

基于可见光红外扫描辐射计杂散光建模仿真

殷恺^{1,2,3}, 钮新华^{1,3}, 张镔^{1,3}

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: 杂散光对星载红外光学系统的影响体现在两个方面, 一是成像质量会恶化, 二是仪器定标精度会降低。因此, 开展星载红外光学系统杂散光分析与抑制工作十分必要。本文以FY-3气象卫星的可见光红外扫描辐射计(VIRR)为研究对象, 使用TracePro对仪器成像光学系统进行建模仿真, 得到了不同光谱通道在不同维度的点源透过率(PST)曲线。结合在轨仪器备份产品的杂散光实验室复测, 对模型仿真与实测结果做了定性对比分析。通过分析PST曲线, 找到了仪器可能受杂散光影响的光照角度; 通过对卫星轨道参数进行仿真和分析, 在考虑载荷间相互影响的情况下模拟了卫星穿越晨昏线时的光照射情况, 获得了杂散光量级的初步结果。该工作还可以为同类载荷的消杂散光设计和太阳污染抑制提供参考, 同时为遥感历史数据再定标提供基础支撑。

关键词: 遥感, 可见光红外扫描辐射计(VIRR), 杂散光抑制, 点源透过率(PST), 太阳污染, 再定标

中图分类号: TP701/P2

引用格式: 殷恺, 钮新华, 张镔. 2024. 基于可见光红外扫描辐射计杂散光建模仿真. 遥感学报, 28(3): 746-754

Yin K, Niu X H and Zhang E. 2024. Modeling and simulation of stray light based on the Visible and InfraRed Radiometer. National Remote Sensing Bulletin, 28(3): 746-754[DOI:10.11834/jrs.20221469]

1 引言

杂散光是指从光学系统视场外入射到像面的非成像光线, 在一定程度上会降低像面的对比度和整个光学系统的信噪比, 严重时会使像质恶化, 甚至阻碍系统正常成像。星载光学系统处于大气层外特殊的环境, 当它的运行位置与太阳、月亮等天体构成特定角度关系时就会受到杂散光影响, 不仅成像受到干扰, 仪器的定标精度也会下降。因此对于星载光学系统的杂散光研究十分必要。

极轨气象卫星轨道高度一般为830 km左右, 光学载荷工作模式为扫描成像, 刈幅宽度约3000 km, 在轨工作易受到杂散光影响, 当满足特定的时间和光照条件时影响相当明显。即使考虑到杂散光抑制设计, 要做到全年任何光照条件下完全消除杂散光影响仍然是十分困难的。Cao等(2001)分析了AVHRR在卫星穿越晨昏线时定标黑体计数值

和定标系数的变化, 结合受到杂散光影响的图像, 确定了杂散光污染通常发生在卫星日出(出阴影)且太阳天顶角为70°—118°时。NOAA最新一代载荷VIIRS将离轴三反主光学系统整合在旋转望远镜组件(RTA)中, 起到杂散光抑制作用, 但是在轨工作时昼夜带通道(DNB)仍然发现存在杂散光影响。Mills等(2013)对图像的杂散光模式进行了分析表征, 归纳出杂散光污染主要发生在太阳天顶角98°—102°, 将太阳污染的方式分为通过对地窗口、通过太阳衰减屏和地球半影区3种类型, 并且基于对数据的筛选拟合在图像上对杂散光进行修正。

中国极轨气象卫星历经FY-1和FY-3两个系列。作为FY-1系列MVISR载荷的继承, 可见光红外扫描辐射计(VIRR)在FY-3A/B/C星上都有搭载, 在轨工作已有十年以上, 获取了大量遥感数据, 对气候研究具有重要作用。仪器长期连续工

收稿日期: 2021-08-18; 预印本: 2022-07-08

基金项目: 国家重点研发计划(编号: 2018YFB0504901)

第一作者简介: 殷恺, 研究方向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

通信作者简介: 钮新华, 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

作涵盖了不同的光照条件,通过分析仪器在长时间序列中响应的变化情况,能够掌握仪器在轨探测的变化规律,对于历史数据再定标具有重大意义。徐寒列等(2015)分析了FY-3C/VIRR的在轨定标数据(OBC文件),发现卫星进出阴影时伴有黑体计数值的异常,初步判断污染来源为太阳杂散光。朱吉彪等(2021)针对VIRR通道3存在条带噪声的图像展开分析,认为噪声的来源是太阳光线经过反射或散射进入仪器内部,从而造成像面的杂散光污染。

以上国内外研究从数据应用的角度对遥感图像和遥测参数进行分析,进而对杂散光来源进行估计,通过统计的方法降低杂散光对遥感数据的不良影响。张锸等(2020)对VIRR仪器结构和工作模式进行了详细阐释,分析了VIRR在扫描冷空时观察到月球对定标产生的影响,为定标数据的

修正提供了参考。本文通过对VIRR实际光学成像系统进行建模,仿真了不同光照条件下的杂散光效应,并开展了在轨仪器备份产品的杂散光复测与验证,在此基础上对仪器历史遥感数据及图像进行分析,获得了特定轨道条件下的杂散光量级初步结果。

2 VIRR杂散光建模仿真与实测

2.1 VIRR建模步骤与结果验证

VIRR具有10个光谱通道,如表1所示(Wang等,2018)。VIRR光学系统由扫描镜、主光学系统和后光路组成,主光学为同轴两反望远镜,主次镜面均为抛物面。入射光线经过扫描镜和主光学之后在分光镜上分光,分别进入不同的后光路并成像在各个通道的探测器焦面。VIRR各通道探测器尺寸不同,其视场角也有区别,具体指标见表2。

表 1 FY-3 (A, B, C)/VIRR 光谱通道参数
Table 1 FY-3 (A, B, C)/VIRR spectral band specifications

通道	波长范围/ μm	光谱带宽/ μm	空间分辨率/m	噪声($\Delta\rho$ or ΔK @300 K)	动态范围(ρ or K)
1	0.58—0.68	0.10	1100	0.1%	0—100%
2	0.84—0.89	0.05	1100	0.1%	0—100%
3	3.55—3.93	0.38	1100	0.3 K	180—350 K
4	10.3—11.3	1.00	1100	0.2 K	180—350 K
5	11.5—12.5	1.00	1100	0.2 K	180—350 K
6	1.55—1.64	0.09	1100	0.15%	0—90%
7	0.43—0.48	0.05	1100	0.05%	0—50%
8	0.48—0.53	0.05	1100	0.05%	0—50%
9	0.53—0.58	0.05	1100	0.05%	0—50%
10	1.325—1.395	0.07	1100	0.19%	0—90%

表 2 VIRR 光学系统主要指标
Table 2 Major specifications of VIRR optical system

口径/mm	瞬时视场/($^{\circ}$)			
	可见光	近红外	短波红外	长波红外
$\Phi 200$	0.253×	0.036×	0.144×	0.144×
	0.036	0.036	0.038	0.038

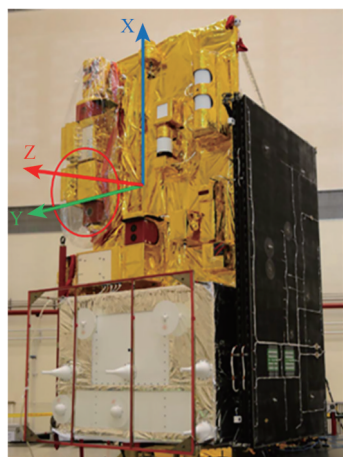
目前对光学系统进行杂散光分析的软件有TracePro和Light tools等,本文采用TracePro对VIRR进行建模和杂散光分析。卫星载荷布局如图1(a)所示(Yang等,2012),图中红色圆圈内的是VIRR。仿真时光源的初始位置位于星下点,如图1(b)所示。通过光线追迹,入射平行光首先经过同轴两反的主光学,在后光路分光后通过透镜组会聚

在探测器焦面中心,像斑能量符合实际情况,验证了建模的正确性。

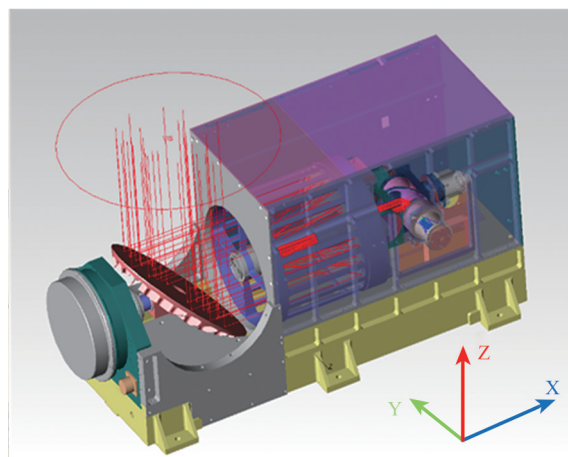
通过建立光源并调整光源与扫描镜的相对位置,在不同入射角进行光线追迹,来得到仪器对不同照射条件杂散光的响应。由于太阳作为无穷远目标在仪器入瞳处可以视作均匀照射的平行光,所以在TracePro仿真时将光源设置为均匀面光源,尺寸覆盖整个扫描镜。光源的辐照度以太阳常数为标准,设置为 1367 W/m^2 ,波长分别取探测器响应曲线的中心波长。光源从中心视场入射和视场外大离轴角度入射时,探测器接收辐照度相差很大,需要设置不同量级的光线数,最终将光线数量设置在 $5\text{E}4$ — $5\text{E}7$ 范围。另一方面TracePro提供

了重点采样功能 (Freniere 等, 1997), 将某些关键表面设置为重点采样可以在不增加光线数量的基础上进一步提高仿真的效率。设置重点采样的表面有扫描镜表面 (指向主镜筒)、主镜面 (指向次镜)、次镜光阑 (指向主镜遮光筒) 和接套内壁 (指向探测器)。选择这些表面作为重点采样是因为通过从探测器面反向追迹光线, 确定这些表面

是关键面, 或者是关键光学表面, 外部入射的杂散光经过这些表面的一次散射或反射即可抵达探测器, 因此需要着重分析。图2显示了光学系统中设置重点采样的位置。对于系统内的光学元件, 按照透镜/反射镜/分光镜等特性分别设置其表面散射特性, 对于机械零件, 表面设置为发黑。



(a) 载荷在 FY-3 卫星平台上的布局, 红色圈内是 VIRR
(a) Configuration of payloads onboard FY-3 satellite platform, inside the red circle is VIRR



(b) TracePro 环境中对 VIRR 进行光源设置和光线追迹
(b) Light source set-up and ray tracing for VIRR in TracePro

图 1 VIRR 在卫星平台上的布局和单机仿真模型

Fig. 1 Configuration of VIRR on satellite platform and single model of simulation

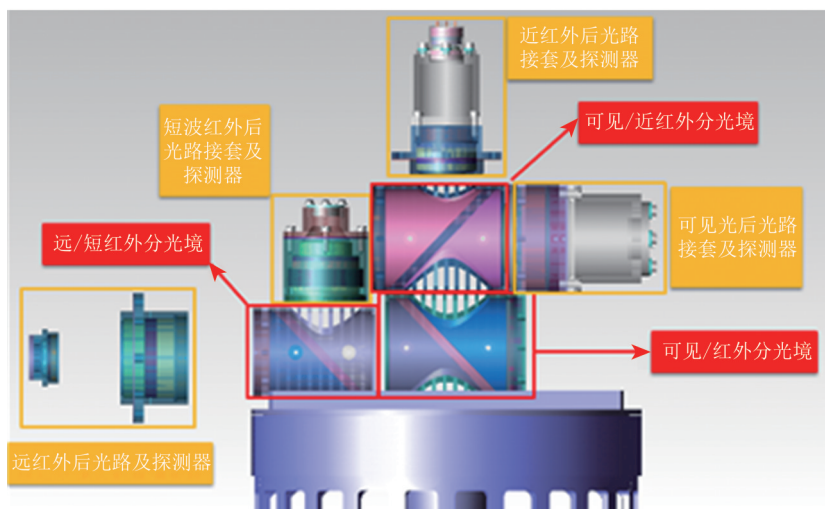


图 2 VIRR 后光路结构及重点采样位置

Fig. 2 The rear optical structure of VIRR and positions with importance sampling

2.2 VIRR 杂散光分析

评价光学系统杂散光响应情况普遍采用的指标是点源透过率 (PST), 其定义为离轴角为 θ 的点源引起探测器上的辐照度与点源位于光轴上时入

瞳处的辐照度之比 (Breault, 2009), 即

$$\text{PST}(\theta) = \frac{E_{\text{detector}}(\theta)}{E_{\text{entrance}}(0^\circ)} \quad (1)$$

式中, $E_{\text{detector}}(\theta)$ 为点源位于不同离轴角时探测器上

的辐照度, $E_{\text{entrance}}(0^\circ)$ 为点源位于光轴上时入瞳处的辐照度。PST 曲线可以定量地反映出光学系统视场外杂散光的分布情况。

VIRR 通过扫描成像的工作模式实现较大的刈幅宽度, 但同时受杂散光影响的范围与可能性也相应增加。为了分析 VIRR 在各个方向受杂散光影响的情况, 同时为了后续进行对比验证, 需要在俯仰维、扫描维和偏航维进行仿真进而获得 PST 曲线。以扫描镜中心为旋转中心将光源分别绕俯仰维 (卫星 Y 轴)、扫描维 (卫星 X 轴) 和偏航维 (卫星 Z 轴) 旋转 $\pm 90^\circ$, 采集探测器表面的辐照度, 并以光源的辐照度进行归一化, 得到 VIRR 可见光

和近红外通道在 3 个维度的 PST 曲线, 如图 3 所示。可见光仿真取通道 8 中心波长 $0.5 \mu\text{m}$, 近红外取通道 2 中心波长 $0.86 \mu\text{m}$ 。通常情况下由于视场内探测器响应接近饱和, 对分析仪器杂散光作用不大, 所以一般忽略视场内的响应, 在图 3 中没有显示 90° 的峰值, 将 PST 显示上限设在 1。图 3 中 90° 为星下点位置, 横坐标为光线方向与相应维度坐标轴的夹角, 图 3 (a) 图为俯仰维的 PST, 横坐标为入射光方向与卫星 X 轴夹角, 图 3 (b) 图为扫描维的 PST, 横坐标为入射光方向与卫星 Y 轴夹角, 图 3 (c) 图为偏航维的 PST, 横坐标为入射光方向与卫星 Y 轴夹角。

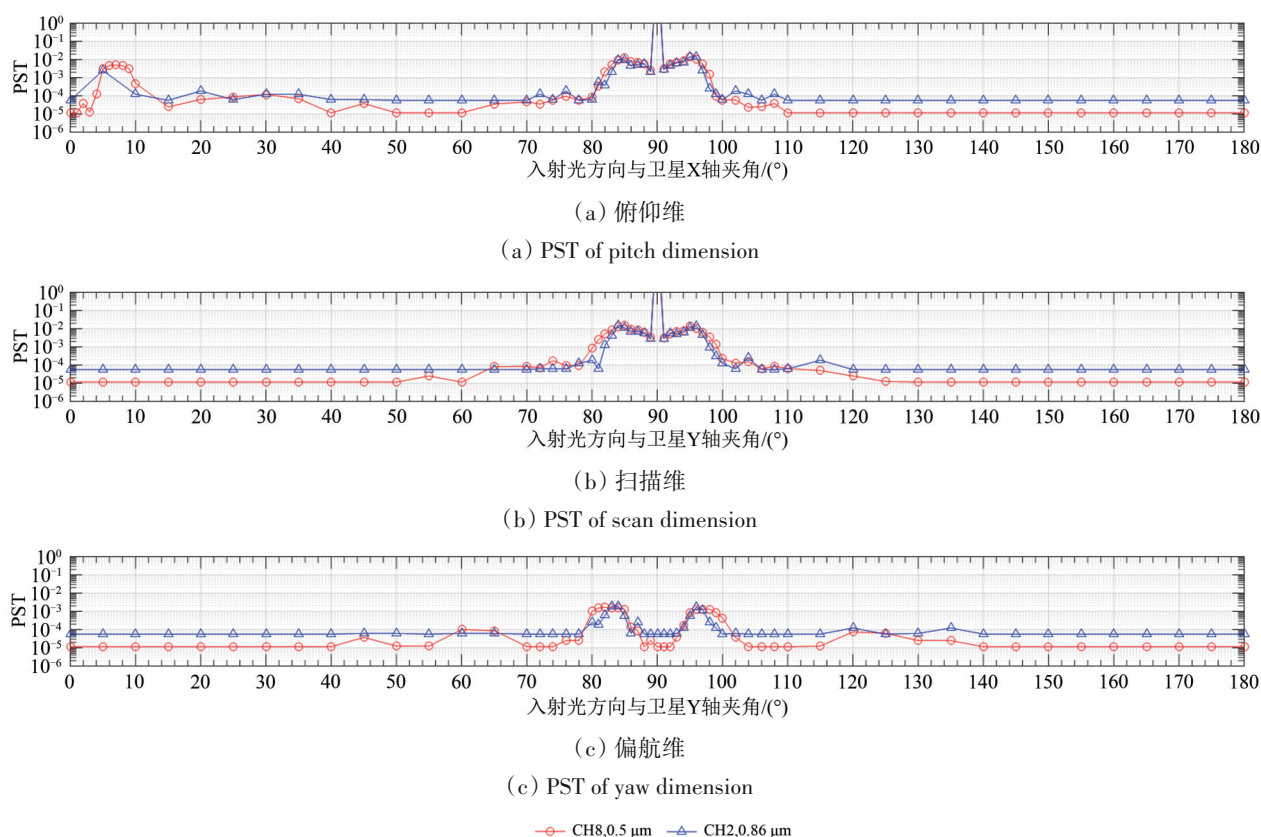


图 3 VIRR 可见光和近红外通道在 3 个维度的 PST 曲线

Fig. 3 PST curves of visible and near-IR band of VIRR in three dimensions

从图 3 中可以看出扫描维的 PST 曲线在 90° 左右两侧具有对称的两个峰值, 反映出光学系统的成像轴对称性。俯仰维曲线同样在 90° 左右两侧存在对称的两个峰值, 但是在 9° 多出一个峰值, 这是由扫描镜和仪器壳体的外形结构导致的。当光源分别从扫描镜一端和仪器外壳一端入射时被遮挡情况不同, 所以俯仰维 PST 曲线与扫描维相比存在差异。俯仰维和扫描维在 $90^\circ \pm 9^\circ$ 处的峰值量级

为 $\sim 1\text{E}-2$, 说明杂散光在偏离光轴 9° 附近入射会对仪器造成较强的影响, 此时杂散光通过扫描镜转折进入主镜筒。通过 TracePro 软件仿真分析, 这一部分杂散光影响的主要来源是光线穿过主镜遮光筒和次镜光阑之间的空隙直射入分光镜筒, 从而进入后光路被成像在探测器上, 次要来源是主镜反射的杂散光在次镜光阑表面散射进入后光路。

而俯仰维在入射光与卫星 X 轴夹角为 9° 的峰

值对应的是杂散光从扫描电机盖一侧入射，偏离主镜筒光轴 9° ，不经过扫描镜转折直接穿过电机盖与主镜遮光筒之间的缝隙入射到分光镜筒，从而进入后光路造成像面的杂散光污染，并且辐射的能量与 $90^\circ\pm 9^\circ$ 处的相当。表3显示了这两种杂散光入射情况对应的各个关键面的PST量级。偏航维的杂散光入射路径与此相似，由于电机盖的遮挡面积更大，所以峰值低一个量级。

表 3 杂散光峰值情况对应各关键面 PST 量级

Table 3 The PST level of each critical surface corresponding to situations where straylight peaks

关键面	PST 量级	关键面	PST 量级
扫描镜表面	0.853	扫描镜表面	0.0402
主镜面	0.522	电机盖一侧入射，主镜面	0.194
次镜光阑	0.475	离轴 9° ，次镜光阑	1.548
接套内壁	$3.33\text{E}-3$	接套内壁	$1.72\text{E}-5$

光源入射角度进一步增大时，通过次镜消杂光阑和主镜遮光筒的衰减，杂散光得到抑制。为了验证建模及仿真结果，对与在轨仪器同技术状态的备份产品开展了实验室杂散光复测工作。

2.3 备份产品杂散光复测

我们对 VIRR 备份产品在 PST 测试实验室的暗室内进行了杂散光测试。PST 测试系统组成主要有大功率激光器、平行光管、暗室、转台和探测器系统，激光器出射波长为 $0.66\text{ }\mu\text{m}$ 、功率为 450 mW，平行光管为离轴两反结构，出光口径 1 m，PST 测试系统布局如图4所示。

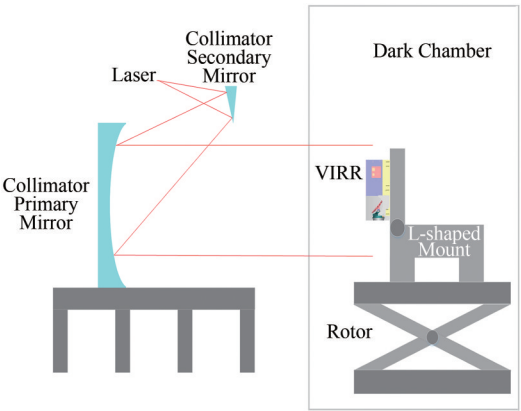


图 4 PST 测试系统布局图

Fig. 4 Configuration of PST measuring system

如图5所示，依靠L型安装支架和转台的共同作用，在3个维度旋转 VIRR 备份产品，实际测得了 VIRR 在俯仰维、扫描维和偏航维的 PST。在测

试全过程中仪器的扫描镜固定在指星下点的位置，支架和部分支撑结构表面覆盖了黑布以减小试验误差。VIRR 备份产品杂散光测试结果如图6所示，为了将3个维度的实测 PST 曲线在一张图中展现，横坐标采用了离轴角，表示的是杂散光入射方向与光学系统光轴的夹角。对应到仿真 PST 曲线的3个维度的横坐标，应当取离轴角的互余角，即对于俯仰维离轴角的余角是入射光与卫星 X 轴的夹角，对于扫描维和偏航维离轴角的余角是入射光与卫星 Y 轴的夹角。

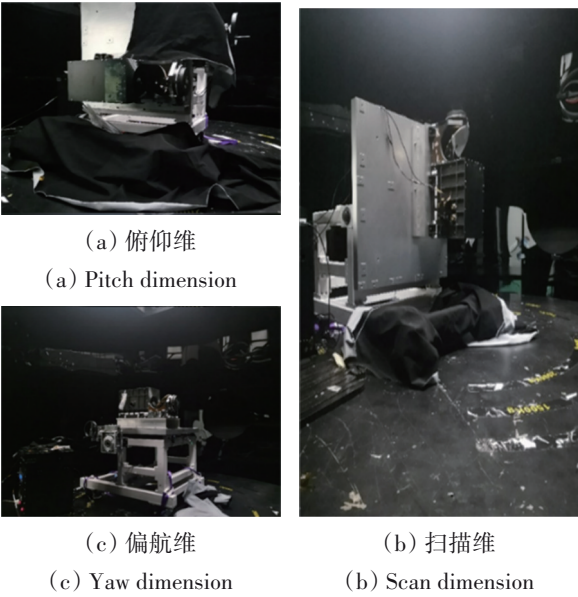


图 5 VIRR 杂散光实验室测试
Fig. 5 The experimental measurement of stray light for VIRR in laboratory

PST 曲线的分析结果可以总结为以下3点：(1) 在峰值附近俯仰维与扫描维的量级比较符合，扫描维 PST 曲线具有与仿真结果相似的对称性。当光源入射角进一步增大，由于仪器壳体存在遮挡，俯仰维曲线的对称性就不存在了，但是扫描维曲线仍然对称。(2) 俯仰维和扫描维峰值在离轴角为 10° 附近，与仿真结果对应，验证了直射杂散光的影响。同样俯仰维在离轴大角度（图6中 75° ）也有一个峰值，对应的就是杂散光从电机盖方向入射的情况。(3) 通过对比偏航维的 PST 曲线可以发现，光源从偏离主镜筒光轴 $\pm 20^\circ$ 范围内入射时，由于电机盖存在一定的遮挡，探测器接收的杂散光相比俯仰维和扫描维低2—3个量级。偏航维 PST 曲线也存在对称性，在曲线的下限（ $\sim 1\text{E}-6$ 量级）与其他两个维度的结果比较接近。

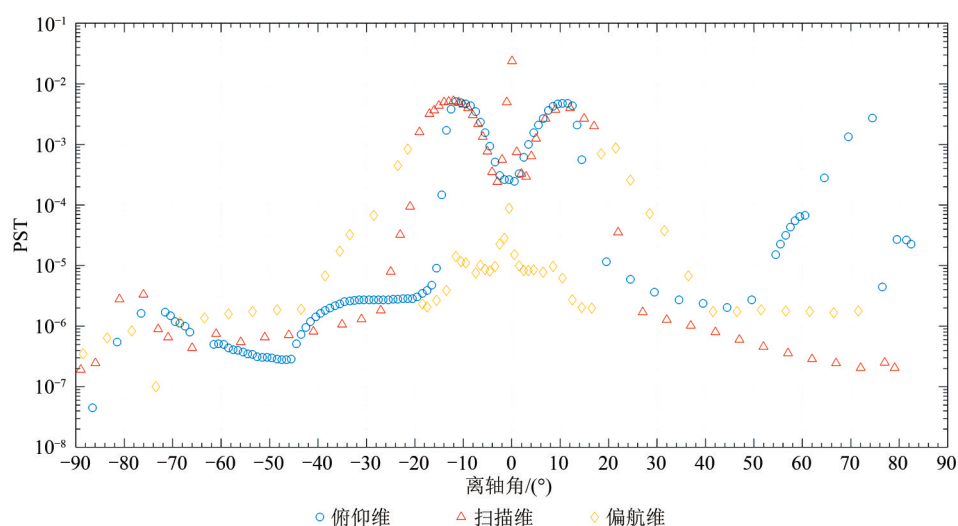


图6 VIRR可见光通道不同维度PST测量值

Fig. 6 PST measurement result for visible channel of VIRR in different dimensions

如图7所示,在VIRR电机盖上加装挡板进行了验证测试。图8显示了VIRR加装挡板前后俯仰维PST的测试结果对比,可以看出加装挡板后,从电机盖方向入射的杂散光受到抑制,峰值下降了一个数量级,抑制效果明显。

实测结果与仿真存在一定的误差,分析误差来源有以下几个方面:(1)仪器拆解成部件,并且在实验室环境中放置了近十年,与设计时的指标参数肯定有较大差异,表现在镜面光洁度、透镜透过率、黑漆散射率等参数的改变;(2)仿真模型中采用的是仪器自身的探测器,而实测采用的是测试系统的探测器,两者焦面尺寸不同,探测杂散光的范围也就有差异,由于杂散光在像面分布不均匀,所以会导致最后测得的PST结果存在差

异;(3)仪器的零位是通过转台旋转时取探测器最大输出位置得到的,可能会存在一定的转角误差。

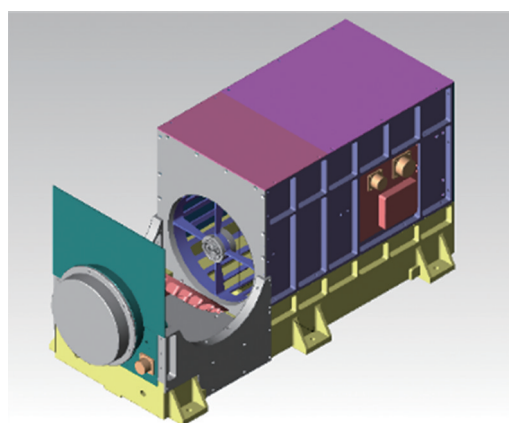


图7 VIRR俯仰维加装挡板

Fig. 7 VIRR installed a shield on the motor housing

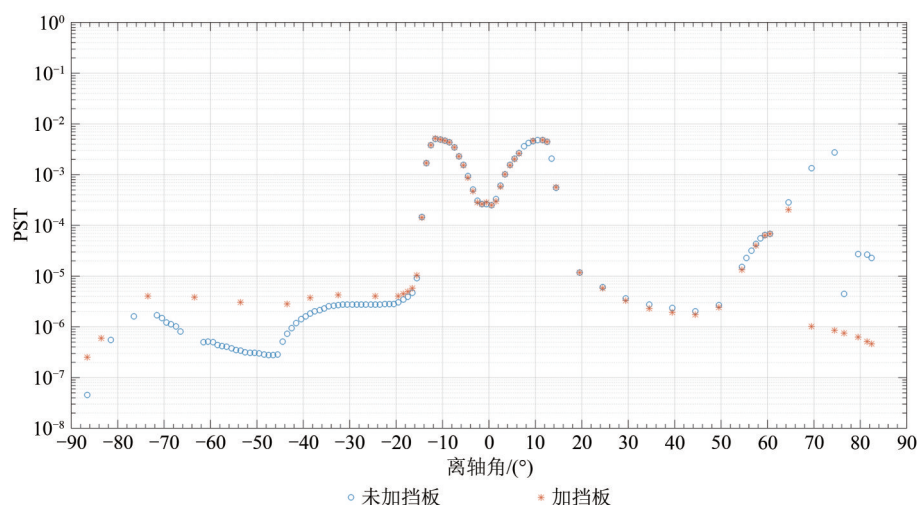


图8 VIRR俯仰维加装挡板前后PST测试结果对比

Fig. 8 PST in pitch dimension with or without shield

3 VIRR在轨杂散光仿真

以FY-3C/VIRR为例分析VIRR仪器在轨杂散光影响情况。FY-3C星运行在太阳同步轨道, 标称轨道高度836 km, 降交点地方时09:07 (UTC)。考虑到卫星存在轨道漂移, 实际轨道参数与发射时的标称值存在差异, 所以在轨道仿真时选取卫星当日两行报TLE (Two Line Element) 作为轨道参数的输入, 仿真结果能够较好地符合实际情况。图9为使用STK导入20180321当日两行报进行轨道仿真, 得到太阳矢量的时间分布, 与OBCXX文件进行对比, 时间角度均符合。

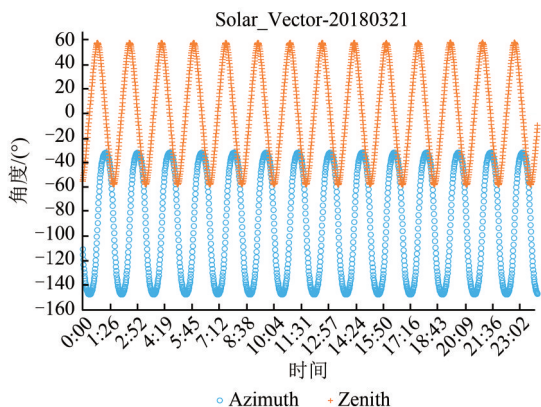


图9 2018年3月21日太阳矢量时间分布

Fig. 9 Time profile of solar vector on March 21, 2018

在卫星坐标系中, 太阳矢量 (Solar Vector) 以太阳方位角 θ_A 和太阳天顶角 θ_z 表示。太阳方位角 θ_A 是卫星太阳连线在卫星 XY 平面内投影与卫星 X 轴所成夹角, 对于FY-3C星, $\theta_A \in (-180^\circ, 0^\circ)$,

太阳天顶角 θ_z 是卫星太阳连线与卫星 (-Z) 轴之间的夹角, $\theta_z \in (0^\circ, 180^\circ)$ 。太阳光线矢量 (Sunlight Vector) 与太阳矢量方向相反, 太阳光线矢量在卫星坐标系下与 X、Y、Z 这 3 轴的夹角分别为 $\alpha\beta\gamma$, 太阳光线矢量与太阳方位角、天顶角之间的转换公式如下:

$$\overrightarrow{\text{Sunlight}} = -1 \cdot \overrightarrow{\text{Solar}} = \begin{bmatrix} \cos\alpha \\ \cos\beta \\ \cos\gamma \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sin\theta_A \sin\theta_z \\ -\cos\theta_A \sin\theta_z \\ \cos\theta_z \end{bmatrix} \quad (2)$$

转换后的太阳光线矢量如图10所示, 根据该矢量设置TracePro中光源的法向。卫星出阴影时 γ 角从 118° 开始减小, 直到小于 90° 后太阳光不能再照射到卫星对地面。考虑到平台环境可能存在杂散光的相互影响, 在仿真中加入了卫星平台上与VIRR直接相邻的载荷中分辨率光谱成像仪 (MERSI) 的包络模型, 如图11(a)所示。根据仪器外部包裹的多层材料设置表面属性, 选择 Diffuse White 材料, 吸收率0.01, 总散射0.99。图11中显示了卫星出阴影时太阳光线的传输情况。在卫星出阴影前的8—10 min, 星下点仍然是黑夜, 但是由于卫星轨道高度, 太阳光已经可以掠入射到卫星对地面, 太阳光经MERSI侧壁多层材料漫反射, 会对VIRR产生杂散光影响。图11(b)显示了绝大部分入射的光线经过主镜遮光筒内壁一次反射衰减后进入后光路, 少量散射光线直接进入后光路, 通过像面照度与光源照度求比值, 出阴影杂散光PST量级在 $6E-6$ — $1E-5$, 比从电机盖一侧无遮挡直接入射的情况低两个数量级。

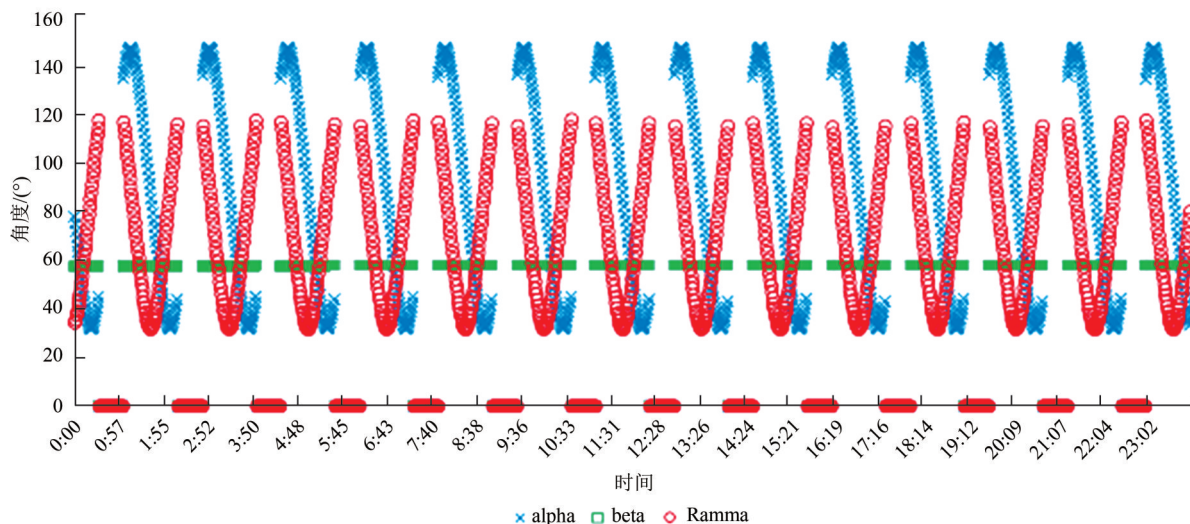


图10 2018年3月21日太阳光线矢量时间分布

Fig. 10 Time profile of sunlight vector on March 21, 2018

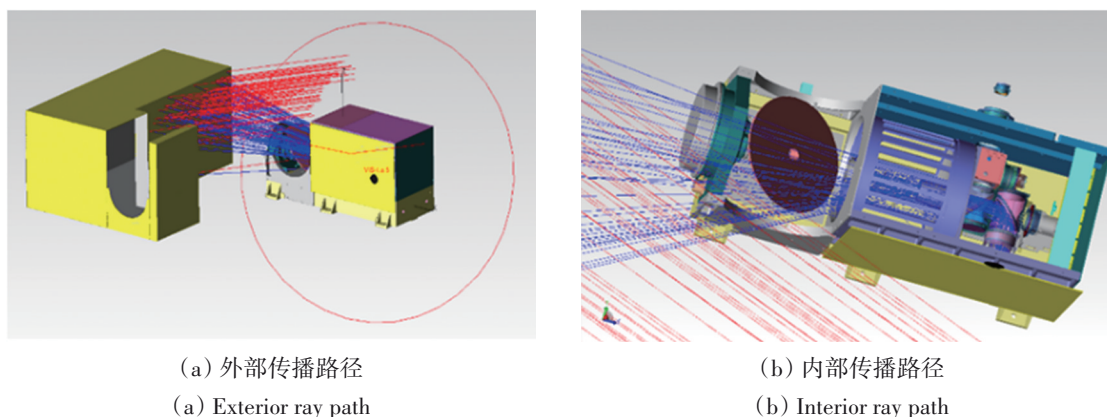


图 11 VIRR 太阳光入射仿真

Fig. 11 Simulated sunlight incidence on VIRR

卫星进阴影时由于MERSI遮挡,未发现杂散光入射到仪器内部。对通道3进行仿真,也得到类似的结果,出阴影时杂散光量级约 $4\text{E}-6$ 。同时发现出阴影时黑体表面能够被太阳光照射到,与MERSI情况类似(钮新华等,2015)。该照射条件下的仿真结果可以作为卫星出阴影时VIRR产生杂散光影响和黑体计数值异常现象的一种解释。

4 结 论

本文对VIRR实际成像系统进行光机建模,获得了仪器不同光谱通道在不同维度的PST曲线。为了验证建模仿真的正确性与仿真结果进行对比,对仪器备份产品进行了恢复和实验室杂散光测试,得到仪器在实际光源照射下的响应情况。通过对PST曲线进行分析,找到了仪器可能受杂散光影响的光照条件。结合卫星轨道参数展开分析,并考虑到载荷之间的相互影响,仿真了不同光照条件下的杂散光效应,获得了杂散光量级的初步结果。通过为仪器加装挡板展示了一种抑制杂散光的方法,可以为同类型载荷杂散光抑制设计提供参考。下一步工作可以从提高仿真精度和建立PST结果与再定标系数之间的联系这两方面推进。

参考文献(References)

- Breault R P. 2009. Control of stray light//Bass M, DeCusatis C, Enoch J, Lakshminarayanan V, Li G F, Macdonald C, Mahajan V and Van Stryland E, eds. Handbook of Optics. 3rd ed. New York: McGraw-Hill, Inc.
- Cao C Y, Weinreb M and Sullivan J. 2001. Solar contamination effects on the infrared channels of the advanced very high resolution radiometer (AVHRR). Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 106(D24): 33463-33469 [DOI: 10.1029/2001JD001051]
- Freniere E R, Gregory G G and Chase R C. 1997. Interactive software for optomechanical modeling//Proceedings of SPIE 3130, Lens Design, Illumination, and Optomechanical Modeling. San Diego: SPIE: 128-133 [DOI: 10.1117/12.284054]
- Mills S, Weiss S and Liang C. 2013. VIIRS day/night band (DNB) stray light characterization and correction//Proceedings of SPIE 8866, Earth Observing Systems XVIII. San Diego: SPIE: 88661P [DOI: 10.1117/12.2023107]
- Niu X H, Zhou J G, Chen S S, Wang X H, Ding L and Hu X Q. 2015. Simulation and suppression of solar on-orbit pollution of FY-3/MERSI onboard blackbody. Optics and Precision Engineering, 23(7): 1822-1828 (钮新华, 周巨广, 陈帅帅, 王向华, 丁雷, 胡秀清. 2015. FY-3/中分辨率光谱成像仪上黑体的在轨太阳污染模拟与抑制. 光学精密工程, 23(7): 1822-1828) [DOI: 10.3788/OPE.20152307.1822]
- Wang L, Hu X Q, Chen L and He L L. 2018. Consistent calibration of VIRR reflective solar channels onboard FY-3A, FY-3B, and FY-3C using a multisite calibration method. Remote Sensing, 10(9): 1336 [DOI: 10.3390/rs10091336]
- Xu H L, Hu X Q, Xu N and Min M. 2015. Discrimination and correction for solar contamination on mid-infrared band of FY-3C/VIRR. Optics and Precision Engineering, 23(7): 1874-1879 (徐寒列, 胡秀清, 徐娜, 闵敏. 2015. FY-3C/可见光红外扫描辐射计中红外通道太阳污染的认识和修正. 光学精密工程, 23(7): 1874-1879) [DOI: 10.3788/OPE.20152307.1874]
- Yang Z D, Lu N M, Shi J M, Zhang P, Dong C H and Yang J. 2012. Overview of FY-3 payload and ground application system. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 50(12): 4846-4853 [DOI: 10.1109/TGRS.2012.2197826]
- Zhang E, Chen S S and Zhang L Y. 2020. The phenomena of lunar observation in cold space reference sampling area of Visible and Infrared Radiometer on FY-3 Meteorological Satellite. Journal of Infrared and Millimeter Waves, 39(6): 802-809 (张镔, 陈帅帅, 张里阳. 2020. 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. 红外与毫米波学报, 39(6): 802-809) [DOI: 10.11972/j.issn.1001-9014.2020.06.020]

Modeling and simulation of stray light based on the Visible and InfraRed Radiometer

YIN Kai^{1, 2, 3}, NIU Xinhua^{1, 3}, ZHANG E^{1, 3}

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 effects that stray light has on satellite-borne infrared optical systems are embodied in two perspectives: one is degrading the quality of imaging, and the other is decreasing the precision of calibration. Satellite-borne infrared optical systems are situated in an extraneous atmosphere environment, where stray light is simply formed at a specific operating position relative to celestials such as the sun and the moon. Owing to this, the imaging capability of the payload and the precision of calibration rely vitally on the evaluation of stray light. The Visible and InfraRed Radiometer (VIRR), which embarks on FY-3A/B/C satellites, has been operating in orbit for more than 10 years, during which the massive quantity of data acquired is significant for the study of climate change. The long period of the payload's consistent operation covered various circumstances of illumination. By evaluating the variation of the payload's response in a long time sequence, the changing trend of the payload's on-orbit performance can be obtained, which is of great significance for the recalibration of historical data.

The imaging optical system of the VIRR is modeled and simulated by means of TracePro, which yields the Point Source Transmittance (PST) curves of different spectral bands in pitch, scan, and yaw dimension, respectively. PST is one of the widely adopted indicators for the characterization of an optical system's response to stray light. It is defined as the radiance of the detector aroused by an off-axis point source and then normalized to the entrance pupil radiance when the point source is on axis.

The experimental stray light measurement of the backup of the on-orbit instrument is conducted as well. Based on the experimental results, a comparative analysis between simulated result and actual measurement is achieved qualitatively. Possible incident angles for which the instrument is susceptible to stray light are found by studying the PST curves. A shield is later mounted on the instrument to demonstrate the effectiveness of the stray light suppression method.

To evaluate the on-orbit performance of VIRR under stray light influence, the simulation and analysis of orbital parameters, especially the solar irradiance, are performed as well. Taking into consideration the mutual effects of payloads, the illumination situation during satellite crossing terminator is simulated, and the path through which solar contamination influences the instrument both externally and internally is found.

The PST curves of pitch, scan, and yaw dimension of VIRR reveal the geometric profile of the instrument. The peaks of pitch and scan dimension appear at an off-axial angle of 10° , which is consistent with the simulation results. Likewise, there is a peak at a large off-axial angle ($\sim 75^\circ$) in the pitch dimension, which corresponds to a stray light incident from the motor side. The yaw dimension PST is two to three magnitudes lower than that of the pitch and scan dimension within the range of $\pm 20^\circ$. This is due to the blockage of the motor housing. Preliminary results of the magnitude of stray light are also obtained. The transmitting path of stray light is predicted by simulation results and later verified by on-orbit data.

This work can provide reference for the design of similar payloads with regard to suppressing stray light and preventing sun contamination. In addition, the results yielded can fundamentally support the recalibration of historical remote sensing data.

Key words: remote sensing, Visible and Infra-Red Radiometer (VIRR), stray light suppression, point source transmittance (PST), solar contamination, recalibration

Supported by National Key Research and Development Project of China (No. 2018YFB0504901)