

文章编号 1004-924X(2015)07-1822-07

## FY-3/中分辨率光谱成像仪星上黑体的 在轨太阳污染模拟与抑制

钮新华<sup>1,2\*</sup>, 周巨广<sup>1</sup>, 陈帅帅<sup>1,2</sup>, 王向华<sup>1,2</sup>, 丁雷<sup>1,2</sup>, 胡秀清<sup>3</sup>

(1. 中国科学院 上海技术物理研究所, 上海 200083;

2. 中国科学院 红外探测与成像技术重点实验室, 上海 200083;

3. 中国气象局国家卫星气象中心, 北京 100081)

**摘要:**对风云三号(FY-3)中分辨率光谱成像仪(MERSI)的黑体进行了在轨太阳污染模拟,以掌握在轨太阳污染对面源黑体的影响,同时研究了抑制太阳污染的措施。模拟了 FY-3 卫星轨道及全轨道周期内太阳光的入射角,使用 Tracepro 软件建立了太阳污染模拟的模型,利用太阳光入射与 MERSI 的相对位置对太阳污染进行仿真,分析了污染随光谱成像仪扫描镜旋转和卫星飞行位置的变化。最后,根据分析结果设计了太阳污染抑制措施,并对抑制效果进行了仿真验证。结果表明:在扫描镜附近区域设置遮光板,有效地抑制了太阳光的污染,使辐射量级小于 0.1 W,整个太阳污染功率下降了 97%以上,对黑体有良好的保护效果。另外,提出的方法提高了面源黑体温度的均匀性和稳定性,保证了红外通道星上定标精度。

**关键词:**风云-3/中分辨率光谱成像仪(FY-3/MERSI);面源黑体;太阳污染;Tracepro 仿真;污染抑制

**中图分类号:**TP732;P414.4 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20152307.1822

## Simulation and suppression of solar on-orbit pollution of FY-3/MERSI onboard blackbody

NIU Xin-hua<sup>1,2\*</sup>, ZHOU Ju-guang<sup>1</sup>, CHEN Shuai-shuai<sup>1,2</sup>,

WANG Xiang-hua<sup>1,2</sup>, DING Lei<sup>1,2</sup>, HU Xiu-qing<sup>2</sup>

(1. Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China;

2. Key Laboratory of Infrared Detecting & Imaging Technology,

Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China;

3. National Satellite Meteorological Center, China Meteorological Administration, Beijing 100081, China)

\* Corresponding autor, E-mail: nxh@mail.sitp.ac.cn

**Abstract:** The solar on-orbit pollution of a blackbody on the FY-3/MERSI(FY\_3 Medium Resolution Spectral Imager) was simulated to explore the effect of the solar on-orbit pollution on the surface source blackbody, meanwhile, the method to suppress the solar pollution was researched. The orbit of FY-3 satellite was simulated and the solar incidence angle at each point on the orbit was recorded. Then, Tracepro software was used to establish solar pollution simulation model and the relative posi-

收稿日期:2015-02-13;修订日期:2015-03-05.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 41471302)

tion of the sun and the imager was used to simulate the solar pollution and analyze the pollution changes when the imager's scan mirror scanned and the satellite flew. At last, suppression methods for the solar pollution was designed based on analyzed results, and the suppression effects were verified by simulation experiments. The results show that the solar pollution of the surface source blackbody has been removed by designing a light board near the scanning mirror, by which the power of pollution radiation is less than 0.1 W, reduced by over 97%, and protects the surface source blackbody effectively. Moreover, the uniformity and stability of the surface source blackbody are improved and the calibration precision of infrared channel onboard is guaranteed.

**Key words:** FY-3/Medium Resolution Spectral Imager (FY-3/MERSI); surface source blackbody; solar pollution; Tracepro simulation; pollution suppression

## 1 序 言

风云气象卫星的研制工作始于20世纪70年代,经历了三十多年的发展,目前实现了4个系列9颗卫星的发射和正常工作,成为了世界气象卫星观测系统的重要组成部分。随着全球气候变化加剧,天气预报、环境监测的要求越来越高,气象卫星的测量精度也变得越来越高<sup>[1-3]</sup>。我国自主研发的风云三号(FY-3)气象卫星是我国的第二代极轨气象卫星,是在FY-1气象卫星技术基础上发展起来的,其功能和技术有了很大提高,能够获取全球、全天候、三维、定量、多光谱的大气、地表、海洋特性等参数<sup>[4-6]</sup>。

FY-3/MERSI作为气象卫星风云三号上的扫描式光谱成像仪,用于提供全球的温、湿、云、辐射等参数,实现中期数值预报;监测大范围自然灾害和生态环境;探测地球物理参数,研究全球气候变化和环境变化等规律,为航空、航海和军事部门提供全球任意地区的气象信息<sup>[7]</sup>。

MERSI通过在轨辐射定标建立探测器数字化输出和地面光谱辐亮度之间的定量关系,并在任务期间监测和修正探测器的衰变。目前,中、长波红外通道的在轨辐射定标通过仪器扫描镜观测星上面源黑体实现<sup>[8]</sup>。从热力学定律可知,面源黑体的辐射能主要与黑体温度和表面发射率有关。因此,面源黑体温度的稳定性和均匀性对星上在轨定标精度起着决定性的作用<sup>[9]</sup>。

本文以FY-3/MERSI作为研究对象,分析其在轨运行时外热流对星上面源黑体的影响,并对可能出现的污染设计了抑制措施,提高了面源黑体温度的均匀性和稳定性,保证了红外通道星上

定标精度。

## 2 黑体红外定标技术

遥感仪器对红外辐射信号强度呈线性响应,因此,其响应率在星上可用二点法校正,即使用扫描观测的冷空间和常温黑体进行实时校正。

由地面红外定标试验确定的定标系数和深冷空间输出码值可以获得深冷空间等效辐射能量 $N_{sp}$ ,以及星上黑体温度系数 $d_{i,j}$ ,对星上定标数据进行处理,完成星上定标。光谱成像仪对参考黑体扫描信号值 $C_R$ ,并参考黑体的等效黑体温度 $T_R$ ;对外层空间扫描信号 $C_{sp}$ ,并参考黑体的辐射量 $N_R$ ,可以得到:

$$G = \frac{N_{sp} - N_R}{C_{sp} - C_R}, \quad (1)$$

$$I = N_R - G * C_R, \quad (2)$$

式中: $N_{sp}$ 为等效的外层空间辐射量。

$N_R$ 的计算过程为:

$$N_R = \frac{c_1 * v_c^3}{e^{\frac{c_2 * v_c}{T_{ER}}} - 1}, \quad (3)$$

$$T_{ER} = T_R * A_1 + B_1. \quad (4)$$

为此,在光谱成像仪红外辐射定标后提供给用户的温度反演参数:

- (a) 红外通道的光谱响应函数;
- (b) 外层空间的等效辐射量 $N_{sp}$ ;
- (c) 求取参考黑体温度 $T_R$ 所需的系数 $d_{i,j}$ 。

## 3 FY-3/MERSI 在轨太阳污染模拟

### 3.1 太阳污染组成分析

FY-3/MERSI采用45°扫描镜扫描的工作方

式,通过扫描镜观测星下点的地球目标和面源黑体。根据 MERSI 轨道及工作方式,可能存在的太阳污染源<sup>[10]</sup>组成如下:

(a)直射光线

太阳光穿过光机结构的间隙,能够直接照射到黑体表面的光线。

(b)散射光线

太阳光入射到扫描镜附近的机械零件表面后散射形成的杂散光。尽管机械零件表面采用了防杂散光处理,但仍有 10%左右的散射率,需要对此影响进行分析。

(c)反射光线

太阳光入射经过扫描镜表面的反射能够入射到黑体表面的光线。整个扫描镜表面都具有较高的反射率,需要对扫描镜不同工作角度下反射光线对黑体的影响进行分析。

### 3.2 轨道模拟

FY-3 卫星运行在近极地太阳同步轨道上,轨道高度为 836 km。利用软件建立 FY-3 的卫星轨道,从中可以获得卫星在轨运行过程中每个位置处太阳入射光与载荷三轴的夹角,从而用于载荷污染分析。图 1 所示为卫星飞过南极附近的示意图,当卫星从地球阴影区飞向光照区时,太阳光照射到卫星平台,此时可能会有部分光线对黑体造成污染。

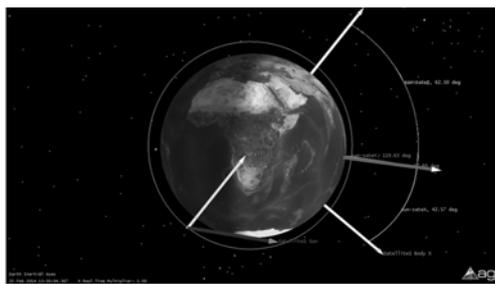


图 1 卫星轨道模拟示意图  
Fig. 1 Simulation diagram of satellite trajectory

### 3.3 太阳光入射角

MERSI 上的黑体安装在卫星 XY 平面上,面源朝向为 +Z 轴方向,因此,对于太阳光,其入射角在满足与 +Z 轴夹角小于 90° 时才有可能入射到黑体表面,如图 2 所示。

由卫星坐标轴与太阳光入射角位置可知,太阳光 Y 轴入射角度越大,太阳光可更多地入射到

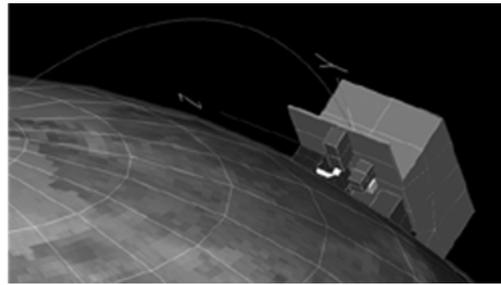


图 2 太阳光与 MERSI 相对关系示意图  
Fig. 2 Relative diagram of sunlight vs MERSI

黑体表面,对全年太阳光 Y 轴入射角进行分析,如图 3 所示。

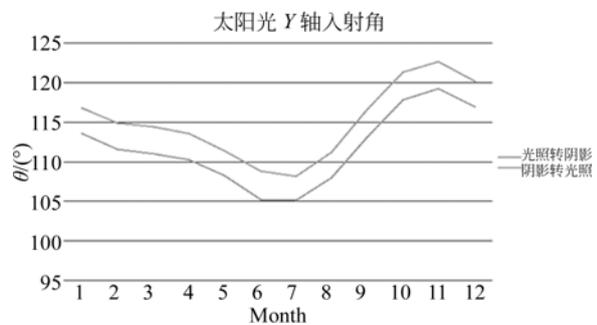
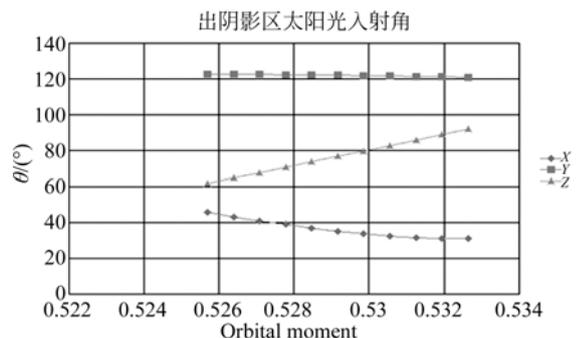


图 3 全年太阳光 Y 轴入射角  
Fig. 3 Incidence angles of Y axis of annual sunlight

在 11 月 10 日附近时,太阳光 Y 轴入射角达到全年最大值,此时太阳光污染产生的可能性及污染程度最大,这里对此最大入射角进行太阳污染分析和抑制措施设计,以保证极端情况下的抑制效果。图 4 所示为 FY-3 卫星轨道(升交时 13:40)11 月 10 日出阴影区、出光照区太阳光入射角(矢量从卫星指向太阳)。

从图 4 可以看出,卫星在昼夜转换期间将有小于 10 min 的时间满足太阳入射条件;同时,通



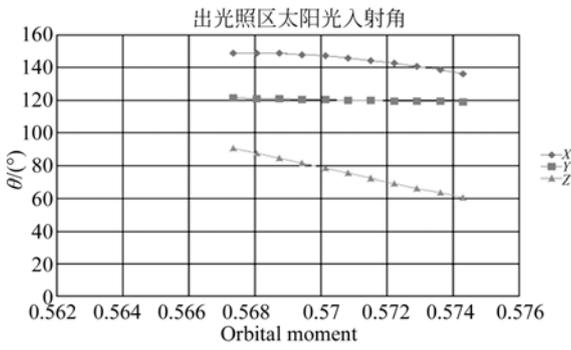


图 4 太阳光入射与卫星坐标系夹角

Fig. 4 Included angles of sunlight incident and satellite coordinate system

过对全年轨道的分析,在出阴影区、出光照区附近,满足太阳入射条件的仪器在轨飞行时长小于 10 min。

### 3.4 出阴影区太阳污染分析

针对 MERSI 扫描电机侧设置有 2 块遮光板的情况,按 11 月 10 日的卫星轨道进行分析,当卫星飞行由阴影区飞向光照区时,黑体表面太阳光入射的最大功率分布如图 6 所示。

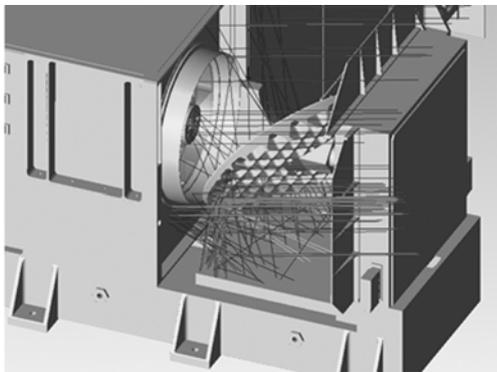
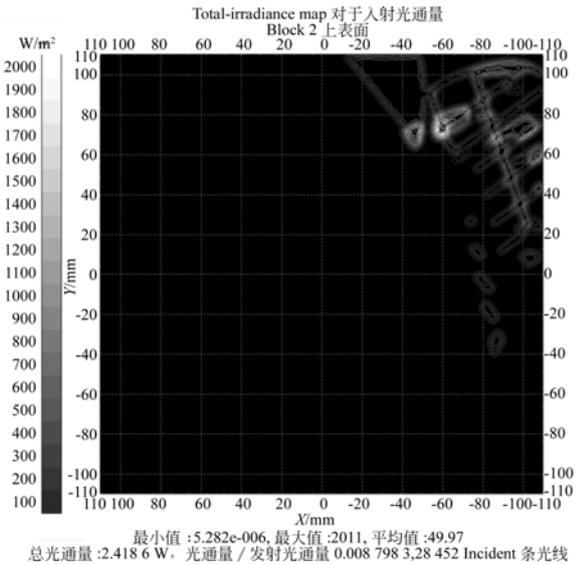


图 5 阴影区转至光照区太阳光线入射追迹图

Fig. 5 Sunlight tracing of shadow zone to light zone

由光线追迹可知入射光线由两部分组成:一部分为经扫描镜反射后入射到黑体表面的太阳光,另一部分为直射到黑体表面的太阳光。当扫描镜旋转至 +50°左右时,黑体表面上的污染功率最大,为 2.419 W。此时,入射到黑体表面的太阳光大部分是由扫描镜背面反射引入,少部分直接穿过光机机械间隔入射。随着卫星飞入光照区,太阳光 Z 轴入射角增大,太阳污染逐渐减少至消失,整个污染时间小于 10 min。



最小值:5.282e-006,最大值:2011,平均值:49.97  
总光通量:2.418 6 W, 光通量 / 发射光通量 0.008 798 3,28 452 Incident 条光线

图 6 出阴影区太阳入射功率分布

Fig. 6 Solar incident power distribution out of shadow zone

### 3.5 出光照区太阳污染分析

采用与出阴影区相类似的处理方法,对出光照区的太阳光污染进行仿真。图 8 所示为卫星飞至北极附近光照区进入阴影区时,太阳光对黑体表面的污染分布。

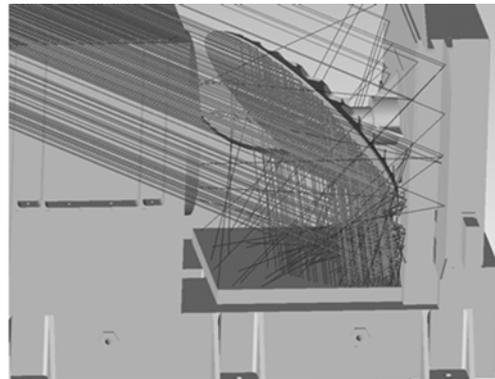


图 7 光照区转至阴影区时的太阳光线入射追迹图

Fig. 7 Sunlight tracing of light zone to shadow zone

从图 8 中可以看出,出光照区的太阳光污染由太阳光直射黑体、扫描镜反射到黑体以及其他机械表面反射到黑体所组成。相对于出阴影区的太阳光经扫描镜背面反射至黑体,出光照区的阳光照射在扫描镜反射面上,因此入射负号到黑体表面的能量将更高。当扫描镜旋转至 -140°左右时,黑体表面上的污染功率最大,为 16.058 W。

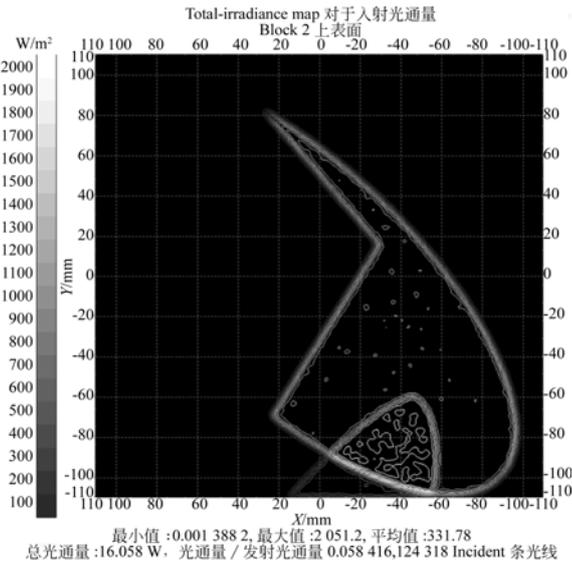


图 8 出光照区太阳入射功率分布

Fig. 8 Solar incident power distribution out of light zone

随着卫星飞出光照区,整体污染功率呈上升趋势直至最大值,卫星进入地球阴影区时刻太阳被地球遮挡,太阳污染消失,整个太阳光污染时间小于 10 min。

综上所述,在目前状态下,当卫星出阴影区或出光照区时,MERSI 的面源黑体都将受到了一定时间和功率的太阳污染照射,需对这些太阳污染进行定标精度影响分析及进一步抑制设计。

### 3.6 太阳污染影响分析

在卫星出阴影区或出光照区时,部分太阳光能照射到黑体表面,这些污染会引起黑体表面温度上升。对于 FY-3/MERSI,这部分太阳污染在仪器扫描成像的有效视场范围之外,不会影响其正常工作;由于星上红外定标是通过接收特定温度下充满瞳面的面源黑体辐射总能量进行标定,通过对面源黑体结构及测温点的优化布局可以消除太阳污染所致黑体温度不均匀性对定标精度的影响。

MERSI 的星上红外定标器使用一体化同心型槽结构,如图 9 所示,即有效辐射面形状为同心 V 型深环槽。采用这种面、体一体化的面源黑体结构可以提高其辐射出射度,使用强发黑技术来提高其法向比辐射率。面源黑体内部安装有 7 个测温电阻,其安装位置已经经过热设计优化布局,通过算法可以获得准确的黑体均化温度值,从而保证黑体在轨定标精度,其在轨定标精度已得到

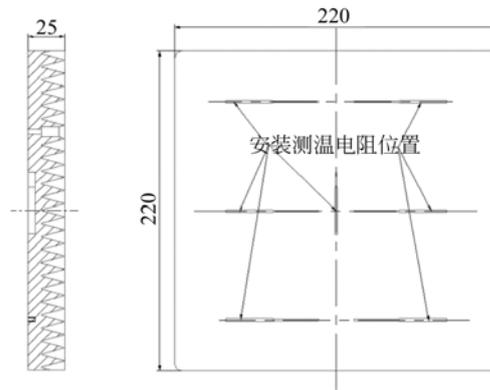


图 9 红外星上定标器结构

Fig. 9 Scaler structure on satellite

了卫星验证。

## 4 FY-3/MERSI 在轨太阳污染抑制措施

在保证平台资源的前提下,为了降低数据处理的复杂度,同时避免数据处理带来的额外误差,对这部分太阳污染设计了抑制措施。

在出光照区时,扫描镜表面对太阳光的反射和阳光直射是黑体表面污染的主要来源。通过在主镜两侧各设置 1 块挡板(图中透明部分),尺寸分别为:135 mm×340 mm(侧面)和 255 mm×100 mm(上面)可有效遮挡太阳光的入射<sup>[11]</sup>,如图 10 所示。

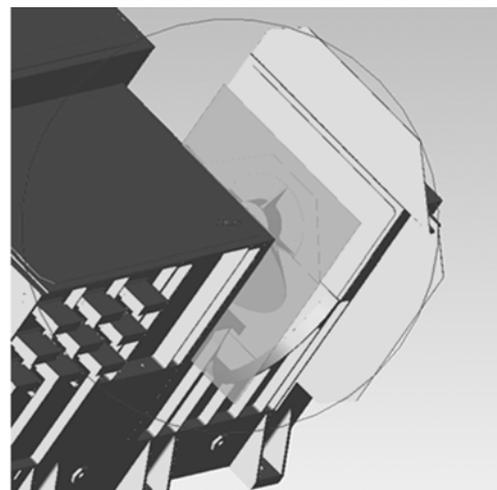


图 10 北极方向遮光板

Fig. 10 Light screen of arctic direction

设置遮光板后,在扫描镜旋转一周的过程中,阳光都无法照射到扫描镜和黑体上,整个黑体表面接收到的太阳辐射功率为 0.052 6 W,比增加遮光板前下降了 99%,遮光板对太阳污染起到了良好的抑制效果。

同样的,通过遮光板的设置,在出阴影区处添加侧边遮光板,尺寸为 135 mm×290 mm,如图 11 所示,整个黑体表面接收到的太阳辐射功率为 0.064 2 W,比增加遮光板前下降了 97%。

通过热力学分析进一步确认污染抑制措施的

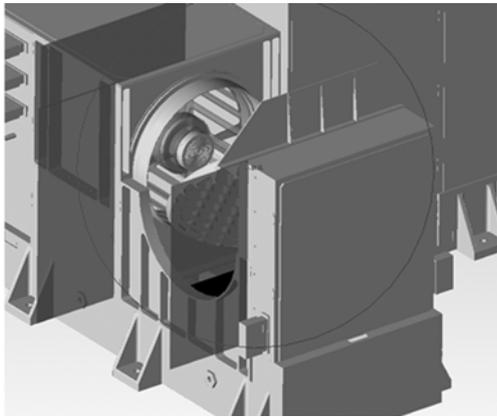


图 11 南极方向遮光板

Fig. 11 Light screen of antarctic direction

有效性。图 12 和 13 分别为添加遮光板后,卫星出阴影区、出光照区整个面源黑体表面温度的均匀性分布。

为了保证力学强度及结构可靠性,增设的遮光板将安装在卫星平台,太阳污染抑制措施实施后,在卫星出阴影区和光照区的过程中,整个面源黑体表面温度分布均匀,表面温度均匀性优于 0.1 K。遮光板能够起到消除太阳光污染的作用。

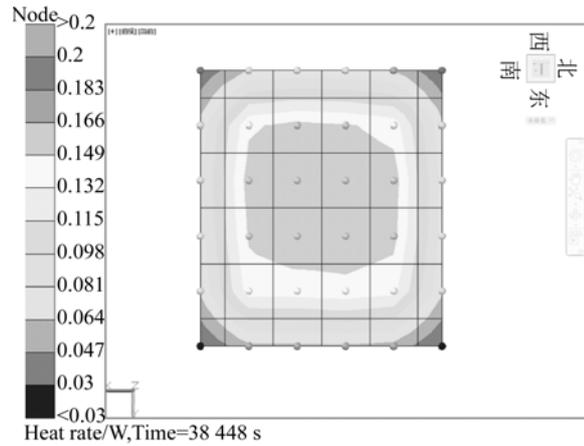


图 13 卫星出地球光照区表面热流分布(添加遮光板)

Fig. 13 Surface heat flux distribution out of light zone

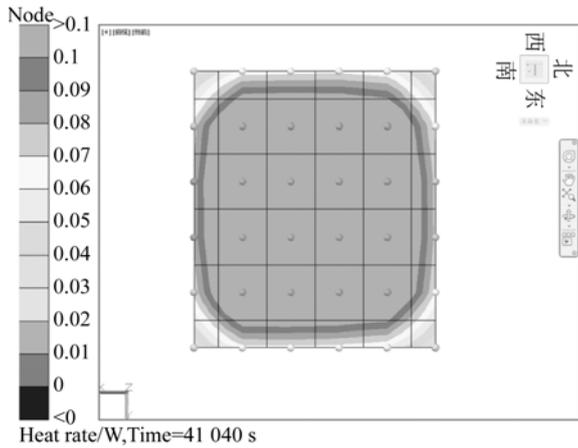


图 12 卫星出地球阴影区表面热流分布(添加遮光板)

Fig. 12 Surface heat flux distribution out of shadow zone

### 5 结 论

光谱成像仪的在轨辐射定标是成像仪探测器数据量化应用的基础。对于红外通道,星上面源黑体是红外辐射定标的基准,其温度的稳定性和均匀性对定标有着重要的影响。本文对 FY-3/MERSI 进行在轨太阳污染模拟仿真,并对出阴影区、出光照区可能出现的太阳污染进行了抑制措施的仿真验证。结果表明,在扫描镜附近区域设置的遮光板,可有效地抑制太阳光的污染,对黑体有良好的保护效果。整个太阳污染功率下降了 97% 以上,对红外通道星上定标精度的保证起到了良好的作用。

### 参考文献:

[1] 张鹏,杨虎,邱红,等. 风云三号卫星的定量遥感应用能力[J]. 气象科技进展,2012,2(4):6-11.

ZHANG P, YANG H, QIU H, et al.. Quantitative remote sensing from the current Fengyun 3 satellites [J]. *Advances in Met S&T*, 2012,2(4):6-11.  
 [2] 董超华,杨军,卢乃锰,等. 风云三号 A 星(FY-3A)

- 的主要性能与应用[J]. 地球信息科学学报, 2010, 12(4):458-465.
- DONG CH H, YANG J, LU N M, *et al.*. Main characteristics and primary applications of polar orbiting satellite FY-3A [J]. *Journal of GEO\_Information science*, 2010, 12(4):458-465.
- [3] 范天锡. 风云三号气象卫星的特点和作用[J]. 气象科技, 2002, 30(6):321-327.
- FAN T X. Characteristics and applications of Fengyun 3 satellites [J]. *Meteorological science and Technology*, 2002, 30(6):321-327.
- [4] 杨军, 董超华, 卢乃锰, 等. 中国新一代极轨气象卫星——风云三号[J]. 气象学报, 2009, 67(4):501-509.
- YANG J, DONG C, LU N M, *et al.*. FY-3A: the new generation polar-orbiting meteorological satellite of China[J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 2009, 67(4):501-509.
- [5] YANG J, ZHANG P, LU N M, *et al.*. Improvements on global meteorological observation from the current Fengyun 3 satellites and beyond[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2012, 50(12):4846-4853.
- [6] YANG Z, LU N M, SHI J, *et al.*. Overview of FY-3 payload and ground applications system[J]. *IEEE Transaction on Geoscience and remote Sensing*, 2012, 50(12):4846-4853.
- [7] 钮新华. 多焦平面光谱成像仪光学性能实现技术研究[D]. 上海: 中科院上海技术物理研究所.
- NIU X H. *Techniques to get the performace of optical system for spectroradiometry imager with FPAs*[D]. Shanghai: shanghai Institute Technical Physics of the Chinese Academy of Sciences.
- [8] 李照洲, 郑小兵, 唐伶俐, 等. 光学有效载荷高精度绝对辐射定标技术研究[J]. 遥感学报, 2007, 11(4):581-588.
- LI ZH ZH, ZHENG X B, TANG L L, *et al.*. An advanced technology of absolute radiometric calibration for optical remote sensors [J]. *Journal of Remote Sensing*, 2007, 11(4):581-588.
- [9] XIONG X X, WILLIAM B. An Overview of MODIS Radiometric Calibration and Characterization [J]. *Advances in Atmospheric Science*, 2006, 23(1):69-79.
- [10] 黄强. 空间光学系统的杂散光分析与研究[D]. 上海: 中科院上海技术物理研究所.
- HUANG Q. *Analysis and study on stray light of space optical system* [D]. Shanghai: Shanghai Institute Technical Physics of the Chinese Academy of Sciences.
- [11] 李欣耀, 原育凯, 裴云天, 等. 风云二号扫描辐射计可见杂光分析与抑制[J]. 科学技术与工程, 2006, 6(12):1605-1608.
- LZ X Y, YUAN Y K, PEI T Y, *et al.*. Analyzing and suppressing visible stray light of scanning radiometer for FY-2 meteorological satellite [J]. *Science Technology and Engineering*, 2006, 6(12):1605-1608.

#### 作者简介:



钮新华(1968—), 男, 博士, 研究员。1990年、1995年于浙江大学分别获得学士、硕士学位, 2005年于中科院上海技术物理研究所获博士学位。主要研究方向为: 航天器总体方案设计技术、光学系统设计和校正技术、非球面加工检验技术以及红外光学系统背景技术等。E-mail: nxh@mail. sitp. ac. cn



胡秀清(1973—), 1996年于南京大学获学士学位, 现为国家气象卫星中心研究员, 主要从事星载传感器辐射定标和与气象卫星工程业务相关的工作。E-mail: huxq@cma. gov. cn

(版权所有 未经许可 不得转载)