

## 星上红外遥感相机的辐射定标技术发展综述

盛一成<sup>1</sup>, 顿雄<sup>1</sup>, 金伟其<sup>1</sup>, 郭一新<sup>1</sup>, 周峰<sup>2</sup>, 肖思<sup>2</sup>

(1. 北京理工大学光电学院光电成像技术与系统教育部重点实验室, 北京 100081;

2. 北京空间机电研究所, 北京 100094)

**摘要:** 随着对天基对地以及临近空间目标探测的需求增大, 高性能红外相机探测及海量数据量化迫切需要高可靠性、高精度的辐射定标技术, 因此, 星上辐射定标装置已成为当前空间定量遥感技术发展的重要方向。在轨红外遥感相机的辐射定标主要校正探测器响应的不均匀性(相对辐射定标)和建立遥感相机输出信号与输入辐射量的函数关系(绝对辐射定标)。在介绍红外相机星上辐射定标基本原理的基础上, 综述近年来几个国内外典型星上辐射定标装置及其特点, 并介绍笔者所在课题组近年来基于内部定标源+天空星图的红外相机高动态范围(HDR)相对辐射定标方法的研究进展。论文对于红外辐射定标技术及星上辐射定标装置的发展具有参考意义。

**关键词:** 辐射定标; 红外相机; 星上; 遥感; 黑体

**中图分类号:** TP7 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201948.0904001

## Review of on-orbit radiometric calibration technology used in infrared remote sensors

Sheng Yicheng<sup>1</sup>, Dun Xiong<sup>1</sup>, Jin Weiqi<sup>1</sup>, Guo Yixin<sup>1</sup>, Zhou Feng<sup>2</sup>, Xiao Si<sup>2</sup>

(1. MOE Key Laboratory of Photo-electronic Imaging Technology and System, School of Optics and Photonics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China; 2. Beijing Institute of Space Mechanics & Electricity, Beijing 100094, China)

**Abstract:** With the growing demand of quantitative remote sensing and near-space target detection technology, the radiometric calibration technology with high reliability and high accuracy, the on-orbit radiometric calibration device has become an essential orientation in quantitative remote sensing. The on-orbit radiometric calibration of an infrared remote sensing system includes non-uniformity correction (relative radiometric calibration) and absolute radiometric calibration. Absolute radiometric calibration is defined in terms of a sensor's response on a physical, real-world scale, measured in internationally defined units. Based on the introduction of the basic calibration principles, the latest development in infrared on-orbit radiometric calibration devices was reviewed and the technical features of the radiometric calibration method was analyzed. Furthermore, our recent research progress was introduced based on internal calibration sources and combined with starring image in high dynamic range (HDR) relative

收稿日期: 2019-04-05; 修订日期: 2019-05-03

基金项目: 国家重点研发计划(2018YFB0504900); 国家自然科学基金(61871034)

作者简介: 盛一成(1987-), 男, 博士生, 主要从事红外成像技术及星上辐射定标技术方面的研究。Email: shengyicheng87@gmail.com

导师简介: 金伟其(1961-), 男, 教授, 博士生导师, 博士, 主要从事夜视与红外技术、光电图像处理、光电检测与仪器等方面的研究。

Email: jinwq@bit.edu.cn

radiometric calibration methods was introduced. The research promotes the development of infrared on-orbit radiometric calibration devices and technology.

**Key words:** radiometric calibration; infrared sensors; on-orbit; remote sensing; black body

## 0 引言

随着对天基对地以及临近空间目标探测的需求增大,红外遥感相机高性能探测及海量数据定量化需要高精度的遥感相机在轨辐射定标技术,星上红外辐射定标技术成为国内外重点发展的方向,出现了多种新型的星上辐射定标装置。

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。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>[1]</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>[2]</sup>。

方法(1)中定标源选取及安装位置需要考虑红外遥感探测系统低温工作环境的需求及影响;方法(2)对于以深空为背景的红外遥感探测系统应用受限,因为其探测器响应范围往往处于非大气窗口,难以与地物背景匹配;方法(3)应用的前提是空间中相似的轨道上存在功能相近、性能参数及技术指标类似的遥感相机,若这类遥感相机在空间轨道上数量较少,则较难获得广泛应用。为此,当前国内外都注重于根据卫星系统自身特殊性,设计适用于系统星上在轨辐射定标的方法。基于星上定标装置的方法由于不受地表类型和大气的影 响,可对红外相机进行实时快速定标,且具有较高的精度,因此,世界各国都发展了多种星上辐射定标装置。文中将在简述遥感红外相机星上定标原理的基础上,重点介绍近年来国内外红外遥感星上定标装置及其系统的研究进展,并介绍基于内部定标源(ICU)+天空星图的红外相机高动态范围(HDR)相对辐射定标方法。

## 1 红外相机星上辐射定标原理

星上辐射定标源一般采用标准灯、发光二极管、黑体等人工辐射源和太阳、月亮、云层、深空、恒星等自然辐射源。标准灯和太阳等一般用于可见光、近红外和短波红外通道;黑体主要用于中、长波红外通道。

红外相机星上辐射定标一般分为全光路和半光路,全光路定标将漫射体置于整个光路的最前方,采用可展开和收起的机械结构将太阳辐射等引入构成绝对基准;半光路星上辐射定标技术主要在星上受限条件下使用,采用星上辐射内定标装置进行在轨辐射定标,是空间遥感相机在轨辐射定标常用的方法。星上定标系统主要由定标辐射源和必要的定标光学系统组成,有时候也只有定标源而没有定标光学系统,其通过定期开启星上定标辐射源,产生在探测系统工作谱段上与探测器响应性能相匹配的辐射,并经定标光路为探测器提供均匀的定标辐射场<sup>[3]</sup>。这种方法大多进行的是相对辐射定标(非均匀性校正)或者是部分光路的绝对辐射定标,还需要通过卫星发射前的实验室测定或通过浮标与定标场地获取等效定标系数,建立相对定标到绝对辐射定标的转换模型。

红外相机星上辐射定标一般以参考黑体和深冷空间作为辐射参考基准点。参考黑体发射率可达 0.995 以上,腔式黑体温度均匀性可达 $\pm 0.1$  K,稳定性为 $\pm 0.1$  K/30 min,以保证较高的黑体定标精度。若定标源温度可调,则可得到多个等级的定标点。在获得各定标参考基准温度后,利用发射前实验室定标获得的黑体光谱辐射量和温度之间精确的对应关系,进行高精度的绝对定标。深冷空间温度大约为 4 K,若低于红外相机阈值,可利用深冷空间测量相机的本底<sup>[4]</sup>,即系统观测深冷空间时信号幅值理论上为零电平。卫星在轨运行时,在成像轨道区间(非定标环节)内,通过扫描获得深冷空间的响应输出。对于某

些受设计所限而无法观测深冷空间的定标系统,可采用对已知温度的黑体进行扫描定标。

基于发射到太空空间的定标球或基于恒星的红外辐射定标方法可以模拟点目标成像的情况,也被应用于部分卫星平台。根据探测目标的辐射物理量种类不同,红外遥感相机辐射定标模型有<sup>[5]</sup>:

辐射亮度(Radiance)定标:

$$L_{M,k,t} = \frac{1}{\mathcal{R}_L} r_{k,t} = \frac{1}{\mathcal{R}_L} \left[ \frac{B_k G_I}{F_{NUC,k}} [F_{Lin,k}(r_{T,k,t}) - F_{Lin,k}(r_{O,k,t})] \right] \quad (1)$$

式中: $\mathcal{R}_L$ 为峰值辐射亮度响应率; $r_{k,t}$ 为辐射校正后像素响应; $B_k$ 为坏点校正; $G_I$ 为积分时间归一化; $F_{NUC,k}$ 为非均匀性校正(Non-Uniformity Correction, NUC)函数; $F_{Lin,k}(r_{T,k,t})$ 为非线性响应校正函数; $r_{T,k,t}$ 为原始像素响应; $r_{O,k,t}$ 为原始像素背景响应; $k$ 为像素常数; $t$ 为时间常数。

辐射照度(Irradiance)定标:

$$E_{M,k,t} = \frac{1}{\mathcal{R}_E UNF_{irrad}} P[r_{k,t}, PRF] = \frac{1}{\mathcal{R}_E UNF_{irrad}} \left[ \frac{B_k G_I}{F_{NUC,k}} [F_{Lin,k}(r_{T,k,t}) - F_{Lin,k}(r_{O,k,t}), PRF] \right] \quad (2)$$

式中: $\mathcal{R}_E$ 为峰值辐射照度响应率; $UNF_{irrad}$ 为辐射照度非均匀性校正; $P[r_{k,t}, PRF]$ 为点目标提取过程,PRF为点目标响应函数; $F_{NUC,k}$ 为非均匀性校正函数。

## 2 国外典型红外相机星上定标技术

国际上近年来发射的卫星大都配备了先进的星上辐射定标设备,不仅提高了在轨辐射定标的频率,而且通过不同设备定标结果的比对,保障定标系数的准确性。

### 2.1 MODIS 星上定标

中分辨率成像光谱仪(MODIS)是美国宇航局研制的大型空间遥感仪器,MODIS 被安装在 TERRA 和 AQUA 两颗卫星上,用于科学界深入研究全球气候的变化情况以及人类活动对气候的影响。图 1 为 MODIS 及其星上定标系统结构<sup>[6]</sup>,在 36 个相互配准的光谱波段捕捉数据,波长范围为 0.4~14.4  $\mu\text{m}$ ,覆盖从可见光到红外波段;图像分辨率在 0.25~1 km 之间,每 1~2 天提供地球表面大范围全球数据动态观察数据一次,包括云层覆盖的变化、地球能量辐射变化,海洋陆地以及低空变化过程。

MODIS 采用了标准灯、深空、星上黑体和太阳

等定标方式,包括部分光谱定标。MODIS 热红外波段主要是使用黑体进行在轨星上定标。MODIS 星上黑体采用一种全孔径 V 形槽平板面黑体,表面经过抛光、阳极氧化、再抛光处理,发射率可达 0.997;具有良好的温度均匀性,其波动在 0.03~0.08 K 的范围内。黑体从 270 K 加热到 315 K 的时间为 130 min。冷却时间为 180 min。

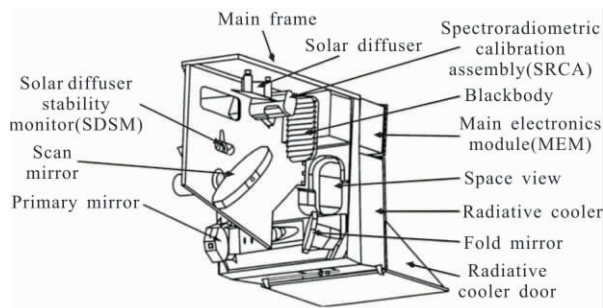


图 1 MODIS 扫描腔及星上定标系统示意图<sup>[7]</sup>

Fig.1 MODIS instrument scan cavity and on-board calibrators<sup>[7]</sup>

12 个监测黑体温度的传感器嵌入在黑体基底上,温度传感器为玻璃式压缩热电调节器,不确定度约 0.013 K。测量温度为:

$$T = \frac{1}{a_0 + a_1 \cdot \ln(R_i) + a_2 \cdot \ln(R_i)^2 + a_3 \cdot \ln(R_i)^3} \quad (3)$$

式中: $R_i$ 为电热调节器电阻; $a_0, a_1, a_2, a_3$ 为电热调节器系数。

黑体辐射覆盖了整个仪器的入射口径,属于全光路定标,可方便地对仪器进行定标。黑体定标过程中既可使用 315 K 和 270 K 两个温度点进行两点定标,也可利用黑体被加温到 315 K 和冷却到 270 K 的均匀过程提供的多种辐射尺度进行多点定标<sup>[8-10]</sup>。对地观测红外遥感相机采用全光路全口径定标,可确保红外遥感相机基本功能的实现。但星上定标设备多为常温黑体,不能覆盖全动态范围,且不易控制,升温降温的速度慢,功耗、体积和成本都较大。

### 2.2 Landsat 卫星星上定标

美国陆地卫星(Landsat)对地观测任务从 1972 年延续至今已开展了 40 多年,观测数据广泛应用于农业、水文管理、灾害响应、科学研究和国家安全等领域。Landsat 系列卫星共有 8 颗,第一颗 Landsat 卫星 1972 年发射,是地球资源和环境探测卫星的里程碑<sup>[11]</sup>。Landsat-8 卫星 2013 年 2 月发射,可提供地球陆地

和极地地区中等分辨率的可见光、近红外、短波红外和热红外图像数据，其中热红外通道采用了热红外探测器(Thermal Infrared Sensor, TIRS)。

2009 年 12 月美国航空航天局安达德航天飞行中心(GSFC)研制的专用于热红外波段成像的热红外探测器 TIRS(见图 2)<sup>[12]</sup>,是由 3 个 640×512 的量子阱焦平面探测器(QWIP)沿中心线交替排列组成的长阵列推扫式红外遥感相机,工作温度 43 K;通过覆盖焦平面组件的干涉滤波器实现包含中心波长分别为 10.8 μm 和 12.0 μm 的 2 个红外通道成像<sup>[13]</sup>;采用 3 片锗透镜和 1 片硒化锌透镜构成四元折射式光学系统,焦距 178 mm, F 数 1.64,主要参数指标见表 1<sup>[14-19]</sup>。

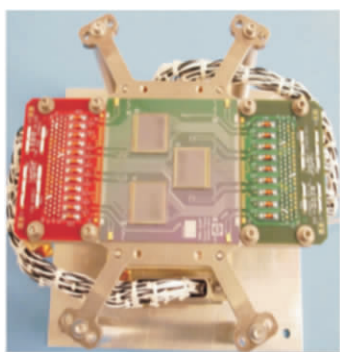


图 2 TIRS 的焦平面探测器

Fig.2 Focal plane assembly of the TIRS

表 1 TIRS 的主要参数指标

Tab.1 TIRS main characteristics

Parameter	Specification
Spacecraft altitude	705 km
Across track speed	7 km · s <sup>-1</sup>
Ground sample distance	100 m/pixel; 185 km/focal plane
Two spectral bands	centered at 10.8 μm and 12.0 μm
Operating temperature	43 K
Telescope	four-element refracting telescope
Optics (T~160 K)	f/1.64
Detectors	3-640×512 QWIP sensor chip
Pixel size	25 μm×25 μm
Focal plane thermal stability	<0.01 K
Read noise	<1,000e-
Frame rate	~70 frames/s
Signal quantify	12 bit digital numbers

TIRS 的星上定标黑体与 MODIS 类似,如图 3 所示,采用一种全孔径 V 形槽平板曲面黑体,辐射覆盖整个仪器的入射口径,属于全光路定标,可方便

地对仪器进行定标。黑体被设定在固定单温度点 295 K(可设定在 270~320 K 温度范围之间)。星上黑体温度控制精度为 0.1 K 以满足当相机的入射场景温度为 260~330 K 时,绝对定标精度为 2%的指标。在卫星轨道降落段的底段和初升段这两个轨道阶段进行辐射定标<sup>[20]</sup>。通过场景选择镜分别扫描深空和星上黑体获得辐射参考基准点并进行多点辐射定标<sup>[21-22]</sup>。如图 4 给出 TIRS 在红外波段参数校正前后的比较,校正后红外图像中杂散光引起的鬼影和条纹状图案被有效校正<sup>[14-15]</sup>。

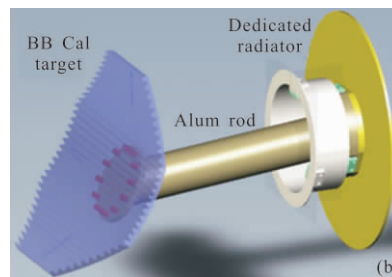
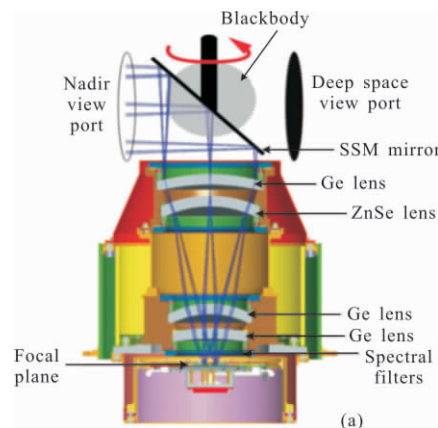
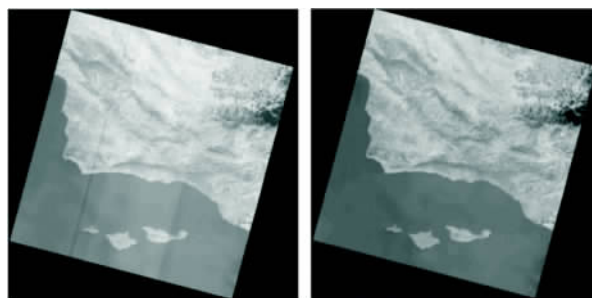


图 3 TIRS 的星上红外辐射定标黑体

Fig.3 On-board blackbody calibrator of the TIRS



(a) 校正前

(b) 校正后

(a) Before calibration

(b) After calibration

图 4 TIRS 在轨红外辐射校正的图像效果对比

Fig.4 TIRS calibrated effect with the different calibration parameters

随着遥感器性能和数据获取能力的提升,Landsat 系列卫星辐射定标方法不断更新,涉及发射前实验室定标、内定标灯、全孔径太阳定标器、交叉定标和场地定标等方法。Landsat 系列卫星辐射定标的发展过程不仅提升了遥感数据的精度,为量化应用提供了重要的基础,而且注重交叉验证以及全过程辐射定标,不断提高定标的准确度和一致性。

### 2.3 SSG 星上辐射定标

美国 SSG 公司提出一种全新的内定标单元 (Internal Calibration Unit,ICU)辐射定标方案<sup>[23]</sup>。如图 5 所示,红外相机光学系统为同轴折反式施密特光学系统,ICU 位于主镜中心开口处,其光学系统由原光

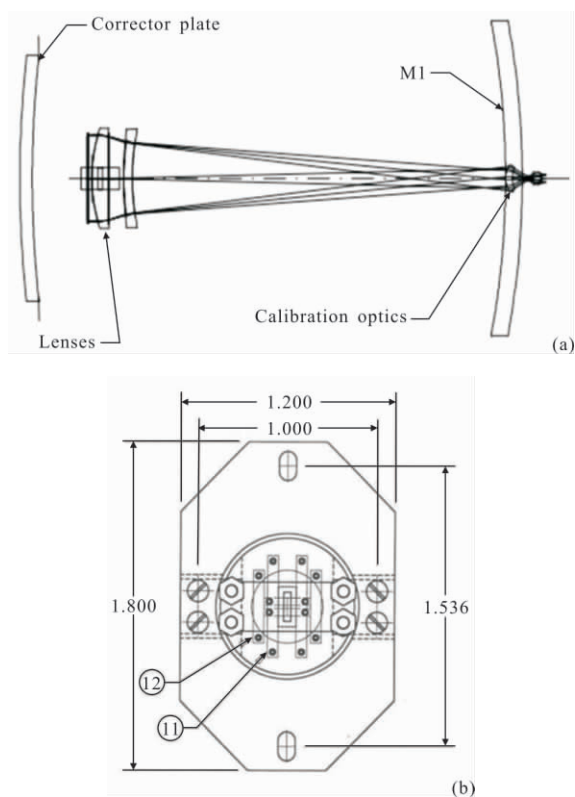


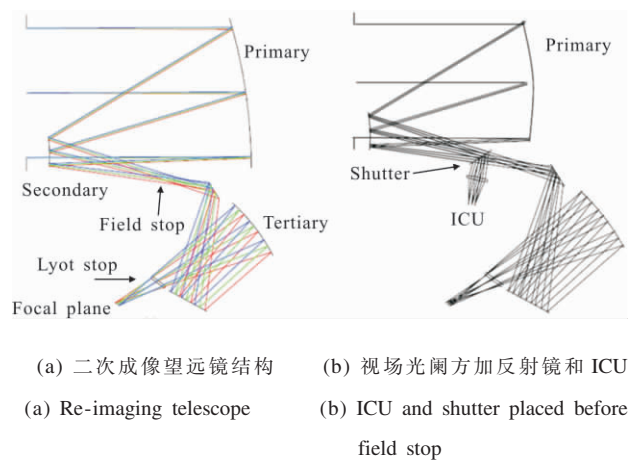
图 5 ICU 位于 Schmidt 望远系统中央遮挡处的星上红外相机及其 ICU 结构示意图

Fig.5 Schmidt telescope with ICU occupying central obscuration and ICU source assembly

学系统的两片光学元件与放置在主镜中心孔的光学元件共同组成。不同于传统面阵黑体内定标装置,其借助遥感成像光学系统的次镜系统,通过投射辐射定标方法可在红外相机像面产生均匀辐射,实现大动态范围的辐射校正。ICU 是星上定标的重要装置,具有一系列特点:大数值孔径,保证能量尽可能多地

被收集;大视场,确保光源的冗余设计;ICU 入瞳与相机焦平面共轭,保证了相机焦平面探测器上获得均匀照明;ICU 增加了视场光阑,可防止杂散光进入;ICU 结构紧凑,充分利用相机焦前透镜组件,构成投射校准系统。

ICU 还可用于二次或多次成像系统,如图 6 所示,可直接将应用平台的某个中间像面作为定标光学系统的入瞳面,简化系统结构。当 ICU 应用在主光学系统是二次成像系统时,在视场光阑之前加入反射镜,通过其开启和关断使系统在“成像”与“定标”模式之间迅速切换。反射镜的作用一是在内定标源校准时遮挡外部光线进入,二是通过快速控制其开启和关断,实现对热辐射的控制。

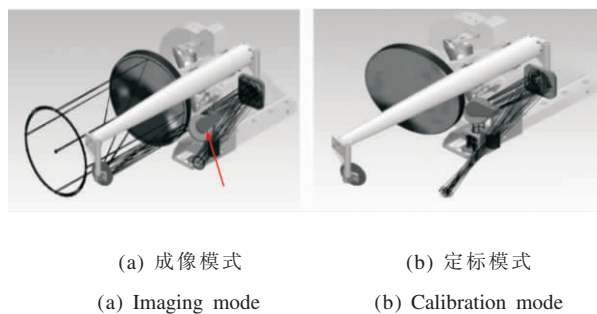


(a) 二次成像望远镜结构 (b) 视场光阑方加反射镜和 ICU  
(a) Re-imaging telescope (b) ICU and shutter placed before field stop

图 6 二次成像望远系统结构图

Fig.6 Re-imaging telescope configuration

ICU 也可用于对地同步望远傅里叶变换成像光谱仪 (Geosynchronous Imaging Fourier Transform Spectrometer, GIFTS)系统(如图 7 所示)<sup>[24-25]</sup>。ICU 安装在望远系统的安装架上,可消除装载、震动和抖动等因素的不利影响。工作时通过控制光路切换反射



(a) 成像模式 (b) 定标模式  
(a) Imaging mode (b) Calibration mode

图 7 加入 ICU 的 GIFTS 系统结构设计图

Fig.7 GIFTS configuration adding with ICU

镜(flip mirror)进行打开和关闭,切入镜打开时,相机对外界景物成像,关闭时将内定标源辐射引入,对探测器进行辐射定标。相比之下,二次成像的望远镜配置结构提供了充足的空间来安装内定标源,另外,ICU在不工作时可以实现快速冷却,提高定标精度<sup>[26]</sup>。

Kintner E. C 等基于 ICU 提出了如图 8 所示的非成像光学系统结构<sup>[27]</sup>,ICU 分别放置于两个相互耦合的积分球上,辐射经积分球多次散射和反射后,通过抛物面反射镜和光锥投射出去,使用 LightTools 等照明系统软件优化抛物面反射镜和光锥的结构,确保出射面能量均匀分布,光锥出射端面尺寸应尽量大,从而使得定标光学系统出射光束发散角尽可能小,保证在较长的距离上均可获得均匀的辐射分布,同时获得比成像光学系统设计方法更高的能量效率。由于其直接获得均匀辐射分布,不需要额外的光瞳等限制光束的部件,能适合多种应用平台。

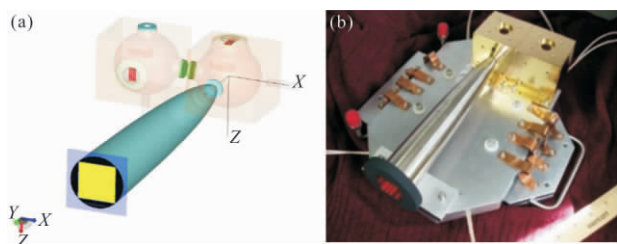


图 8 非成像光学设计的纯能量定标装置

Fig.8 Non-imaging optical design concept and calibration assembly

## 2.4 MSX 卫星上定标

中段空间试验卫星(Midcourse Space Experiment, MSX) 由美国约翰霍普金斯大学研制,1996 年 4 月发射入轨。如图 9 所示,空间红外成像望远镜(Spatial Infrared Imaging Telescope III, SPIRIT III)是 MSX 的一台中长波红外仪器设备,用于测量卫星、



图 9 空间红外成像望远镜

Fig.9 Spatial infrared imaging telescope III

极光、地球气辉和其它大气上层现象的光谱和辐射强度等参数,标定背景辐射特征。SPIRIT III 还配合 MSX 的其他有效载荷,验证导弹助推器熄火到再入大气层即导弹飞行中段卫星对导弹的识别与跟踪技术<sup>[28-29]</sup>。

SPIRIT III 的光学系统是一个高散射抑制的离轴反射望远镜系统,工作温度为 10~20 K。SPIRIT III 主要采集长波红外数据,由超高离轴抑制望远镜、低温空间分辨率辐射仪,工作波段为 4.2~26.0 μm(6 个谱段)以及一台波长 2.5~28.0 μm 的傅里叶干涉光谱仪组成,详细参数见表 2 和表 3<sup>[30-31]</sup>。

表 2 SPIRIT III 傅里叶干涉光谱仪参数

Tab.2 SPIRIT III Fourier transform interferometer-spectrometer characteristics

Band	Wavelength/μm	Noise equivalent radiance /W·cm <sup>-2</sup> ·sr <sup>-1</sup>
20B	17.2-28.0	10 <sup>-12</sup>
3B	2.6-4.9	5×10 <sup>-10</sup>
8B	5.8-8.9	5×10 <sup>-11</sup>
Open	4.0-28.0	5×10 <sup>-9</sup> -5×10 <sup>-12</sup>
12B	10.6-13.0	10 <sup>-9</sup>
Prewhitened	2.5-24.0	5×10 <sup>-9</sup> -5×10 <sup>-12</sup>

表 3 SPIRIT III 辐射仪参数

Tab.3 SPIRIT III radiometer detector characteristics

Band	Wavelength/μm	Noise equivalent radiance for MS1 mode /W·cm <sup>-2</sup> ·sr <sup>-1</sup>
A	6.03-10.91	1.4×10 <sup>-10</sup>
B <sub>1</sub>	4.22-4.36	1.6×10 <sup>-9</sup>
B <sub>2</sub>	4.24-4.46	1.6×10 <sup>-9</sup>
C	11.10-13.24	8.6×10 <sup>-10</sup>
D	13.50-15.90	2.7×10 <sup>-10</sup>
E	18.30-25.00	7.1×10 <sup>-10</sup>

SPIRIT III 在轨辐射定标包含相对和绝对辐射定标<sup>[32]</sup>。相对辐射定标由安装于内部的三组内定标源完成(如图 10 所示),三组内定标源通过事先编写

的指令控制,在每次在轨数据采集事件之前需对探测器进行测试,以确认其性能指标在正常范围之内。第一组内定标源安装在辐射计每个焦平面外壳,两个内定标源可同时或单独使用,工作时产生的辐射直接照射在探测器上;第二组内定标源是辐射计内定标源,其材料主要是电阻丝。快门反射电阻丝的红外辐射经过除 M1 镜和 M2 镜的光路后进入焦平面探测器;第三组内定标源是光谱仪内定标源,经过快门反射使得其红外辐射进入光谱仪,只是其红外辐射在快门上反射的位置同辐射计第二组内定标源反射的位置不一样。通过内定标源使 SPIRIT III 焦平面像元的非均匀性得到了很好的校正<sup>[3]</sup>。

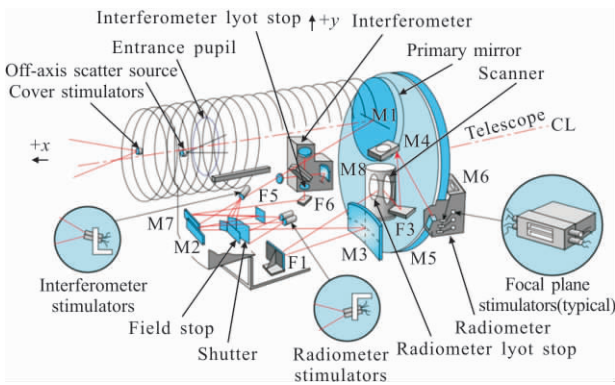


图 10 SPIRIT III 光学系统结构  
Fig.10 SPIRIT III optical layout

由于 MSX 用于探测点目标,需要建立高精度的绝对辐射定量关系,绝对辐射定标主要通过观测标准恒星及观测 MSX 自身所释放的参考球等两种方法来完成。

(1) 观测标准恒星进行绝对辐射定标的方法:根据 SPIRIT III 的工作谱段及探测器响应特性,选择  $\alpha$ Boo 恒星进行辐射测量计算对点光源的辐射响应, $\alpha$ Boo 在 SPIRIT III 波段的标准辐射通量由 Burdick 和 Morris 提供<sup>[33]</sup>。SPIRIT III 还对基于 Cohen 等标准的四颗恒星( $\alpha$ Lyr, $\alpha$ Cma, $\alpha$ Tau, $\beta$ Gem)进行了观测,以独立评价其对  $\alpha$ Boo 定标的效果<sup>[34]</sup>。

(2) 观测卫星释放参考球的绝对辐射定标方法:参考球是一种人工制造的表面涂有辐射层的红外辐射源,如图 11 所示,MSX 上载有 5 个一样的参考球,在 MSX 整个任务周期中参考球会作为定标物被陆续释放。当它被释放后开始远离 MSX 时,由

于与探测系统的距离及自身温度都在不断变化,因而其辐射可满足覆盖 SPIRIT III 探测器整个动态范围的要求。由于参考球释放后的位置与速度变化已通过地面仿真精确预知,结合实时的姿态及指向修正,可使探测系统进行很好的跟踪探测。SPIRIT III 对参考球的观测时间为参考球释放后 3 min~1 h 之后,其原因有:刚释放后的参考球温度较高, SPIRIT III 对其立即观测会造成探测器响应饱和,无法进行定标工作;参考球释放后相对卫星的速度约 10~15 m/s,考虑光学系统参数及探测器像元尺寸,需让参考球飞行较长时间才能让 SPIRIT III 达到点源成像的效果<sup>[35-36]</sup>。

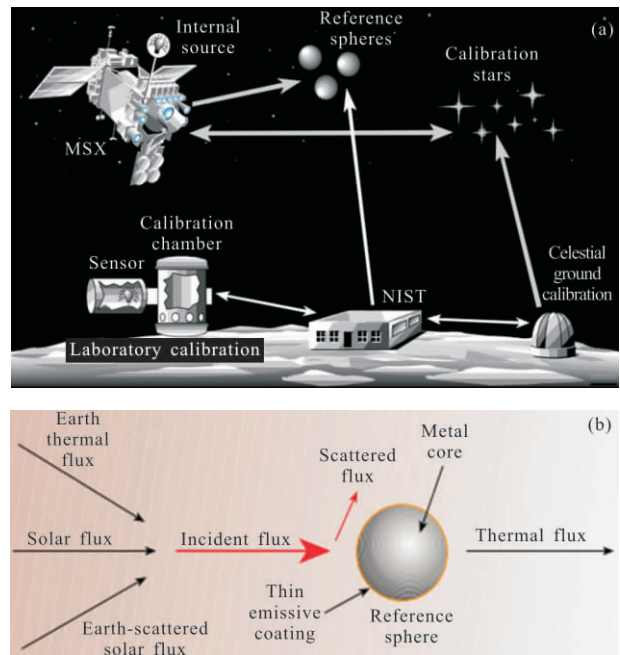


图 11 MSX 综合定标方法与参考球设计原理图

Fig.11 NIST-traceable MSX calibration process and the deployed emissive reference sphere in the thermal environment

## 2.5 几种在轨辐射定标方法比较分析

综上所述,红外遥感相机在轨辐射定标方法主要有基于星上定标设备、观测标准恒星和观测参考球等。基于星上定标设备通常采用面源黑体,同时多采用内定标光源进行相对辐射定标;观测标准恒星是对于执行点目标探测任务的红外遥感相机绝对定标最直接有效的方法,但存在无法覆盖整个探测器动态范围的缺点;观测参考球的方案易实现全动态范围绝对定标,但参考球的温度预估和探测系统的工程实现都较为困难,具体比较分析见表 4。

表 4 基于不同定标源的红外相机在轨辐射定标方案比较

Tab.4 Comparison of on-orbit radiometric calibration scheme based on different calibration sources for infrared sensors

Calibration sources	Advantages	Disadvantages
On-board flat plate blackbody	Full-optical-path, full-aperture measurements	Not for full dynamic range, hard to control, large volume, high cost and power consumption, slow heating rate
On-board internal calibration sources	Covers full dynamic range, easy to control, small size and low power consumption, fast heating rate, mostly used for relative radiometric calibration	Part-optical-path, hard for full aperture measurements
Stars	This calibration is consistent with the real imaging process and the best way for irradiance calibration (point source imaging)	Not for full dynamic range (It is necessary to achieve absolute calibration in combination with relative radiometric calibration)
Ejected sources	It has all the advantages of observing stars and can cover the full dynamic range. Since the reference spheres are real blackbody or gray-body, the calibration accuracy among the spectral segments is higher	It is difficult to achieve the manufacture and detection of the reference spheres

### 3 国内典型红外相机星上定标技术

#### 3.1 中巴 CBERS-02 卫星 IRMSS 遥感相机

CBERS-02 卫星的红外多光谱扫描仪 (IRMSS) 是我国自行研制的长寿命实时传输型地球资源红外

多光谱遥感相机, 有 1 个全色波段 (0.5~0.9 μm)、2 个短波红外波段 (1.55~1.75 μm, 2.08~2.35 μm) 和 1 个热红外波段 (10.4~12.5 μm), 星上有高温腔式黑体和常温面型黑体作为辐射定标源。如图 12 所示<sup>[37]</sup>, 高温黑体温度稳定性高, 装在内定标器上, 其辐射经内

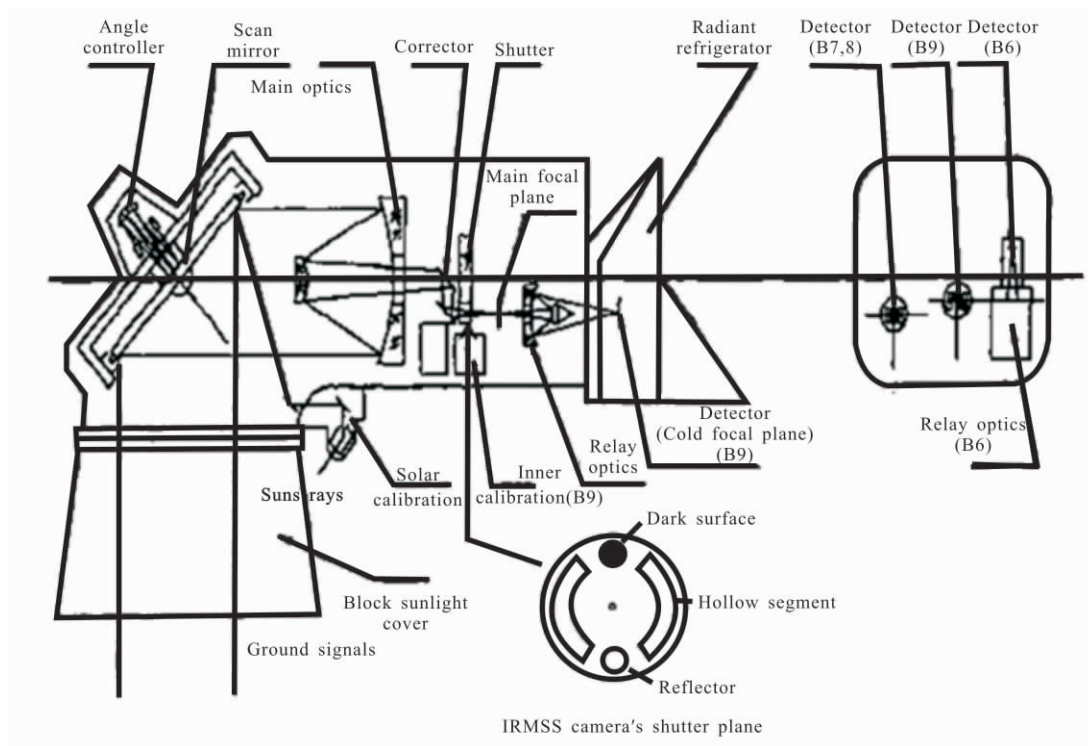


图 12 IRMSS 扫描仪主体及旋转快门结构图

Fig.12 IRMSS and rotating shutter structure



定标光学处理后,再经快门上的平面镜反射进入主光路,作为高温定标信号;常温黑体表面直接装在定标快门上,在扫描镜非线性滞留时间段内黑体表面辐射直接进入主光路,作为常温定标信号。

CBERS-02 星上定标黑体信号在快门旋转过程中被引自焦平面的。由于星上定标黑体辐射未经过前级光学系统,因此,只能实现相对定标。然而,根据发射前实验室提供的经过各元件定标等效辐亮度(经过了前级光学系统),用发射前实验给出的等效辐亮度与获得 343 K 所对应的辐亮度作比,求出等效黑体发射率,再乘以星上下传的高温黑体温度根据普朗克方程求得的辐亮度作为高温黑体的等效辐亮度进行定标。这样的定标黑体信号是全光路的。修正后的等效辐亮度值,可满足绝对辐射定标的要求。

IRMSS 里高温黑体有两个,一个作为主要黑体,对应 343K,另一个作为备用黑体,对应 320 K。经过观测测量,常温黑体没有高温黑体稳定,高温黑体 7 个月内温度变化不到 0.1 K,而常温黑体从 293.5 K 变化到 294.5 K。常温黑体为了实现绝对定标,需要使用替代定标,使用青海湖等作为场地辐射定标来标定固定黑体温度下的等效辐亮度值。

### 3.2 环境一号 HJ-1B 卫星 IRS 红外相机

HJ-1B 卫星 IRS 红外相机设有近红外 (0.75~1.175  $\mu\text{m}$ )、短波红外(1.55~1.75  $\mu\text{m}$ )、中波红外(3.5~3.99  $\mu\text{m}$ )、长波红外(10.5~12.55  $\mu\text{m}$ )4 个探测通道。中波通道温度探测范围 300~500 K,长波通道温度探测范围 200~340 K。为满足用户的使用要求,实时为用户提供在轨的绝对辐射定标系数,监测遥感相机在轨运行状态,红外相机设计中长波通道星上定标系统。红外辐射定标的研究大致分三个部分:一是辐射基准的溯源;二是地面的定标试验;三是仪器在轨运行时的辐射校正。地面定标是根据标准黑体,在总体给定的动态范围下,确定定标方程系数,对星上黑体进行辐射标准的传递。在发射入轨工作后,根据地面辐射定标得到的关系,反演地球目标的等效黑体温度。

HJ-1B 卫星的红外相机在观测冷空间时会采用太阳帆板的遮挡。因此,采用如图 13 的 2 个黑体(基准黑体和校正黑体)来实现星上辐射定标。其中,基准黑体实现辐射基准,校正黑体用来实现辐射校正,系统观测基准黑体时探测器输出的信号值是相对于零辐射的一个绝对量。在轨绝对定标期间,探测器先

采集校正黑体在常温点 293 K 校正时的定标状态 1,再采集校正黑体被加热到 329 K(323~333 K 之间)时的定标状态 2,再通过发射前地面试验建立的绝对定标关系,得到两个温度点下的等效辐亮度,然后对两个定标态进行校正实现定标。经系统辐射定标精度分析,系统的中波红外通道定标精度为 1.82 K(400 K),长波红外通道定标精度为 $\pm 1.63$  K(300 K)。

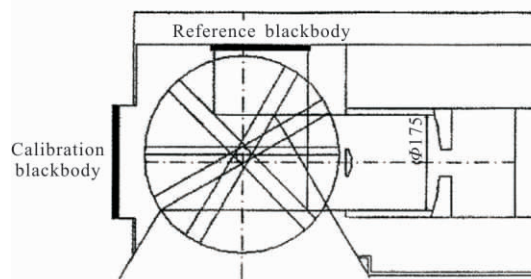


图 13 在轨辐射定标的基准黑体和校正黑体

Fig.13 Reference blackbody and calibration blackbody for on-orbit radiometric calibration

国内在轨卫星大多尚不具备内置的星上定标装置,少数载荷有定标灯、太阳定标器和黑体,但使用频率较低,多采用替代定标,这类卫星除了每年进行标准的场地替代定标以外,常用 pseudo invariant calibration sites(PICS)结合交叉定标法,通过和具有稳定内置星上定标器的卫星交叉定标,提高其辐射定标精度。

## 4 基于 ICU+星图的辐射定标方法

针对图 5 的星上定标装置及其星上辐射定标算法进行了研究,系统任务为远距离红外弱点目标探测预警。如图 14 所示,基于施密特望远结构的红外遥感系统采用双波段红外扫描型 IRFPA,像元数  $2 \times 4\,000 \times 12$ ,定标系统的辐射投射在 IRFPA 的面积  $144\text{ mm} \times 8.6\text{ mm}$ ,系统按 4 000 像素推扫成像,工作中心波长为短波红外 2.8  $\mu\text{m}$  和中波红外 4.3  $\mu\text{m}$  非大气窗口,探测器靶面辐照度动态范围约 2 个数量级。为满足大口径高动态范围、定标无遮挡的辐射定标系统设计需求,设计的定标光学系统可使 ICU 光源产生与 IRFPA 响应性能相匹配的辐射,经过定标光路,实现了定标源辐射均匀照明 IRFPA 靶面的功能<sup>[38]</sup>;内定标源采用镍铬合金材料的 EF8530 辐射源,可工作在稳态模式或脉冲模式。经过模拟仿真分

析, 可通过 ICU+星图辐射获得不同强度的背景辐射, 并研究提出了基于调制内定标源的非均匀校正(MICS-NUC)算法<sup>[39]</sup>和基于可控内定标源的非均匀校正(CICS-NUC)算法, 可实现在轨 IRFPA 高动态范围内的动态辐射相对定标。

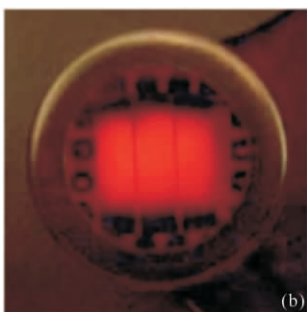
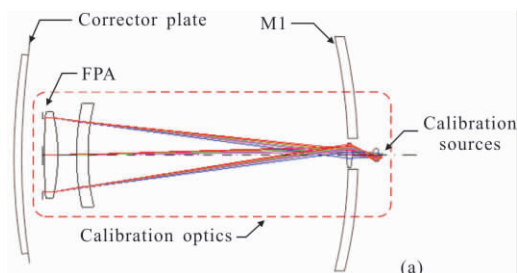


图 14 星上红外遥感系统及其内定标装置

Fig.14 On-orbit infrared remote sensing system and its internal calibration resources

投射式星上内定标装置构造出满足基于场景的非均匀校正(SBNUC)算法需求的动态场景图像。经过阈值处理后, 可实现系统在不遮挡视场情况下高动态范围的星上相对辐射定标。图像的非均匀性可由初始的 12.99%降低到 2%以下<sup>[39]</sup>, 等效于挡板式一点校正的效果(如图 15 所示)。该方法为在轨高动

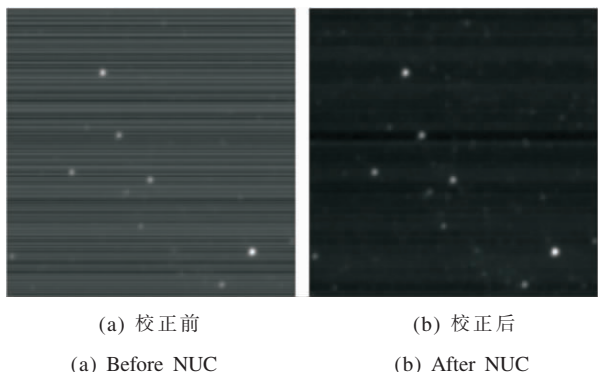


图 15 采用 MICS-NUC 算法获得校正参数并对原始星图进行非均匀性校正的处理结果

Fig.15 Implementing the MICS - NUC algorithm to actual space scene and comparing the NUC effects

态范围扫描型 IRFPA 的相对辐射定标提供了有效的解决方案, 解决了大口径高动态范围的系统难以进行辐射定标校正的问题。相比于采用大面阵的星上黑体源, 不仅满足控温稳定性、高精度、高动态范围、辐照度分布均匀性等性能指标, 还具有升温与降温时间短、成本低、体积小、质量轻、功耗低等诸多特点。星上绝对辐射定标部分主要通过观测标准定标恒星完成, 还需要进一步考虑工程可实施性, 进行点目标探测辐射量反演定标技术研究。

### 5 星上辐射定标研究的发展趋势

从前述国内外红外遥感相机辐射定标技术及系统的总结, 可以看出未来红外遥感相机星上辐射定标研究有望在以下几个方面取得重要进展:

#### (1) 高精度、高准确度、高稳定度辐射定标

根据近年来国际上多个气候观测计划, 空间光学遥感相机绝对定标精度至少需要再提高一个量级, 即由目前的 5%(可见光、短波红外)和 1K(中、长波红外), 提高到 0.1%(太阳辐射变化观测)和 0.1K(气候变化监测), 才能实现十年及以上时间尺度的观测和研究。现有的星上辐射定标技术较难满足定量遥感对定标高精度、高稳定度高准确度和可重复性的要求。

原定 2023 年发射的美国国家航空航天局(NASA)的气候绝对辐射与折射观测计划(Climatic Absolute Radiance and Refractivity Observatory, CLARREO)设计了采用多种辐射定标流程实现红外波段定标精度 0.065 K (95%的置信区间), 同时溯源至国际单位制标准(Système International, SI 标准)确保实现年代际的气候变化遥感监测<sup>[40]</sup>。

高准确度要求遥感相机对同一目标、不同辐射定标方法得出的结果具有一致性。这需要建立国家标准溯源链路, 保证发射卫星辐射参照基准的一致性, 实现空间遥感相机乃至其他观测手段获得的数据相互校验。

#### (2) 新型的星上定标设备

随着对探测目标、探测器、系统结构等遥感需求的不断更新, 新型红外遥感相机的研制也将产生新的星上辐射定标设备需求。定标设备将趋向于满足更多、更具体的遥感需求。

大口径、高动态范围红外遥感相机辐射定标系

统由于动态范围大、环境工作温度低,使得其辐射定标存在特殊性,增加了定标难度。由于传统的星上面源黑体法可设定的最高温度较小,面源黑体法只能用于中、低温段的辐射定标。区别于一般对地观测遥感相机的辐射定标方法,这类系统的辐射定标技术需要进一步深入研究。

### (3) 新的辐射定标方法

随着新型卫星载荷(如微光卫星、激光卫星和偏振卫星等)的不断发展,也将不断催生新的辐射定标方法。辐射定标方法不仅围绕辐射定标设备展开,而且需要解决在轨运行中出现的各种具体问题。例如提高定标频率实现动态校正,即通过定标系数更新,及时发现相机自身的衰减。红外相机长期工作的工作点漂移需要对原始辐射定标查找表进行周期性修正。由于星上定标的面阵黑体源的面积较大,造成定标设备载荷体积、质量、功耗大,温度调节慢,且存在大面积黑体及其均匀性、材料和控温稳定性等问题。此外,定标时由于光路切换,将对成像视场造成遮挡,影响对地面目标的遥感成像,难以适应校正参数随工作状态环境的变化。近年来,自适应非均匀校正和动态辐射校正技术可望弥补基于黑体定标方法的缺点。替代定标、交叉定标、PICS等新型定标技术以及光谱测量、气溶胶测量、大气传输模型等高精度的测量方法都有利于辐射定标精度的提升。机器学习等数据处理技术将进一步提高定标与目标反演效率。

### (4) 建立系统级的全过程辐射定标与测试

发射前与发射后定标同样重要,使得发射前/后的辐射定标形成一个完整的过程。其中任何环节都会对定标结果产生影响。因此,需要从仪器研制开始,对每个环节都深入分析,减小定标误差或建立明确的误差分析。在遥感卫星发射前,红外相机需要在地面模拟空间环境下进行绝对辐射定标试验,建立其输出数字量与入瞳辐射量之间的对应关系,反演地物的光谱反射特性和光谱辐射特性,同时检测遥感相机的辐射响应特性以及内定标装置的工作性能。红外相机在模拟空间环境下的辐射定标技术综合了光学、机械、真空、低温、控制、测试等多种技术,定标设备结构复杂、技术难度大,是遥感卫星研制的关键技术之一。我国曾在前期卫星研制中完成了遥感相机的辐射定标试验,初步掌握了空间遥感相机辐射定标技术,但在模拟空间环境下辐射定标技术

的研究还处在初级阶段。受到型号的局限,通用性不够。因此,有必要在现有地面定标设备的基础上,建立一套大型的、通用的地面综合辐射定标设备,以解决目前我国辐射定标的局限性,满足未来研制不同类型的空间探测的需要。

## 6 结论

空间遥感相机辐射定标方法必须结合具体遥感相机参数进行设计,有效的方法需要基于对具体遥感相机的观测模式和性能参数的深刻理解,仅靠一种定标方法往往难以满足所有辐射定标要求。故在条件允许的情况下,应当采取多种方法进行在轨辐射定标,综合考虑定标结果,在权衡的基础上,才能有效提高定标精度和准确度,提升整个遥感探测系统工作性能。

通过对国内外红外遥感相机辐射定标技术的跟踪分析,可进一步提升对我国该领域发展方向的理解决,研究提出一些针对性的理论和方法,为我国航天遥感技术和装备的发展提供新的方法和手段。

### 参考文献:

- [1] Liu Li, Gu Xingfa, Yu Tao, et al. HJ-1B thermal infrared band in-flight radiometric calibration and validation [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(5): 1119-1125. (in Chinese)  
刘李, 顾行发, 余涛, 等. HJ-1B 卫星热红外通道在轨场定标与验证[J]. 红外与激光工程, 2012, 41(5): 1119-1125.
- [2] Sun Ke, Fu Qiaoyan, Qi Xueyong. Radiometric cross-calibration of thermal infrared channel of IRS sensor on HJ-1B satellite [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2010, 39(5): 785-790. (in Chinese)  
孙珂, 傅俏燕, 齐学勇. HJ-1B 卫星 IRS 传感器热红外通道交叉定标 [J]. 红外与激光工程, 2010, 39(5): 785-790.
- [3] Long Liang, Wang Shitao, Zhou Feng, et al. In-orbit radiometric calibration methods for remote sensing system to detect space infrared point target [J]. *Spacecraft Recovery & Remote Sensing*, 2012, 33(2): 73-80. (in Chinese)  
龙亮, 王世涛, 周峰, 等. 空间红外点目标遥感探测系统在轨辐射定标 [J]. 航天返回与遥感, 2012, 33(2): 73-80.
- [4] Zhang Wei, Xie Xufen, Wang Fugang, et al. Single-point absolute radiometric calibration for space infrared camera by changing integration time[J]. *Infrared and Laser Engineering*,

- 2012, 41(8): 2090–2095. (in Chinese)  
张伟, 谢蓄芬, 王付刚, 等. 变积分时间的空间红外相机单点绝对辐射定标法 [J]. *红外与激光工程*, 2012, 41(8): 2090–2095.
- [5] Tansock J, Bancroft D, Butler J, et al. Guidelines for radiometric calibration of electro-optical instruments for remote sensing[R]. NIST.HB.157, USA, 2015.
- [6] Xiong X, Chiang K, Esposito J, et al. MODIS on-orbit calibration and characterization [J]. *Metrologia*, 2003, 40(1): S89.
- [7] Xiong X, Angal A, Barnes W L, et al. Updates of Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer on-orbit calibration uncertainty assessments [J]. *Journal of Applied Remote Sensing*, 2018, 12(3): 18.
- [8] Xiong X, Barnes W. An overview of MODIS radiometric calibration and characterization [J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2006, 23(1): 69–79.
- [9] Xiong X, Sun J, Barnes W, et al. Multiyear on-orbit calibration and performance of Terra MODIS reflective solar bands [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2007, 45(4): 879–889.
- [10] Xiong X, Chiang K, Sun J, et al. NASA EOS Terra and Aqua MODIS on-orbit performance [J]. *Advances in Space Research*, 2009, 43(3): 413–422.
- [11] Schott J R, Hook S J, Barsi J A, et al. Thermal infrared radiometric calibration of the entire Landsat 4, 5, and 7 archive (1982–2010) [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2012, 122: 41–49.
- [12] Jhabvala M, Reuter D, Choi K, et al. QWIP-based thermal infrared sensor for the landsat data continuity mission [J]. *Infrared Physics & Technology*, 2009, 52(6): 424–429.
- [13] Thome K, Lunsford A, Montanaro M, et al. Calibration plan for the Thermal Infrared Sensor on the Landsat Data Continuity Mission [C]//SPIE Defense, Security, and Sensing, International Society for Optics and Photonics, 2011: 804813–804819.
- [14] Montanaro M, Lunsford A, Tesfaye Z, et al. Radiometric calibration methodology of the landsat 8 thermal infrared sensor [J]. *Remote Sensing*, 2014, 6(9): 8803–8821.
- [15] Barsi J, Schott J, Hook S, et al. Landsat-8 Thermal infrared sensor (TIRS) vicarious radiometric calibration [J]. *Remote Sensing*, 2014, 6(11): 11607–11626.
- [16] Knight E, Kvaran G. Landsat-8 operational land imager design, characterization and performance [J]. *Remote Sensing*, 2014, 6(11): 10286–10305.
- [17] Montanaro M, Levy R, Markham B. On-orbit radiometric performance of the landsat 8 thermalInfrared sensor [J]. *Remote Sensing*, 2014, 6(12): 11753–11769.
- [18] Barsi J, Lee K, Kvaran G, et al. The spectral response of the landsat-8 operational land imager [J]. *Remote Sensing*, 2014, 6(10): 10232–10251.
- [19] Montanaro M, Gerace A, Lunsford A, et al. Stray light artifacts in imagery from the landsat 8 thermal infrared sensor [J]. *Remote Sensing*, 2014, 6(11): 10435–10456.
- [20] Gerace A, Montanaro M, Connal R. Leveraging intercalibration techniques to support stray-light removal from Landsat 8 thermal infrared sensor data [J]. *Journal of Applied Remote Sensing*, 2017, 12(1): 13.
- [21] Reuter D, Irons J, Lunsford A, et al. The operational land imager (OLI) and the thermal infrared sensor (TIRS) on the Landsat data continuity mission (LDCM) [C]//SPIE Defense, Security, and Sensing, International Society for Optics and Photonics, 2011: 804812–804817.
- [22] Irons J R, Dwyer J L, Barsi J A. The next Landsat satellite: The Landsat data continuity mission [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2012, 122: 11–21.
- [23] Kintner E C, Jacobs E S, Hartley J M, et al. Infrared internal calibration sources developed at SSGPO, Inc [C]//Optical Science and Technology, SPIE' s 48th Annual Meeting, 2003: International Society for Optics and Photonics, 2003, 5152: 42–50.
- [24] Kintner E C, Hartley J M, Jacobs E S, et al. Advanced development of internal calibration sources for remote sensing telescopes [C]//Optical Science and Technology, the SPIE 49th Annual Meeting, 2004: International Society for Optics and Photonics, 2004, 5543: 313–319.
- [25] Smith W, Harrison F, Hinton D, et al. The geosynchronous imaging Fourier transform spectrometer (GIFTS) [C]//Conference on Satellite Meteorology and Oceanography, 2001: 391–398.
- [26] Zhou D K, Smith W L, Bingham G E, et al. Ground-based measurements with the Geosynchronous Imaging Fourier Transform Spectrometer (GIFTS) engineering demonstration unit—experiment description and first results [J]. *Journal of Applied Remote Sensing*, 2007, 1(1): 13528–13514.
- [27] Kintner E C, Wong W K, Jacobs E S, et al. Efficient and versatile internal reference sources for remote sensing space telescopes [C]//Proceedings-SPIE the International Society for Optical Engineering, 2006: International Society for

- Optical Engineering, 2006, 6297: 62970F.
- [28] Paxton L J, Meng C-I, Anderson D E, et al. MSX-A multiuse space experiment [J]. *Johns Hopkins APL Technical Digest*, 1996, 17(1): 19-34.
- [29] Mill J D, O'Neil R R, Price S, et al. Midcourse space experiment: introduction to the spacecraft, instruments, and scientific objectives [J]. *Journal of Spacecraft and Rockets*, 1994, 31(5): 900-907.
- [30] Bartschi B Y, Morse D E, Woolston T L. The spatial infrared imaging telescope III [J]. *Johns Hopkins APL Technical Digest*, 1996, 17(2): 215-225.
- [31] Huebschman R K. The MSX spacecraft system design [J]. *Johns Hopkins APL Technical Digest*, 1996, 17(1): 41-48.
- [32] Egan M, Price S, Moshir M, et al. The midcourse space experiment point source catalog version 1.2 explanatory guide[R]. DTIC Document, USA, 1999.
- [33] Burdick S V, Morris D C. SPIRIT III calibration stars: inband irradiance and uncertainty [J]. *Optical Engineering*, 1997, 36(11): 2971-2976.
- [34] Price S D, Egan M P, Carey S J, et al. Midcourse space experiment survey of the Galactic Plane [J]. *The Astronomical Journal*, 2001, 121(5): 2819.
- [35] Burdick S V, Chalupa J, Hamilton C L, et al. MSX reference objects [J]. *Johns Hopkins APL Technical Digest*, 1996, 17(2): 247.
- [36] Mill J D, Guilmain B D. The MSX mission objectives [J]. *Johns Hopkins APL Technical Digest*, 1996, 17(1): 5.
- [37] Zhang Yong. Study on thermal infrared remote sensors' absolutely radiometric calibrations [D]. Beijing: Institute of Remote Sensing Applications Chinese Academy of Sciences, 2006: 60-64. (in Chinese)  
张勇. 遥感传感器热红外数据辐射定标研究 [D]. 北京: 中国科学院遥感应用研究所, 2006: 60-64.
- [38] Sheng Y, Jin W, Dun X, et al. A design of an on-orbit radiometric calibration device for high dynamic range infrared remote sensors [C]//Applied Optics and Photonics China (AOPC2017), 2017.
- [39] Sheng Y, Dun X, Jin W, et al. The on-orbit non-uniformity correction method with modulated internal calibration sources for infrared remote sensing systems [J]. *Remote Sensing*, 2018, 10(6): 830.
- [40] Wielicki B A, Young D, Mlynzack M, et al. Achieving climate change absolute accuracy in orbit [J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2013, 94(10): 1519-1539.