

## 红外相机实时绝对辐射定标技术研究

吕原<sup>1</sup>, 丛明煜<sup>1</sup>, 赵漪璇<sup>2</sup>, 牛凯庆<sup>2</sup>, 路子威<sup>2</sup>

(1. 哈尔滨工业大学 航天学院, 黑龙江 哈尔滨 150001;  
2. 中国空间技术研究院, 北京 100094)

**摘要:** 辐射定标技术是实现定量遥感的关键环节。近年来,随着红外遥测技术愈发成熟,星上红外辐射定标已成为空间定量遥感技术的重要发展方向。文中从红外相机实时绝对辐射定标的背景出发,提出了半光路星上绝对辐射定标和基于多温度场的场地绝对辐射定标方法,结合实验数据,分别采用星上定标、场地定标、交叉定标三种方案进行在轨绝对辐射定标实验验证,并对其适用场景进行了分析。结果表明,通过结合半、全光路定标数据处理和转换技术,利用水面场和陆面场的场地绝对辐射定标方法,优选合适的定标场地,同时在陆面场中增加典型地物场景实现多温度场定标的方法,所提出的辐射定标方法实现了实时高精度绝对辐射定标,定标精度优于 1.5 K。

**关键词:** 红外遥感; 辐射定标; 星上定标; 场地定标; 交叉定标

中图分类号: P236 文献标志码: A DOI: 10.3788/IRLA20220395

## Research on real-time absolute radiometric calibration technology of infrared cameras

Lv Yuan<sup>1</sup>, Cong Mingyu<sup>1</sup>, Zhao Yini<sup>2</sup>, Niu Kaiqing<sup>2</sup>, Lu Ziwei<sup>2</sup>

(1. School of Astronautics, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China;  
2. China Academy of Space Technology, Beijing 100094, China)

**Abstract:** Radiometric calibration technology is the key link to realize quantitative remote sensing. In recent years, with the maturity of infrared telemetry technology, onboard infrared radiation calibration has become an important development direction of space quantitative remote sensing technology. Based on the background of real-time absolute radiometric calibration of infrared cameras, this paper puts forward the semi-optical path on-board absolute radiometric calibration and site absolute radiometric calibration based on multitemperature field. Combined with the experimental data, three schemes of onboard calibration, site calibration and cross calibration are used to verify the on-orbit absolute radiometric calibration experiment. The applicable scenarios of onboard calibration, site calibration and cross calibration are analysed. The results show that by combining the semi and all optical calibration data processing and conversion technology, using the site absolute radiation calibration method of the water surface field and land surface field, a suitable calibration site is selected, and typical ground object scenes are added to the land surface field to realize multitemperature field calibration. The radiometric calibration method proposed in this paper realizes real-time high-precision absolute radiometric calibration, and the calibration accuracy is better than 1.5 K.

**Key words:** infrared remote sensing; radiometric calibration; on-board calibration; site calibration; cross calibration

收稿日期:2021-06-15; 修订日期:2022-06-06

作者简介:吕原,男,工程师,硕士,主要从事空间目标测量技术方面的研究。

## 0 引言

辐射定标技术将图像灰度值转换成绝对辐射亮度,是实现定量遥感的关键环节。在轨红外遥感探测系统的辐射定标主要包含:探测器响应的不均匀性校正(相对辐射定标)和建立遥感相机输出信号值与输入辐射量的函数关系(绝对辐射定标)。前者是辐射定标的中间环节,后者是辐射定标的最终目标<sup>[1]</sup>。

目前常用的辐射定标方法包括:(1)利用自然辐射源、黑体定标源、定标灯以及太阳光漫反射板等星载定标设备对红外相机进行定标;(2)以地物作为定标源的场地定标<sup>[2]</sup>;(3)利用已定标且精度较高的参考红外相机对目标红外相机进行交叉定标<sup>[3]</sup>。

传统红外相机一般采用扫描方式成像,可以实现星上实时定标。与传统红外相机相比,文中研究的红外相机(以下统称该相机)分辨率高、口径大,难以实现星上实时定标。同时,由于该红外相机无法观测冷空间,传统的利用单个定标场和冷空间的场地绝对辐

射定标方法也不适用,且由于空间分辨率高,对定标场的辐射均匀性要求更高。因此,针对上述该红外相机的限制问题,文中设计合理的辐射定标方案,充分利用实验数据,实现了实时高精度绝对辐射定标,为后续的温度反演和定量化应用奠定了基础,具有一定的现实意义。

## 1 红外相机辐射定标设计与实现

针对红外相机半光路星上定标的特点,完成了星上定标数据处理和分析,生成噪声等效温差、相对和绝对辐射定标系数;针对红外相机不能观测冷空间的特点,完成了场地定标方案设计,在卫星在轨测试期间开展了场地定标外场试验,利用定标场地红外图像和同步测量数据,生成场地相对和绝对辐射定标系数;针对红外相机宽谱段、高分辨率的特点,完成了交叉定标方案设计,通过参考传感器选择和光谱匹配,完成了交叉定标数据处理和分析,生成交叉绝对辐射定标系数<sup>[4]</sup>。红外定标总体流程图 1 所示。

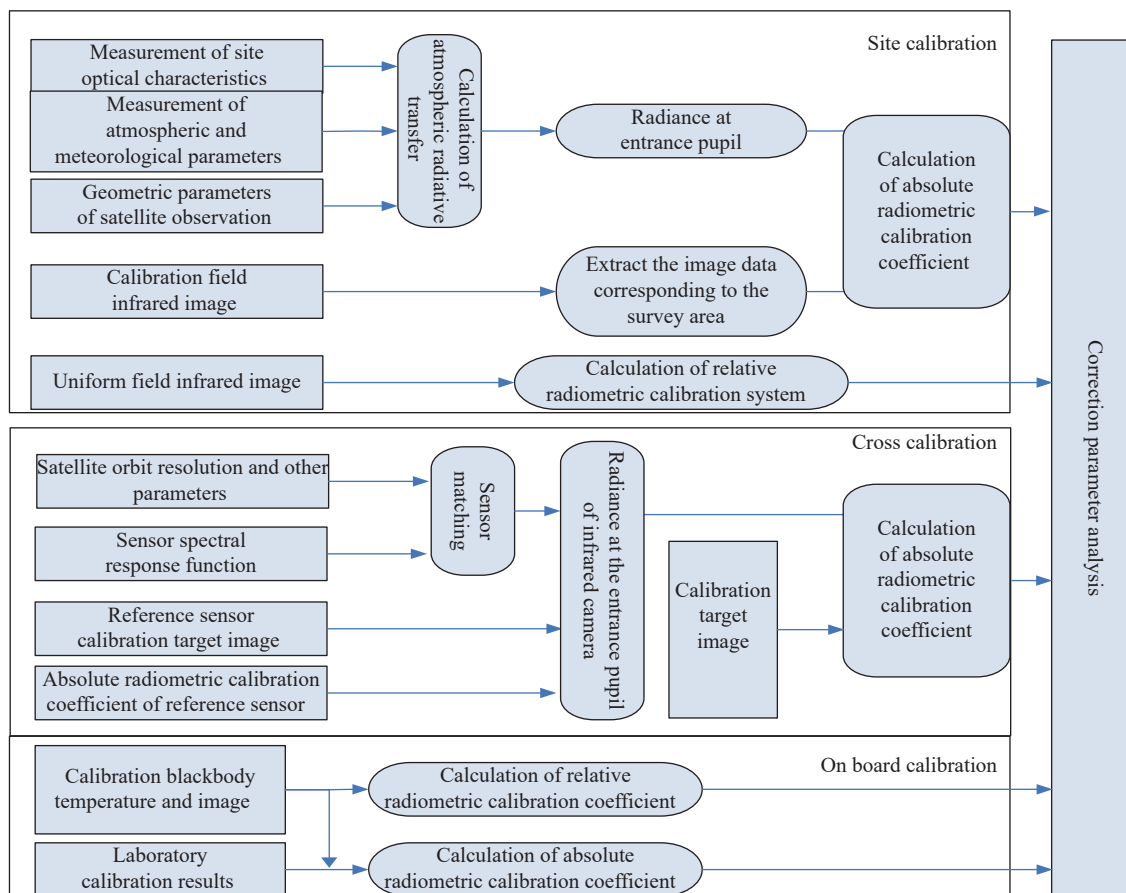


图 1 红外定标流程图

Fig.1 Flow chart of infrared calibration

### 1.1 星上定标

与星上红外定标装置相匹配,星上定标主要实现相对定标系数的计算、绝对定标系数的计算。

#### 1.1.1 相对定标系数计算

相对定标系数 $k(i)$ 、 $DN_{offset}(i)$ 计算如下:

$$\overline{DN}_l = k(i) \times DN_l(i) + DN_{offset}(i) \quad (1)$$

$$\overline{DN}_h = k(i) \times DN_h(i) + DN_{offset}(i) \quad (2)$$

$$\overline{DN}_l = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \overline{DN}_{l(i)} \quad (3)$$

$$\overline{DN}_h = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \overline{DN}_{h(i)} \quad (4)$$

式中:  $DN_l(i)$ 、 $DN_h(i)$ 分别为低温、高温定标图像数据第*i*个探测元的灰度值,  $i = 1, 2, 3, \dots, n$ ;  $\overline{DN}_l$ 、 $\overline{DN}_h$ 为低温、高温定标图像数据所有探测元的平均灰度值;  $\overline{DN}_{l(i)}$ 、 $\overline{DN}_{h(i)}$ 为低温、高温定标图像数据第*i*个探测元的平均灰度值;  $k(i)$ 为第*i*个探测元的校正增益;  $DN_{offset}(i)$ 为第*i*个探测元的校正偏移值;  $n$ 为探测元个数, 实验中  $n=480$ 。校正增益和校正偏移值计算公式为:

$$k(i) = \frac{\overline{DN}_h - \overline{DN}_l}{\overline{DN}_{h(i)} - \overline{DN}_{l(i)}} \quad (5)$$

$$DN_{offset}(i) = \overline{DN}_h - k(i) \cdot \overline{DN}_{h(i)} \quad (6)$$

相对辐射校正依据相对辐射定标系数进行计算处理, 具体为: 假设输入的原始遥感影像为  $G$ ,  $G(i, j)$  为第  $i$  个探测元第  $j$  列的  $DN$  值, 相对辐射校正后的图像用  $F$  表示, 则相对辐射校正如下式所示:

$$F(i, j) = G(i, j) \cdot k(i) + DN_{offset}(i) \quad (7)$$

式中:  $j = 1, 2, 3, \dots, 10786$ 。

#### 1.1.2 相对辐射校正精度评估

相对辐射校正精度采用非均匀性的来评价, 分为整个扫描条带整体的非均匀性和个相邻元见的非均匀性。整个扫描条带各元间的非均匀性  $PRNU$  计算如下:

$$PRNU = \frac{1}{\bar{Y}(\phi)} \sqrt{\frac{\sum_{n=1}^N (Y_n(\phi) - \bar{Y}(\phi))^2}{N}} \quad (8)$$

式中:  $Y_n(\phi)$ 为在均匀辐照 $\phi$ 下每个探测元的平均响应结果;  $\bar{Y}(\phi)$ 为在均匀辐照 $\phi$ 下校正后的像元平均;  $N$ 是

探测器的光敏元数, 实验中为 480。各相邻元间的非均匀性  $PRNU$  计算如下:

$$PRNU = \frac{|Y_{i+1}(\phi) - Y_i(\phi)|}{(Y_{i+1}(\phi) + Y_i(\phi))/2} \quad (9)$$

式中:  $i = 1, 2, 3, \dots, 479$ 。

#### 1.1.3 绝对定标系数计算

绝对定标系数 $K(i)$ 、 $C(i)$ 计算如下:

$$K(i) = \frac{K'(i)}{R_1(i)} \quad (10)$$

$$C(i) = C'(i) - R_2(i) \cdot K'(i) \quad (11)$$

式中:  $i$ 为探测元序号, 1~480;  $K(i)$ 为第*i*元绝对定标方程的增益系数;  $C(i)$ 为第*i*元绝对定标方程的偏置系数;  $R_1(i)$ 、 $R_2(i)$ 为内定标绝对定标系数与入瞳处绝对定标系数转换系数, 为相机真空辐射定标结果。 $K'(i)$ 、 $C'(i)$ 的计算如下:

$$K'(i) = \frac{DN_h(i) - DN_l(i)}{L_{eh} - L_{el}} \quad (12)$$

$$C'(i) = \frac{DN_l(i) \cdot L_{eh} - DN_h(i) \cdot L_{el}}{L_{eh} - L_{el}} \quad (13)$$

式中:  $DN_h(i)$ 为内定标高温黑体图像第*i*元  $DN$  值, 计算如下: 首先从 FRED 数据的辅助数据第 106 字长中获取其成像状态标识, F00 H 代表高温定标, 然后选择高温成像第 5、6、7 帧作为高温定标图像数据, 最后计算这三帧的图像每一元的均值即为  $DN_h(i)$ ;  $DN_l(i)$ 为内定标低温黑体图像第*i*元  $DN$  值, 计算如下: 首先从 FRED 数据的辅助数据第 106 字长中获取其成像状态标识, 0 F0 H 代表低温定标, 然后选择低温成像第 5、6、7 帧作为高温定标图像数据, 最后计算这三帧的图像每一元的均值即为  $DN_l(i)$ ;  $L_{eh}$ 为内定标高温黑体等效光谱辐亮度 ( $W/(m^2 \cdot sr \cdot \mu m)$ );  $L_{el}$ 为内定标低温黑体等效光谱辐亮度 ( $W/(m^2 \cdot sr \cdot \mu m)$ ), 计算如下:

$$L_{eh} = \frac{\varepsilon' \cdot \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} R(\lambda) L(\lambda, T_h) d\lambda}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} R(\lambda) d\lambda} \quad (14)$$

$$L_{el} = \frac{\varepsilon' \cdot \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} R(\lambda) L(\lambda, T_l) d\lambda}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} R(\lambda) d\lambda} \quad (15)$$

式中:  $\varepsilon'$ 为内定标黑体发射率为 0.97;  $R(\lambda)$ 为红外相机的相对光谱响应 (主备份不同);  $L$ 为光谱辐亮度 ( $W/(m^2 \cdot sr \cdot \mu m)$ );  $T_h$ 为高温黑体绝对温度 (K),  $T_l$ 为低温

黑体绝对温度 (K) 温度从 FRED 辅助数据里面提取;  $\lambda$  为波长 ( $\mu\text{m}$ );  $\lambda_1$ 、 $\lambda_2$  为相机响应的起始波长和截止波长, 主份为 7.62、10.20  $\mu\text{m}$ , 备份为 7.61、10.24  $\mu\text{m}$ 。

绝对辐射校正依据绝对辐射定标系数进行计算处理, 具体为: 假设输入的原始遥感影像为  $G$ ,  $G(i, j)$  为第  $i$  个探测元第  $j$  ( $j = 1, 2, 3, \dots, 10\ 786$ ) 列的  $DN$  值, 绝对辐射校正后的图像用  $S$  表示, 则绝对辐射校正公式如下:

$$S(i, j) = (G_c(i, j) - C(i)) / K(i) \quad (16)$$

$$G_c(i, j) = G(i, j) + \Delta G_d(i) \quad (17)$$

式中:  $G_c$  为影像的有效  $DN$  值;  $\Delta G_d(i)$  为相机输出温度变化修正量。

### 1.1.4 绝对定标精度分析实现

从星上定标各个环节入手, 文中对星上绝对定标精度进行分析, 包括星上黑体辐射源的温度控制精度、黑体温度测量精度、半光路至全光路转换和实验室真空辐射定标等环节对定标精度产生影响。

影响最终绝对定标精度的因素及影响量如下: 黑

体辐射源的温度控制精度, 0.18%; 黑体温度测量精度, 0.09%; 半光路到主光路转换引入的误差, 0.24%; 红外相机主份通道的绝对定标精度, 1.99%。总误差为 2.01%, 换算到 300 K, 精度为 1.13 K。

### 1.2 场地定标技术

国内相关单位有多年的气象卫星红外通道场地定标经验, 但其利用青海湖进行红外通道场地定标的方法不适用于该红外相机, 原因有两点: (1) 该红外相机不能观测冷空间, 单靠水面场无法获得有效的定标系数, 必须增加陆面场<sup>[5]</sup>; (2) 该红外相机分辨率高, 对同步观测场地的面积要求相对不严格, 但对场地的辐射均匀性要求更严格。基于以上分析, 设计场地定标方案如图 2 所示。进行场地定标之前, 需要首先确定同步观测场地并对参试仪器进行室内定标。当卫星飞越水面定标试验场时, 利用红外光谱仪、走航式水温计、浮标等仪器和设备获得水面辐亮度、水温等数据; 飞越陆面定标试验场时, 利用红外光谱仪、地温测量系统等仪器和设备测量陆面辐亮度和温度数据; 同时进行实时探空观测。将测量数据和实时探空数据

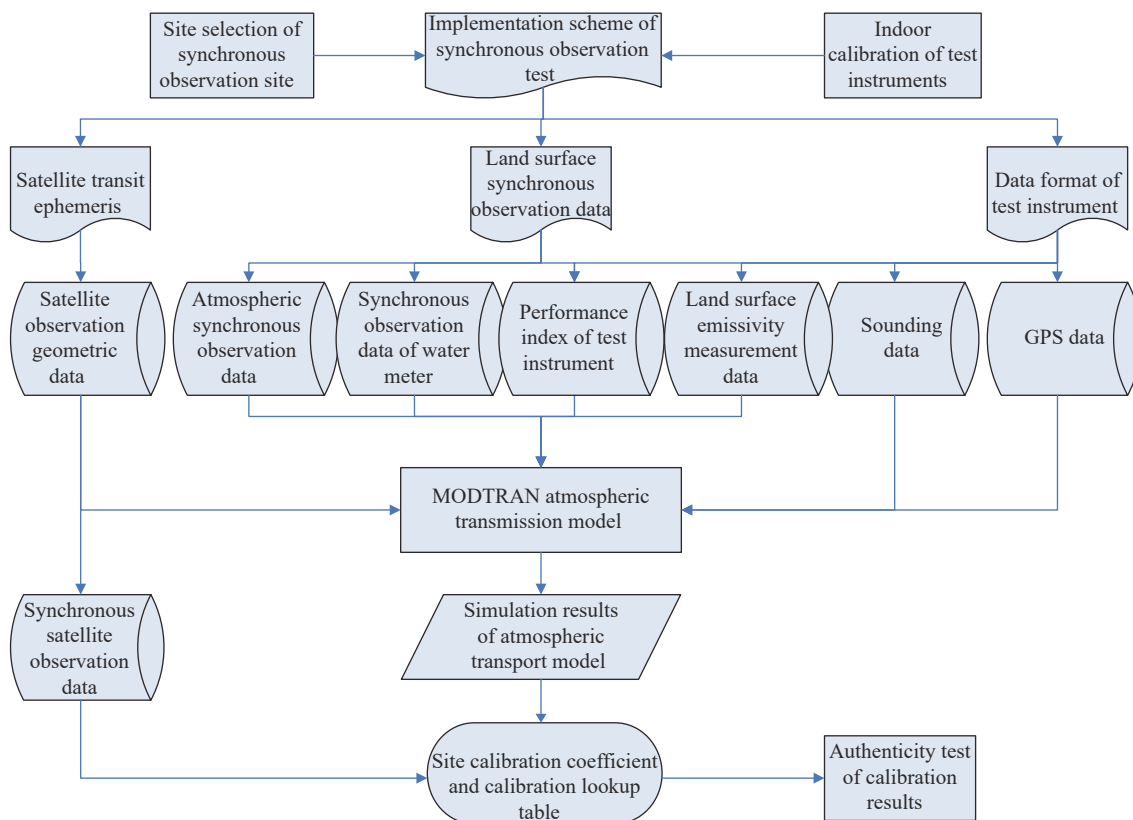


图 2 场地定标方案流程图

Fig.2 Flow chart of site calibration scheme

输入到辐射传输模型,计算大气透过率和程辐射,获得卫星入瞳处等效辐亮度,与卫星图像计数值比较,获得场地绝对辐射定标系数。

### 1.2.1 同步观测场地确定

由于该平台是太阳同步轨道,并且其红外相机不具备冷空观测能力,在进行场地定标时采用青海湖一点作为定标靶区,无法获取定标系数。针对该红外相机的这一特点,在进行场地定标时,需要选择新的定标场地,从而完成定标。鉴于以上分析,在场地定标实施过程中,最好多个场地同时进行,获取同步数据,从而保证场地定标精度。根据红外相机特点,并对场地的辐射特性、气候气象条件、表面组成、可到达性、观测可操作性等方面进行可行性分析,试验场地锁定在北纬 60°以内,大气影响小的区域。

定标低点:在初次定标时可以利用星上定标黑体在温度较低的阴影面获取的低温点作为定标低点。但是随着探测器的在轨运行时间推移,探测器性能会有较大变化,所以要利用外场观测来取代低点,例如水体。由于探测器空间分辨率较高,试验场地具有 100 m×100 m 的均匀区域即可。但是水体的深度应该足够深以保证热红外影像的均匀性。

定标高点:在满足要求的湖泊附近寻找均匀区域作为定标高点,主要寻找成片均匀的下垫面目标。经过考察分析,确定用敦煌中国遥感卫星辐射校正场作为场地定标区域,同步观测区包括敦煌戈壁表面和渥洼池(敦煌戈壁附近的一处湖泊)水体表面。卫星在同一轨道可以覆盖两目标。

### 1.2.2 同步观测仪器与方法

观测前所有地物波谱和大气辐射特性观测仪器都要进行统一的实验室定标和标定。同时,同类地面观测仪器在观测前和观测后都要进行比对。观测时地面观测和卫星观测必须准同步进行,一般在卫星过境前后半小时内。同时,天气条件必须满足晴空、大气稳定、无云、风力小于 4 级、大气质量数小于等于 6、太阳天顶角小于 50°等要求。

#### (1) 水面光学特性观测

乘坐测量船,安装好有关仪器,开展水面的辐亮度光谱测量、通道辐亮度测量和水温测量等。仪器主要使用 CE-312 野外热红外辐射计(波段范围 8~14 μm,

FOV: 10°, 4 个通道)、MR-154 傅里叶变换红外光谱仪(波长范围: 0.7~19.5 μm, 光谱分辨率最高 1 cm<sup>-1</sup>)、102 F 傅里叶变换红外光谱仪和表层水温仪、走航式水温仪等。

#### (2) 陆面光学特性观测

陆面光学特性观测内容包括:辐射亮度、发射率和温度。所用仪器包括:MR-154 傅里叶变换红外光谱仪、红外标准板,用于测量陆面辐射亮度和地表发射率;地温测量系统用于测量陆面温度。具体测量步骤如下:

(a) 在场地上选择至少 5 个地点(四角和中心点)进行发射率测量;

(b) 在近地表无风、天气晴朗的条件下,测量时间应选择太阳高度角变化缓慢,地表温度较稳定的时间段;或没有太阳,且地表已经处于热平衡状态下的夜间进行观测;

(c) 利用 GPS 定位仪获取观测区域地理位置数据;

(d) 架设发电机发电;

(e) 利用 MR-154 傅里叶变换红外光谱仪获取地表亮温初值,然后在温度附近选择 5 个温度点,将标准黑体控温在这几个点上对红外光谱仪进行定标测量;

(f) 利用红外光谱仪测量红外标准板,采集数据;

(g) 用接触式点温计测量红外标准板的物理温度;

(h) 用红外光谱仪重复测量地面目标区域;

(i) 重复步骤(f)~(h),直至测量数据足够为止;

(j) 换下一个地点测量。

#### (3) 陆面发射率反演

卫星入瞳处分谱的热辐射可以表达为:

$$L_{TOA}(\lambda) = [\varepsilon(\lambda)L_{BB}(\lambda, T_s) + (1 - \varepsilon(\lambda))L_{atm}^{\downarrow}(\lambda)]\tau_{atm} + L_{atm}^{\uparrow}(\lambda) \quad (18)$$

式中:  $L_{TOA}(\lambda)$  为传感器接收到的光谱辐亮度;  $L_{BB}(\lambda, T_s)$  为地表真实温度  $T_s$  所对应的黑体辐亮度;  $\varepsilon(\lambda)$  为地表发射率;  $\tau_{atm}$  为大气透过率;  $L_{atm}^{\uparrow}(\lambda)$ 、 $L_{atm}^{\downarrow}(\lambda)$  分别为大气上行和下行辐射。利用 BOMEM MR-154 红外光谱仪在测量地表时探测器距离地面高度在 1 m 以内。根据 MODTRAN 模式的模拟结果,在 8~14 μm 的波段内,该距离下大气的上行辐射  $L_{atm}^{\uparrow}(\lambda)$  小于探测器接收的总辐射能量的 0.5%,大气透过率  $\tau_{atm}$  近乎为 1,因此

可以忽略这两项。于是利用光谱仪近地表观测时,上式可以进一步简化为:

$$L_s(\lambda) = \varepsilon(\lambda)L_{BB}(\lambda, T_s) + (1 - \varepsilon(\lambda))L_{atm}^{\downarrow}(\lambda) \quad (19)$$

式中:  $L_s(\lambda)$  为仪器在近地表测量目标得到的光谱辐亮度,  $L_{atm}^{\downarrow}(\lambda)$  为大气下行辐射。由上式可以求解出地面观测目标的发射率光谱  $\varepsilon(\lambda)$ :

$$\varepsilon(\lambda) = \frac{L_s(\lambda) - L_{atm}^{\downarrow}(\lambda)}{L_{BB}(\lambda, T_s) - L_{atm}^{\downarrow}(\lambda)} \quad (20)$$

上式表明: 地表发射率光谱测量必需获得被测目标表面的出射辐射、大气下行辐射和目标表面温度三个物理量。发射率测量过程中需把握的两个关键问题: 一是大气下行辐射或环境辐射的精确测量; 二是测准物体表面温度。为解决这两方面问题, 在分析现有测量方法的基础上, 利用高精度的 BOMEM MR-154 傅里叶变换红外光谱测量仪, 并采用红外标准板对环境辐射进行了测量, 同时利用 ISSTES 算法进行温度和发射率的分离反演。

#### (4) 场区大气光学特性观测

场区大气光学特性观测内容包括: 太阳直射辐照度、总辐照度、天空漫射辐照度、晕-天空光散射、大气臭氧与水汽含量、常规气象数据、气溶胶光学厚度等。主要用到的仪器有 CE-317 手动跟踪太阳光度计和 CE-318 自动跟踪太阳光度计。

#### (5) 场区气象观测

场区同步气象参数测量内容包括: 气压、相对湿度、能见度、温度、风力、风向等。测量仪器主要是自动气象站和探空气球, 在卫星过顶前后半小时内测量。

#### (6) 场区 GPS 定位

获得所有测量地点的位置数据。

### 1.2.3 场地定标数据处理

卫星热红外探测器对场地表面进行观测时接收的辐射包括三个部分: 第一部分是来自场地表面的热辐射, 经过大气的衰减到达卫星, 其大小由场地表面的温度和比辐射率以及大气透过率决定; 第二部分为大气的热辐射, 与大气中吸收气体的含量和物理状态有关; 第三部分是场地表面反射的大气辐射。

$$L_{band} = L_1 + L_2 + L_3 \quad (21)$$

式中:  $L_{band}$  为卫星探测器接收到辐射;  $L_1$  为目标自身辐射向上通过大气到达传感器的辐射;  $L_2$  为大气出射的热辐射;  $L_3$  地面目标反射的大气辐射。其中:

$$L_1 = \int_{\Delta\lambda} L_b(T, \lambda) \cdot \tau_a(\lambda) \cdot \varepsilon(\lambda) \cdot d\lambda \quad (22)$$

式中:  $L_b$  为地面测量的目标辐亮度;  $\tau_a$  为目标到卫星路径整层大气透过率;  $\varepsilon$  为目标发射率。

$$L_2 = \int_{\Delta\lambda} L_p \uparrow(\lambda) \cdot d\lambda \quad (23)$$

式中:  $L_p$  为向上大气程辐射。

$$L_3 = \int_{\Delta\lambda} L_p \downarrow(\lambda) \cdot \tau_a(\lambda) \cdot [1 - \varepsilon(\lambda)] \cdot d\lambda \quad (24)$$

如果选择陆地表面作为场地定标目标区, 则可根据已经测量获取的场地发射率数据及以上公式, 计算出卫星入瞳处接收到的辐亮度  $L_{band}$ 。如果选择面积大、稳定的水域作为外定标地面目标, 由于水体目标发射率接近于 1, 由地面目标反射的向下的大气辐射可忽略不计, 则卫星遥感器入瞳处接收到的辐亮度  $L_{band}$  为:

$$L_{band} = \int_{\Delta\lambda} L_b(T, \lambda) \cdot \tau_a(\lambda) \cdot d\lambda + \int_{\Delta\lambda} L_p \uparrow(\lambda) \cdot d\lambda \quad (25)$$

考虑卫星通道的光谱响应, 卫星传感器通道的等效辐射亮度为:

$$L_{eq} = \frac{\int_{\Delta\lambda} L_{band} R(\lambda) d\lambda}{\int_{\Delta\lambda} R(\lambda) d\lambda} \quad (26)$$

式中:  $R(\lambda)$  为归一化的卫星通道光谱响应函数。

卫星通道的定标公式为:

$$L = a \times DC + b \quad (27)$$

式中:  $DC$  为卫星传感器测量计数值;  $a$ 、 $b$  为定标系数。

### 1.2.4 场地定标精度分析与验证

#### (1) 定标精度理论分析

要保证场地辐射定标实现高精度, 需要分析定标测量的每个环节误差及其敏感系数, 从而评价总的辐射定标精度。误差计算公式如下:

$$\sigma = \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \dots + \sigma_n^2} \quad (28)$$

式中:  $\sigma$  为总的误差;  $\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_n$  为不同误差源的误差贡献。

表 1 给出了场地定标各个环节的误差和总的误差估计结果。

表 1 场地定标各个环节的误差表

Tab.1 Error table of each link of site calibration

Error source	Calibration error	Measurement error	Algorithm error	Error	Sensitivity coefficient	Error contribution
Moisture content		20%		20%	0.05%	1.0%
Surface radiance	0.1%	0.5%	0.1%	0.52%	1.0%	0.52%
Solar zenith angle			1.0%	1.0%	0.1%	0.1%
Intrinsic model precision			2.0%	2.0%	1.0%	2.0%
Water meter emissivity		0.1%		0.1%	1.0%	0.1%
Land surface emissivity	0.1%	0.5%	0.5%	0.71%	1.0%	0.71%
Satellite count value		0.1%	0.1%	0.14%	1.0%	0.14%
Least square method			0.5%	0.5%	1.0%	0.50%
Total error						<b>2.46%</b>

该红外相机中心波数 1135.5 cm 对应的 300 K 时辐亮度为 75.56 mW/(m<sup>2</sup>·sr·cm)，将辐亮度增大或减小 2.46% 时对应的亮温分别为 298.6387 K 和 301.3377 K，即场地定标的误差在 1.4 K 以内。

(2) 定标精度验证

利用在轨测试期间获取的数据进行定标精度验证。具体方法是：首先，利用测量的辐亮度、温湿压廓线等数据以及相机光谱响应函数，计算入瞳辐亮度；利用入瞳辐亮度和 Planck 公式，计算等效黑体温度，得到 T<sub>1</sub>；然后，利用图像 DN 值和定标系数，计算入瞳辐亮度；利用入瞳辐亮度和 Planck 公式，计算等效黑体温度，得到 T<sub>2</sub>；最后，得到定标精度为 T<sub>2</sub>-T<sub>1</sub>。利用水面、陆面和黑衬网得到绝对辐射定标系数，如图 3 所示。利用水面、陆面数据验证定标精度。

水面实测的入瞳辐亮度 7.1379 Wm<sup>-2</sup>·sr<sup>-1</sup>·μm<sup>-1</sup>，

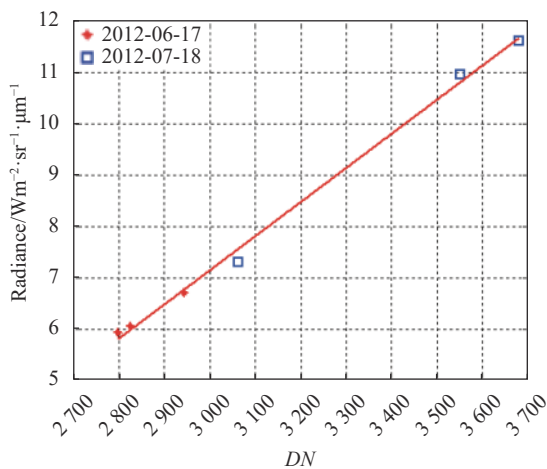


图 3 绝对辐射定标系数

Fig.3 Absolute radiometric calibration coefficient

利用定标系数计算的入瞳辐亮度 6.9671 Wm<sup>-2</sup>·sr<sup>-1</sup>·μm<sup>-1</sup>；实测的入瞳等效黑体温度 283.16 K，计算的入瞳等效黑体温度 281.96 K，定标误差-1.2 K。

陆面实测的入瞳辐亮度 6.6331 Wm<sup>-2</sup>·sr<sup>-1</sup>·μm<sup>-1</sup>，利用定标系数计算的入瞳辐亮度 6.4914 Wm<sup>-2</sup>·sr<sup>-1</sup>·μm<sup>-1</sup>；实测的入瞳等效黑体温度 279.55 K，计算的入瞳等效黑体温度 278.50 K，定标误差-1.1 K。

综上，基于有限的验证数据，得到定标精度优于 1.2 K，与理论分析结果一致。

1.3 交叉定标技术

交叉定标内容包括：

(1) 交叉定标卫星对应通道间的光谱响应匹配，包括相近通道和相近通道组合对应通道的匹配、对应通道在各种大气廓线情况下辐射影响因子的计算。

(2) 交叉定标卫星轨道图像的时间匹配，两幅图像获取时间控制在 10 min 内。

(3) 交叉定标卫星对应通道图像间的几何匹配，将参考卫星数据与该红外相机红外图像进行相同范围的投影，在进行几何定位检验、确定两种资料样本选取标准、并进行区域样本图像均匀性判断后，得到最后的相对定标样本数据。

(4) 参考标准传感器相应通道的定标系数提取，进行交叉定标计算。在获得该红外相机定标系数后，进行定标查找表计算，并将查找表应用到样本图像中，获得亮温图像，进行直方图分析。一般来讲，高温端由于样本数较多且均匀稳定，匹配及定标结果较好，而低温端由于时间差等原因，总有一定误差，需要加入二次项修正。重新将结果应用到图像中进行分

析, 确定最后得定标结果。

(5) 交叉定标结果时效性分析。由于交叉定标参考基准传感器卫星数据获取较难达到实时, 需要对定标结果的时效性进行分析。将某次交叉定标结果应

用到今后一段时间的图像中并与当时的该红外相机卫星图像进行比对。遥感器在轨交叉定标流程如图 4 所示。

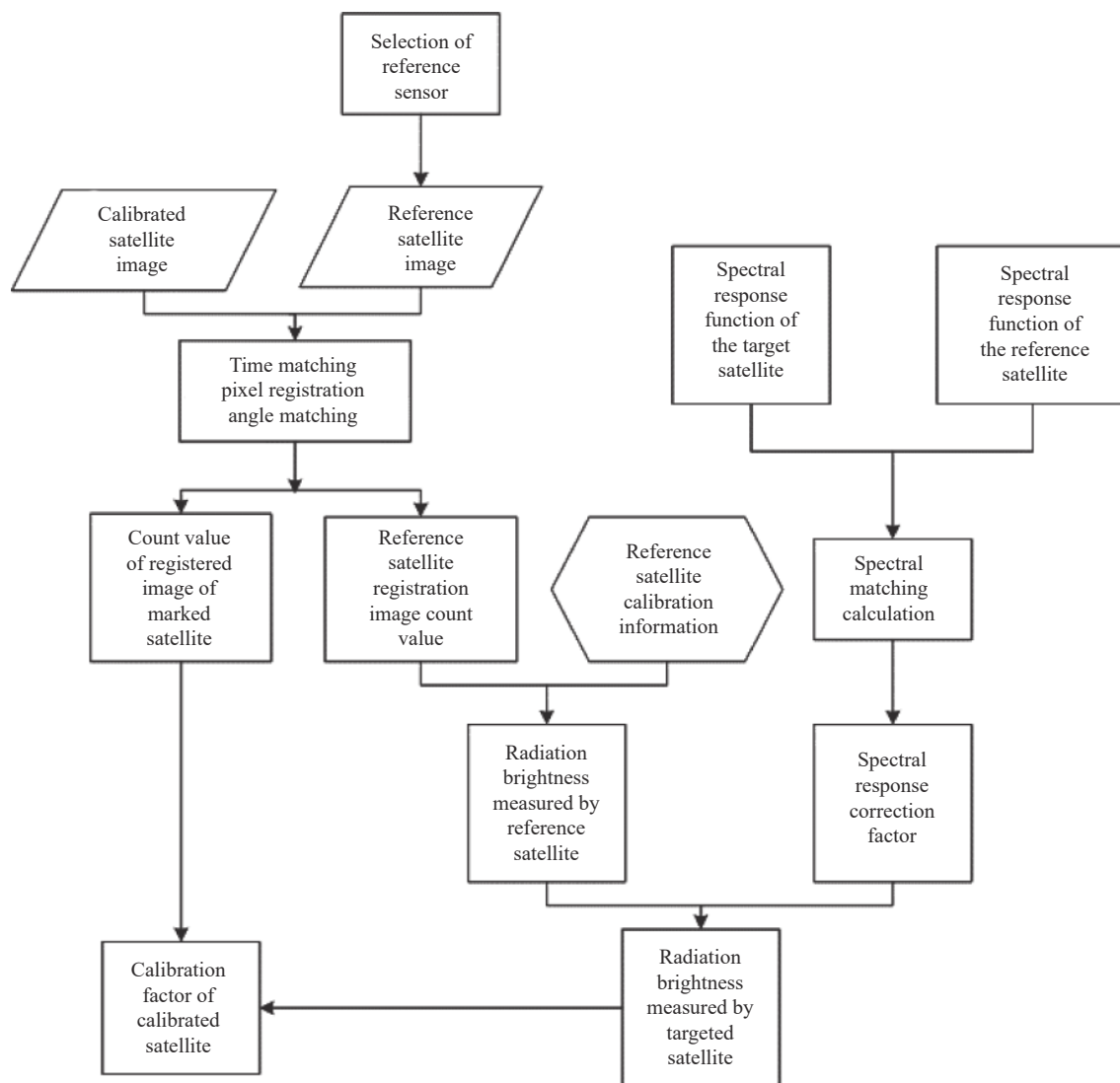


图 4 红外通道遥感器在轨交叉定标流程图

Fig.4 On orbit cross calibration flow chart of infrared channel remote sensor

交叉定标算法包括数据匹配、光谱匹配、过滤和辐射定标计算等几个主要的步骤。主要是对被定标的该红外相机数据和参考卫星数据进行有效的匹配, 从而保证后期定标的准确性。

### 1.3.1 参考传感器选择

参考传感器的选择在交叉定标流程中是关键的一环, 必须选择与被定标传感器波段相近、同时期的、具有高辐射定标精度的传感器作为参考标准, 将

其辐射基准传递至被定标传感器。参考传感器选择还需要考虑具有较高空间分辨率、高光谱分辨率, 以及较短回访周期的遥感器作为定标参考源, 从而提高交叉定标的精度和频次。

针对该红外相机, 文中在高光谱仪器中选择了 Aqua-IASI 和 Metop-AIRS 传感器。而通道式传感器中选择了 MSG-SEVIRI、Aqua-MODIS 和 Terra-MODIS 传感器。



1.3.2 数据匹配

主要是对被定标的该红外相机数据和参考卫星数据进行有效的匹配,从而保证后期定标的准确性。

(1) 时空匹配

该步骤主要利用轨道模拟软件进行 LEO-LEO 或 LEO-GEO 的交叉计算。空间匹配上要采用观测天顶角小于 60°的数据;时间匹配上要采用两颗卫星交叉时间差距在 600 s 以内的数据。

(2) 几何观测方位匹配

每一时空匹配的像元将逐一被检测来检查两个仪器的观测几何方位是否足够接近。高度角的标准是根据大气路径长度、观测高度角正切值之间的差和方位角之间的差来确定的。如果这些要小于前面所定义的阈值,匹配像元将能够进行观测几何方位上的校准和进一步的分析;否则将被拒绝。

高度角的判断公式如下:

$$\left| \frac{\cos(\text{geo\_zen}[or : \text{leo\_zen}])}{\cos(\text{leo\_zen})} - 1 \right| < \text{max\_zen} \quad (29)$$

式中:该红外相机的 max\_zen 阈值设为 0.05。

1.3.3 光谱匹配

经由光谱匹配阶段,匹配数据将被转换成能够进行直接比较的形式。由于参考仪器和被定标的该红外相机通道间存在一定的差距,需要进行光谱匹配来保证观测辐射度的真实性。对于高光谱仪器 IASI 和 ARIS,所有的光谱响应函数都首先转换成一个公用的光谱格点。然后将和静止卫星的通道光谱响应函数匹配的极轨卫星高光谱通道进行卷积,从而保证合成出伪通道的辐射值,这也说明光谱误差平衡中的抽样性和稳定性。

$$R_{LEO} = \frac{\int_{\nu} R_{\nu} \Phi_{\nu} d\nu}{\int_{\nu} \Phi_{\nu} d\nu} \quad (30)$$

式中:  $R_{LEO}$  为模拟的该红外相机观测辐射值;  $R_{\nu}$  为极轨卫星在波数  $\nu$  处的辐射值;  $\Phi_{\nu}$  为该红外相机在波数  $\nu$  处的光谱响应函数。由于 IASI 或 ARIS 在光谱通道上具有一些损坏或本身的缺口,为了能够和该红外相机相匹配,还需要对参考仪器的光谱进行补偿来减小定标误差。光谱补偿的方法主要利用辐射传输模式计算不同大气条件高光谱入瞳辐射亮度结果,并将该结果在对应缺口上进行补偿。在卫星传感器交叉

定标过程中,对应通道之间的光谱匹配是一个重要环节。为了获得准确的光谱匹配结果,需要选择与被标定卫星通道近似的高精度卫星通道作为参考通道,并采用多种样本数据。利用样本数据分别与与被标定卫星通道和参考卫星通道光谱响应函数进行相关计算,最后找出被定标卫星通道与参考卫星通道之间在卫星高度处测量的地球物理参数的量化关系。针对该卫星红外通道波段光谱特性,分别选择 TERRA-MODIS/AQUA-MODIS 的 3 个通道 (28、29、30) 进行组合,并选择 SEVIRI 的 7.3、8.7、9.7、10.8  $\mu\text{m}$  等 4 个通道进行组合,通过多元线性回归算法,给出该卫星通道和参考卫星组合通道之间的光谱匹配系数。待定标的卫星 TIR 通道波段范围为 7.0~10.6  $\mu\text{m}$ 。参考卫星 TIR 通道光谱范围如下。

MODIS—通道 28: 7.0~7.7  $\mu\text{m}$ ; 通道 29: 8.1~8.9  $\mu\text{m}$ ; 通道 30: 9.3~10.0  $\mu\text{m}$ 。

SEVIRI—7.3  $\mu\text{m}$  通道: 6.35~8.35  $\mu\text{m}$ ; 8.7  $\mu\text{m}$  通道: 7.9~9.5  $\mu\text{m}$ ; 9.7  $\mu\text{m}$  通道: 9.1~10.22  $\mu\text{m}$ ; 10.8  $\mu\text{m}$  通道: 8.8~12.8  $\mu\text{m}$ 。

该卫星 TIR 通道与标准卫星通道光谱响应曲线如图 5~图 7 所示。

首先,对 TERRA-MODIS、AQUA-MODIS 的通道 28、29、30 和 SEVIRI 通道 7.3、8.7、9.7 和 10.8 按波长分布的光谱响应函数进行按波数分布转换,然后插值和归一化处理,最后生成光谱匹配计算所需要的文件。

其次,利用 MODTRAN 辐射传输软件包,选择热

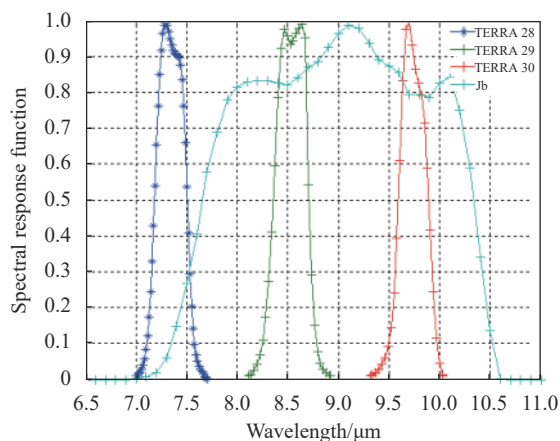


图 5 TERRA-MODIS 与该红外相机光谱响应

Fig.5 TERRA-MODIS and spectral response of the infrared camera

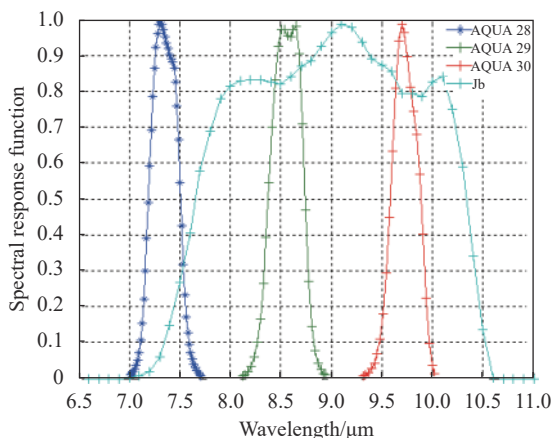


图 6 AQUA-MODIS 与该红外相机光谱响应

Fig.6 AQUA-MODIS and spectral response of the infrared camera

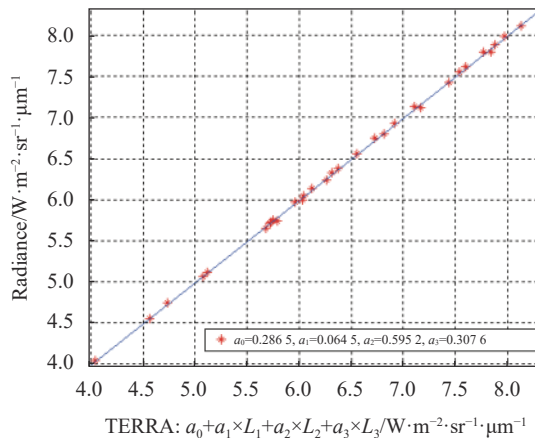


图 8 TERRA-MODIS 与该红外相机辐亮度对比图

Fig.8 Radiance contrast between TERRA-MODIS and the infrared camera

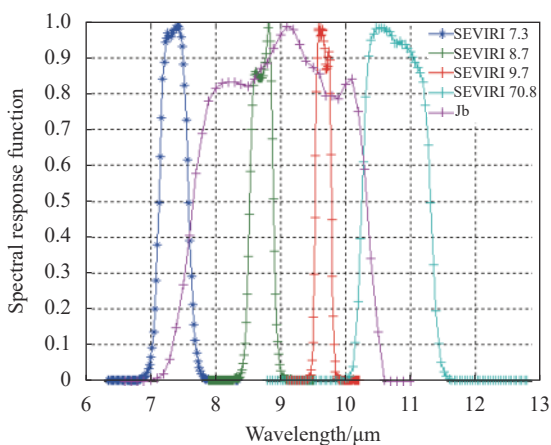


图 7 MSG-SEVIRI 与该红外相机光谱响应

Fig.7 MSG-SEVIRI and spectral response of the infrared camera

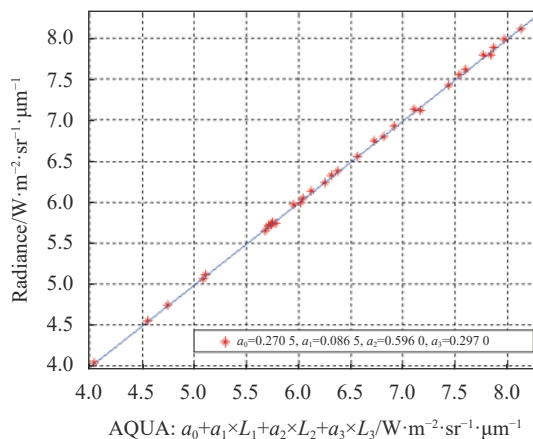


图 9 AQUA-MODIS 与该红外相机辐亮度对比图

Fig.9 Radiance contrast between AQUA-MODIS and the infrared camera

带大气和标准大气廓线, 温度范围为 200~320 K, 以海洋、云、陆地等目标作为辐射传输计算的输入参数, 通过模拟计算, 获得 46 组热红外谱段样本数据。利用样本数据和各传感器相关通道光谱响应函数按公式 (31) 进行卷积计算, 给出每个计算通道所有样本大气顶的等效辐亮度。

$$Radiance_{eqI} = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} Radiance_I(\lambda) \times response_I(\lambda) d\lambda}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} response_I(\lambda) d\lambda} \quad (31)$$

式中:  $Radiance_{eqI}$  为通道 I 目标等效辐亮度;  $Radiance_{eqI}$  为通道 I 对应的分谱辐亮度;  $response_I$  为通道 I 归一化光谱响应函数 ( $cm^{-1}$ )。图 8~图 10 为各个卫星传感器对该红外相机通道辐亮度的比值, 可以看出该红外

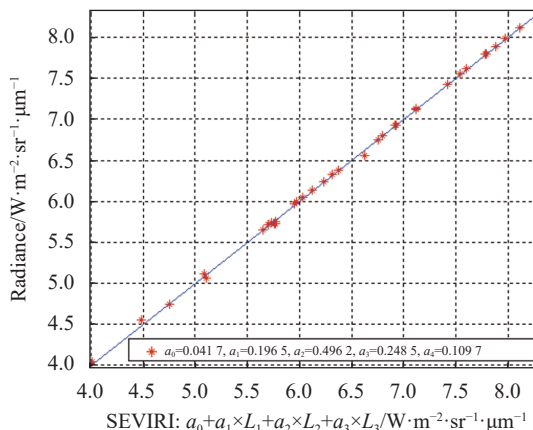


图 10 SEVIRI 与该红外相机辐亮度对比图

Fig.10 Radiance contrast between SEVIRI and the infrared camera

相机与各个卫星传感器相关性较强。

最后,利用通过光谱响应卷积得出的通道大气顶辐亮度数据分别将待标定该红外相机热红外通道模拟辐亮度分别与 TERRA-MODIS、AQUA-MODIS、SEVIRI 4 个通道辐亮度建立多元线性回归模型:

$$L_x = a_0 + a_1L_1 + a_2L_2 + a_3L_3 + a_4L_4 \quad (32)$$

式中:  $L_x$  为待标定该红外相机热红外通道辐亮度 (单位:  $mW/(m^2 \cdot sr \cdot cm)$ ),  $L_1$ 、 $L_2$ 、 $L_3$ 、 $L_4$  为参考卫星各通道辐亮度;  $a_0$ 、 $a_1$ 、 $a_2$ 、 $a_3$ 、 $a_4$  为需要计算的光谱匹配系数。

从表 2 可以看出,相对误差都不超过 0.5%,两颗 MODIS 传感器的效果更好,误差都在 0.3% 以下。

表 2 该红外相机热红外通道与 MODIS 和 SEVIRI 光谱匹配系数

Tab.2 Matching coefficients between thermal infrared channel of the infrared camera and MODIS and SEVIRI spectra

Infrared camera and sensor	$a_0$	$a_1$	$a_2$	$a_3$	$a_4$	Relative error
TERRA-modis	0.2865	(ch28) 0.0645	(ch29) 0.5952	(ch30) 0.3076		0.2146%
AQUA-modis	0.2705	(ch28) 0.0865	(ch29) 0.5960	(ch30) 0.2970		0.2336
SEVIRI	0.0417	(ch7.3) 0.1965	(ch8.7) 0.4962	(ch9.7) 0.2485	(ch10.8) 0.1097	0.3407%

1.3.4 过滤

过滤主要的目的是剔除那些异常低的不用分析的结果,选择留下最后定标所用的匹配点数据<sup>[6]</sup>。

(1) 均匀性检验

情景均匀性的信息在减少和评估交叉定标中的不确定性时是非常重要的<sup>[7]</sup>。为了减少对比中由于时空不匹配产生的不确定性,可能将匹配数据集进行过滤,仅仅只有那些均匀场景的观测才会用来进行对比。

为了减少两个卫星之间观测时间、光学路径和导航等上的差异,这里仅选择和比较均匀情景下的观测结果。在环境均匀性的检测中,将使用下面的方程检测该红外相机辐射数据在环境中的均匀性:

$$STDV(ENV) < \max\_STDV \quad (33)$$

式中:  $STDV(ENV)$  为该红外相机辐射值在环境中的标准偏差。参考卫星辐射值将与该红外相机卫星在靶区的辐射值进行比较。该红外相机在靶区的辐射数据是经过环境均匀性检测的数据。靶区的该红外相机辐射数据的正常情况使用下面的公式进行检验:

$$\frac{|MEAN(TARGET) - MEAN(ENV)| \times 9}{STDV(ENV)} < Gaussian \quad (34)$$

式中:  $MEAN(TARGET)$  和  $MEAN(ENV)$  分别为该红外相机在靶区和环境中的平均辐射值。

$\max\_STDV$  和  $Gaussian$  的阈值在不同通道和天

气条件下是不同的,在这里  $\max\_STDV$  取 1.65(晴空), 3.31(有云),  $Gaussian$  取 2(任何条件)。如果该红外相机亮温高于 275 K, 此类情景条件将被划归为晴空。否则将被划归为有云情况。

(2) 异常排斥

为了保证异常观测不会过度影响最后的结果,可能会在统计的基础上将确定和排除掉“异常”结果<sup>[8]</sup>。具体方法是将靶区辐射与周围环境的辐射值进行比较。那些明显不同于环境辐射值 ( $3\sigma$ ) 的靶区将被排除。对于一个样本空间  $N$ , 均值为  $M$ , 标准差为  $S$  的正态分布样本来说,任意一个样本和均值  $M$  之间的差约 68% 的概率小于  $S$ , 约 95% 的概率小于  $2S$  等。相似地, 样本数  $n_2$  与均值  $M$  之间差也是约 68% 的概率小于  $S/n[(N-n)/(N-1)]$ , 约 95% 的概率小于  $2S/n[(N-n)/(N-1)]$ 。这种性质被用来检验在均匀环境中的匹配区域是否是一个异常值:

$$\left| \frac{1}{n^2} \sum_{i=1}^{n^2} R_i - M \right| \leq \frac{S}{n} \frac{N-n}{N-1} Gaussian (= 3) \quad (35)$$

式中:  $R$  为独立像元的辐射值;  $n^2$  为样本数;  $Gaussian$  为一个阈值。如果  $Gaussian=1$ , 那么被排除的样本为异常值的概率是 68%, 同理, 如果  $Gaussian=2$ , 此概率就是 95%, 如果  $Gaussian=3$ , 此概率就会大于 99%。

1.3.5 辐射定标

对匹配辐射值进行权重线性回归定标。这个方法提供回归系数的估计值, 主要说明两个仪器辐射值

之间关系式的斜率和截距,以及不确定性。有关每个系数不确定性中的订正问题有可能会通过一个变型数据集的回归来减少。例如,从每个数据集中提取平均值和参考辐射值。参考仪器  $x$  和目标仪器  $y$  的观测值可以按下面的方程进行线性拟合:

$$\hat{y}(x) = a + bx \quad (36)$$

假设每次观测  $y_i$  相关的不确定性  $\sigma_i$  和因变量  $x_i$  都是已知的。为了将上面方程中的观测数据进行拟合,将卡方优化函数最小化:

$$\chi^2(a,b) = \sum_{i=1}^N \left( \frac{y_i - a - bx_i}{\sigma_i} \right)^2 \quad (37)$$

最后能够产生对回归系数的估计值:

$$a = \frac{\sum_{i=1}^N \frac{x_i^2}{\sigma_i^2} \sum_{i=1}^N \frac{y_i}{\sigma_i^2} - \sum_{i=1}^N \frac{x_i}{\sigma_i^2} \sum_{i=1}^N \frac{x_i y_i}{\sigma_i^2}}{\sum_{i=1}^N \frac{1}{\sigma_i^2} \sum_{i=1}^N \frac{x_i^2}{\sigma_i^2} - \left( \sum_{i=1}^N \frac{x_i}{\sigma_i^2} \right)^2}$$

$$b = \frac{\sum_{i=1}^N \frac{1}{\sigma_i^2} \sum_{i=1}^N \frac{x_i y_i}{\sigma_i^2} - \sum_{i=1}^N \frac{x_i}{\sigma_i^2} \sum_{i=1}^N \frac{y_i}{\sigma_i^2}}{\sum_{i=1}^N \frac{1}{\sigma_i^2} \sum_{i=1}^N \frac{x_i^2}{\sigma_i^2} - \left( \sum_{i=1}^N \frac{x_i}{\sigma_i^2} \right)^2} \quad (38)$$

以上获得的  $a$  和  $b$  就是定标系数的截距和斜率。

### 1.3.6 交叉定标精度理论分析

#### (1) 定标精度理论分析

交叉定标误差来自标准探测器的误差传递与交叉定标中光谱匹配、时空匹配、几何匹配、视角匹配等算法的误差<sup>[9]</sup>。可利用公式  $\Delta = \sqrt{\Delta_{cross}^2 + \Delta_{ref}^2}$  计算总的交叉定标误差。式中:  $\Delta_{cross}$  为参考传感器误差;  $\Delta_{ref}$  为算法误差。

#### (2) 参考传感器误差分析

使用 MSG2/SEVIRI 四个通道参与光谱匹配,传递的误差是这四个通道按照匹配系数的大小加权叠加的效果。MSG2/SEVIRI 参与匹配各通道光谱匹配系数与官方发布的定标精度见表 3。

按照下式计算,MSG2/SEVIRI 的定标精度约为 0.5 K:

$$\Delta_{ref} = \sqrt{\frac{(a_1 \Delta_1)^2 + \dots + (a_i \Delta_i)^2}{a_1^2 + \dots + a_i^2}} = 0.5071 \text{ K}$$

式中:  $i$  为参与通道匹配的通道个数。

表 3 MSG2/SEVIRI 定标精度与匹配系数

Tab.3 MSG2/SEVIRI calibration accuracy and matching coefficient

Number	Channel name	Calibration accuracy/K	Matching factor(a)
1	ch7.3	0.4	0.2901
2	ch8.7	0.5	0.4593
3	ch9.7	0.6	0.1969
4	ch10.8	0.8	0.1219

#### (3) 算法误差分析

理论分析的交叉定标算法误差如表 4 所示。其中数据匹配包括时空匹配和几何观测方位匹配,不同分辨率带来的误差也在这里体现。由于该红外相机分辨率较高,与所选的参考传感器差异较大,因此数据匹配环节误差较大。交叉定标结果最终依靠线性回归算法实现,因此在保证匹配样本数的前提下,数据匹配误差传递到算法总误差上时,敏感系数不会太大,一般在 0.2 以内。

表 4 交叉定标各个环节的误差表

Tab.4 Error table of each link of cross calibration

Error source	Error	Sensitivity coefficient	Error contribution
Data matching	5.00%	0.20%	1.00%
Spectral Matching	0.50%	1.00%	0.50%
Filter	1.00%	0.10%	0.10%
linear regression	1.00%	1.00%	1.00%
Total error			1.50%

该红外相机中心波数  $1135.5 \text{ cm}^{-1}$  对应的 300 K 时辐亮度为  $75.56 \text{ mW}/(\text{m}^2 \cdot \text{sr} \cdot \text{cm})$ ,将辐亮度增大或减小 1.5% 时对应的亮温分别为 299.17 K 和 300.82 K,即交叉定标的算法误差在 0.8 K 以内。以 MODIS 为标准探测器时,交叉定标总误差按照下式计算:

$$\sqrt{0.5^2 + 0.8^2} = 0.94 \text{ K}$$

#### (2) 定标精度验证

通过与场地定标进行对比的方法,验证交叉定标精度。交叉定标和场地定标结果比较如图 11 所示。

在 300 K 处,二者有 0.23 K 的差异,考虑前面得到的场地定标精度 1.2 K,可以得到交叉定标精度为:

$$\sqrt{0.23^2 + 1.2^2} = 1.22 \text{ K}$$

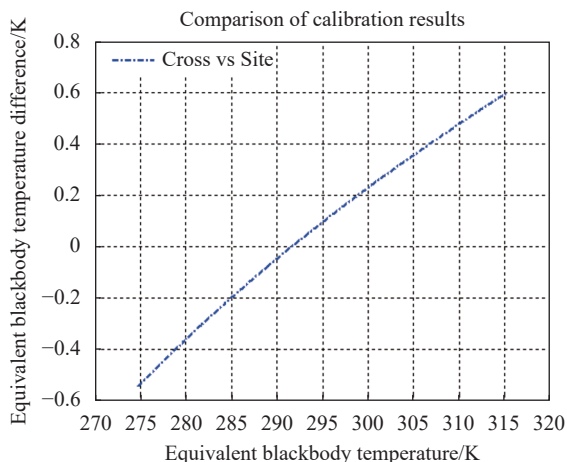


图 11 交叉定标和场地定标结果比较

Fig.11 Comparison of cross calibration and site calibration results

### 1.4 适用场景分析

#### 1.4.1 星上定标

星上定标是指卫星在轨运行期间,利用卫星上自带的定标设备对遥感器进行辐射定标。该方法可在卫星正常寿命期间对仪器的状态进行监测,及时发现遥感器衰减情况。目前常见的星上定标设备根据光源不同分为:星上定标灯、太阳反射光定标设备和月球定标设备三类。该方法定标频次较高,可校正星上设备短周期的变化,对其他条件依赖程度较低。但由于长期运行后,定标设备自身存在衰减情况,因此,在较长周期内,其定标结果可能会出现较大误差<sup>[10]</sup>。

#### 1.4.2 场地定标

场地定标是利用地球表面大面积均匀稳定的地物目标,通过测量地表光反射情况,再经反演计算,获取卫星遥感器入瞳辐亮度,完成绝对辐射定标。主要包括反射率基法、辐亮度基法和辐照度基法三种。其中,辐亮度基法精度最高,但耗费较大,应用不广。目前,较为常用的是反射率基法和辐照度基法<sup>[11]</sup>。

这三种方法对场地及测量过程均要求较高。按照场地不同可分为两种:一种是直接利用地表反射特性较为均匀的大面积场地,如我国的敦煌定标场、美国的白沙定标场等;另一种是在平坦地区,铺设不同反射率的专用大尺寸定标靶标,如我国的包头定标场、玉溪定标场、嵩山定标场等。此外,武汉大学在宁夏中卫建设的辐射定标场采用了点光源定标方式,场内布设有 25 台点光源,不需铺设靶标。

场地内除靶标等设备外,还需部署地物光谱仪、

太阳辐射计、BRDF 测量设备、气象探测设备等多种设备,完成卫星过顶摄影时刻前后地面相关数据的同步测量。

场地定标法是目前最为常用的一种辐射定标方法,但每次测量均需投入大量的人力、仪器及经费,导致其定标频次不高(一般 2 次/年)<sup>[12]</sup>。

#### 1.4.3 交叉定标

交叉定标是利用定标精度较高的遥感器作为参考,对目标遥感器进行定标<sup>[13]</sup>。具体方法是选择两个遥感器同时或近同时对相对区域成像的影像对,经过光谱匹配,建立两个遥感器图像之间的联系,利用参考遥感器的定标系数,实现目标遥感器的定标<sup>[14]</sup>。目前常用的定标参考星有 MODIS 和 LANDSAT-8<sup>[15]</sup>。交叉定标方法不需要精确的实地测量数据,具有频率高、所需费用少等特点,但其定标精度高度依赖参考遥感器的定标精度,整体精度偏低,可作为遥感器状态常态化监测的一种手段,在实际使用中,如对遥感器定标精度要求较高,则不能完全代替场地定标法。

## 2 结 论

由于在轨卫星条件限制,为有效提升辐射定标精度,需要有针对性地结合红外遥感相机参数进行辐射定标方法设计。在条件允许的情况下,最好综合多种定标方法进行辐射定标。文中针对该红外相机的限制问题,提出了半光路星上绝对辐射定标方法,结合半、全光路定标数据处理和转换技术,实现了高分辨率红外相机实时绝对辐射定标;提出了利用水面场和陆面场的场地绝对辐射定标方法,优选了合适的定标场地,并通过在陆面场中增加典型地物场景实现多温度场定标;通过两种定标方法的综合应用,实现了实时高精度绝对辐射定标,为后续的温度反演和定量化应用奠定了基础。

#### 参考文献:

[1] Sheng Yicheng, Dunxiong, Jin Weiqi, et al. A review of the development of radiometric calibration technology for on-board infrared remote sensing cameras [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2019, 48(9): 0904001. (in Chinese)

[2] Liu Li, Gu Xingfa, Yu Tao, et al. Calibration and verification of HJ-1 B satellite thermal infrared channel on orbital site [J].

- Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(5): 1119-1125. (in Chinese)
- [3] Sun Ke, Fu Xiaoyan, Qie Xueyong. Cross-calibration of thermal infrared channel for HJ-1B satellite IRS sensor [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2010, 39(5): 785-790. (in Chinese)
- [4] Lu Xiaojie, Han Guicheng, Yao Bo, et al. Study on calibration technology of binocular ranging system for thermal infrared camera [J]. *Laser & Infrared*, 2020, 50(5): 567-572. (in Chinese)
- [5] Chen Jigang, Zhu Qing, Yu Fang, et al. Study on optical axis calibration of infrared camera [J]. *Optical Instruments*, 2017, 39(1): 46-49. (in Chinese)
- [6] Lu Deryun. Research and implementation of calibration method for infrared binocular camera [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2020. (in Chinese)
- [7] Yang Tianhang, Hu Xiuqing, Xu Hanlie, et al. Performance evaluation of fy3 d-hiras radiometric calibration based on cross comparison [C]//Proceedings of the 2019 Symposium on Infrared and Remote Sensing Technology and Application And Interdisciplinary Forum, 2019: 145-161.
- [8] Li Xiaoying, Gu Xingfa, Min Xiangjun, et al. Radiation cross calibration of CBERS-02 satellite CCD camera using MODIS [J]. *Chinese Science E: Information Science*, 2005(S1): 41-58.
- [9] Zhang Yong. Research on radiometric calibration of thermal infrared data of remote sensing sensor [D]. Beijing: Graduate School of Chinese Academy of Sciences (Institute of Remote Sensing Applications), 2006. (in Chinese)
- [10] Chen Zheng chao, Liu Xiang, Li Jun sheng, et al. Cross calibration of beijing-1 small satellite multispectral remote sensor [J]. *Acta Astronautica Sinica*, 2008, 29(2): 637-643. (in Chinese)
- [11] Wang Zuo. Study on multi-point cross calibration of HJ-1 satellite CCD camera [D]. Fujian: Fujian Normal University, 2011. (in Chinese)
- [12] Zhang Weiguo, Zhang ZeJian, Jia Na. Design of data processing system for infrared radiation characteristics measurement of sea targets [J]. *Laser & Infrared*, 2018, 48(7): 860-866. (in Chinese)
- [13] Zhou Yuxing. Research on radiometric calibration and error estimation method of space-based infrared measurement camera [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2014. (in Chinese)
- [14] Zhang Tianlin, Fu Xingke, Tang Hongzhao. Research on cross calibration of Ziyuan-3 satellite based on Gaofen-1 [J]. *Surveying and Mapping Science*, 2019, 44 (10): 8-13, 28.
- [15] Wei Wei. Research on long time series calibration method of satellite remote sensor based on global calibration field network [D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2017. (in Chinese)