

FY-3B/VIRR 真空红外定标辐射响应度一致性校正

王阳¹, 钮新华¹, 张镔^{1,2}, 陈帅帅^{1,3}, 胡秀清⁴,
张冬冬¹, 王向华¹, 熊千千¹

1. 中国科学院上海技术物理研究所 红外探测与成像技术重点实验室, 上海 200083;

2. 国科大杭州高等研究院, 杭州 310024;

3. 中国科学院大学, 北京 100049;

4. 国家卫星气象中心 中国遥感卫星辐射测量和定标重点开放实验室, 北京 100081

摘要: 在真空红外定标过程中, 扫描辐射计系统响应度常受到试验污染及探测头部温度非一致性等因素影响, 导致各通道获取定标系数及铂电阻转换系数不准确。为校正系统响应度的不一致性, 可基于黑体辐射源恒温模式下的辐射稳定性和红外探测系统通道单一定标状态下响应度不变性, 利用红外定标中的面源黑体及星上黑体变温数据, 构建内外黑体红外通道响应一致性传递算法。针对FY-3B可见光红外扫描辐射计(VIRR)发射前定标数据, 将定标过程中的系统响应度进行一致性校正。结果表明, 面源黑体变温阶段面源黑体校正码值在升温 and 降温间的一致性优于0.7 DN, 辐射传递过程中基准工况下星上黑体校正码值一致性优于0.3 DN, 并分析了校正方法和其他传统方法在计算星上黑体变温阶段等效黑体温度的差异性。因此, 该算法保证了空间辐射基准到红外探测系统以及星上黑体辐射传递过程的辐射准确性, 为有效提高真空红外辐射定标精度提供技术保障。

关键词: 遥感, 红外定标, 稳定性, 扫描辐射计, 响应度, 一致性

中图分类号: TP701/P2

引用格式: 王阳, 钮新华, 张镔, 陈帅帅, 胡秀清, 张冬冬, 王向华, 熊千千. 2023. FY-3B/VIRR 真空红外定标辐射响应度一致性校正. 遥感学报, 27(10): 2295–2306

Wang Y, Niu X H, Zhang E, Chen S S, Hu X Q, Zhang D D, Wang X H and Xiong Q Q. 2023. Uniformity correction of radiance responsivity in vacuum infrared calibration for FY-3B/VIRR. National Remote Sensing Bulletin, 27(10): 2295–2306 [DOI: 10.11834/jrs.20231599]

1 引言

红外遥感技术正朝着高定量化的方向发展, 特别是在气候变化监测、数值天气预报以及军事应用等领域, 其对量化水平的要求越来越苛刻(杨以坤等, 2019)。在经历数十年发展之后, 目前遥感卫星红外谱段辐射定标不确定度为0.2 K水平(Hilton等, 2012; Hu等, 2013), 为了准确预测气候变化及有效监测全球气候变化, 遥感卫星在地球热发射波段的观测必须长期保持在0.1 K水平(Anderson等, 2004), 为了这个目标, 美国 and 欧洲分别相继提出了CLARREO计划(Grandmont等, 2017)和TRUTHS计划(Fox等, 2017), 同

时中国也提出了空间辐射测量基准星计划(卢乃锰等, 2020), 所有航天强国都围绕在轨红外定标的精度提高开展相关研究。

基于星上定标装置的方法可对星载传感器进行快速实时定标, 并不受大气和地表类型的影响, 具有较高的定标精度(盛一成等, 2019), 该方法一般以星上黑体和深冷空间作为辐射基准源(Díaz等, 2022; Xiong等, 2014), 例如IASI、MODIS、VIIRS等载荷(盛一成等, 2019)。卫星发射前利用标准辐射源对星载传感器以及星上黑体进行辐射标定(赵艳华等, 2021), 获取的红外定标精度也决定了星上黑体能够发挥其高精度的在轨定标能力(宋健, 2019)。随着定量遥感技术的发展,

收稿日期: 2021-10-20; 预印本: 2022-10-03

基金项目: 国产多系列遥感卫星历史资料再定标技术(编号: 2018YFB0504901)

第一作者简介: 王阳, 研究方向为空间遥感仪器定标技术。E-mail: wangyang13ji@163.com

通信作者简介: 张镔, 研究方向为航天遥感仪器的研制、空间光谱成像技术以及空间光学系统技术等。E-mail: zeshcn@126.com

对星载传感器发射前的实验室定标精度提出了更高的要求(宋健等, 2019)。目前, 国内外发射前红外定标试验基本以标准面源黑体作为红外波段最常用的标准辐射源(Hao等, 2018; Guenther等, 1996; Xiong等, 2014), 利用星载传感器将标准面源黑体辐射传递到星上黑体上, 该定标方法在航天红外遥感载荷以及各种红外辐射计辐射定标试验中被广泛应用。

对于红外遥感载荷来说, 真空红外定标试验是技术相当复杂、要求非常高的试验之一。在标准面源黑体升降温过程中, 红外辐射计会与面源黑体、空间试验环境进行能量交换(李志胜, 2018), 红外辐射计系统温度会受到不同程度的影响。现有的光学遥感器载荷对污染十分敏感, 在轨长时间运行后, 系统的成像质量受空间污染物的影响会有一定程度下降(徐加宽, 2000)。红外遥感载荷发射前红外定标试验工作在真空罐内, 可以通过抽真空和加热来去污, 但红外遥感载荷在长时间工作后仍然会受到真空试验环境的不同程度的污染(李志胜, 2018)。红外探测器的响应度与环境温度息息相关, 温度波动会导致红外探测系统输出的灰度值的漂移, 从而影响红外定标中目标辐射的精确测量(吴越等, 2019)。以上这些因素均会导致红外定标辐射溯源链中系统响应度的不一致, 甚至会影响到红外遥感载荷定标精度和星上黑体辐射传递精度。标准面源黑体作为辐射基准, 随着辐射传递链路的增长, 不可避免的造成红外辐射测量精度的逐级降低(龚律宇, 2017; 顾行发等, 2013)。因此, 针对红外遥感载荷及星上黑体定标, 真空红外定标中辐射响应一致性校正方法研究是提高发射前红外辐射定标精度的关键。

2 仪器与试验

在卫星发射任务前, 红外扫描辐射计需要在地面完成真空红外辐射定标试验, 测试正样产品的性能和为在轨运行提供仪器标定系数。本文针对FY-3B气象卫星携带的光学遥感载荷—可见光红外扫描辐射计(VIRR)的发射前红外定标历史数据再处理分析。该扫描辐射计主要用途是监测全球云量, 判识云的高度、类型和相态, 探测海洋表面温度, 监测高温火点, 识别地表积雪覆盖, 探测海洋水色等, 拥有10个1 km分辨率的探测通

道, 覆盖可见光、近红外、短波红外、中波和长波红外谱段范围(0.43—12.5 μm)。

针对扫描辐射计的3个红外通道(中波3.55—3.93 μm 、长波10.3—11.3 μm 和11.5—12.5 μm), 在发射任务前完成了红外定标试验。扫描辐射计的红外探测器采用辐射制冷器冷却, 红外辐射定标和性能测试在F3H真空设备中进行, 它具有液氮和液氦环境, 建立有深冷黑体和冷屏(张勇等, 2006)。如图1所示, 扫描辐射计通过扫描镜(红色)依次接收冷空间、面源黑体以及星上黑体的辐射, 光学接收孔径对准面源黑体, 探测头部进行恒温控制, 利用深冷黑体作为空间零辐射基准, 标准面源黑体为空间辐射基准。在红外定标试验过程中, 扫描辐射计探测头部与星上黑体同时变温, 具有相同的物理温度。

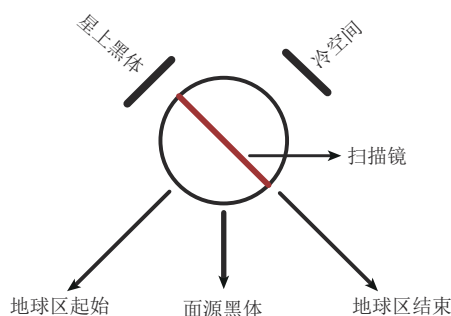


图1 扫描辐射计扫描顺序示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the scanning sequence for the scanning radiometer

如图2所示, 在面源黑体变温阶段, 探测头部/星上黑体控制在一个固定温度点上, 通过改变面源黑体温度(辐射量)得到对应的系统输出信号码值, 获取探测头部的定标系数。在面源黑体变温阶段, 探测头部/星上黑体会随着外部温度环境变化而受到波动。在星上黑体变温阶段, 面源黑体控制在一个固定温度点上, 通过改变星上黑体/探测头部温度得到对应的系统输出信号码值, 通过探测头部的定标系数、星上黑体信号码值和星上黑体测温铂电阻码值获取测温铂电阻码值与其等效黑体温度之间的转换系数, 这样通过探测头部把面源黑体辐射标准引渡到星上黑体上。

其中, 在以上各个红外定标阶段, 获取的试验数据都包括温度数据与信号数据。温度数据包括面源黑体温度、辐冷温度以及星上黑体/探测头部温度。信号数据包括面源黑体、星上黑体和深冷空间。

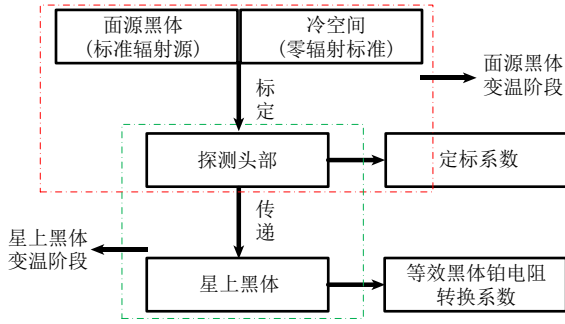


图2 扫描辐射计真空红外定标方法原理图

Fig. 2 Schematic diagram of vacuum infrared calibration method for scanning radiometer

3 系统响应度一致性校正原理

针对 VIRR 扫描辐射计真空红外定标过程中辐射传递的响应度非一致性问题, 本文提出了一种真空红外定标辐射响应度一致性校正算法。

3.1 扫描辐射计信号响应码值分解函数

在星上黑体变温以及面源黑体变温阶段下, 冷空信号扣除后的星上黑体或者面源黑体系统响应码值 $\Delta DN_{BB, T^m, T^x}^{CS}$ 为

$$\Delta DN_{BB, T^m, T^x}^{CS} = DN_{SV, T^m, T^x}^{CS} - DN_{BB, T^m, T^x}^{CS} \quad (1)$$

式中, CS 是表示星上黑体变温定标阶段或面源黑体变温定标阶段, BB 表示扫描辐射计观测的星上黑体或面源黑体, T^m 表示面源黑体物理温度, T^x 表示星上黑体/探测头部温度, DN_{BB, T^m, T^x}^{CS} 表示红外定标阶段 CS、面源黑体物理温度 T^m 以及星上黑体/探测头部物理温度 T^x 的 BB 黑体码值, DN_{SV, T^m, T^x}^{CS} 表示红外定标阶段 CS、面源黑体物理温度 T^m 以及星上黑体/探测头部物理温度 T^x 的冷空码值。

在红外定标中, 探测头部的温度波动、系统试验污染、探测器温度波动等因素会导致系统响应度的变化。探测系统获取的响应码值与外部目标辐射源辐射变化有关, 而外部目标辐射源包括面源黑体或者星上黑体。因此, 扫描辐射计响应码值由 3 部分组成, 包括基准工况码值、外部目标辐射源辐射函数以及系统响应一致性函数, 如图 3 所示, 扫描辐射计响应码值 $\Delta DN_{BB, T^m, T^x}^{CS}$ 分解函数如下:

$$\Delta DN_{BB, T^m, T^x}^{CS} = \Delta DN_{BB, T_0^m, T_0^x}^{CS} H_{out}(T^m, T^x) H_{in}(T^m, T^x) \quad (2)$$

式中, 面源黑体温度 T_0^m 和星上黑体/探测头部温度 T_0^x 作为扫描辐射计红外定标的基准工

况, $\Delta DN_{BB, T_0^m, T_0^x}^{CS}$ 是在基准工况下系统响应码值, $H_{in}(T^m, T^x)$ 表示扫描辐射计在面源黑体温度 T^m 和星上黑体/探测头部温度 T^x 下系统响应一致性函数, $H_{out}(T^m, T^x)$ 表示外部辐射源在面源黑体温度 T^m 和星上黑体/探测头部温度 T^x 下的目标源辐射函数。外部目标源辐射函数以及系统响应一致性函数是相对基准工况响应码值的相对响应函数。

3.2 面源黑体变温阶段系统响应度一致性校正

在面源黑体变温阶段, 如图 3 所示, 根据式(2), 面源黑体响应码值 $\Delta DN_{MY, T^m, T^x}^{MYBW}$ 和星上黑体响应码值 $\Delta DN_{XS, T^m, T^x}^{MYBW}$ 进行如下响应函数分解:

$$\Delta DN_{XS, T^m, T^x}^{MYBW} = \Delta DN_{XS, T_0^m, T_0^x}^{MYBW} H_{out-XS}^{MYBW}(T^m, T^x) H_{in}^{MYBW}(T^m, T^x) \quad (3)$$

$$\Delta DN_{MY, T^m, T^x}^{MYBW} = \Delta DN_{MY, T_0^m, T_0^x}^{MYBW} H_{out-MY}^{MYBW}(T^m, T^x) H_{in}^{MYBW}(T^m, T^x) \quad (4)$$

式中, $\Delta DN_{XS, T_0^m, T_0^x}^{MYBW}$ 是面源黑体温度 T_0^m 和星上黑体/探测头部温度 T_0^x 时的星上黑体基准工况码值, $H_{out-XS}^{MYBW}(T^m, T^x)$ 是面源黑体温度 T^m 和星上黑体/探测头部温度 T^x 时的星上黑体辐射函数, $\Delta DN_{MY, T_0^m, T_0^x}^{MYBW}$ 是面源黑体温度 T_0^m 和星上黑体/探测头部温度 T_0^x 时的面源黑体基准工况码值, $H_{out-MY}^{MYBW}(T^m, T^x)$ 是面源黑体温度 T^m 和星上黑体/探测头部温度 T^x 时的面源黑体辐射函数, $H_{in}^{MYBW}(T^m, T^x)$ 是面源黑体温度 T^m 和星上黑体/探测头部温度 T^x 时的系统响应一致性函数。

3.2.1 星上黑体辐射函数获取

当探测头部和星上黑体控制在温度 T^x 时, 面源黑体变温过程导致星上黑体温度和探测头部温度同时波动, 其系统响应度发生变化, 面源黑体变温阶段星上黑体响应码值分解函数如式(3)所示。根据扫描辐射计红外通道光谱响应函数、黑体能量光谱分布以及星上黑体发射率, 计算不同星上黑体温度 T^x 对应的辐射能量 $N(T^x)$, 以扣除星上黑体温度波动对星上黑体测量的系统响应影响, 具体的计算过程如下:

$$N(T^x) = \sum_{i=0}^n \varepsilon(\nu_i) \cdot \frac{c1 \cdot \nu_i^3}{e^{\frac{c2 \cdot \nu_i}{T^x}} - 1} \cdot R(\nu_i) / \sum_{i=0}^n R(\nu_i) \quad (5)$$

式中, ν_i 为第 i 个波数, $R(\nu_i)$ 为通道相对应的相对光谱响应, $\varepsilon(\nu_i)$ 是星上黑体发射率 (>0.99), $c1 = 1.1910427 \times 10^{-5} \text{ mW}/(\text{m}^2 \text{sr}^1 \text{cm}^{-4})$, $c2 = 1.4387752 \text{ cm}^1 \text{K}^1$

为辐射常数。在面源黑体变温阶段, 星上黑体辐射函数 $H_{\text{out-XS}}^{\text{MYBW}}(T^m, T^x)$ 计算如下:

$$H_{\text{out-XS}}^{\text{MYBW}}(T^m, T^x) = \frac{N(T^x)}{N(T_0^x)} (H_{\text{out-XS}}^{\text{MYBW}}(T^m, T_0^x) = 1) \quad (6)$$

式中, $N(T_0^x)$ 是星上黑体温度 T_0^x 时的辐射能量, 式(6)中的星上黑体发射率 $\varepsilon(v_i)$ 可以忽略不计。

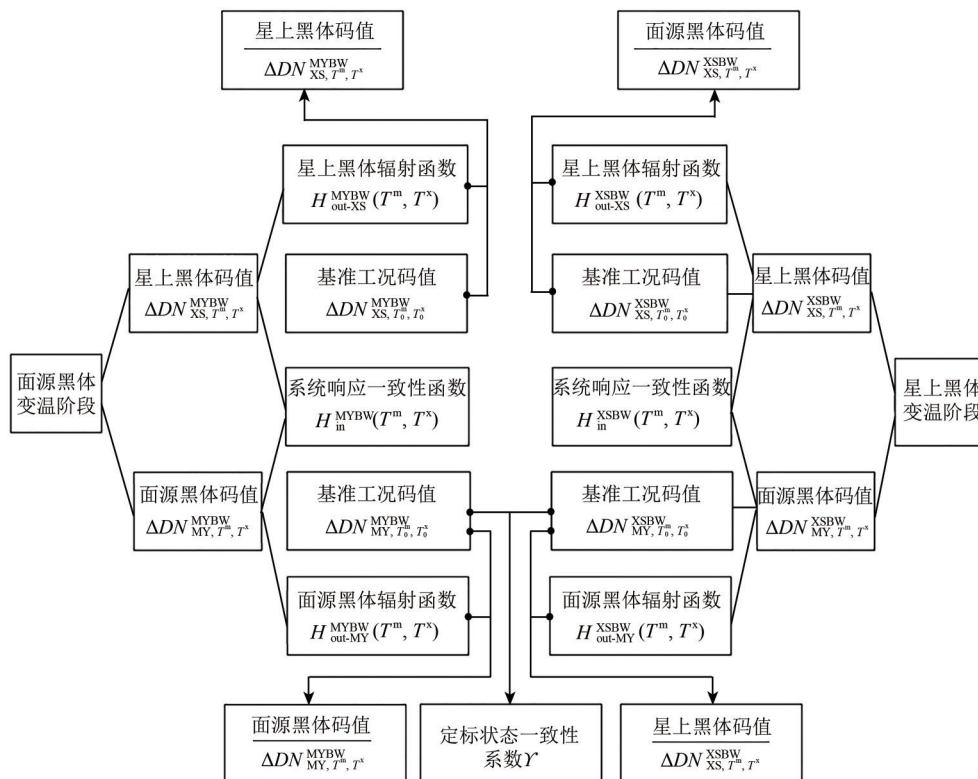


图3 红外定标辐射响应一致性方法原理图

Fig. 3 Principle diagram of uniformity method of the radiance response in the infrared calibration

3.2.2 系统响应一致性函数获取

根据式(3)中星上黑体响应函数分解公式以及星上黑体辐射函数 $H_{\text{out-XS}}^{\text{MYBW}}(T^m, T^x)$, 扣除面源黑体变温阶段的星上黑体温度波动对星上黑体系统响应的的影响, 基于扫描辐射计线性响应系统, 获取扫描辐射计辐射响应一致性函数 $H_{\text{in}}^{\text{MYBW}}(T^m, T^x)$:

$$H_{\text{in}}^{\text{MYBW}}(T^m, T^x) = \frac{\Delta DN_{\text{XS}, T^m, T^x}^{\text{MYBW}}}{H_{\text{out-XS}}^{\text{MYBW}}(T^m, T^x) \Delta DN_{\text{XS}, T_0^m, T_0^x}^{\text{MYBW}}} \quad (7)$$

3.2.3 系统响应度一致性校正

针对面源黑体变温定标阶段的面源黑体码值, 利用扫描辐射计的系统响应一致性函数 $H_{\text{in}}^{\text{MYBW}}(T^m, T^x)$ 线性校正面源黑体响应码值, 其校正后的面源黑体响应码值 $\overline{\Delta DN_{\text{MY}, T^m, T^x}^{\text{MYBW}}}$ 为

$$\overline{\Delta DN_{\text{MY}, T^m, T^x}^{\text{MYBW}}} = \frac{\Delta DN_{\text{MY}, T^m, T^x}^{\text{MYBW}}}{H_{\text{in}}^{\text{MYBW}}(T^m, T^x)} \quad (8)$$

3.3 星上黑体变温阶段系统响应度一致性校正

如图3所示, 在星上黑体变温阶段, 扫描辐射计探测头部和星上黑体同时变温, 面源黑体控制在温度 T_0^m 处, 针对每一个探测头部温度点, 扫描辐射计都会对面源黑体进行辐射测量, 星上黑体码值 $\Delta DN_{\text{XS}, T_0^m, T^x}^{\text{XSBW}}$ 和面源黑体码值 $\Delta DN_{\text{MY}, T_0^m, T^x}^{\text{XSBW}}$ 分别进行响应函数分解, 如下式(9)式(10)所示。

$$\Delta DN_{\text{MY}, T_0^m, T^x}^{\text{XSBW}} = \Delta DN_{\text{MY}, T_0^m, T_0^x}^{\text{XSBW}} H_{\text{out-MY}}^{\text{XSBW}}(T_0^m, T^x) H_{\text{in}}^{\text{XSBW}}(T_0^m, T^x) \quad (9)$$

$$\Delta DN_{\text{XS}, T_0^m, T^x}^{\text{XSBW}} = \Delta DN_{\text{XS}, T_0^m, T_0^x}^{\text{XSBW}} H_{\text{out-XS}}^{\text{XSBW}}(T_0^m, T^x) H_{\text{in}}^{\text{XSBW}}(T_0^m, T^x) \quad (10)$$

式中, 面源黑体温度 T_0^m 条件下, $\Delta DN_{\text{MY}, T_0^m, T_0^x}^{\text{XSBW}}$ 是星上黑体/探测头部温度 T_0^x 时的面源黑体响应码值, $H_{\text{out-MY}}^{\text{XSBW}}(T_0^m, T^x)$ 是星上黑体/探测头部温度 T^x 时的面源黑体辐射函数, $\Delta DN_{\text{XS}, T_0^m, T_0^x}^{\text{XSBW}}$ 是星上黑体/探测头部温度 T_0^x 时的星上黑体基准工况码值, $H_{\text{out-XS}}^{\text{XSBW}}(T_0^m, T^x)$ 是星上黑体/探测头部温度 T^x 时的

星上黑体辐射函数, $H_{in}^{XSBW}(T_0^m, T^x)$ 是星上黑体/探测头部温度 T^x 时的系统响应一致性函数。

3.3.1 系统响应一致性函数获取

面源黑体响应码值函数分解如式(9)所示, 当面源黑体控制在温度 T_0^m 处时, $H_{out-MY}^{XSBW}(T_0^m, T^x)=1$, 基于扫描辐射计线性响应系统和高精度面源黑体控温系统, 利用面源黑体温度 T_0^m 处面源黑体响应码值, 计算扫描辐射计探测头部变温时系统响应一致性函数:

$$H_{in}^{XSBW}(T_0^m, T^x) = \frac{\Delta DN_{MY, T_0^m, T^x}^{XSBW}}{\Delta DN_{MY, T_0^m, T_0^x}^{XSBW}} (H_{out-MY}^{XSBW}(T_0^m, T^x) = 1) \quad (11)$$

3.3.2 系统响应度一致性校正

为了准确地计算星上黑体测温铂电阻与其等效黑体温度之间的转换系数, 需将星上黑体变温定标阶段扫描辐射计响应度校正到相同定标状态(头部温度 T_0^x), 即头部温度 T^x 时的系统响应度一致性, 在保证探测头部系统响应状态一致性的情况下, 基准工况下面源黑体辐射变化引起的星上黑体响应码值 $\overline{\Delta DN_{XS, T_0^m, T^x}^{XSBW}}$ 定义为

$$\overline{\Delta DN_{XS, T_0^m, T^x}^{XSBW}} = \Delta DN_{XS, T_0^m, T_0^x}^{XSBW} H_{out-XS}^{XSBW}(T_0^m, T^x) \quad (12)$$

基于星上黑体码值响应函数分解如式(10), 利用扫描辐射计的系统响应一致性函数 $H_{in}^{XSBW}(T_0^m, T^x)$ 线性校正星上黑体变温定标阶段星上黑体响应码值, 即基准工况下面源黑体辐射变化引起的星上黑体响应码值 $\overline{\Delta DN_{XS, T_0^m, T^x}^{XSBW}}$ 是:

$$\overline{\Delta DN_{XS, T_0^m, T^x}^{XSBW}} = \frac{\Delta DN_{XS, T_0^m, T^x}^{XSBW}}{H_{in}^{XSBW}(T_0^m, T^x)} \quad (13)$$

3.4 辐射传递过程中系统响应度一致性校正

基于扫描辐射计单一定标状态下的辐射响应度不变性, 利用面源黑体变温阶段与星上黑体变温阶段面源黑体 T_0^m 温度处辐射测量数据, 将辐射传递过程中的扫描辐射计的响应度进行一致性校正。

根据式(4)和式(9)基准工况码值, 以面源黑体变温阶段面源黑体码值 $\Delta DN_{MY, T_0^m, T_0^x}^{MYBW}$ 为基准, 计算面源黑体辐射标准传递到星上黑体过程中的定标状态一致性系数 r :

$$r = \frac{\Delta DN_{MY, T_0^m, T_0^x}^{MYBW}}{\Delta DN_{MY, T_0^m, T_0^x}^{XSBW}} \quad (14)$$

利用定标状态一致性系数 r 对星上黑体变温阶段星上黑体码值 $\overline{\Delta DN_{XS, T_0^m, T^x}^{XSBW}}$ 进行线性校正, 其校正后的星上黑体码值 $\overline{\Delta DN_{XS, T_0^m, T^x}^{XSBW}}$ 是:

$$\overline{\Delta DN_{XS, T_0^m, T^x}^{XSBW}} = r \overline{\Delta DN_{XS, T_0^m, T^x}^{XSBW}} \quad (15)$$

通过以上红外定标数据处理方法, 保证扫描辐射计星上黑体变温和面源黑体变温阶段的系统响应度的一致性, 获取校正后星上黑体变温阶段星上黑体码值 $\overline{\Delta DN_{XS, T_0^m, T^x}^{XSBW}}$, 为准确地计算扫描辐射计在轨定标所需的辐射定标系数提供数据。

4 系统响应度一致性校正及检验

本文针对 VIRR 扫描辐射计 11.5—12.5 μm 通道发射前真空红外定标试验数据进行系统响应一致性校正及检验, 真空红外定标数据按照面源黑体变温阶段、星上黑体变温阶段以及辐射传递阶段分别进行处理。

4.1 面源黑体变温阶段系统响应度一致性

4.1.1 面源黑体变温定标数据

在面源黑体变温阶段, 扫描辐射计依次开展面源黑体降温试验及升温试验, 如图 4(a) 所示, 降温试验对应的温度点序号为 1—31, 升温试验对应的温度点序号为 32—62。面源黑体温度范围为 180—322 K, 星上黑体/探测头部控温在 19.3° 左右, 面源黑体从 322 K 降温到 180 K, 在从 180 K 升温到 322 K。由于面源黑体在升温和降温过程中会烘烤探测头部, 致使探测头部/星上黑体温度发生波动, 此时面源黑体温度与探测头部/星上黑体温度的关系如图 4(a) 所示, 面源黑体温度与探测头部/星上黑体温度之间成正相关。

在面源黑体变温阶段, 面源黑体响应码值与面源黑体温度之间的关系图 4(b) 所示, 面源黑体响应码值升温曲线与降温曲线较为不重合。

如图 5 所示, 面源黑体从降温到升温过程中, 星上黑体响应码值逐渐变小, 同时星上黑体温度/探测头部温度受到面源黑体变温的影响。星上黑体响应码值变化受到系统响应度变化和星上黑体温度的波动影响, 其中系统的响应度主要受到探测头部温度变化及试验污染的影响。本文仅考虑系统响应度的变化, 针对红外探测系统响应度变化进行一致性校正。

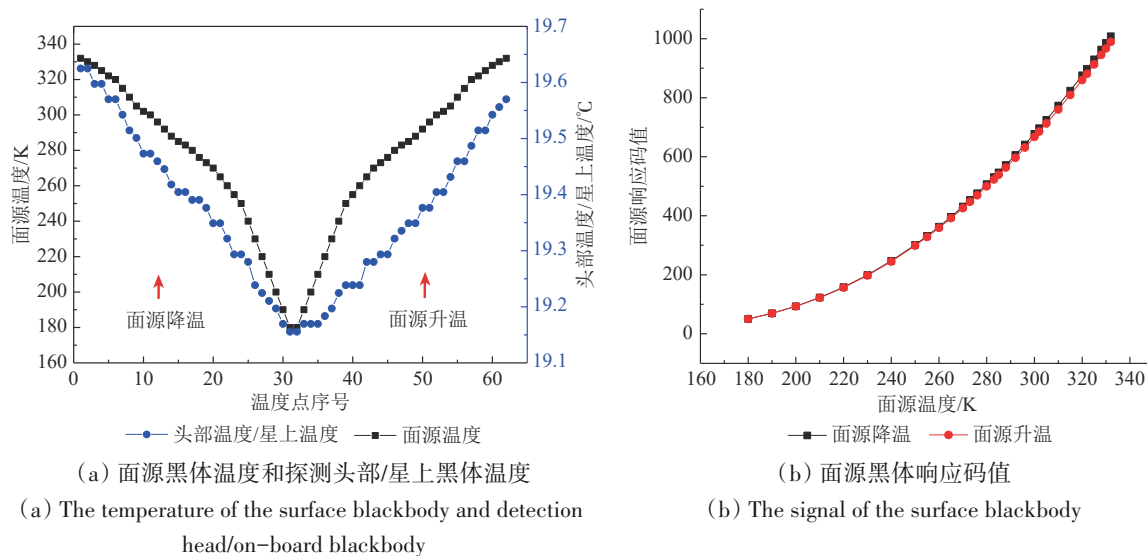


图4 面源黑体变温阶段面源黑体温度与探测头部/天上黑体温度、面源黑体码值之间的关系

Fig. 4 The relationship between the temperature of the surface blackbody and the temperature of the detection head/on-board blackbody or the surface blackbody signal at the variable temperature stage of the surface blackbody

4.1.2 系统响应度一致性校正

在面源黑体变温阶段,由式(4)可知,面源黑体响应码值由基准工况码值,系统响应一致性函数以及面源黑体辐射函数构成。由式(4)(8)可知,基准工况码值和面源黑体辐射函数用于获取校正后的 $\Delta DN_{MY, T^m, T^x}^{MYBW}$ 。利用式(7)来计算系统响应一致性函数 $H_{in}^{MYBW}(T^m, T^x)$,该函数由面源黑体变温阶段天上黑体辐射函数 $H_{out-XS}^{MYBW}(T^m, T^x)$ 以及天上黑体码值归一化函数 $\frac{\Delta DN_{XS, T^m, T^x}^{MYBW}}{\Delta DN_{XS, T_0^m, T_0^x}^{MYBW}}$ 计算获取。由式(6)可知,天上黑体辐射函数 $H_{out-XS}^{MYBW}(T^m, T^x)$ 利用探测头部温度计算获取,其中红外定标基准工况下的面源黑体温度 $T_0^m = 300$ K,天上黑体温度 $T_0^x = 19.45$ °C。

通过以上计算,分别获取面源黑体变温阶段天上黑体辐射函数、天上黑体码值归一化函数以及系统响应一致性函数,三者曲线如图6(a)所示,降温试验对应的温度点序号1—31,升温试验对应的温度点序号32—62。由图6(a)中天上黑体辐射函数可知,天上黑体温度引起的辐射变化约为0.7%。由图6(a)中系统响应一致性函数可知,在面源黑体升温阶段红外系统响应度逐渐变小,系统的响应度变化约2%左右。

在面源黑体变温阶段,面源黑体升温和降温试验的原始响应码值与面源黑体温度关系如图6(b)

中的上图所示。由式(8)可知,利用获取的系统响应一致性函数 $H_{in}^{MYBW}(T^m, T^x)$ 对面源黑体码值进行响应度一致性校正。如图6(b)中的下图所示,其校正后的面源黑体升降温曲线重合性要明显优于原始数据的升降温曲线重合性。

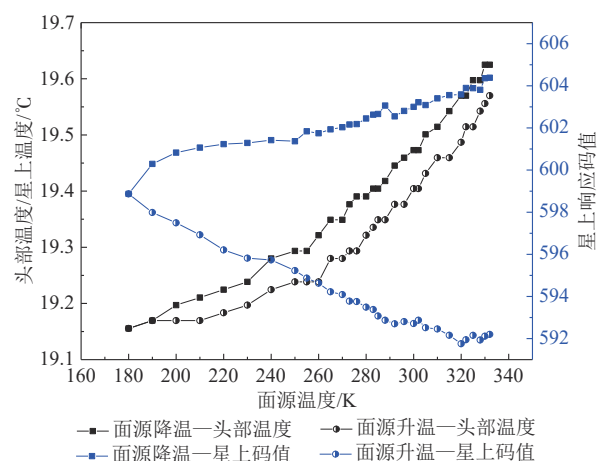


图5 面源黑体温度与探测头部/天上黑体温度、面源响应码值之间的关系

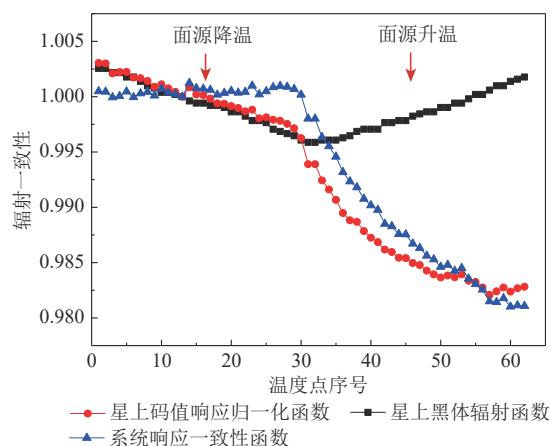
Fig. 5 The relationship between the temperature of the surface blackbody and the temperature of the detection head/on-board blackbody or the response signal of the surface blackbody

4.1.3 升温和降温校正码值一致性检验

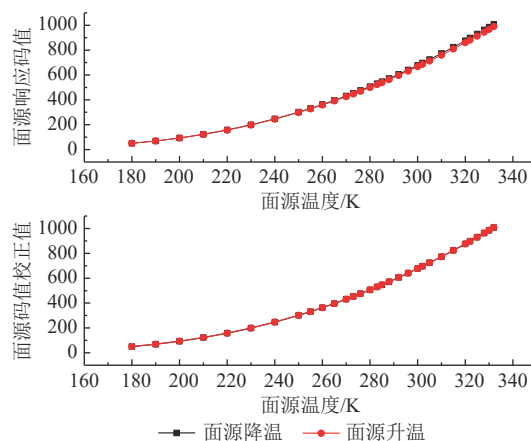
在面源黑体变温阶段,面源黑体升温和降温数据具有相同面源黑体控温点,因此,在不同温度点上面源黑体降温与升温的响应码值差如图7所

示,黑点表示原始响应码值差,蓝点表示校正响应码值差,其原始数据升降温的码值差在高动态

位置能达到 18 DN。



(a) 系统响应一致性函数
(a) Uniformity function of the system responsivity



(b) 面源黑体升降温响应码值一致性校正
(b) Uniformity correction of heating-up and cooling-down signal of the surface blackbody

图6 面源黑体变温阶段面源响应码值一致性校正

Fig. 6 Uniformity correction of the response signal of the surface blackbody at the variable temperature stage of the surface blackbody

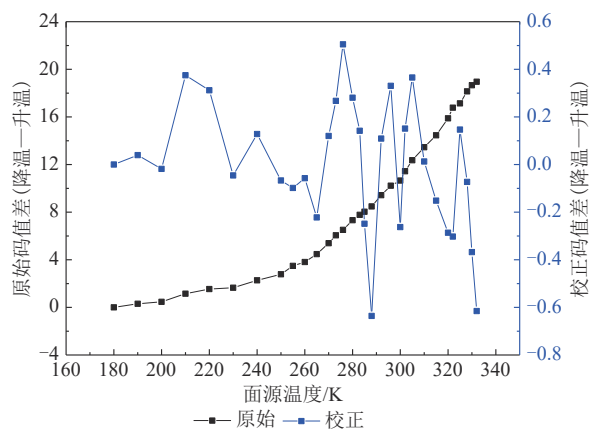


图7 面源黑体升降温响应码值一致性校正前后差异

Fig. 7 The difference of the response uniformity between before and after correction for heating-up and cooling-down signal for the surface blackbody

经过扫描辐射计响应度一致性校正后,在所有控温点上其校正数据的最大码值偏差为 0.7 DN,大幅度提高面源黑体升降温响应曲线的辐射响应一致性。

4.2 星上黑体变温阶段系统响应度一致性

4.2.1 星上黑体变温定标数据

在星上黑体变温阶段,面源黑体控温在 300 K,控温精度优于 0.1 K,探测头部/星上黑体从 35°降

温到 0°,在从 0°升温到 35°,此时探测头部/星上黑体温度与星上黑体响应码值的关系如图 8(a)所示。

如图 8(b)所示,在星上黑体定标阶段,扫描辐射计依次开展星上黑体降温试验及升温试验,降温试验对应的温度点序号 1—17,升温试验对应的温度点序号 18—33。探测头部在星上黑体变温阶段获取星上黑体码值和面源黑体码值,此时面源黑体温度保持不变。当探测头部和星上黑体同时变温时,红外探测系统系统响应度会发生变化,从图 8(b)可知,探测头部温度和 300 K 面源黑体码值成反比关系。

4.2.2 系统响应度一致性校正

在星上黑体变温阶段,探测头部扫描星下点位置处的面源黑体。探测头部温度变化引起探测头部的响应度发生变化,如图 9(a)所示,基于式(11)利用 300 K 面源黑体响应码值计算星上黑体升温及降温阶段系统响应一致性函数 $H_{in}^{XSBW}(T^m, T^s)$ 。

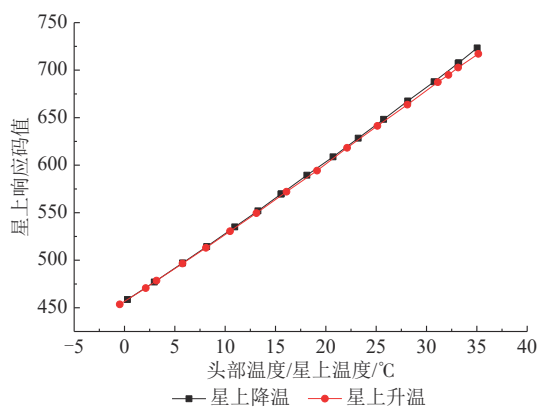
在星上黑体变温阶段,以探测头部温度 19.45 °C 面源黑体 300 K 基准工况为基准,利用式(13)校正星上黑体响应码值,即保证探测头部响应度的一致性。如图 9(b)所示,黑点代表星上黑体升降温原始响应码值,红点代表校正后的星上黑体升降温响应码值,红线为该校正数据的多项式拟合线。

4.3 辐射传递阶段系统响应度一致性

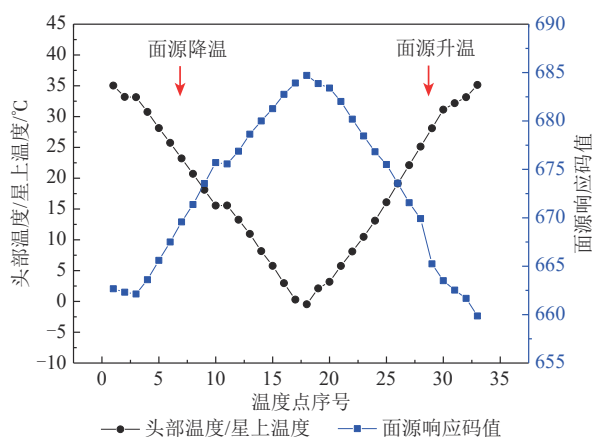
4.3.1 辐射传递阶段响应码值一致性校正

为保证面源黑体辐射基准到星上黑体辐射传递过程中扫描辐射计系统响应度一致性,需计算两种定标状态下的响应一致性系数 r :

$$r = \frac{\Delta DN_{MY, 300 K, 19.45^\circ C}^{MYBW}}{\Delta DN_{MY, 300 K, 19.45^\circ C}^{XSBW}} \quad (16)$$



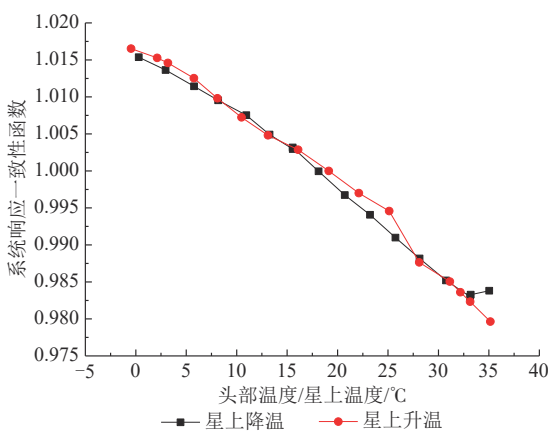
(a) Response signal of the on-board blackbody



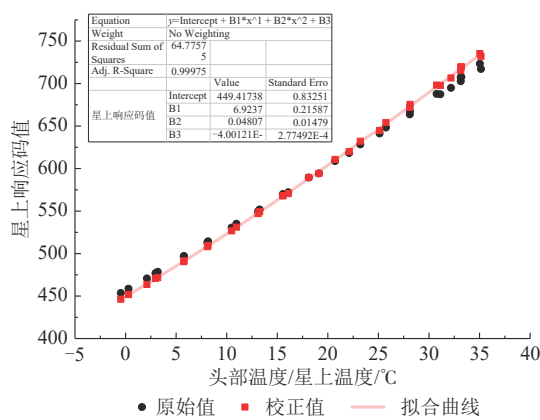
(b) Response signal of the surface blackbody

图8 星上黑体变温阶段探测头部/星上黑体温度与响应码值之间的关系

Fig. 8 The relationship between temperature of the detection head/on-board blackbody and the response signal at the variable temperature stage of the on-board blackbody



(a) Uniformity function of system responsivity



(b) Uniformity correction of heating-up and cooling-down signal of the on-board blackbody

图9 星上黑体变温阶段星上黑体响应码值一致性校正

Fig. 9 Uniformity correction of the response signal of the on-board blackbody at the variable temperature stage of the on-board blackbody

面源黑体温度 300 K, 星上黑体/探测头部温度 19.45 °C 作为红外定标的基准工况,以该基准工况下的星上黑体码值 $\Delta DN_{XS, 300 K, 19.45^\circ C}^{MYBW(down)}$ 为基准,获取

基于式(15),利用定标状态一致性系数 r 对星上黑体变温阶段星上黑体码值 $\Delta DN_{XS, T_0^m, T^s}^{XSBW}$ 进行线性校正,获取校正后星上黑体码值 $\Delta DN_{XS, T_0^m, T^s}^{XSBW}$,通过以上红外定标数据处理方法,保证扫描辐射计星上黑体变温阶段和面源黑体变温阶段的系统响应度一致性,以获取校正后的面源黑体码值 $\Delta DN_{MY, T^m, T^s}^{MYBW}$ 和星上黑体码值 $\Delta DN_{XS, T_0^m, T^s}^{XSBW}$.

系统面源黑体变温时的系统响应度的一致性函数,以校正面源黑体升降温码值,表1是面源变温阶段面源黑体码值和星上黑体码值校正表。

表1 面源变温阶段面源黑体和星上黑体码值校正表
Table 1 The correction table of the signal of the surface blackbody and on-board blackbody in the variable temperature stage of the surface blackbody

面源变温阶段		升温	降温
面源黑体	原始码值	$\Delta DN_{MY, T^m, T^s}^{MYBW(up)}$	$\Delta DN_{MY, T^m, T^s}^{MYBW(down)}$
	校正码值	$\overline{\Delta DN_{MY, T^m, T^s}^{MYBW(up)}}$	$\overline{\Delta DN_{MY, T^m, T^s}^{MYBW(down)}}$
	基准工况校正码值	$\overline{\Delta DN_{MY, 300\text{ K}, 19.45^\circ\text{C}}^{MYBW(up)}}$	$\overline{\Delta DN_{MY, 300\text{ K}, 19.45^\circ\text{C}}^{MYBW(down)}}$
星上黑体	原始码值	$\Delta DN_{XS, T^m, T^s}^{MYBW(up)}$	$\Delta DN_{XS, T^m, T^s}^{MYBW(down)}$
	校正码值	$\Delta DN_{XS, 300\text{ K}, 19.45^\circ\text{C}}^{MYBW(down)}$	$\Delta DN_{XS, 300\text{ K}, 19.45^\circ\text{C}}^{MYBW(down)}$
	基准工况校正码值	同上	同上

表2 星上变温阶段面源黑体和星上黑体码值校正表
Table 2 The correction table of the signal of surface blackbody and on-board blackbody in variable temperature stage of the on-board blackbody

星上变温阶段		升温	降温
面源黑体	原始码值	$\Delta DN_{MY, T^m, T^s}^{XSBW(up)}$	$\Delta DN_{MY, T^m, T^s}^{XSBW(down)}$
	校正码值	$0.5(\overline{\Delta DN_{MY, 300\text{ K}, 19.45^\circ\text{C}}^{MYBW(up)}} + \overline{\Delta DN_{MY, 300\text{ K}, 19.45^\circ\text{C}}^{MYBW(down)}})$	$0.5(\overline{\Delta DN_{MY, 300\text{ K}, 19.45^\circ\text{C}}^{MYBW(up)}} + \overline{\Delta DN_{MY, 300\text{ K}, 19.45^\circ\text{C}}^{MYBW(down)}})$
	基准工况校正码值	同上	同上
星上黑体	原始码值	$\Delta DN_{XS, T^m, T^s}^{XSBW(up)}$	$\Delta DN_{XS, T^m, T^s}^{XSBW(down)}$
	校正码值	$\overline{\overline{\Delta DN_{XS, T^m, T^s}^{XSBW}}}$	$\overline{\overline{\Delta DN_{XS, T^m, T^s}^{XSBW}}}$
	基准工况校正码值	$\overline{\overline{\Delta DN_{XS, 300\text{ K}, 19.45^\circ\text{C}}^{XSBW}}}$	$\overline{\overline{\Delta DN_{XS, 300\text{ K}, 19.45^\circ\text{C}}^{XSBW}}}$

表3 面源黑体和星上黑体码值基准工况下校正码值对比表
Table 3 Comparison table between correction signal of surface blackbody and on-board blackbody in reference condition

定标阶段	面源黑体		星上黑体	
	曲线	原始数据	校正数据	原始数据
面源变温	升温	667.00	677.67	592.70
	降温	677.65	677.41	602.55
星上变温	升温	671.37	677.54	601.38
	降温	673.58	677.54	602.81

(1) 在面源黑体变温阶段, 基于基准工况下的星上黑体数据, 校正面源黑体升降温时的面源黑体数据, 获取基准工况下的面源黑体校正码值 (677.67 和 677.41), 其校正码值偏差为 0.3 DN。

(2) 基于面源变温阶段基准工况下的面源黑体校正码值 (677.67 和 677.41), 计算星上黑体变温阶段基准工况下的面源黑体校正码值 (677.54)。基于星上黑体变温阶段基准工况下的面源黑体校正码值与星上黑体变温阶段面源黑体码值 (671.37 和

表2是星上变温阶段面源黑体码值和星上黑体码值校正表, 以面源黑体变温阶段基准工况下的面源黑体码值 $\frac{1}{2}(\overline{\Delta DN_{MY, 300\text{ K}, 19.45^\circ\text{C}}^{MYBW(up)}} + \overline{\Delta DN_{MY, 300\text{ K}, 19.45^\circ\text{C}}^{MYBW(down)}})$ 为基准, 获取系统星上黑体变温阶段的系统响应度的一致性函数, 以校正星上黑体变温响应码值。

4.3.2 辐射传递阶段系统响应一致性检验

在面源黑体变温阶段和星上黑体变温阶段, 面源黑体和星上黑体码值经过的系统响应度的一致性函数和定标状态一致性系数校正后, 在基准工况下其校正码值比对结果如表3所示。

673.58), 校正星上黑体变温阶段的星上黑体码值, 获取其基准工况下星上黑体校正码值 (602.81), 与面源变温阶段星上黑体码值 (602.55) 偏差为 0.3 DN。

4.4 星上黑体等效黑体温度比对分析

在星上黑体变温阶段, 星上黑体测温铂电阻码值与其等效黑体温度之间的转换系数准确性主要由星上黑体码值对应的等效黑体温度反演精度决定的, 本文采用3种方法计算星上黑体码值对应等效黑体温度。

- (1) 原始码值定标系数亮温计算方法 (原始法)
通过面源黑体变温阶段面源黑体定标曲线 (原始码值) 计算的定标系数 (2次拟合), 进而计算星上黑体变温阶段星上黑体码值 (原始码值) 对应的等效黑体温度。
- (2) 校正码值定标系数亮温计算方法 (校正法)
通过 4.1 章到 4.3 章节获得的红外定标过程中

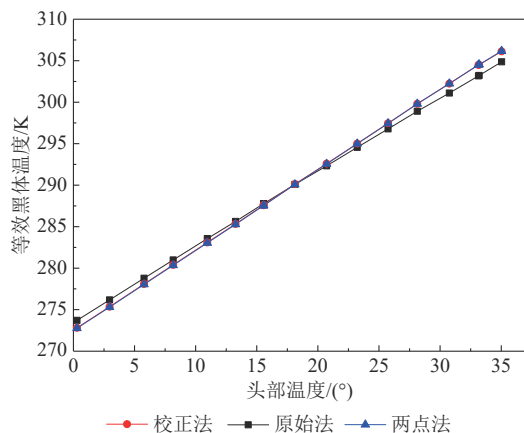
的响应度一致性系数, 对其定标获得的码值进行一致性校正, 利用面源黑体变温阶段面源黑体校正定标曲线计算的定标系数(2次拟合)计算星上黑体变温阶段星上黑体校正码值对应的等效黑体温度。

(3) 面源黑体 300 K 目标+冷空方法(两点法)

利用星上黑体变温阶段 300 K 面源黑体目标和冷空两点法(原始码值)计算不同头部温度下的定标系数, 实时计算星上黑体变温阶段星上黑体码值(原始码值)对应的等效黑体温度。

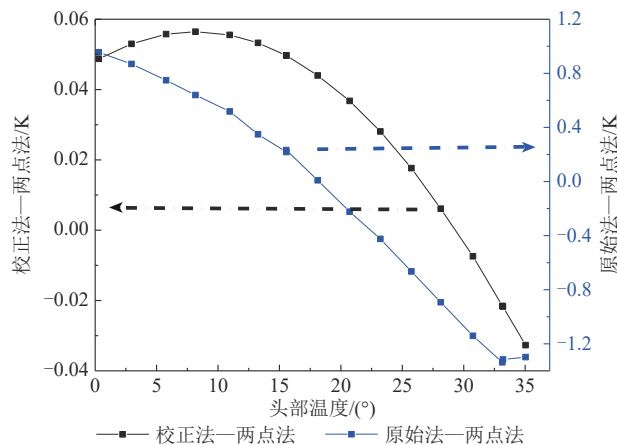
图 10(a)所示, 3 条曲线分别表示利用以上 3 种方法计算的星上黑体变温阶段不同头部温度下星上黑体码值对应的等效黑体温度。图 10(b)所示, 两条曲线是校正法和原始法分别与两点法计

算的等效黑体温度之间的偏差。由图 10(b)中可以看出, 在头部温度 0—35°变化范围内, 比对 3 种计算等效黑体温度的结果, 两点法和校正法一致性在 0.06 K 以内, 原始法相对于其他两种方法计算的结果偏差约为 1.35 K。原始法考虑了计算黑体等效温度中的非线性项, 但没有考虑头部变温等因素引起的响应度变化。两点法和校正法都考虑了头部温度等因素变化引起的响应度变化, 但两点法并没有考虑系统的非线性引入的误差。相对于两点法来说, 校正法考虑了定标系数中的非线性项, 所采用的非线性项也是经过响应度一致性校正后的计算结果。从以上分析结果来看, 采用校正法计算星上黑体码值对应的等效黑体温度更加准确。



(a) 星上黑体码值等效黑体温度

(a) Equivalent blackbody temperature from the signal of on-board blackbody



(b) 原始法和校正法与两点法之间的等效黑体温度偏差

(b) Temperature deviation between the original method and the corrected method and the two-point method

图 10 星上黑体码值等效黑体温度多种计算方法比对

Fig. 10 Comparison of various calculation methods for the equivalent blackbody temperature from the signal of the on-board blackbody

5 结 论

为保证红外定标各阶段数据的系统响应度一致性和辐射准确性, 基于扫描辐射计线性响应系统、扫描辐射计单一系统状态响应稳定性以及空间辐射基准源辐射稳定性, 本文建立了红外遥感载荷真空红外定标辐射传递过程中的辐射响应度一致性校正算法。针对 FY-3B 可见光红外扫描辐射计, 利用真空红外定标中面源黑体及星上黑体数据获取辐射一致性函数, 经过扫描辐射计系统响应度一致性校正后, 在面源黑体变温阶段所有控温点上面源黑体升降温响应码值一致性优于

0.7 DN, 在基准工况上面源黑体辐射基准到星上黑体辐射传递过程中响应码值一致性优于 0.3 DN。基于红外定标过程中原始码值和校正后的码值, 开展校正算法和其他传统方法在星上等效黑体温度计算结果的比对及分析。该算法为实现卫星红外定标历史资料数据再定标处理, 以及红外遥感载荷的定量化发展提供有效的技术支撑。

参考文献(References)

- Anderson J G, Dykema J A, Goody R M, Hu H and Kirk-Davidoff D B. 2004. Absolute, spectrally-resolved, thermal radiance: a bench-

- mark for climate monitoring from space. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 85(3/4): 367-383 [DOI: 10.1016/S0022-4073(03)00232-2]
- Díaz C L P, Xiong X X, Wu A S and Chang T J. 2022. Terra and aqua MODIS thermal emissive bands calibration and RVS stability assessments using an *in situ* ocean target. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 60: 4201614 [DOI: 10.1109/TGRS.2021.3072791]
- Fox N, Green P, Brindley H, Russell J, Smith D, Lobb D, Cutter M and Barnes A. 2017. Traceable radiometry underpinning terrestrial and heliostudies (truths): a benchmark mission for climate//*Proceedings Volume 10563, International Conference on Space Optics. Tenerife: SPIE: 635-643* [DOI: 10.1117/12.2304220]
- Gong L Y. 2017. Research of Vacuum Low Background Infrared Radiance Temperature Calibration Method. Chengdu: Chengdu University of Technology (龚律宇. 2017. 真空低背景红外亮度温度校准方法研究. 成都: 成都理工大学)
- Grandmont F, Moreau L, Bourque H, Taylor J, Girard F, Larouche M and Veilleux J. 2017. Instrument demonstration effort for the CLARREO mission//*Proceedings Volume 10565, International Conference on Space Optics. Rhodes Island: SPIE: 241-245* [DOI: 10.1117/12.2309125]
- Gu X F, Tian G L, Yu T, Li X Y, Gao H L and Xie Y. 2013. Radiation Calibration Principle and Method of Space Optical Remote Sensors. Beijing: Science Press (顾行发, 田国良, 余涛, 李小英, 高海亮, 谢勇. 2013. 航天光学遥感器辐射定标原理与方法. 北京: 科学出版)
- Guenther B, Barnes W, Knight E, Barker J, Harnden J, Weber R, Roberto M, Godden G, Montgomery H and Abel P. 1996. MODIS calibration: a brief review of the strategy for the at-launch calibration approach. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 13(2): 274-285 [DOI: 10.1175/1520-0426(1996)013<0274:MCA-BRO>2.0.CO;2]
- Hao X P, Sun J P, Gong L Y, Song J, Gu J M and Ding L. 2018. Research on H500-type high-precision vacuum blackbody as a calibration standard for infrared remote sensing. *International Journal of Thermophysics*, 39(4): 51 [DOI: 10.1007/s10765-018-2371-6]
- Hilton F, Armante R, August T, Barnett C, Bouchard A, Camy-Peyret C, Capelle V, Clarisse L, Clerbaux C, Coheur P L, Collard A, Crevoisier C, Dufour G, Edwards D, Faijan F, Fourrié N, Gambacorta A, Goldberg M, Guidard V, Hurtmans D, Illingworth S, Jacquinet-Husson N, Kerzenmacher T, Klaes D, Lavanant L, Masiello G, Matricardi M, McNally A, Newman S, Pavelin E, Payan S, Péquignot E, Peyridieu S, Phulpin T, Remedios J, Schlüssel P, Serio C, Strow L, Stubenrauch C, Taylor J, Tobin D, Wolf W and Zhou D. 2012. Hyperspectral earth observation from IASI: five years of accomplishments. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 93(3): 347-370 [DOI: 10.1175/BAMS-D-11-00027.1]
- Hu X Q, Xu N, Weng F Z, Zhang Y, Chen L and Zhang P. 2013. Long-term monitoring and correction of FY-2 infrared channel calibration using AIRS and IASI. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 51(10): 5008-5018 [DOI: 10.1109/TGRS.2013.2275871]
- Li Z S. 2018. Development of ultra large shielded door for infrared calibration in simulated space environment. *Vacuum*, 55(5): 66-70 (李志胜. 2018. 空间环境下超大型红外定标用辐射屏蔽门的研制. *真空*, 55(5): 66-70) [DOI: 10.13385/j.cnki.vacuum.2018.05.14]
- Lu N M, Ding L, Zheng X B, Ye X, Li C R, Lü D R, Zhang P, Hu X Q, Zhou C H, You Z, Fang J C, Gong J Y, Jiang X W, Li J J, Ma L L and Xu N. 2020. introduction of the radiometric benchmark satellite being developed in China for remote sensing. *Journal of Remote Sensing*, 24(6): 672-680 (卢乃锰, 丁雷, 郑小兵, 叶新, 李传荣, 吕达仁, 张鹏, 胡秀清, 周成虎, 尤政, 房建成, 龚建雅, 蒋兴伟, 李建军, 马灵玲, 徐娜. 2020. 中国空间辐射测量基准技术. *遥感学报*, 24(6): 672-680) [DOI: 10.11834/jrs.20200011]
- Sheng Y C, Dun X, Jin W Q, Guo Y X, Zhou F and Xiao S. 2019. Review of on-orbit radiometric calibration technology used in infrared remote sensors. *Infrared and Laser Engineering*, 48(9): 904001 (盛一成, 顿雄, 金伟其, 郭一新, 周峰, 肖思. 2019. 星上红外遥感相机的辐射定标技术发展综述. *红外与激光工程*, 48(9): 904001) [DOI: 10.3788/IRLA201948.0904001]
- Song J. 2019. Research on the Traceability and the On-Orbit Emissivity Measurement Method of Space Primary Standard Blackbody. Shanghai: University of Chinese Academy of Sciences (Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences) (宋健. 2019. 空间基准黑体辐射溯源技术及其在轨发射率测量技术研究. 上海: 中国科学院大学(中国科学院上海技术物理研究所))
- Song J, Hao X P, Ding L, Li K and Sun J P. 2019. Development of reduced background vacuum infrared hyperspectral radiance temperature standard facility. *Infrared and Laser Engineering*, 48(10): 1004001 (宋健, 郝小鹏, 丁雷, 李凯, 孙建平. 2019. 真空低背景红外高光谱亮温计量标准装置研制. *红外与激光工程*, 48(10): 1004001) [DOI: 10.3788/IRLA201948.1004001]
- Wu Y, Zhu Z Z, Fang Y H, Zhang L L, Yang W K, Tao M Q and Ning Z Q. 2019. Radiation calibration method using uncooled long-wave infrared spectrometer. *Acta Optica Sinica*, 39(9): 0904001 (吴越, 朱之贞, 方勇华, 张蕾蕾, 杨文康, 陶孟琪, 宁志强. 2019. 非制冷型长波红外光谱仪的辐射定标方法. *光学学报*, 39(9): 0904001) [DOI: 10.3788/AOS201939.0904001]
- Xiong X X, Butler J, Chiang K, Efremova B, Fulbright J, Lei N, McIntire J, Oudrari H, Sun J Q, Wang Z P and Wu A S. 2014. VIIRS on-orbit calibration methodology and performance. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 119(9): 5065-5078 [DOI: 10.1002/2013JD020423]
- Xu J K. 2000. The contamination control of "ZY-1" FM1 infrared multi-spectrum scanner in the radiation calibration test in simulation space environment. *Spacecraft Environment Engineering*, (2): 17-19 (徐加宽. 2000. "ZY-1"FM1 红外多光谱扫描仪在模拟空间环境下辐射定标试验的污染控制. *航天器环境工程*, (2): 17-19)
- Yang Y K, Li H, Sun L, Du Y M, Cao B, Liu Q H and Zhu J S. 2019. Land surface temperature and emissivity separation from GF-5 visual and infrared multispectral imager data. *Journal of Remote*

Sensing, 23(6): 1132-1146 (杨以坤, 历华, 孙林, 杜永明, 曹彪, 柳钦火, 朱金山. 2019. 高分五号全谱段光谱成像仪地表温度与发射率反演. 遥感学报, 23(6): 1132-1146) [DOI: 10.11834/jrs.20198053]

Zhang Y, Qi G L and Rong Z G. 2006. Radiation Calibration Model and Method of Satellite Infrared Remote Sensors. Beijing: Science Press (张勇, 祁广利, 戎志国. 2006. 卫星红外遥感器辐射定标模型与方法. 北京: 科学出版)

Uniformity correction of radiance responsivity in vacuum infrared calibration for FY-3B/VIRR

WANG Yang¹, NIU Xinhua¹, ZHANG E^{1,2}, CHEN Shuaishuai^{1,3}, HU Xiuqing⁴,
ZHANG Dongdong¹, WANG Xianghua¹, XIONG Qianqian¹

1. Key Laboratory of Infrared System Detection and Imaging Technology, Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China;

2. Hangzhou Institute for Advanced Study, University of Chinese Academy of Sciences, Hangzhou 310024, China;

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

4. Key Laboratory of Radiometric Calibration and Validation for Environmental Satellites, National Satellite Meteorological Center, Beijing 100081, China

Abstract: In vacuum infrared calibration, factors, such as test contamination and non-uniformity of instrument temperature, cause response changes for scanning radiometer system, resulting in inaccurate calibration coefficients and platinum resistance conversion coefficients for each channel. The non-uniformity of the responsivity is corrected using the stability of the blackbody as a reference source in the constant temperature mode and the responsivity invariance in the single calibration state for the infrared detection system. The transfer algorithm of the consistent response from the internal to external blackbody measurement for the infrared channels is established by the data of variable temperature test for the surface blackbody and on-board blackbody in the infrared calibration. For the prelaunch calibration data of FY-3B visible infrared radiometer (VIRR), the non-uniformity of system responsivity is corrected during the calibration. At the temperature change stage, the uniformity of the correction signal for the surface blackbody between the heating-up and cooling-down stages is better than 0.7 digital number. In the radiance transfer stage, the uniformity of the correction signal for the on-board blackbody is better than 0.3 digital number in the reference condition. The difference between the correction method and other traditional methods in calculating the equivalent blackbody temperature of the on-board blackbody is analyzed. This algorithm ensures the transfer accuracy from the space-based radiance standard to the infrared detection system and on-board blackbody, and the technical support is provided to effectively improve the accuracy of vacuum infrared calibration.

Key words: remote sensing, infrared calibration, stability, scanning radiometer, responsivity, uniformity

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