

# 空间污染条件下红外测量相机响应衰减模型的建立与应用

张 寅 丛明煜 周宇星

哈尔滨工业大学空间光学工程研究中心, 黑龙江 哈尔滨 150001

**摘要** 基于某型号大气辐射测量卫星在轨定标实验数据,开展了空间污染物对天基红外测量相机响应性能的影响研究。建立了具有明确物理意义的测量相机灰度响应衰减模型,使用实测数据对模型参数进行了拟合,拟合相对均方根误差小于1%,参数值与其物理意义吻合较好;提出了基于相机线性响应范围与最小辐射分辨率要求双重约束下的空间污染容限确定准则,得出了推荐去污间隔时间为1250 h的结论;给出了利用衰减模型预估任意时刻定标系数的方法,分别利用模型预估定标系数、历史定标系数以及当轨定标系数对测量灰度数据进行了辐射标定,预估定标系数的标定误差小于3%,能够在保证像面质量的同时提高测量精度。

**关键词** 遥感;相机响应衰减模型;在轨辐射定标;空间污染物;污染容限

**中图分类号** V445.8 **文献标识码** A

**doi:** 10.3788/AOS201535.0212004

## Establishment and Application of Infrared Camera Response Attenuation Model due to Contamination in Satellite

Zhang Yin Cong Mingyu Zhou Yuxing

Research Center for Space Optical Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin, Heilongjiang 150001, China

**Abstract** On-orbit radiometric calibration data from some types of atmospheric radiation measurement satellite are analyzed to investigate the impact of pollutants on the response performance of space-based infrared camera. An attenuation model of camera responded grayscale is established with a clear physical meaning, whose parameters are fitted using the practical data with the relative root mean square errors less than 1%, and the fitted values coincide with their physical meanings well. In order to determine the pollution tolerance in satellite, rules based on the constraints of camera linear response range and the minimum radiance resolution requirements are proposed, and the recommended decontamination interval of 1250 h is obtained. The method of using the attenuation model to predict calibration coefficients at any moment is presented, and calibration coefficients from model prediction, history calibration tests and the time-matched calibration test are used to convert measuring grayscale data to radiance. Results show that the model-predicted coefficients can control the calibration errors with less than 3% and are able to improve the measurement accuracy while ensuring image quality.

**Key words** remote sensing; attenuation model of camera response; on-orbit radiometric calibration; pollutants in satellite; pollution tolerance

**OCIS codes** 120.0280; 110.3080; 150.1488

### 1 引言

光学遥感卫星在轨运行一段时间后,受空间污染物的影响,成像质量会有一定程度下降<sup>[1-4]</sup>。我国于20

收稿日期:2014-07-17;收到修改稿日期:2014-09-11

基金项目:总装备部预研基金(z/07-85-0639-2012)

作者简介:张寅(1986—),男,博士研究生,主要从事空间光学信息处理与战略场景成像仿真技术方面的研究。

E-mail: hitzhangyin@gmail.com

导师简介:丛明煜(1964—),男,博士,教授,主要从事空间光学工程方面的研究。E-mail: mycong@hit.edu.cn

世纪80年代末发射的第一颗太阳同步轨道气象卫星FY-1A,在轨运行很短时间内,扫描辐射计处于低温下的红外探测器窗口便受到了污染,以致失效<sup>[5]</sup>。导致天基红外测量相机响应性能下降的主要污染物包括在轨运行初期阶段的水汽污染和运行中后期的有机物污染<sup>[6-7]</sup>,这些污染物会逐渐凝结、附着在相机光学器件表面,使系统光谱透射率发生改变,相机焦面实际接收到的能量逐渐减少<sup>[8]</sup>。

我国近期发射的某型号大气辐射测量实验卫星,采用电阻丝加热(分布在光学系统中)的方式,缓解空间水汽的凝结污染。但由于加热去污过程耗时较长,并且在此过程中相机无法执行正常的测量任务,频繁去污是不可取的。另一方面,每次大气背景测量前都应进行在轨定标实验,以减少相机响应衰减对最终辐射亮度标定的影响。如果某次测量实验中缺乏相应的定标数据,直接使用之前的定标数据无疑会引入较大的误差。因此,亟需建立相机响应(空间污染程度)与在轨工作时间的关系模型,帮助确定测量相机的污染容限与合适的去污间隔时间,修正定标数据与测量数据时间差异引起的标定误差。

本文建立了相机灰度响应与在轨工作时间的关系模型,并在此基础上提出了污染容量确定准则以及定标系数预估方法。需要特别说明的是,所提及的相机响应衰减模型不包括黑体以及相机组件自身的性能衰减。因为在入轨初期以及所考察的较小时间尺度内,它们对相机灰度下降的影响远远小于空间污染物。

## 2 在轨定标实验概述

实验卫星搭载的红外多谱段凝视相机,包括A(2.7 μm)、B(4.3 μm)两个谱段,共用一个探测器焦面,通过转动滤光轮实现谱段间的切换。利用二维摆镜控制相机视线方向,分别对两个不同温度范围的黑体凝视成像,完成各自的在轨辐射定标实验。黑体设置在光学系统入瞳处,以减少自身非均匀性对定标结果的影响。可以通过调节相机的增益与积分时间来适应较大的大气背景辐射亮度范围<sup>[9]</sup>。所使用的定标实验数据均在同一相机工况下获得。

相机首次加热去污后分别对A、B谱段进行了一次在轨全温度定标实验,两个黑体从各自的温度下限缓慢上升到温度上限,并在事先设定的4个温度点短暂停留。图1给出了该次定标实验的相机响应灰度随黑体等效亮度的变化情况,以及使用温度点1与温度点4线性定标时的相对响应误差。一般而言,实际选用的黑体定标温度应当覆盖测量对象的辐射亮度范围。在该工况下,A、B谱段大气背景的估计辐射亮度范围均为 $10^{-2} \sim 10^{-1} \text{ W}/(\text{sr} \cdot \text{m}^2)$ 。从图1可以看出,温度点1和温度点4覆盖的亮度区间基本满足这一要求,并且区间内相机响应拥有良好的线性度。如果直接使用温度点1和温度点4进行高低温线性定标处理,响应相对误差可控制在2%以内,完全满足相机在轨辐射定标的精度要求,并且可以缩短在轨定标实验时间,降低数据处理难度。因此,之后的在轨定标实验中只对温度点1和4下的黑体进行了成像。

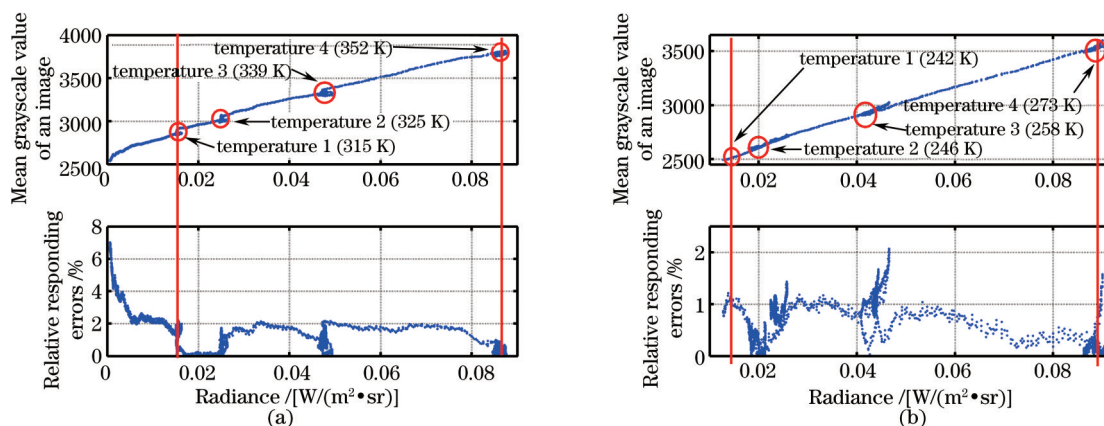


图1 在轨全温度定标实验结果。(a) A谱段; (b) B谱段

Fig.1 Results of the on-orbit all temperature calibration test. (a) Spectrum A; (b) spectrum B

## 3 测量相机灰度响应衰减分析及建模

由于空间污染物对光学系统传输路径上能量的消光作用,测量相机焦平面实际接收到的光子数逐渐减

少,图像整体灰度值逐渐降低。图2给出了定标实验时相机平均灰度随在轨工作时间的变化关系。工作时间的起点刚刚进行完一次历时六天的在轨加热去污,可以认为此时不存在污染物的影响。在初始的300 h内,A谱段的响应值迅速下降,之后进入了一段为期300 h左右的稳定期。在轨工作600 h以后再次进入明显的衰减期。1200 h后,像面灰度响应已不足初始阶段的75%。相对而言,B谱段的响应衰减曲线要平缓得多,1200 h时,灰度响应只下降了不到7%。由Gerakines或Warren提供的数据可知<sup>[10-11]</sup>,冰晶在2.7 μm与4.7 μm两个谱段的消光系数差异很小,而水汽在2.7 μm附近的吸收截面却比4.3 μm附近高至少三个量级<sup>[12]</sup>,镜片表面凝结的冰晶与光学路径中弥散水汽的共同作用导致了A、B谱段上述响应衰减差异。

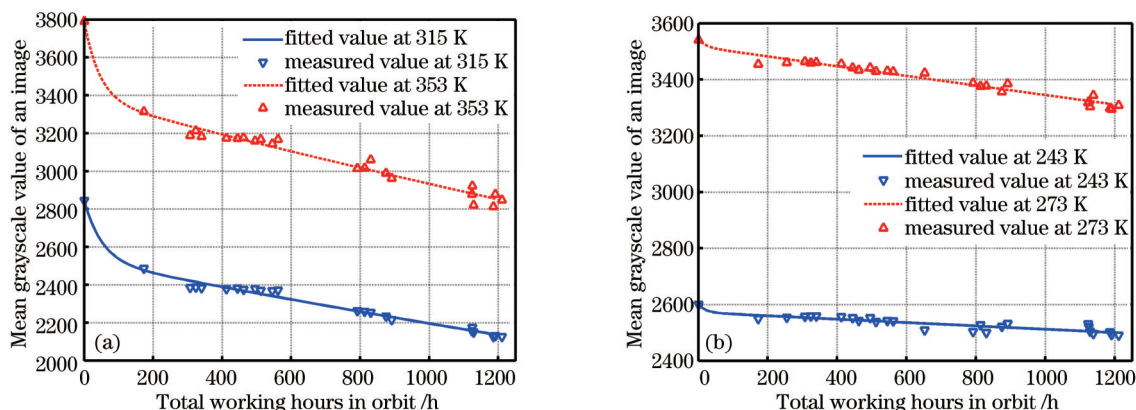


图2 高低定标温度点下相机灰度响应衰减拟合曲线。(a) A谱段;(b) B谱段

Fig.2 Fitted attenuation curves of the camera responded grayscale at both high and low calibration temperature points. (a) Spectrum A; (b) spectrum B

考虑黑体温度为  $B$  时,相机的灰度响应  $\hat{G}(t, B)$  主要来自两个部分,黑体辐射  $G(t, B)$  以及环境温度等因素产生的杂散光  $N(t, B)$ <sup>[13]</sup>。由于污染物随工作时间  $t$  增加,这三个变量均为  $t$  的函数,省略变量  $B$ ,它们的关系可以表示为

$$\hat{G}(t) = G(t) + N(t), \quad (1)$$

根据比尔定律,(1)式可以改写为

$$\hat{G}(t) = G_0 \exp[-\tau_c(t)] + N_0 \exp[-\tau_N(t)], \quad (2)$$

式中  $G_0$  和  $N_0$  分别为无污染物影响时的黑体与杂散光引起的灰度响应。由于  $G_0$  和  $N_0$  拥有不同的光学路径,因此它们对应的污染物光学厚度  $\tau_c(t)$  与  $\tau_N(t)$  有所差异。假设  $\tau_c(t)$  和  $\tau_N(t)$  均随在轨工作时间线性增长,这种假设并不精确,但是形式简单,在实际应用中效果良好。此时,可以建立空间污染物消光条件下,相机灰度响应随时间变化的双指数衰减模型:

$$\hat{G}(t) = G_0 \exp(-\alpha t) + N_0 \exp(-\beta t), \quad (3)$$

式中  $\alpha$  和  $\beta$  分别代表污染物光学厚度  $\tau_c(t)$  和  $\tau_N(t)$  的增长速率。当  $t=0$  时,(3)式变为  $\hat{G}(0) = G_0 + N_0$ , 与工作初始时(加热去污刚刚结束)忽略空间污染物影响的假设自洽。

(3)式表示的模型中有4个参数需要拟合求取,即  $G_0$ 、 $N_0$ 、 $\alpha$  和  $\beta$ 。为了与模型计算值  $\hat{G}(t)$  区别,令  $\tilde{G}(t)$  为相机的实际灰度响应值。因为黑体辐射占相机响应的绝大部分,  $G_0$  的初值设为相机的初始响应灰度  $\hat{G}(0)$ ;  $N_0$  的初值可以参考相机设计时的杂散光估计量,这里取黑体辐射响应灰度  $G_0$  的7%;从测量数据来看,  $\alpha$  和  $\beta$  应均为小量,初值设为0。表1给出了拟合结果,使用相对均方根误差(RRMSE)评估模型的拟合效果,RRMSE的计算公式为

$$S_{\text{RRMSE}} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \left[ \frac{\hat{G}(t_n) - \tilde{G}(t_n)}{\hat{G}(t_n)} \right]^2}, \quad (4)$$

式中  $n$  为定标实验时间的序列索引,  $N$  为参与拟合的定标实验次数。两个谱段的RRMSE均控制在1%以内,



表 1 模型参数拟合值及拟合相对均方根误差

Table 1 Fitted values of the model parameters and the corresponding RRMSE

Band	Blackbody temperature /K	$G_0$	$\alpha$	$N_0$	$\beta$	RRMSE /%
Spectrum A	353	3380	$1.417 \times 10^{-4}$	410.0	0.0226	0.73
	315	2527	$1.405 \times 10^{-4}$	318.0	0.0195	0.94
Spectrum B	273	3517	$5.027 \times 10^{-5}$	27.00	0.0500	0.45
	243	2572	$2.362 \times 10^{-5}$	29.00	0.0500	0.37

拟合效果良好。

由拟合出的参数值可知,  $G_0$  远大于  $N_0$ , 接近测量相机初始工作时的灰度响应。A 谱段的  $\alpha$  值比 B 谱段大 3~6 倍, 最终表现为 A 谱段的灰度响应衰减速率大于 B 谱段。各参数的拟合结果与物理意义吻合良好。但是同时可以发现, A 谱段的  $N_0$  值明显大于 B 谱段,  $\beta$  值普遍比  $\alpha$  值高 2~3 个量级。这并不能说明 A 谱段的杂散光要远大于 B 谱段或是杂散光的衰减速度要远大于黑体辐射。因为  $N_0$  与  $\beta$  值实际上主要取决于初始工作阶段的实验数据, 而从图 2 中可以发现, 初始 300 h 内的实验数据点个数非常有限, 这将造成  $N_0$  与  $\beta$  拟合时产生较大的误差。同时, 相比黑体辐射项, 杂散光项所占比重较小,  $\beta$  拟合时的置信区间较宽, 改变  $\beta$  的值对模型整体趋势的影响很小,  $\beta$  的大小很难真实反映杂散光的衰减速率。

## 4 测量相机灰度响应衰减模型的实际应用

### 4.1 确定测量相机污染容限的方法

结合实际应用中污染物对相机测量能力影响, 在相机灰度响应衰减模型的基础上, 制定出两条污染容限确定准则:

- 1) 衰减后的灰度响应值超出相机的线性响应范围

测量相机 A、B 谱段的实际灰度线性响应范围应覆盖相机对高低温黑体成像的平均灰度, 保证在估计的大气背景辐射范围内, 辐射亮度与灰度的正常线性映射关系, 即

$$G_{l,\min} < \hat{G}(t, B_{\text{low}}) < \hat{G}(t, B_{\text{high}}) < G_{l,\max}, \quad (5)$$

式中  $G_{l,\min}$ 、 $G_{l,\max}$  分别为相机线性响应灰度值的上下限,  $\hat{G}(t, B_{\text{high}})$ 、 $\hat{G}(t, B_{\text{low}})$  分别为高低温定标点的黑体辐射灰度响应值。当  $\hat{G}(t, B_{\text{low}}) < G_{l,\min}$  时, 使用高低温线性模型标定出的大气辐射亮度误差过大, 无法反映真实的大气辐射情况。 $\hat{G}(t, B_{\text{low}}) = G_{l,\min}$  时为空间污染到达容限时刻, 应立即进行在轨去污工作。图 3(a) 为通过相机灰度响应衰减模型计算出的  $G_{l,\min}$  与去污间隔时间的关系曲线, 由于谱段 A、B 共用一个相机焦面, 在同样的  $G_{l,\min}$  条件下, A 谱段要求的去污间隔更短。因此, 该准则下的去污间隔时间以 A 谱段为准。在实际应用

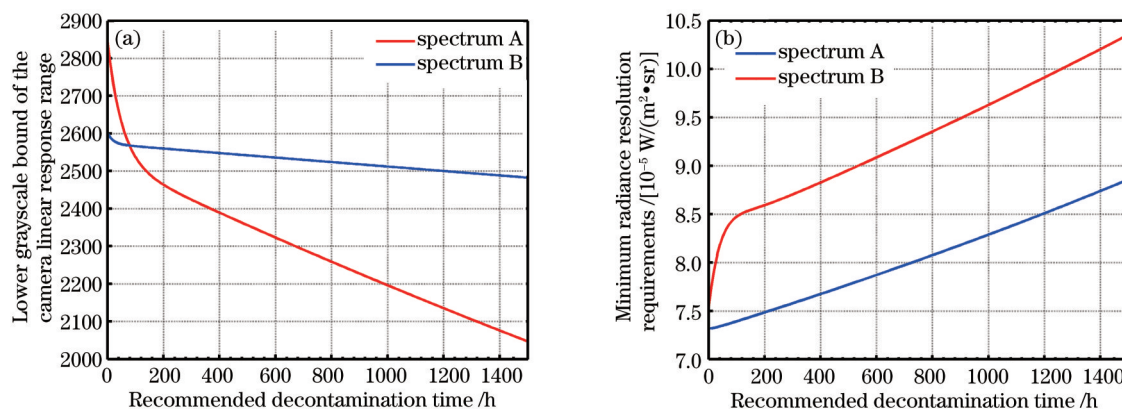


图 3 去污间隔时间与(a)相机线性响应范围下限及(b)最低辐射分辨率要求的关系

Fig.3 Relationships between decontamination interval and both (a) lower bound of the camera linear response range and (b) minimum radiance resolution requirements

中,相机的灰度线性范围下限为2100左右,相应的去污间隔要求为1300 h。

2) 衰减后的辐射分辨率无法满足需求

从图2中可以看出,相机对高温黑体成像时的响应衰减速率要略大于对低温黑体,这将导致测量相机辐射分辨率的下降。定义相机工作  $t$  小时后的辐射分辨率为  $\Delta L(t)$ ,则有

$$\Delta L(t) = \frac{L(B_{\text{high}}) - L(B_{\text{low}})}{\hat{G}(t, B_{\text{high}}) - \hat{G}(t, B_{\text{low}})}, \quad (6)$$

式中  $L(B_{\text{high}})$ 、 $L(B_{\text{low}})$  为黑体在高、低温定标点的理论辐射亮度。当  $\Delta L(t)$  接近最低辐射分辨率要求  $\Delta L_{\text{min}}$  时,测量相机已接近污染容限,需要开展加热去污工作。图3(b)为通过相机灰度响应衰减模型计算出的  $\Delta L_{\text{min}}$  与去污间隔时间的关系曲线。同样,当A、B谱段  $\Delta L_{\text{min}}$  一致时,A谱段要求的去污间隔时间更短,去污间隔时间以A谱段为准。相机实际要求的辐射分辨率为  $10^{-4} \text{ W}/(\text{sr} \cdot \text{m}^2)$ ,对应的去污间隔时间为1250 h。

综合考虑准则1)与准则2)的结果,选取较小值作为最终的去污间隔时间,建议相机工作1250 h后再次开展加热去污工作。

4.2 在轨定标系数的预估方法及应用分析

利用测量相机灰度响应衰减模型可以估计任意给定时刻相机的定标系数,对缺乏在轨定标实验支撑的测量数据进行标定。利用(3)式,依次建立焦面每个像元的灰度响应衰减模型,并对模型中的参数进行拟合求取。通过衰减模型估计相机对高低温黑体的灰度响应,计算每个像元的定标斜率系数  $k(m, n, t)$  与截距系数  $b(m, n, t)$  :

$$k(m, n, t) = \frac{\hat{G}(m, n, t, B_{\text{high}}) - \hat{G}(m, n, t, B_{\text{low}})}{L(B_{\text{high}}) - L(B_{\text{low}})}, \quad (7)$$

$$b(m, n, t) = \hat{G}(m, n, t, B_{\text{low}}) - k(m, n, t)L(B_{\text{low}}), \quad (8)$$

式中  $m, n$  为像元在焦面的行列位置。通过定标系数可以标定任一像元的辐射亮度:

$$L(m, n, t) = \frac{\hat{G}(m, n, t) - b(m, n, t)}{k(m, n, t)}, \quad (9)$$

式中  $\hat{G}(m, n, t)$  为该像元实际测量到的灰度数据。

分别采用模型预估的定标系数及不同在轨工作时间定标实验获取的定标系数,对A、B谱段在轨工作1211 h的黑体灰度图像进行了辐射亮度标定。该时刻的定标实验数据并未参与响应衰减模型的参数拟合,不会对拟合结果产生影响。如图4所示,将定标斜率系数  $k(m, n, t)$  在取值范围内等间隔划分成1000份,绘制其频次分布图,选取出频率大于0.0005的斜率区间为置信区间,区间外的像元为响应异常的无效像元。将利用当轨定标系数(定标实验时间为1211 h)筛选出的无效像元位置作为基准,统计使用其他定标系数时对

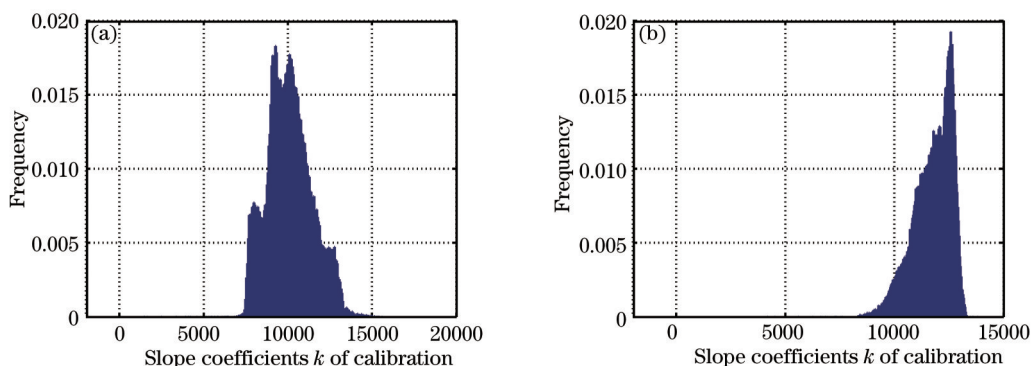


图4 在轨工作1211 h的模型预估定标斜率系数  $k$  频率分布图。(a) A谱段; (b) B谱段

Fig.4 Frequency distribution of the model-predicted calibration slope coefficients  $k$  at the working time of 1211 h in orbit. (a) Spectrum A; (b) spectrum B

无效像元的误判数与漏检数。最终的标定结果如表 2 和表 3 所示。表中  $R_b$ 、 $R_c$  和  $\varepsilon_r$  分别为定标黑体理论辐射亮度、标定后图像的亮度均值以及二者之间的相对误差； $\sigma_a$  和  $\sigma_r$  分别为标定后亮度图像的绝对标准差与相对标准差； $N_i$ 、 $N_f$  和  $N_m$  分别表示无效像元总数、误判数及漏判数。在计算亮度均值与标准差时事先除了无效像元，相对标准差由标定后亮度图像的绝对标准差除以亮度均值获得。从表中可以明显看出：

1) 在辐射亮度标定方面，由于空间污染导致的相机响应持续衰减，使用越早的定标系数造成的误差越大。而使用模型预估系数优势明显，标定出的平均辐射亮度误差接近使用当轨定标系数的标定结果，A、B 谱段的辐射亮度相对误差均可控制在 3% 以内；

2) 在非均匀性校正方面，使用当轨定标系数效果最佳，而使用预估定标系数与历史定标系数的非均匀性校正结果没有太大区别，亮度图像标准差结果非常接近。但在使用预估系数时会显著拉升图像整体亮度水平，相对标准差减小；

3) 在无效像元剔除方面，使用预估定标系数与历史定标系数都无法有效定位新出现的无效像元，漏检数处于同一水平。而使用预估定标系数产生的总无效像元与误判无效像元数要远大于使用历史定标系数。这主要是因为预估定标系数由历史定标系数拟合获得，历史定标实验判定出的无效像元位置，很可能在预估定标系数中仍被判定为无效，即预估无效像元接近历史无效像元的集合。即使这样，预估无效像元总数也不到像面总像元数的 1%，对像面总体质量的影响微乎其微，却可以大大提高测量数据的辐射标定精度，具有重要的应用价值。

表 2 A 谱段黑体辐射图像标定结果比较(黑体温度:315 K)

Table 2 Comparison of calibrated blackbody radiance image for spectrum A (blackbody temperature: 315 K)

Coefficients source	$t/h$	$R_b/[W/(sr \cdot m^2)]$	$R_c/[W/(sr \cdot m^2)]$	$\varepsilon_r/\%$	$\sigma/[W/(sr \cdot m^2)]$	$\sigma_r/\%$	$N_i$	$N_f$	$N_m$
On-orbit test	$t=323$		-0.0072	146.76	0.0037	-51.03	357	18	214
	$t=813$		0.0029	81.01	0.0020	67.06	392	14	175
	$t=1211$	0.0154	0.0156	1.04	0.0002	1.60	553	0	0
Model prediction	$t=1211$		0.0151	1.91	0.0030	19.65	669	291	175

Note: The bold italics marked in this table indicate that the calibrated average radiance is negative while using calibration coefficients at  $t=323$  and the calibrated results are meaningless.

表 3 B 谱段黑体辐射图像标定结果比较(黑体温度:265 K)

Table 3 Comparison of calibrated blackbody radiance image for spectrum B (blackbody temperature: 265 K)

Coefficients source	$t/h$	$R_b/[W/(sr \cdot m^2)]$	$R_c/[W/(sr \cdot m^2)]$	$\varepsilon_r/\%$	$\sigma/[W/(sr \cdot m^2)]$	$\sigma_r/\%$	$N_i$	$N_f$	$N_m$
On-orbit test	$t=323$		0.0460	17.55	0.0011	2.49	80	17	31
	$t=813$		0.0502	10.16	0.0010	2.00	78	15	31
	$t=1211$	0.0558	0.0544	2.53	0.0003	0.55	94	0	0
Model prediction	$t=1211$		0.0544	2.62	0.0016	2.93	519	472	47

## 5 结 论

通过对天基红外测量相机在轨定标实验数据及其响应衰减过程的细致分析，将在轨定标实验中相机的响应来源分解为黑体辐射与杂散光，建立起相机灰度响应与在轨工作时间的关系模型，并在此基础上提出了污染容限确定准则以及定标系数预估方法。有效解决了天基红外测量相机实际在轨运行过程中出现的两个典型问题：1) 如何确定合适的在轨去污间隔时间；2) 如何在缺乏当轨定标实验数据的情况下，减少测量数据的辐射标定误差。所提出的模型与方法已经成功应用在了该型号卫星测量数据的处理中，并取得了良好的效果，可以作为其他天基红外相机在轨定标工作的参考。

- 1 Zhao Xue, Zhou Yanping, Liu Haigang. Effect of optical system caused by space organism pollution[J]. Optical Technique, 2004, 30(1): 113-115.  
赵 雪, 周彦平, 刘海刚. 空间沾染对光学系统的影响分析[J]. 光学技术, 2004, 30(1): 113-115.
- 2 F De Luccia, D Moyer, K Rausch, *et al.*. Discovery and characterization of on-orbit degradation of the Visible Infrared Imaging Radiometer Suite (VIIRS) Rotating Telescope Assembly (RTA) [C]. International Society for Optics and Photonics, 2012: 85101A.
- 3 G Iona, J Butler, B Guenther, *et al.*. VIIRS on-orbit optical anomaly: Investigation, analysis, root cause determination and lessons learned [C]. International Society for Optics and Photonics, 2012: 85101C.
- 4 S Osterman, J Green, C Froning, *et al.*. The cosmic origins spectrograph: on-orbit instrument performance [J]. Astrophysics and Space Science, 2011, 335(1): 257-265.
- 5 W Zhang. Meteorological satellite program of China [C]. Asia-Pacific Symposium on Remote Sensing of the Atmosphere, Environment, and Space, 1998: 72-77.
- 6 Pei Yuntian. Study of Si-oil contamination on mirror of remote sensing instrument [J]. J. Infrared and Millimeter Waves, 1993, 12(3): 219-222.  
裴云天. 硅油对遥感仪器镜面污染的研究[J]. 红外与毫米波学报, 1993, 12(3): 219-222.
- 7 D Lockwood, Z Lu, J-M Baribeau. Quantum confined luminescence in Si/SiO<sub>2</sub> superlattices [J]. Phys Rev Lett, 1996, 76(3): 539.
- 8 A M Smith, B E Wood, L S Fletcher. Bidirectional reflectance of H<sub>2</sub>O cryofilms on specular and diffusing surfaces [J]. AIAA Journal, 1978, 16(5): 510-515.
- 9 Sun Zhiyuan, Chang Songtao, Zhu Wei. Radiation calibration method for infrared system with large aperture and broad dynamic range [J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(7): 0712006.  
孙志远, 常松涛, 朱 玮. 大口径、宽动态范围红外测量系统辐射定标方法[J]. 光学学报, 2014, 34(7): 0712006.
- 10 P Ehrenfreund, A C A Boogert, P A Gerakines, *et al.*. Infrared spectroscopy of interstellar apolar ice analogs [J]. Astronomy and Astrophysics, 1997, 328: 649-669.
- 11 S G Warren. Optical constants of ice from the ultraviolet to the microwave [J]. Appl Opt, 1984, 23(8): 1206-1225.
- 12 Dai Congming, Wei Heli, Hu Shunxing. Analysis on upper atmospheric radiance transfer characteristic to different HITRAN databas [J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(5): 0501001.  
戴聪明, 魏合理, 胡顺星. 不同版本 HITRAN 数据库对高层大气辐射传输影响特性分析[J]. 光学学报, 2013, 33(5): 0501001.
- 13 Li Yan, Liu Jianfeng. Research on integrative suppression of internal and external stray light in infrared optical remote sensor[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(9): 0928002.  
李 岩, 刘剑峰. 红外光学遥感器内杂散光和外杂散光的综合抑制研究[J]. 光学学报, 2013, 33(9): 0928002.

栏目编辑: 韩 峰