

# 一种光学载荷在轨杂散光效应全链路自动仿真方法

殷恺<sup>1,2,3</sup>, 钮新华<sup>1,3\*</sup>, 张镔<sup>1,3</sup>

(1. 中国科学院上海技术物理研究所, 上海 200083;

2. 中国科学院大学, 北京 100049;

3. 中国科学院红外探测与成像技术重点实验室, 上海 200083)

**摘要:** 针对极轨气象卫星 FY-3C 载荷可见光扫描辐射计(VIRR)在轨红外定标时存在温度反演不一致的现象展开分析, 提出了一种全链路自动化仿真分析方法, 将仪器结构与卫星轨道参数和卫星平台环境相结合, 通过对光机模型的高精度光线追迹来得到杂散光影响的定量化结果。仿真模拟了在轨红外定标和太阳光入射两种情况, 确定了太阳杂散光的入射路径, 解释了温度反演不一致的原因。将仿真结果与卫星在轨数据进行比对, 验证了仿真方法的有效性。该方法可用于同类型载荷的在轨杂散光分析仿真工作, 同时也为历史数据的再定标修正提供参考。

**关键词:** 可见光红外扫描辐射计; 太阳杂散光; 在轨红外定标; 仿真自动化

中图分类号: TN202 文献标识码: A

## A whole chain automatic simulation method for the on-orbit stray light effect of optical payloads

YIN Kai<sup>1,2,3</sup>, NIU Xin-Hua<sup>1,3\*</sup>, ZHANG E<sup>1,3</sup>

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

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

3. Key Laboratory of Infrared System Detection and Imaging Technology, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China)

**Abstract:** The temperature inversion inconsistency phenomenon is analyzed for the on-orbit IR calibration of Visible and InfraRed Radiometer (VIRR) which is a payload onboard polar-orbiting meteorological satellite FY-3C. A specific methodology, i. e., the whole chain automatic simulation and analysis, is proposed. This method involves the orbital parameters and the satellite platform environment. By means of the ray trace of the opto-mechanical structure with high precision, the quantified effect of solar stray light is obtained. The simulation includes on-orbit IR calibration and solar incidence, resulting in the identification of the incidence path of solar stray light as well as the explanation for the temperature inversion inconsistency. Through the comparison between the simulated results and the on-orbit data of the satellite, the effectiveness and the validity of the method are verified. This method can be applied to the simulation and analysis of on-orbit stray light effect of the same-typed payloads. This work can also provide references to the recalibration of historical data.

**Key words:** Visible and InfraRed Radiometer, solar stray light, on-orbit IR calibration, automatic simulation

## 引言

随着空间探测技术的持续发展和遥感应用需求的不断拓展, 用户对载荷性能指标的要求也相应

提高, 特别是对遥感数据的质量提出了更高的期望。遥感数据的质量是限制遥感应用有效性的关键因素之一<sup>[1]</sup>。当光学载荷受到来自太阳或月球等天体的杂散光的影响时, 对地观测数据的质量会出

收稿日期: 2023-02-14, 修回日期: 2023-07-12

Received date: 2023-02-14, Revised date: 2023-07-12

基金项目: “地球观测与导航”重点专项 国产多系列遥感卫星历史资料再定标技术(2018YFB0504901)

Foundation items: Supported by the National Key R&D Program of China (2018YFB0504901)

作者简介(Biography): 殷恺(1993—), 男, 江苏苏州人, 博士研究生, 主要研究领域为红外光学系统设计、光学系统杂散光分析与抑制. E-mail: yinkai@mail.sitp.ac.cn

\*通讯作者(Corresponding author): E-mail: nxh@mail.sitp.ac.cn

现下降甚至失效<sup>[2]</sup>。为了保证数据有效性和可靠性,并有针对性地受杂散光影响的数据进行识别和修正,需要准确全面地评估载荷在轨运行时受杂散光影响的程度,并将其与设计测试阶段获得的仪器性能参数进行有效关联,以便监测载荷在轨运行的衰减过程。这就要求对载荷开展全链路分析与仿真工作,将仪器结构与卫星轨道参数和卫星平台环境相结合,通过对光机模型的高精度光线追迹来得到杂散光影响的量化结果。而目前对载荷杂散光效应的研究工作相互独立地分布在设计、测试和在轨运行等阶段。在设计 and 测试阶段主要由载荷的研制单位根据相关技术指标对载荷的光机结构进行仿真、测量和分析,表征载荷的光学系统本身对外部杂散光的响应<sup>[3-6]</sup>。而在轨运行阶段的研究工作主要由用户单位开展,侧重于识别和校正受到杂散光影响的遥感数据,对杂散光的来源和传输路径只能进行推测<sup>[7-10]</sup>,在遥感数据的量化修正时缺乏光机模型的支撑作用。

本文以搭载在极轨气象卫星FY-3系列ABC星上的可见光红外扫描辐射计(VIRR)为研究对象,提出了一种针对光学载荷在轨杂散光效应的全链路自动化仿真分析方法。由于VIRR沿用前一代扫描辐射计的技术方案,杂散光抑制设计存在不完善之处,所以在轨运行过程中产生一定程度的杂散光影响,主要表现为卫星穿越地球晨昏线时中波红外通道3(中心波长 $3.7\ \mu\text{m}$ )图像上的条纹噪声以及星上定标黑体的计数值异常。徐寒列等<sup>[11]</sup>分析了FY-3C/VIRR黑体计数值异常的现象,初步推测导致该现象的原因是太阳杂散光污染,通过统计的方法对受影响的黑体计数值进行插值修正。从仪器构造和工作模式等方面对VIRR进行分析研究的工作有张镔<sup>[12]</sup>的VIRR冷空采样扫到月球的相关内容。殷恺等<sup>[13]</sup>在模拟仿真VIRR单机杂散光的基础上结合卫星轨道参数与整星布局因素,分析了太阳杂散光的入射机理,得到了杂散光影响的量级初步结果。FY-3C/VIRR通道3太阳污染的成因是太阳光在相邻仪器的侧壁表面散射,从而与目标的辐射同时进入仪器,被探测器接收。

国外同类载荷AVHRR也存在太阳杂散光污染的现象<sup>[14]</sup>,在卫星进出地球阴影的过程中,中波红外通道的黑体计数值有异常波动,且地球采样图像上出现杂散光造成的条纹。文章中对于杂散光的具体成因提出几种假设,但是没有基于光机模型进

行光线追迹,因此无法验证假设。

本文的结构安排如下,第一部分详细分析黑体计数值异常以及温度反演不一致的现象,第二部分介绍载荷全链路自动化仿真分析方法的具体应用,包括在轨红外定标仿真和太阳入射仿真,并在此基础上进一步深化模拟仿真结果与在轨数据的比对,详细解释中波红外通道太阳杂散光产生机理。模拟仿真获得的结果可以用于历史数据再定标修正,分析过程的经验可以为同类型载荷的在轨杂散光影响评估与消除提供思路。着眼于我国下一代极轨气象卫星的发展趋势,对气象卫星载荷历史数据的再分析和再处理能够为下一代载荷的规划设计提供极大的借鉴,其中对异常数据的筛选与再定标处理,一方面可以深度挖掘原有低质量数据的利用价值,另一方面更是为未来载荷设计、测试和应用场景的设置提供参考。

## 1 黑体温度反演不一致现象与分析

FY-3C/VIRR中波红外通道的黑体计数值异常现象是与卫星轨道参数和运行时刻紧密相关的<sup>[10]</sup>,通常在卫星进出地球阴影期间出现,且影响程度在全年范围内存在一定的波动。所谓黑体计数值异常是指在星上定标工况中,扫描镜指向定标黑体时,通过探测器得到的黑体计数值反演出的黑体温度与通过测温铂电阻(PRT)遥测值反演出的黑体温度不一致,同时黑体计数值的偏离趋势与太阳方位存在一定的关联。该现象的存在影响了遥感数据的定标精度,阻碍了遥感数据的高效利用。

为了与已有的研究成果进行对比,选择2018年春分日(20180321)的一轨OBC数据,时间为0840~0945(UTC),该数据包含了卫星进出阴影的情况。将通道3(中心波长 $3.7\ \mu\text{m}$ )黑体计数值绘制如图1所示,从图中可以发现在0930~0940之间黑体计数值出现下降,峰值偏离稳定状态约50个计数值。该时间段卫星位于出阴影前的地球半影区,如图2所示,此时星下点仍是黑夜,但是太阳可以掠入射到卫星对地面,图中矢量分别为卫星坐标系矢量与太阳光线矢量。对该通道而言,DN值增大,对应的辐射量减小,所以黑体计数值下降表示扫描黑体时探测器接收到实际入射的辐射量变大。而同一时间段的黑体测温铂电阻(PRT)遥测值和两个长波红外通道的黑体计数值均未出现波动。数据统计显示PRT遥测值标准差小于1,根据测温铂电阻反演系数得到的黑体表面温度为270 K。长波红外数据统

计显示通道4(中心波长 $10.8\ \mu\text{m}$ )计数值均值为576.355 408,标准差为0.428 504;通道5(中心波长 $12\ \mu\text{m}$ )计数值均值为561.362 732,标准差为0.500 261。这与通道3的波动情况相矛盾。

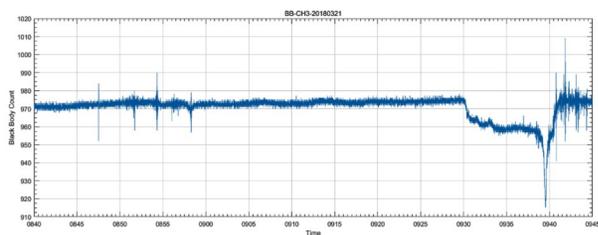


图1 20180321通道3黑体计数值

Fig. 1 The blackbody count of Band 3 on 20180321

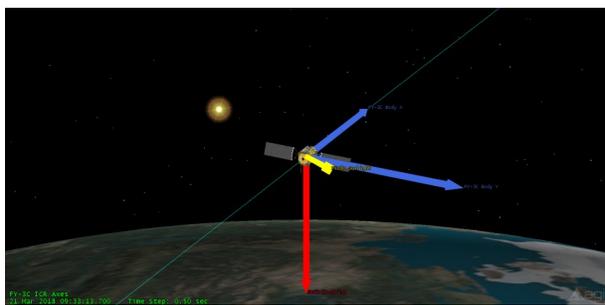


图2 卫星出阴影太阳光照射示意图

Fig. 2 The illustration of solar incidence during the satellite exiting penumbra

进一步观察其他通道的黑体计数值,发现可见光通道黑体计数值都保持在低端不变,只有两个短波红外通道(通道6,中心波长 $1.5\ \mu\text{m}$ ;通道10,中心波长 $1.3\ \mu\text{m}$ )显示相似的变化趋势。将通道10的黑体计数值与通道3进行比较,如图3所示。图3同时显示了通道3的黑体计数值(BB Ch3 count),冷空计数值(SV Ch3 count)和绝对值(Ch3 Absolute value)。通道3黑体计数值为扫描镜指向定标黑体时探测器的响应,冷空计数值为扫描镜指向卫星背阳一侧冷空间时探测器的响应,该响应为探测器钳位电压的基准,绝对值为冷空与黑体计数值的差。可以看到0930~0940时通道3黑体计数值的绝对值和通道10的黑体计数值都存在上升趋势,且尖峰出现的时刻都在09:39:30。

测温PRT与长波红外通道计数值都没有大幅度波动,可以互相佐证卫星出阴影阶段定标黑体本身的温度并没有大幅度波动,而短波和中波红外通道则产生了与此不符的变化趋势。考虑到中波红外波段太阳光(5900 K)的辐照度是定标黑体(270

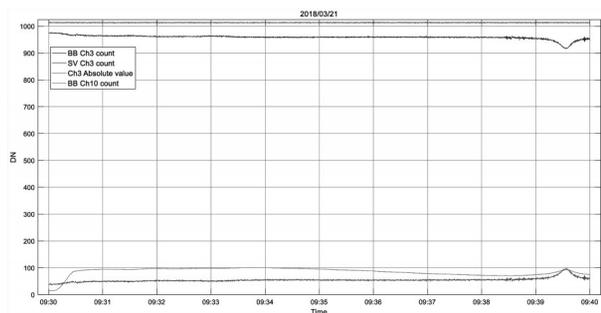


图3 通道3与通道10黑体计数值对比

Fig. 3 Comparison of the blackbody counts between Band 3 and Band 10

K)的辐照度的数十倍量级,参考同类载荷的相似情况<sup>[13]</sup>,初步分析确定造成中波红外通道黑体计数值异常的原因可能是太阳杂散光污染。为了全面系统地分析载荷受太阳杂散光影响的情况,精确量化太阳杂散光传输路径,同时优化数据分析传递和处理过程,提出了全链路自动化仿真分析方法。

## 2 全链路自动化仿真分析方法

### 2.1 分析方法的介绍

全链路自动化仿真分析的思路是将VIRR光机结构与卫星轨道参数和平台环境相结合,通过对光机模型的高精度光线追迹获得太阳杂散光污染的量化结果,并与卫星在轨数据进行比对,从而对历史数据进行再定标修正。基于该分析思路,将仿真流程编写成载荷仿真分析程序,系统框图如图4所示。输入参数有VIRR光机结构模型、整星布局模型、卫星两行报(TLE)文件和载荷在轨定标(OBC)文件。其中,卫星TLE文件每日更新,将它作为高精度轨道仿真的输入,能够有效降低卫星轨道漂移造成的误差。通过卫星轨道仿真软件STK得到卫星在轨情况下太阳光的照射情况,进而得到太阳入射角度,并将其作为TracePro杂散光仿真的光源设置的输入。在TracePro中对VIRR单机光机模型进行仿真,可以模拟在轨红外定标过程,得到不同黑体温度对应的探测器焦面能量,作为与在轨数据比对的基准。通过MATLAB作为控制中枢,自动化地实现各专业分析软件之间的数据传输和比对分析,该方法极大减轻杂散光仿真中繁杂的条件设置和数据存储工作量。将最终仿真得到的结果与在轨数据进行对比分析,相应的修正系数可以作为历史遥感数据再定标输出结果。

然而,由于探测器焦面尺寸过小,如果以真实

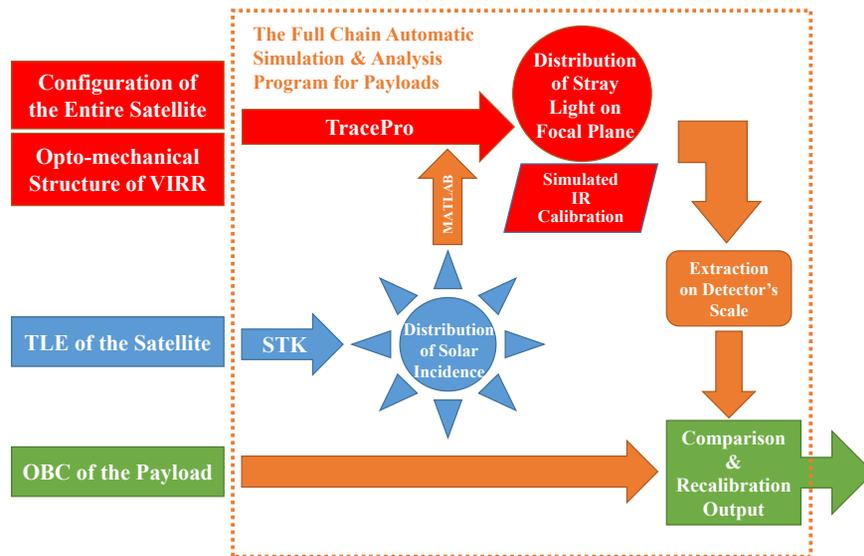


图4 载荷全链路自动化仿真分析程序系统框图

Fig. 4 The systematic diagram of the full chain automatic simulation and analysis program for payloads

探测器焦面作为接收面,会使得最终能够到达接收面的杂散光线相当少,不能有效精确地将杂散光的影响范围反映出来。为了全面地分析杂散光在视场内外的分布和影响程度,可将接收面范围扩大,使其同时包含探测器的光敏面及其周围非成像区域。这样通过一次光线追迹采集的照度图能够同时反映杂散光对探测器光敏面和其外围非成像区域的影响,有效地提高了仿真效率。在计算探测器接收到的能量时使用实际探测器光敏面范围的数据,外围数据作为辅助评估。在本次仿真中,接收面设置为安装探测器的基底( $\Phi 8\text{ mm}$ )。同时需要确定照度图的采样间隔,使其与探测器像元尺寸匹配,通过试验确定为 $256 \times 256$ 。该方法也可以用于包含狭缝结构的光谱仪器的杂散光仿真分析。

## 2.2 在轨红外定标仿真

首先对VIRR光机模型单独仿真分析,模拟VIRR单机在不受外界影响时进行红外定标,得到不同黑体温度时焦面吸收的能量,作为下一步仿真的参考基准。如图5所示,扫描镜指向定标黑体,辐射的能量经扫描镜转折后进入光学系统并最终汇聚在探测器焦面。

仿真中将黑体发射面设置为朗博面,辐出度 $M(T)$ 根据通道3光谱范围( $3.55 \sim 3.93\ \mu\text{m}$ )与黑体温度 $T$ 通过普朗克公式确定(式(1)),忽略探测器光谱响应的影响,认为在该范围内均为1,表面发射率 $\varepsilon$ 设为0.9。公式(1)中波长 $\lambda$ 的单位是 $\mu\text{m}$ ,温度 $T$ 的单位是K。该过程模拟了在轨红外定标中不涉及探

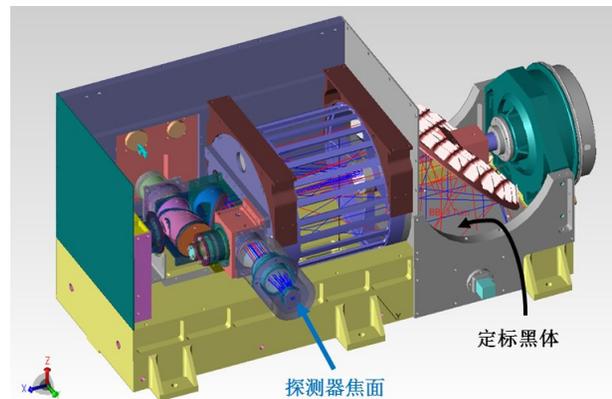


图5 在轨红外定标光路图

Fig. 5 The illustration of optical path for on-orbit IR calibration

测器光电转换的情况,表征了光学系统对不同温度黑体目标的响应情况。

$$M(T) = \left[ \int_{3.55}^{3.93} \frac{3.7415 \times 10^4}{\lambda^5 \left( e^{\frac{1.43879 \times 10^4}{\lambda T}} - 1 \right)} d\lambda \right] \times \varepsilon \times 10^4 (\text{W/m}^2) \quad (1)$$

对温度为270 K黑体对应的照度图结果进行探测器焦面尺寸提取,得到焦面辐射功率,如图6所示,图6(a)中红色圆形为接收面,白色矩形为探测器焦面,图6(b)为将图6(a)探测器焦面放大显示的结果。从图6(a)可以看出,由于黑体位于有限物距处,且表面具有朗博散射特性,在接收面的成像结果存在弥散效应。从图6(b)可看出,黑体辐射能量

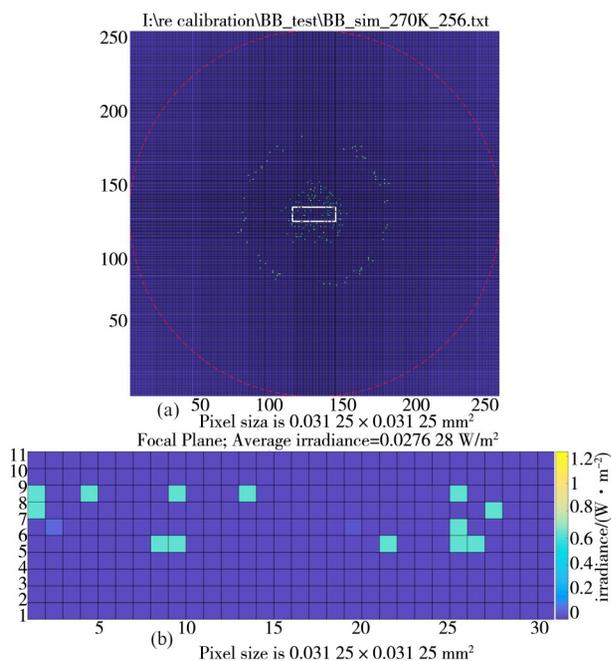


图6 在轨红外定标仿真结果,注:(a)接收面分布,(b)探测器焦面分布

Fig. 6 Results of the simulation for on-orbit IR calibration, Note: (a) distribution on the receiving plane, (b) distribution on the focal plane of the detector

经过光学系统后在焦面分布并不均匀,这是由于光线追迹时光源出射光线的随机分布导致的,但系统采用全口径红外定标,黑体出射的能量充满入瞳,其在焦面照度分布应均匀,在焦面全部接收的情况下对照度取平均并不会影响仿真的准确性。

如式(2)所示,在探测器焦面区域提取出平均照度值  $E_{avg}(T)$ ,与探测器面积  $A_{detector}$  的乘积  $P_{BB}(T)$  即为定标黑体入射到探测器焦面的功率。

$$P_{BB}(T) = E_{avg}(T) \cdot A_{detector}, \quad (2)$$

以此方法为基础,改变黑体的温度,可以得到在轨红外定标的仿真结果。图7显示了黑体温度从265 K到300 K以1 K间隔变化时对应探测器焦面吸收的辐射功率。

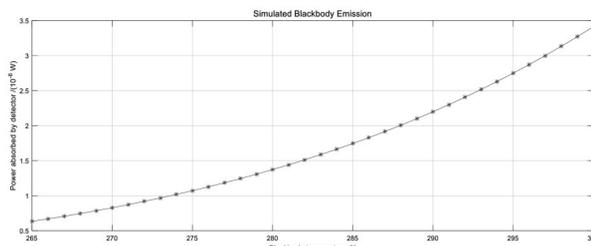


图7 在轨红外定标仿真结果

Fig. 7 Results of the simulation for on-orbit IR calibration

### 2.3 太阳光入射仿真

使用STK对入射太阳光进行卫星轨道仿真,获取太阳杂散光照射时焦面的能量随入射角度(照射时刻)的变化情况。将采样间隔设置为10 sec,在变化趋势较快的角度适当增加采样点。图8显示了20180321太阳光线矢量与卫星三轴夹角的变化, sunlight-z图中红色虚线为90°参考线。在地球阴影区时太阳光被遮挡,太阳光矢量与卫星坐标轴夹角均为零;当卫星被太阳照射时,太阳光矢量与卫星Y轴夹角保持在58°;而在卫星出阴影阶段 sunlight-z角度从118°减小到90°,并且太阳光矢量与卫星X轴和Z轴的夹角呈周期性变化。

自动分析软件将轨道仿真得到的太阳入射角度输入TracePro并相应地设置光源指向,从而进行光线追迹。图9显示了太阳杂散光的传输路径,图9

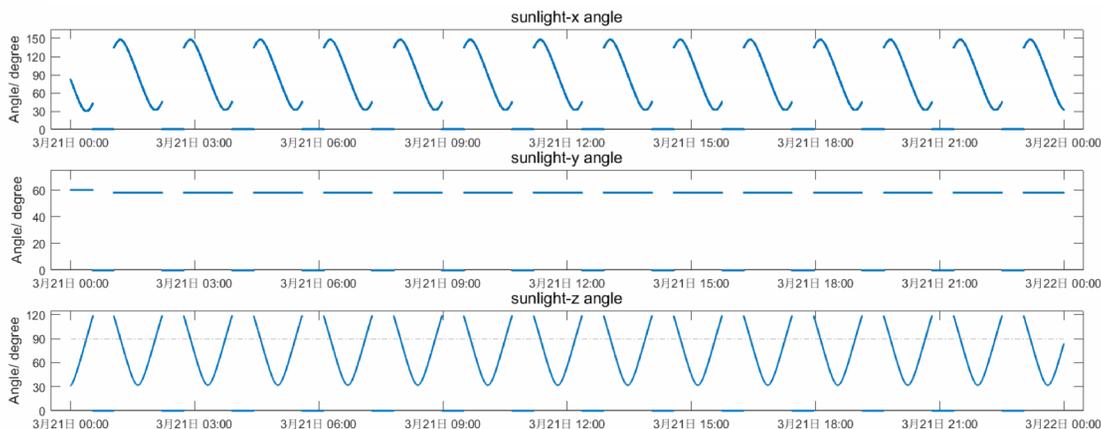


图8 20180321 太阳光线矢量分布图

Fig. 8 The distribution of the sunlight vector on 20180321

(a)显示了在卫星坐标系中太阳光矢量的入射方向,图9(b)显示了根据光线追迹结果得到的太阳杂散光在仪器内部的传输路径,入射的太阳光经过侧壁表面反射后从主镜筒的空隙漏进后光路,从而到达探测器焦面造成杂散光影响。在每次光线追迹中根据光源尺寸和光线追迹阈值,将光源的出射光线数量设置为 $5E7$ 。通过对太阳光入射的连续追迹,采集不同时刻的照度图,在探测器尺寸上进行提取,得到不同时刻焦面接收的辐射功率。

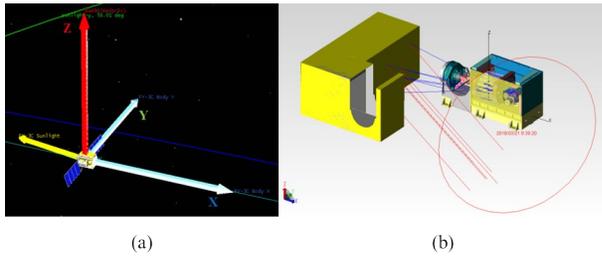


图9 太阳杂散光入射光路图:(a)太阳光矢量在卫星坐标系中的方向,(b)太阳杂散光在仪器内部的传输路径

Fig. 9 The illustration of the stray light path for solar incidence: (a) the sunlight vector in satellite coordinate system, (b) the path of solar stray light inside the instrument

太阳杂散光照射下VIRR在轨红外定标时焦面的辐射功率由两部分合成,如式(3)所示,一是定标黑体自身入射到焦面的能量,二是太阳杂散光通过散射漏光等途径在焦面产生的辐射功率。

$$P_{\text{solar}} = P_{\text{BB}}(270\text{ K}) + \tau_{\text{solar}} \times E_{\text{solar}}(3.7\ \mu\text{m}) \times A_{\text{detector}}, \quad (3)$$

其中: $P_{\text{solar}}$ 为焦面总辐射功率; $P_{\text{BB}}(270\text{ K})$ 为定标黑体温度为 $270\text{ K}$ 时,不受杂散光影响的情况下焦面的辐射功率,根据仿真结果其值为 $8.28 \times 10^{-9}\text{ W}$ ;太阳光的辐照度 $E_{\text{solar}}(3.7\ \mu\text{m})$ 由太阳常数与通道3光谱范围确定,同样根据普朗克公式积分可得 $E_{\text{solar}}(3.7\ \mu\text{m}) = 4.5821\text{ W/m}^2$ ;  $\tau_{\text{solar}}$ 定义为不同入射角度的太阳杂散光的透过率,反映了侧壁表面对太阳光的散射和光学系统对入射杂散光抑制的综合效果,是仿真的关键结果。如式4所示, $\tau_{\text{solar}}$ 可以分解为侧壁表面多层材料对入射太阳光的双向反射分布函数与仪器在该散射方向的点源透过率的乘积,

$$\tau_{\text{solar}} = BRDF_{\text{多层}}(\theta_i, \varphi_i; \theta_s, \varphi_s) \times \tau_{\text{仪器}}(\theta_s, \varphi_s), \quad (4)$$

其中,入射角度 $\theta_i$ 和 $\varphi_i$ 分别为太阳入射在卫星YOZ平面上的天顶角和方位角; $\theta_s$ 和 $\varphi_s$ 分别为散射光线的天顶角和方位角。对多层材料表面属性的设置直接影响 $BRDF_{\text{多层}}$ ,由于该侧壁表面既有多层包覆,

也存在部分白漆,所以将镜面反射率设为 $0.5$ ,散射率设为 $0.2$ ,吸收率为 $0.3$ 。将太阳光入射仿真得到的结果与在轨红外定标仿真结果进行对比,可以得到太阳杂散光影响下探测器焦面吸收的辐射功率,如图10所示。为方便数据比对,同时在图上标识了定标黑体在 $270\sim 285\text{ K}$ 对应的焦面辐射功率的参考基准,如图中黑色点画线所示。曲线在卫星出阴影前的 $1\text{ min}$ 出现峰值,此时太阳光与卫星XOY平面接近平行,表明太阳杂散光影响显著。峰值对应的等效黑体温度为 $285\text{ K}$ ,比PRT遥测反演的温度高 $15\text{ K}$ 。

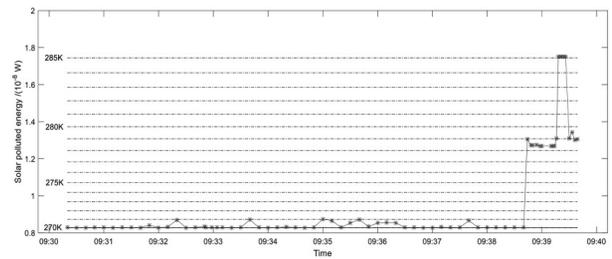


图10 太阳光入射仿真结果

Fig. 10 The simulation results of the solar incidence

## 2.4 分析方法的验证

为了验证全链路仿真方法的正确性,将仿真结果与在轨数据进行对比。由于在轨数据是探测器响应经过光电转换和模数转换后的码值,无法获得探测器焦面原始的辐射能量,需要根据在轨定标系数反演出等效黑体温度,从而与仿真结果在同一维度进行比对。根据OBC文件红外通道亮温反演定义,探测器DN值首先经过定标系数变换得到对应的辐照度值,如式(5)所示,

$$M(\lambda, T) = a_0 + a_1 \times DN(\text{W/m}^2), \quad (5)$$

式中通道3中心波长 $\lambda = 3.76\ \mu\text{m}$ ,定标系数 $a_0 = 3.046581$ ,  $a_1 = -0.003012$ 。再根据普朗克公式逆变换得到黑体亮温,如式(6)所示,

$$T_{\text{BB}} = \text{Plank}^{-1}\{M(\lambda, T)\} = \frac{3826.56915}{\ln\left[1 + \frac{18.91865}{M(\lambda, T) \times 10^{-4}}\right]} \quad (\text{K}) \quad (6)$$

图11显示了太阳光入射仿真结果与在轨数据的对比,图11(a)为通道3黑体计数值反演的等效黑体温度,图11(b)为图10中的太阳光入射仿真结果。从图上可以看出,在出阴影前 $10\text{ min}$ ,太阳杂散光的影响主要集中在最后 $1\text{ min}$ ,即光线以小角度掠入射到卫星对地面,造成黑体计数值偏大。在仿真中太

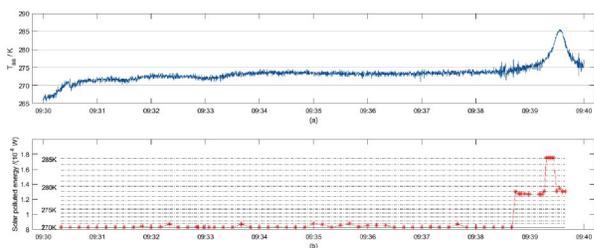


图11 仿真结果与在轨数据对比,注:(a)通道3黑体计数值反演的等效黑体温度,(b)太阳光入射仿真结果

Fig. 11 Comparison between the simulation results and the on-orbit data, Note: (a) the equivalent blackbody temperature retrieved by the blackbody count of Band 3, (b) the simulation results of the solar incidence

阳杂散光影响的峰值时刻,焦面辐射功率等效的黑体温度为285 K,与黑体实际温度相差15 K。从在轨数据反演来看,黑体计数值峰值反演出的黑体温度为285.6 K,与仿真数据较为符合,表明造成中波红外通道黑体计数值异常的原因为太阳杂散光污染。在峰值的上升沿存在一些误差,原因估计为仿真中各表面材料属性均按照设计指标设置,而载荷实际在轨工作已有十年,技术状态与标称值相比有不同程度的衰减和下降。仿真中的峰值时刻与在轨数据相差约10 sec,可能原因是多层表面凹凸不平,使得实际太阳光反射角度与仿真相比存在一定的误差。两组数据的比对结果表明,仿真的曲线与实际在轨数据在变化趋势上一致,能够验证该分析方法的有效性。

### 3 结论

本文对FY-3C/VIRR在卫星出阴影阶段产生黑体温度反演不一致现象进行分析,对比了多个通道的黑体计数值和PRT遥测值,确定太阳杂散光是造成该现象的根本原因。通过载荷全链路自动化仿真程序对VIRR在轨红外定标和太阳入射两种情况进行模拟,得到了太阳杂散光影响下通道3的焦面能量变化曲线,峰值反演出的黑体温度与实际测温温差为15 K,定量地反映了太阳杂散光的影响程度。与在轨数据进行比对,仿真结果的变化趋势较吻合,但是在峰值时刻方面存在一定的误差。下一步工作的方向,一方面是进一步提高仿真精度,另一方面对其他时间的数据进行仿真分析,从而获得太阳杂散光影响在较长时间尺度上的变化规律,为历史数据的再定标提供参考。

### References

- [1] Acker J, Williams R, Chiu L, *et al.* Remote Sensing from Satellites [M]. In Encyclopedia of Physical Science and Technology, 3rd ed.; Meyers, R. A., Eds.; Academic Press: CA, USA, 2003; pp. 169–170.
- [2] Wang H, Chen Q F, Ma Z P, *et al.* Development and prospect of stray light suppression and evaluation technology (Invited) [J]. Acta Photonica Sinica, 2022, **51** (7): 0751406.(王虎,陈钦芳,马占鹏,等.杂散光抑制与评估技术发展展望(特邀)[J].光子学报), 2022, **51**(7): 0751406.
- [3] Waluschka E, Qiu S Y, Godden G D. MODIS stray light simulation[C]. Proceedings of SPIE, 1996, **2864**: 350–360.
- [4] Mills S P, Agravante H, Hauss B, *et al.* Computer modeling of Earthshine contamination on the VIIRS solar diffuser [C]. Proceedings of SPIE, 2005, **5978**: 59780W.
- [5] Lightsey P A, Wei Z Y. James Webb Space Telescope observatory stray light performance[C]. Proceedings of SPIE, 2006, **6265**: 62650S.
- [6] Grochocki F, Fleming J. Stray light testing of the OLI Telescope[C]. Proceedings of SPIE, 2010, **7794**: 77940W.
- [7] Mills S, Weiss S, Liang K. VIIRS day/night band (DNB) stray light characterization and correction [C]. Proceedings of SPIE, 2013, **8866**: 88661P.
- [8] Montanaro M, Gerace A, Rohrbach S. Toward an operational stray light correction for the Landsat 8 Thermal Infrared Sensor[J]. Applied Optics, 2015, **54**(13): 3963–3978.
- [9] Lee S, Cao C. Soumi NPP VIIRS day/night band stray light characterization and correction using calibration view data [J]. Remote Sensing, 2016, **8**, 138.
- [10] Ji Q, McIntire J, Link D, *et al.* Pre-launch characterization of VIIRS straylight [C]. Proceedings of SPIE, 2022, **12232**: 122321B.
- [11] Xu Han-Lie, Hu Xiu-Qing, Xu Na, *et al.* Discrimination and correction for solar contamination on mid-infrared band of FY-3C/VIRR[J]. Optics and Precision Engineering, 2015, **23**(7), 1874–1879.(徐寒列,胡秀清,徐娜,等. FY-3C/可见光红外扫描辐射计中红外通道太阳污染的识别和修正[J].光学精密工程), 2015, **23**(7): 1874–1879.
- [12] Zhang E, Chen Shuai-Shuai, Zhang Li-Yang. The phenomena of lunar observation in cold space reference sampling area of Visible and Infrared Radiometer on FY-3 Meteorological Satellite [J]. Journal of Infrared and Millimeter Waves, 2020, **39**(6): 802–809.(张镨,陈帅帅,张里阳. FY-3气象卫星可见光红外扫描辐射计冷空间基准采样区观测到月球后的现象[J].红外与毫米波学报), 2020, **39**(6): 802–809.
- [13] Yin Kai, Niu Xin-Hua, Zhang E. Modeling and simulation of stray light based on Visible and Infra-Red Radiometer [J]. National Remote Sensing Bulletin, XXXX, XX (XX): 1–9.(殷恺,钮新华,张镨.基于可见光红外扫描辐射计杂散光建模仿真[J].遥感学报), XXXX, XX (XX): 1–9.
- [14] Cao C, Weinreb M, Sullivan J. Solar contamination effects on the infrared channels of the advanced very high resolution radiometer (AVHRR) [J]. Journal of Geophysical Research. 2001, **106**(D24): 33463–33469.