

文章编号: 1672-8785(2013)08-0001-05

风云二号辐射计的红外杂散光抑制研究

沈 易^{1,2} 李欣耀^{1,2} 陈福春^{1,2}

(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)

摘 要: 风云二号卫星云图显示扫描辐射计存在红外杂散辐射, 因此需要对光学系统作进一步改进以减少杂散辐射。利用 TracePro 软件对该系统的红外杂散辐射的形成机理和入侵途径进行了仿真和分析。基于分析结果对该光学系统的红外杂散辐射提出了几项有效抑制措施, 并通过计算系统的点源透过率 (Point Source Transmittance, PST) 函数对这些改进措施进行了评价。

关键词: 红外杂散光; 杂散光抑制; 点源透过率; 仿真分析

中图分类号: TP731 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1672-8785.2013.08.001

Research on Suppression of Stray Infrared Light in FY-2 Radiometer

SHEN Yi^{1,2}, LI Xin-yao^{1,2}, CHEN Fu-chun^{1,2}

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

200083, China; 2. Key Laboratory of Infrared System Detection and Imaging

Technology, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 20083, China)

Abstract: Because the nephograms of FY-2 meteorological satellite show that there exists stray infrared light in the radiometer, it is necessary to further modify the optical system used in the radiometer so as to suppress the stray infrared light. The generation mechanism and path of the stray infrared light in the optical system are simulated and analyzed by the TracePro software. On the basis of the analysis result, several measures which can be used to suppress the stray infrared light of the optical system effectively are proposed. Finally, these measures are evaluated by calculating the Point Source Transmission (PST) function of the optical system..

Key words: stray infrared light; stray light suppressing; PST; simulation and analysis

0 引言

空间光学系统的红外杂散辐射按照来源可以分为两类: 一类来源于空间的太阳和地球等外部辐射源, 称为外部杂散辐射; 另一类来源于红外仪器自身的背景热辐射, 称为内部杂散辐射。风云二号辐射计是一种由 R-C 主光学系统、后光学系统以及定标光学系统组成的涵盖

可见光到长波红外范围的 5 波段扫描辐射计, 其主镜口径为 400 mm, 次镜口径为 120 mm, 可见光焦距为 3000 mm, 红外焦距为 521 mm。图 1 为该辐射计的光路示意图。

1 辐射计的红外杂散辐射机理分析

在仿真软件中建立辐射计的倒追模型 (见图 2)。从红外探测器的光敏元出发, 朝主镜方向倒

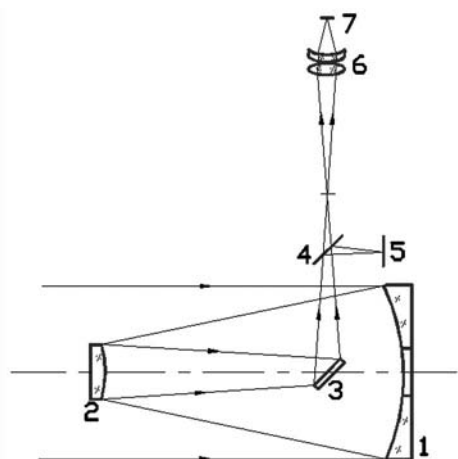
收稿日期: 2013-06-07

作者简介: 沈易 (1982-), 女, 河北衡水人, 硕士, 主要研究方向为空间光学系统的杂散光计算与仿真。

E-mail: wendy_cn@163.com

<http://journal.sitp.ac.cn/hw>

INFRARED (MONTHLY)/VOL.34, No.8, AUG 2013



1主镜， 2次镜， 3折镜， 4分离镜， 5可见探测器， 6红外中继透镜， 7红外探测器

图1 辐射计的光路示意图

追，经折镜后的追迹光线全部落在次镜罩里面。也就是说，若倒追时追不到辐射计之外的辐射源，则可判断辐射计并不存在红外直射杂散光。辐射计的红外杂散辐射主要是入射光线在孔栏边缘上的衍射所产生的杂光以及通过光机重要面的反射和散射所产生的二级杂光。

1.1 衍射杂光分析

当杂散辐射源的辐射入射到辐射计的离轴角较小时，通过中心遮拦的光学系统的衍射所产生的杂散辐射会占较大的比重。随着角度的不断增加，杂散辐射的总能量会减小，次镜和主镜的散射所产生杂散辐射的比重会逐渐加大。当离轴角较大时，主镜的散射所产生的杂散辐射成为主要成分^[1]。

辐射计光路中不存在红外直射杂光。由光的波粒二象性可知，与长波红外 IR_1 波段 ($10.3 \sim 11.3 \mu m$) 和 IR_2 波段 ($11.5 \sim 12.5 \mu m$) 相比，中波红外 IR_3 波段 ($3.5 \sim 4.0 \mu m$) 和 WV 波段 ($6.3 \sim 7.6 \mu m$) 更显现出粒子性，中波一次散射辐射占总杂散辐射的权重比长波的大。与中波红外波段相比，长波红外波段显示的波动性较好，此时一次衍射辐射占据主要地位^[2]。风云二号 C 星的云图表明，圆盘外长波 IR_1/IR_2 杂散辐射比较严重，而中波 IR_3/WV 杂散辐射并不明显。该结果与理论分析较为接近。

通过合理的光学设计和光阑应用可以减少衍射杂光，其中里奥光阑和视场光阑是两种最

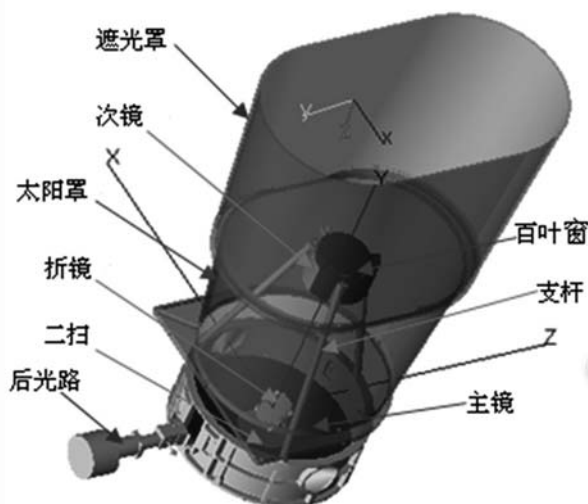


图2 辐射计的光机模型

为常用的光阑。在二次成像系统中，视场光阑和里奥光阑结对使用，可使来自孔径光阑的散射和衍射在里奥光阑处被阻挡，从而起到抑制杂散光的作用。

1.2 红外重要面分析

红外杂散辐射以光机表面上的一次散射杂光为主，即通过光机重要面的反射、一次散射产生，所以在对其进行分析时需要从找出辐射计的重要面入手。红外探测器直接能“看到”的表面称为关键面，可以通过光线倒追法找出。被杂光光源直接照射到的表面称为照明面，可以通过光线正追法找出。将既是关键面又是照明面的表面定义为重要面。从杂光抑制的角度考虑，光机系统中的重要面应该减至最小。

表1列出了通过软件仿真及分析得到的辐射计的红外重要面与照明路径数据。

在 TracePro 软件中对表1所列的辐射计红外重要面进行定量分析，按立体角分布可以得到饼图(见图3)。

图3中，次镜的遮光罩以及锁紧螺母与垫圈部分相对于探测器的立体角分布约占44%，该处产生的杂光比重最大；辐射计中3根支杆及主镜室壳筒表面产生的杂散辐射次之(在轨运行的风云二号卫星辐射计中，已经对这些部位采取了喷Z306黑漆的措施，对散射杂光的抑制效果非常明显)；再次就是主镜孔内机械结构处的杂

表 1 辐射计的红外重要面数据

照明角度		照明路径	重要面	进入探测器的路径
1	0° ~ 2°	平行光光源 → 主镜	折镜框、折镜支架	→ 中继透镜 → 红外探测器
		→ 次镜 →	主镜孔内机械件	→ 次镜 → 折镜 → 中继透镜 → 红外探测器
3	5.2°	平行光光源 → 主镜	主镜边缘小平面	→ 次镜 → 折镜 → 中继透镜 → 红外探测器
		→ 次镜 →		
4	5.5° ~ 6°	平行光光源 → 主镜	主镜室壳筒	→ 次镜 → 折镜 → 中继透镜 → 红外探测器
		→ 次镜 →		
5	6.5° ~ 7°	平行光光源 → 主镜	次镜罩及螺母、垫圈	→ 折镜 → 中继透镜 → 红外探测器
		→ 次镜 →		
6	多角度	平行光光源 → 主镜	三根支杆	→ 次镜 → 折镜 → 中继透镜 → 红外探测器
		→		→ 主镜 → 次镜 → 折镜 → 中继透镜
		平行光光源 →		→ 红外探测器

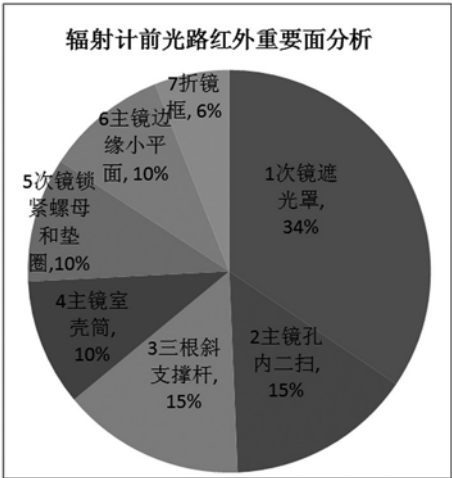


图 3 辐射计的前光路红外重要面分析

光，它是经次镜和折镜反射进入中继透镜后到达探测器的，可以考虑在次镜表面及后光路中适当采取抑制措施。

2 里奥光阑的设置

在系统出瞳处设置的冷光阑称为里奥光阑，其特性与孔径光阑相同。它可以限制关键面的面积，缩短杂光辐射的传输途径。里奥光阑的另一个作用就是减少系统的衍射杂光，使经孔径光阑衍射后的杂光在里奥光阑处再一次产生衍射，从而使到达系统像面探测器的衍射杂光经历两次衍射衰减^[3-4]。

风云二号自 E 星辐射计起开始在光学系

统的出瞳位置设置里奥光阑（光阑半径为 1.7 mm），如图 4 所示。表 2 列出了该辐射计红外光路中各波段的出瞳位置和直径数据。

利用 TracePro 软件对杂散光进行追迹，并计算和比较在辐射计光路中设置里奥光阑前后系统的 PST 值，其结果见图 5。可以看出，随着红外 PST 函数值的整体下降，杂散辐射整体减少了。

表 2 各个红外波段的出瞳位置和直径

参 数	波 段			
	IR ₁	IR ₂	IR ₃	WV
出瞳离开像元的位置 (mm)	3.93	3.93	3.85	3.93
出瞳直径 (mm)	3.05	3.05	3.02	3.04

3 次镜罩内表面的涂层更改

根据辐射计的红外关键面分析，当离轴角为 7° 左右时，由辐射计次镜罩内表面 (包括次镜锁紧螺母、垫圈) 上一次和多次散射所产生的杂散光占全部杂光的比重非常大。

在光机系统的红外杂光抑制中，在机械表面喷涂吸收率较高的涂层是一种重要手段。风云二号辐射计次镜罩内表面使用的镀层材料为黑镍。若采用 Z306 美国航天用漆，则可大幅降低红外杂散辐射。

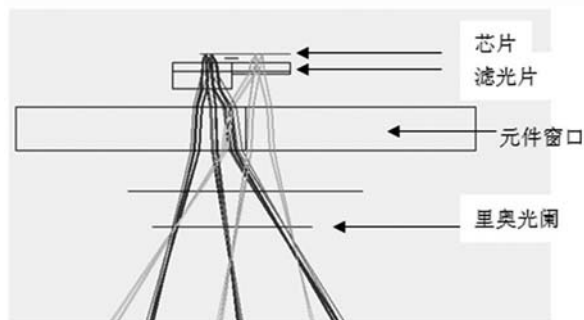


图 4 辐射计红外通道的里奥光阑示意图

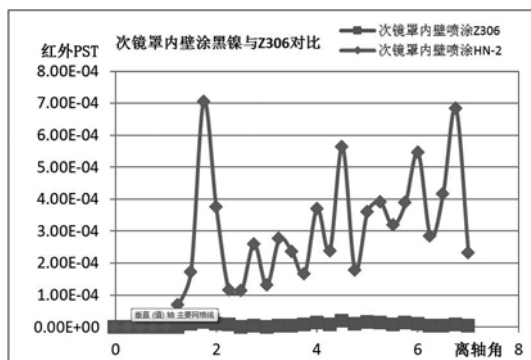
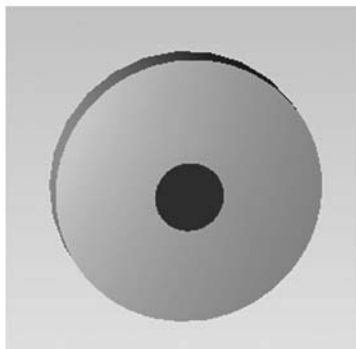


图 6 红外 PST 对比

TracePro 仿真结果表明，在将次镜罩内表面的材料由黑镍改为 Z306 之后，系统的红外 PST 值可以下降 95% 以上，如图 6 所示。Z306 黑漆已用于辐射计的 3 根支撑杆及主镜室的表面涂层，在轨运行效果良好。

4 次镜的镜面盲区处理

根据辐射计的红外重要面分析，当离轴角在 2° 以内时，主镜中心孔内机械件的一次散射光是经次镜和折镜反射进入中继透镜后到达探测器的，它是系统杂光的重要组成部分。



(a) 次镜盲区的示意图

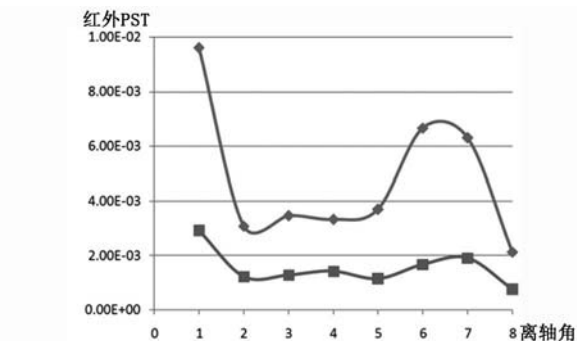


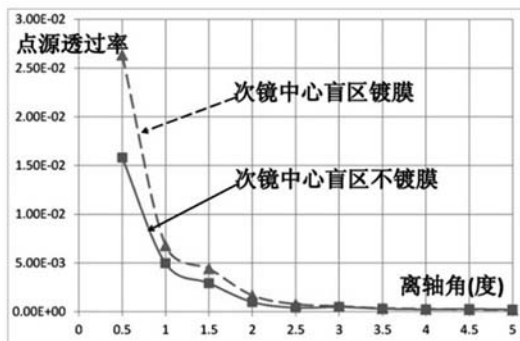
图 5 设置里奥光阑前后的红外 PST 变化

风云二号辐射计是一个中心有遮挡的 R-C 光学系统，次镜直径为 120 mm。根据光学设计，次镜表面上的中心区域约有 9% 的镜面面积（见图 7(a)）不参与成像，称为盲区。应采取“挖空”等类似措施，以免盲区的反射光混入信号光后形成系统杂散光。在此，我们按照信号光在次镜表面上的分布，留下适当余量，采用对次镜中心椭圆形盲区不镀膜的方式对整个镜面进行镀膜。

通过软件追迹计算了采用两种镀膜方式前后辐射计系统的红外 PST 值。计算结果表明，对次镜盲区不镀反射膜这一措施能够减少约三分之一的红外杂散光，其计算结果见图 7(b)。

5 第一像面附近的视场光阑设置

辐射计红外光路的成像过程如下：目标辐射经 R-C 系统收集和会聚后，通过 45° 平面折镜折向，然后经轴外主焦面（即第一像面）到达中继光学系统，最后会聚到辐射制冷机中的红外



(b) 不同镀膜方式下的系统红外 PST 值对比

图 7 次镜的镜面盲区

探测器。

对红外后光路进行了仿真。图 8 为辐射计红外后光路的杂散光仿真图, 图 9 为信号光的仿真图。在信号光最集中的第一像面处设置光阑, 可以抑制部分进入后光路的红外杂散光, 而且其抑制效率较高。



图 8 FY-2 辐射计红外光路中的红外杂散光

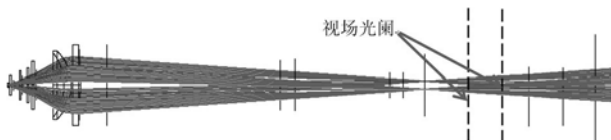


图 9 FY-2 辐射计红外光路中的红外信号光

我们将光阑设计成具有上下对称结构的两级视场光阑, 即具有两个完全一样的棱台。棱台角度 θ 为 45° , 棱台高度 h 为 2 mm (见图 10)。

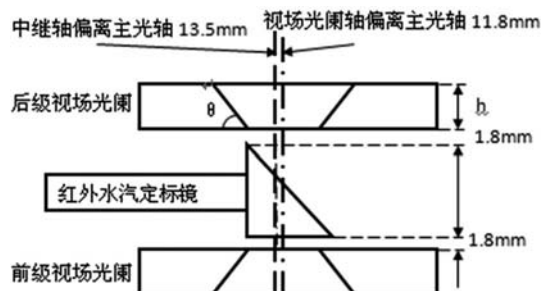


图 10 两级视场光阑的示意图

利用 TracePro 软件进行了仿真并计算了设置两级视场光阑前后系统的红外 PST 值。结果表明, 在该处设置视场光阑能够减少约三分之

一的长波红外杂散光, 如图 11 所示。

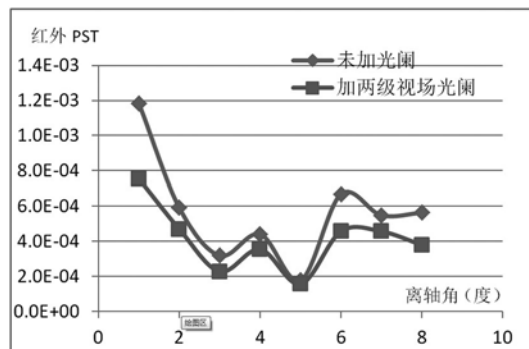


图 11 增设视场光阑前后的红外 PST 对比

6 结束语

本文研究了风云二号辐射计红外杂散辐射的形成机理和入侵途径, 并有针对性地提出了几项抑制措施。其中, 增加里奥光阑这一措施的有效性已在风云二号 E 星、F 星上得到了验证, 卫星云图中的杂散辐射整体下降了 30% ~ 40% [5]; 针对次镜盲区不镀膜这一措施, 我们在实验中对其进行了验证, 并取得了良好的杂光抑制效果; 更改涂层以及增设视场光阑的措施还有待于在卫星成功发射后接受星上验证。

参考文献

- [1] 王骞, 张景旭, 郭劲. 红外系统中杂散辐射的抑制方法 [J]. 光机电信息, 2002, 25(12): 21-24.
- [2] 李欣耀, 裴云天, 王成良. 空间光学系统中红外杂散辐射的抑制方法 [J]. 红外, 2011, 32(1): 31-34.
- [3] Robert J N. Reduction of Diffraction of Use of a Lyot Stop [J]. JOSA, 1973, 63(11): 1399-1402.
- [4] Jhonson B R. Analysis of Diffraction Reduction by Use of Lyot Stop [J]. JOSA A, 1987, 4(8): 1376-1384.
- [5] 陈博洋, 李欣耀, 郭强, 等. FY-2E 卫星杂散光评价与分析 [J]. 红外技术, 2010, 32(11): 636-639.