,GEO-1 卫星采用双波段短轴施密特光学结构,该结构可以有效减轻载荷重量,提高加工、装调以及在轨运行的稳定性,在保证探测质量的基础上实现对目标不同进程红外辐射波段的探测。同时,为了有效抑制静止轨道外热流和午夜杂散辐射对探测器的影响,避免发射过程中受火箭整流罩的空间约束以及在轨运行载荷重量限制,GEO-1 卫星外遮光罩设计采用可展开式结构。下面将分别从光学设计和推理论证两个方面对 GEO-1 卫星光机结构的特性进行研究。

## 3 光机结构论证

### 3.1 光学子系统

不同于目前在轨卫星多数采用的 R-C 结构或三反结构,GEO-1 光学系统采用短轴施密特构型。结合已有模型和数据,对该结构进行仿真分析。该系统要求的技术指标如表 1 所示。GEO-1 相机整

体布局和光学结构分别如图 1、图 2 所示。

表 1 GEO-1 光学系统设计参数

Table 1 Design parameters of GEO-1 optical system

| Parameter                    | Value                      |
|------------------------------|----------------------------|
| Working band / $\mu\text{m}$ | 3~5                        |
| Optical aperture /mm         | $D=280$                    |
| Focal length /mm             | $f=560$                    |
| Field of view / $^\circ$     | $10 \times 3.6$ (scanning) |

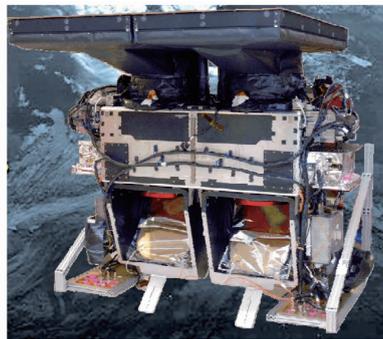


图 1 GEO-1 相机整体布局

Fig. 1 Overall layout of the GEO-1 camera

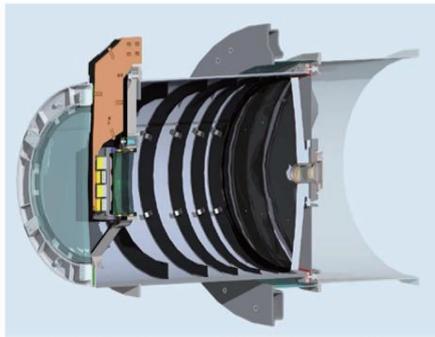


图 2 GEO-1 相机光学结构

Fig. 2 Optical structure of GEO-1 camera

由图 1,图 2 可知,两台相机均采用短轴施密特光学结构,配合物方二维扫描、指向镜以扩大探测视场。在该结构进行仿真时,考虑到光学系统在保证深空环境下一定成像质量的同时,还应具有最少数量的光学元件和最小的有效载荷质量。因此,在施密特结构的基础上应考虑反射光路中校正透镜组的选择。首先考虑两镜系统,它结构型式简单,但系统自变量少,只有轴上点成像效果较为理想,边缘视场和轴外像差的校正不能满足要求。而库克型结构由三个彼此分离的单透镜组成,透镜组采用正负正排列,使结构接近对称,对彗差、畸变和倍率色差等垂轴像差有很好的校正效果,同时利用正负透镜分离来校正 Petzval 场曲<sup>[5]</sup>。透镜组自变量多达 8 个<sup>[6]</sup>,恰好能校正 7 种初级像差,并满足总焦距的要求。

在基本结构的基础上进行复杂化处理和优化。主要采用两种方法：1)将主反射镜非球面化,用以增加变量数目;2)对校正镜组进行无热化设计,以满足深空温度变化对成像的影响,更好地校正像差。

反射镜非球面化,可以达到降低光学系统的二级光谱像差的目的。非球面的表达式为

$$x = \frac{cy^2}{1 + \sqrt{1 - (K+1)c^2y^2}} + dy^4 + ey^6 + \dots, \quad (1)$$

式中  $c$  为顶点曲率,  $c = \frac{1}{R}$ ,  $R$  为顶点曲率半径,  $K$  为二次曲线常数,  $d, e, \dots$  为系数。

选择面型为扁椭球面结构,设置二次曲面常数  $K$  为 0.03,以非球面二次、四次系数  $c, d$  为变量进行优化。值得注意的是,考虑加工的难易,必须选择合适的非球面度<sup>[7]</sup>。

校正镜选择库克型结构。考虑到深空环境温度变化带来的热离焦、像面漂移等对成像效果的负面影响,使用热差图<sup>[8]</sup>选择光学材料,获得有利于校正单色像差的光焦度分配结果。运用像差理论分析和计算初始结构,选择高级像差较小的结构进行优化设计。选好材料后,将材料参数代入薄透镜公式,对

于像差的赛德尔公式各个文献中已给出了比较详尽的说明,在此不再赘述。由此计算出各个透镜的曲率、厚度和光焦度分配。求出初始结构参数后,考虑到反射结构消杂散光方法将光阑置于反射镜焦点附近位置,在保证系统焦距为定值的条件下,取后工作距为 26 mm,使用 ZEMAX-EE(2009)对系统的结构参数进行微量的优化,可得到初步优化结构。在此基础上,设工作温度为-190 K,并对透镜进行非球面设置,再分别对半径、厚度进行优化,以满足深空环境工作条件的要求,获得成像效果良好。其中前修正镜采用 ZNSE 材料,主反射镜半径为-1273 mm,校正镜组采用 ZNSE、GE、SI 组合,其结构参数如表 2 所示,光学系统系统性能曲线如图 3 所示。

表 2 GEO-1 光学系统最终结构参数

Table 2 Final structural parameters of GEO-1 optical system

|      | Radius /mm | Thickness /mm |
|------|------------|---------------|
| ZNSE | -483.025   | 12.23         |
|      | -774.312   | 20            |
| GE   | 381.629    | 13.15         |
|      | 354.951    | 8.4           |
| SI   | -596.505   | 12.0          |
|      | 304.436    | 26.67         |

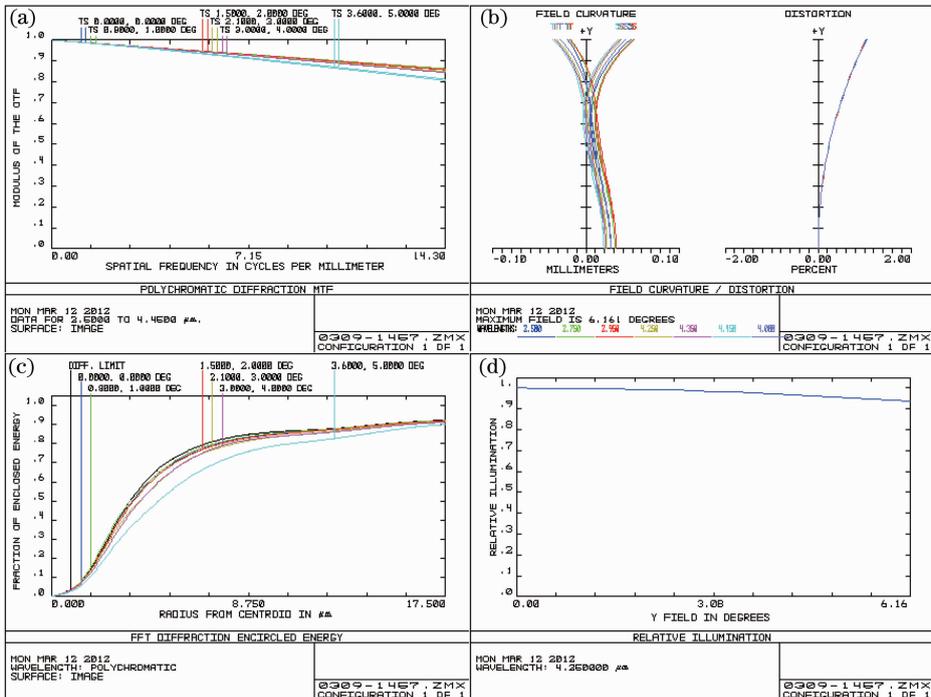


图 3 GEO-1 光学结构性能曲线。(a)点列图;(b)系统畸变图;(c)能量分布图;(d)像面照度

Fig. 3 Performance curves of GEO-1 optical system. (a) Diagram; (b) systematical distortion; (c) energy distribution; (d) illumination of image plane

由图 3 可知,在全频段、全视场范围内,在奈奎斯特频率(14.3 lp/mm)处,光学系统传递函数(MTF)设计平均值为 0.847,接近了衍射极限。并且能量比较集中,全频段畸变在 1.04% 以内,全视场在像元尺寸内能量集中度大于 88%,同时,边缘视场相对照度大于 90%,成像质量良好。

### 3.2 外遮光罩结构论证

当光学系统确定以后,抑制杂散光的一个有效办法是在通光口径处安装一个外遮光罩,它可以通过遮挡以削弱来自宇宙环境的杂散光,保证较高的信噪比,并保持光学系统内部及周边的热稳定性。

外遮光罩的设计需要综合考虑相机整体质量、空间、设备运行稳定性以及在轨运行实效性等一系列

因素。GEO-1 卫星外遮光罩设计采用可展开外遮光罩,在轨展开后,通过将外遮光罩挡在太阳和探测器之间,以避免阳光直射对探测器造成伤害。公布的结构参数如表 3 所示,实物图如图 4 所示。

表 3 GEO-1 卫星整体参数

Table 3 Overall parameters of GEO-1 satellite

| Parameter            | Value                           |
|----------------------|---------------------------------|
| Launch weight /Kg    | 4833                            |
| Weight in orbit /Kg  | 2547                            |
| Orbital altitude /Km | 35970                           |
| Working power /W     | 2361                            |
| Size /m              | 2.123×1.920×6.005 (contraction) |
|                      | 14.813×6.828×6.005 (expansion)  |

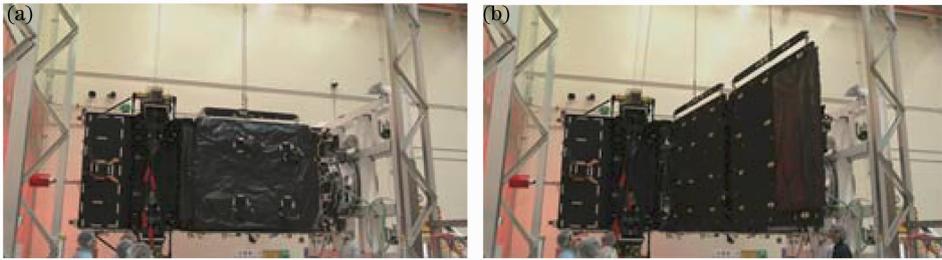


图 4 GEO-1 卫星外遮光罩实物图。(a)遮光罩未展开;(b)遮光罩展开

Fig. 4 Outer hood physical map of GEO-1 satellite. (a) Folded sunshield; (b) unfolded sunshield

根据相关资料可以推断,GEO 卫星的外遮光罩主要由三部分组成,如图 5 所示。图 5 中,板 1、板 2 为外遮光罩主体,板 3 作为辅助板,具备相对于板 2

的翻转功能,如图 6 所示,其中, $\alpha$ 、 $\beta$  为太阳光入射角( $\alpha > \beta$ ),当太阳处于地球圆盘边缘时的午夜时刻,可以进一步限制视场,以达到保护探测器的目的。

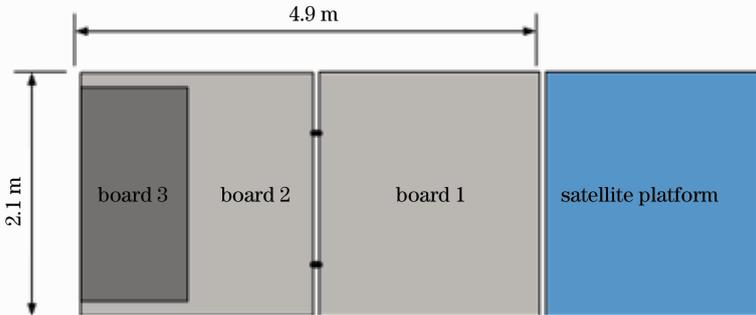


图 5 GEO-1 卫星外遮光罩模型图

Fig. 5 Outer hood model diagram of GEO-1 satellite

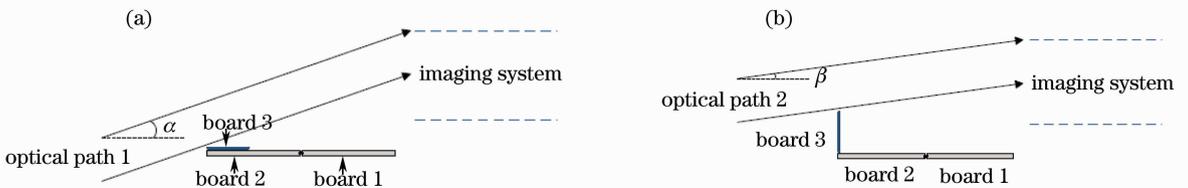


图 6 辅助板功能示意。(a)板 3 与板 2 垂直;(b)板 3 与板 2 平行

Fig. 6 Functional diagram of auxiliary board. (a) Board 3 is perpendicular to board 2; (b) board 3 is parallel to board 2

为了分析 GEO-1 卫星外遮光罩的工作模式,首先建立相应的 GEO-1 卫星体坐标系  $O-XYZ$ ,如图 7 所示,外遮光罩  $ABCD$  在  $X-Z$  平面内,则探测器入口面在  $X-Y$  平面内。由于遮光罩的遮挡,通常阳光照射到遮光罩背面的范围是有限的。两个方向上。定义遮光罩区域边界平面  $ABEF$  和平面  $BCGH$  到遮光罩平面  $ABCD$  的夹角分别为  $\theta, \phi$ ; 遮光罩的长度  $L$  约为 4.9 m,宽度  $l_{DC}$  约为 2.1 m。

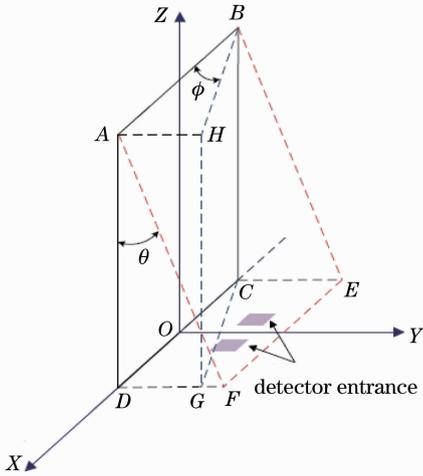


图 7 GEO-1 卫星体坐标系

Fig. 7 Body coordinate system of GEO-1 satellite

由图 7 可知,太阳相对于遮光罩的入射矢量可以分为  $\theta$  和  $\phi$  两个分量,遮光罩投影到  $X-Y$  面上的阴影区为长方形  $CEFD$  以及三角形  $DCG$ ,其阴影尺寸与二面角为  $\theta, \phi$  的关系为

$$\begin{cases} l_{DG} = \tan \phi \times l_{DC} \\ l_{DF} = \tan \theta \times L \end{cases}, \quad (2)$$

式中  $l_{DG}$  为点  $D$  与点  $G$  之间的距离,  $l_{DF}$  为点  $D$  与  $F$  之间的距离。

**GEO-1 外遮光罩工作原理:** 根据太阳运动轨迹和卫星在轨对地成像角度变化,调整卫星姿态角和遮光罩辅助板的转动,使太阳—遮光罩—内部光学结构处于恰当位置,保证遮光罩形成的阴影区恰好完全覆盖光学系统入射口,从而避免太阳杂散辐射直接进入系统而损坏探测器。结合图 7 所示的卫星体坐标系,选择两个典型时刻,对遮光罩性能进行具体分析。

**时刻 1:** 春分时,此时卫星、地球、太阳三者处于同一赤道平面内,除去地球东西张角  $\pm 8.7^\circ$  的地阴区,太阳相对于遮光罩的入射角  $\theta$  为  $8.7^\circ \sim 180^\circ$ ,  $\phi = 90^\circ$ 。由此推测,当  $\theta_{\min} = 8.7^\circ$  时,阴影面  $S_{CEFD}$  能完全覆盖到两个探测器的入口处,依靠外遮光罩可以完全解决午夜阳光入侵问题。

**时刻 2:** 夏至或冬至时,此时南北方向上太阳与赤道平面夹角为  $8.7^\circ$ ,太阳相对于外遮光罩的入射矢量  $\theta$  为  $0^\circ \sim 90^\circ$ 。当  $\theta = 90^\circ$  且  $\phi = 91.3^\circ$ ,阴影面  $S_{CEFD}$  和  $S_{DCG}$  能完全覆盖两个探测器的入口处,外遮光罩起到较好的遮蔽作用。随着时间的推移,  $\theta$  减小。当  $\theta$  小到一定程度时,阴影面  $S_{CEFD}$  将无法覆盖到两个探测器的入口处,因此外遮光罩开始失去遮蔽太阳的作用。午夜附近,角  $\theta$  接近  $0^\circ$ ,此时太阳入侵对成像系统的影响最大,需要通过翻转辅助板,使其挡在太阳与成像系统之间,来达到保护探测器的作用,但此时由于辅助板的遮挡,探测器无法成像。

根据以上分析,GEO-1 卫星的优势在于:采用可展开平板式外遮光罩,避免了发射过程中火箭整流罩空间的限制,同时通过辅助板的翻转作用,可以有效防止太阳杂散辐射进光学系统,大大减少了直射造成的系统内部及周围的热流量,到达保护探测器目的。不足之处在于:遮光罩的随动功能,需要卫星姿控设备和相应的地面控制单元予以配合,增大了卫星在轨运动的不稳定几率和相关后续图像处理单元的成本和复杂度。

## 4 结 论

针对 SBIRS GEO-1 卫星光机结构的特点进行了深入的调研与论证,设计并仿真实现了其双波段光学结构,并对相机可展开式外遮光罩进行了性能分析,均得到比较理想的效果。作为目前世界上最先进的静止轨道全球性地观测卫星,对 GEO-1 的研究论证为我国同类卫星的开发有一定的借鉴和参考意义。

## 参 考 文 献

- Jin Peili, Li Xiaolin, Mao Dengsen. Current situation and future development of IR detection systems for early warning [J]. Electro-Optic Technology Application, 2006, 21(3): 1-2.  
晋培利, 李晓林, 毛登森. 红外预警探测系统的现状和发展[J]. 光电技术应用, 2006, 21(3): 1-2.
- Zhu Xiuli, Yang Jun. Research on space warfare theory and equipment for America [J]. Electro-Optic Technology Application, 2008, 23(1): 7-8.  
朱秀丽, 杨 军. 美国空间战理论及电子装备发展研究[J]. 光电技术应用, 2008, 23(1): 7-8.
- J A Moody. SBIRS Background: Achieving Affordable Operational Requirements on the SBIRS Program [J]. AU/ACSC, 1997, 97-0548: 5-12.
- Pu Jialun, Cui Naigang, Guo Jifeng. Space-based infrared system and the analysis of its detecting capability [J]. Modern Deffnce Technology, 2008, 36(4): 68-72.  
浦甲伦, 崔乃刚, 郭继峰. 天基红外预警卫星系统及其探测能力分析[J]. 现代防御技术, 2008, 36(4): 68-72.
- Xue Qingsheng, Huang Yu, Lin Guanyu. Optical system design

of wide-angle and high-resolution space borne imaging spectrometer [J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(8): 0822001.  
薛庆生, 黄煜, 林冠宇. 大视场高分辨力星载成像光谱仪光学系统设计[J]. 光学学报, 2011, 31(8): 0822001.  
6 Wilson Thomas, Curtiss Davis. Naval earthmap observer (NEMO)satellite [C]. SPIE, 1999, 3753: 2-11.  
7 Pan Junhua. The methodic design of the IR imaging system with

large aperture [J]. Acta Optica Sinica, 2003, 23(12): 1475-1478.  
潘君骅. 大口径红外成像系统的光学设计[J]. 光学学报, 2003, 23(12): 1475-1478.  
8 P J Rogers. Athermalization of IR optical systems [C]. SPIE, 1990, 1354: 742-751.

栏目编辑: 韩 峰