

红外通道式野外辐射计的光机设计及性能测试

张允祥¹, 李 新^{1*}, 黄 冬^{1,2}, 张艳娜¹, 韦 玮¹, 潘 琰^{1,2}

- (1. 中国科学院合肥物质科学研究院安徽光学精密机械研究所
中国科学院通用光学定标与表征技术重点实验室, 安徽合肥 230031;
2. 中国科学技术大学, 安徽合肥 230026)

摘 要: 为满足遥感器在轨辐射定标的需求, 研制了用于现场测量的红外通道式野外辐射计 (Infrared channel field radiometer, ICFR), 阐述了 ICFR 的整机工作原理、光学系统设计和机械结构设计, 开展了 ICFR 实验室辐射定标和定标不确定度分析, 结果表明 ICFR 各通道接收辐射亮度与响应 DN 值具有较高的线性关系, 辐射定标不确定度优于 0.16 K。开展了 ICFR 抗热冲击性和工作环境温度适应性测试, 结果表明 ICFR 具有较强的抗热冲击能力, 能够适用于 -20~50 °C 的工作环境。为检验验证 ICFR 测量数据的准确性和仪器的可靠性, 在国家高分辨率遥感综合定标场开展了 ICFR 和 CE312 的外场比对实验, 结果表明两台设备测量的地表亮温具有相同的变化趋势, 二者对应通道测得的平均亮温偏差小于 0.1 K, 标准偏差小于 0.3 K, 验证了 ICFR 具有与 CE312 相近的测量精度和稳定性, 在遥感器热红外波段场地定标方面具有重要应用前景。

关键词: 辐射定标; 辐射计; 亮温; 光机设计; 不确定度分析

中图分类号: TP722.6 文献标志码: A DOI: 10.3788/IRLA20220246

Opto-mechanical design and performance test of infrared channel field radiometer

Zhang Yunxiang¹, Li Xin^{1*}, Huang Dong^{1,2}, Zhang Yanna¹, Wei Wei¹, Pan Yan^{1,2}

- (1. Key Laboratory of Optical Calibration and Characterization, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Hefei Institutes of Physical Science, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China;
2. University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China)

Abstract: In order to meet the needs of on-orbit radiometric calibration of remote sensors, an infrared channel field radiometer (ICFR) was developed for on-site measurement. The working principle, optical system design and mechanical structure design of ICFR were expounded, and the radiometric calibration and calibration uncertainty analysis of ICFR laboratory were carried out, the results showed that the received radiance of each ICFR channel had a high linear relationship with the response DN value, and the radiometric calibration uncertainty was better than 0.16 K. The ICFR thermal shock resistance and working environment temperature adaptability tests were carried out. The results showed that ICFR had strong thermal shock resistance and could be applied to the working environment of -20-50 °C. In order to verify the accuracy of ICFR measurement data and the reliability of the instrument, the field comparison experiment of ICFR and CE312 were carried out in the National High-Resolution Remote Sensing Comprehensive Calibration Field. The results showed that the surface

收稿日期: 2022-05-10; 修订日期: 2022-06-25

基金项目: 国家重点研发计划 (2018 YFB0504604, 2018 YFB0504900, 2018 YFB0504903); 国家自然科学基金 (62005293)

作者简介: 张允祥, 男, 博士, 博士后, 主要从事遥感器热红外波段场地自动化定标技术及光学精密仪器方面的研究。

通讯作者: 李新, 男, 研究员, 博士, 主要从事卫星遥感器辐射定标技术与光学精密仪器方面的研究。

brightness temperature measured by the two devices had the same change trend, the average brightness temperature deviation measured by the corresponding channels of the two was less than 0.1 K, and the standard deviation was less than 0.3 K, which verified that ICFR had measurement accuracy and stability similar to CE312, and had important applications in remote sensor thermal infrared band site calibration.

Key words: radiometric calibration; radiometer; brightness temperature; opto-mechanical design; uncertainty analysis

0 引言

随着我国热红外遥感技术的发展,近年来具有热红外波段探测能力的对地观测卫星陆续发射升空^[1]。卫星在轨运行后,除了利用星载定标黑体进行定标外,还需要开展场地辐射定标来检验或替代星上定标结果,为后端产品应用提供可靠的高精度定标结果^[2]。

目前,针对遥感器热红外波段在轨辐射定标方法主要分为基于温度法和基于辐亮度法^[3]。基于辐亮度法是在待标定的卫星遥感器过境时,将一台已经精确标定的稳定的热红外辐射计同步观测目标物的辐亮度,考虑热红外辐射计与待标定遥感器在观测几何和光谱响应等方面的差异,校正大气吸收和辐射的影响,计算出卫星入瞳处辐亮度,完成遥感器的辐射定标工作,该方法具有测量参数较少,操作简单等优势,因此被广泛应用。在基于辐亮度法中,用于现场测量的红外辐射计的辐射测量精度直接决定场地辐射定标的精度,因此研制用于现场测量的红外通道式野外辐射计对开展遥感器热红外波段场地定标应用具有重要的研究价值^[4]。

纵观国内针对遥感器热红外通道的场地辐射定标技术的发展,研究人员多使用法国 Cimel 公司生产的通道式热红外辐射计^[5-6]CE312 作为现场测量设备,开展遥感器的场地辐射定标工作,例如,2000 年,胡秀清等利用 CE312 基于辐亮度基法开展了 FY-1C 极轨气象卫星热红外通道在轨辐射定标^[7]。2001 年,戎志国等利用 CE312 开展了针对 FY-2B 静止气象卫星热红外通道的在轨辐射定标工作^[8]。2004 年,张勇、孙吉娟等利用 CE312 开展了针对中巴资源卫星 02 星热红外通道的在轨辐射定标工作^[9]。2009 年,韩启金等^[10]和 2010 年刘李等^[11]利用 CE312 开展了针对 HJ-1B 热红外通道的在轨辐射定标工作。2020 年,Lin 等利用 CE312 开展了针对 FY3D 卫星热红外通道的在轨辐射定标工作^[12],而其他有关自主研制红外辐

射计的应用却鲜有报道。

为获取高精度定标场地辐亮度数据,发展自主知识产权的红外辐射测量设备,中国科学院安徽光学精密机械研究所研制了用于野外现场测量的红外通道式野外辐射计 (Infrared channel field radiometer, ICFR),为开展遥感器热红外波段高精度场地定标提供技术支持。

1 仪器设计

1.1 ICFR 总体设计

红外通道式野外辐射计结构示意图如图 1 所示,该设备主要包括前置光学系统、红外光学系统、红外探测器及预处理组件、信号采集及数据处理运输组件、中央控制器和数据通讯传输组件等。

前置光学系统包含镀金反射镜组件和分光模块。镀金反射镜组件由步进电机、镀金反射镜和铂电阻组成。辐射测量时,电机驱动镀金反射镜切入和切出光路中,实现对镀金反射镜和目标辐射源的依次测量,铂电阻用于监测镀金反射镜的温度。分光模块由滤光片轮、滤光片、步进电机、霍尔传感器和感应磁钢等组成。滤光片通过压板固定在滤光片轮上;步进电机用于驱动滤光轮旋转,实现 8~14、8.2~9.2、10.3~11.3、11.5~12.5 μm 四个观测通道的设置;感应磁钢和霍尔传感器固定于滤光轮的背面,用于确定滤光轮的旋转零点。

红外光学系统是基于科勒照明原理^[13],由物镜和场镜组成,用于将目标辐射聚焦准直到热电堆探测器上。热电堆探测器将辐射信号转换成与之成正比的模拟信号值。信号预采集及传输系统对热电堆探测器产生的模拟信号进行放大、数/模转换、运算处理后计算得到目标辐亮度值和亮温值,通过 RS232 串口将数据传输至控制终端,完成对目标辐亮度和亮温的测量。红外通道式野外辐射计主要技术参数见表 1。

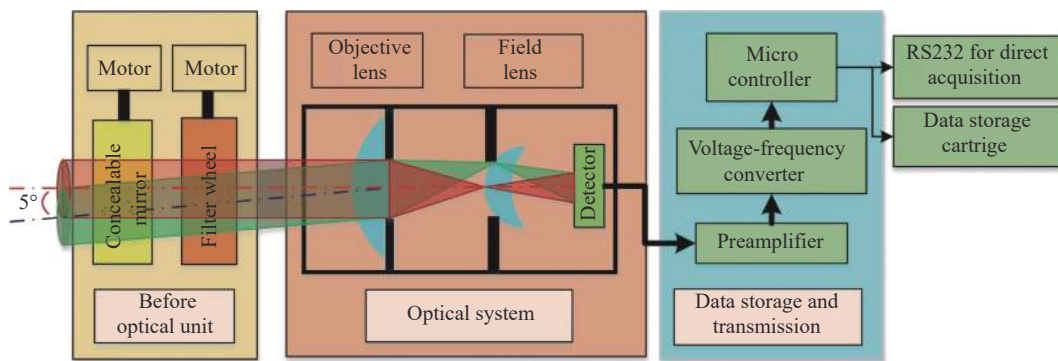


图 1 ICFR 结构图

Fig.1 Schematic of ICFR

表 1 ICFR 技术指标

Tab.1 Technical indicators of ICFR

Parameters	Values
Wavelength/ μm	8-14, 8.2-9.2, 10.3-11.3, 11.5-12.5
Field of view/ $^\circ$	10
Ambient temperature/ $^\circ\text{C}$	-20-50
Temperature resolution/K	0.01
Uncertainty of radiometric calibration/K	0.16

1.2 工作原理

辐射测量时,来自目标的红外辐射通过滤光片分光后,由光学透镜会聚准直到热电堆探测器上。热电堆探测器响应信号 V_s 包括目标辐射源辐射亮度触发信号 V_t 、辐射计头部辐射能量触发信号 V_r 和仪器电子学噪声信号 V_{offset} , 可表示为:

$$V_s = V_t + V_r + V_{offset} \quad (1)$$

当探测器视场被镀金反射镜遮挡时,热电堆探测器响应信号 V_s^m 可表示为:

$$V_s^m = V_t^m + V_r + V_{offset} \quad (2)$$

公式 (1) 和公式 (2) 的差值可去除辐射计自身发射的能量和电子学噪声。

$$V_s - V_s^m = V_t - V_t^m \quad (3)$$

式中: V_t^m 表示镀金反射镜触发信号值,其正比于镀金反射镜自身温度值 T_{mirror} 和辐射计头部等效背景温度 T_{bg} , 可表示为:

$$V_t^m \in \varepsilon(\lambda) \cdot L(T_{mirror}) + (1 - \varepsilon(\lambda)) L(T_{bg}) \quad (4)$$

在辐射测量过程中,辐射计头部在短时间内可认为处在同温条件下,即:

$$T_{mirror} = T_{bg} \quad (5)$$

公式 (4) 可改写为:

$$V_t^m \in L(T_{mirror}) \quad (6)$$

辐射定标时,建立输出计数值与接收辐亮度关系,如公式 (7) 所示:

$$V_{BB,i} - V_{mirror,i} = S_i \cdot [L_i(T_{BB}) - L_i(T_{mirror})] \quad (7)$$

式中: S_i 为定标斜率; $L_i(T_{BB})$ 表示通道 i 接收到温度为 T_{BB} 黑体发射辐亮度; $L_i(T_{mirror})$ 表示通道 i 接收到温度为 T_{mirror} 黑体发射辐亮度。此时,目标辐射亮度 $L_i(T)$ (单位: $\text{mW} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1}$) 和亮温 T_i (单位: K) 可表示为:

$$L_i(T) = \frac{V_{s,i} - V_{s,i}^m}{S_i} + L_i(T_{mirror}) \quad (8)$$

通道等效辐亮度可表示为:

$$L(\lambda, T) = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} RSR(\lambda) L(T) d\lambda}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} RSR(\lambda) d\lambda} \quad (9)$$

式中: $RSR(\lambda)$ 表示通道光谱响应函数。反解普朗克黑体辐射公式便可得:

$$T_i = \frac{c_2}{\lambda \ln\left(\frac{c_1}{\pi \lambda^5 L_i(\lambda, T)} + 1\right)} \quad (10)$$

式中: c_1 和 c_2 是两个常数, $c_1 = 3.7418 \times 10^8 \text{ W} \cdot \mu\text{m}^4 \cdot \text{m}^{-2}$, $c_2 = 14388 \mu\text{m} \cdot \text{K}$ 。

1.3 光学系统设计

ICFR 的光学系统是基于科勒照明原理,由物镜和场镜组成,组合光路示意图如图 2 所示,光学系统的主要特性参数如表 2 所示。

根据共轴球面系统成像原理^[14]对光学系统中初始参数进行计算。假设物镜为薄透镜,此时物镜的孔

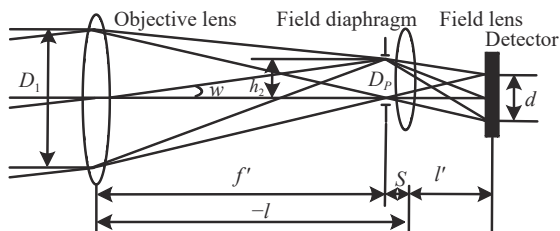


图 2 组合光路示意图

Fig.2 Schematic diagram of combined optical path

表 2 红外通道式野外辐射计透镜特征

Tab.2 Lens characteristics of ICFR

Lens	Focal length/mm	Effective diameter/mm
Objective lens	25.4	5.6
Field lens	3.23	4.35

径光阑、入瞳、出瞳和主面重合，即物镜作为系统的出瞳。物镜孔径为 D ，焦距为 f' ， $F_{\#}=f'D$ ，视场光阑位于物镜的焦平面上，口径为 D_p ，系统半视场角为 w ，场镜的口径为 D_1 ，焦距为 f_1' ， $F_{\#}=f_1'D$ ，探测器的直径为 d ，场镜离物镜的距离为 l ，离探测器的距离为 l' ，离物镜焦平面的距离为 S ，物在无限远处。

通过图 2 可以看出：

$$D_p = 2f'tgw \quad (11)$$

已知目标透射到入瞳处的光束是均匀照明的，为了使探测器上的照度均匀，场镜应该将物镜成像在探测器上，此时入射光束经场镜成像到探测器上时也是均匀照明。这样，场镜的物距为：

$$-l = f' + S \quad (12)$$

像距是 l' ，根据物像关系，有：

$$\frac{1}{l'} - \frac{1}{l} = \frac{1}{f'} \quad (13)$$

根据垂轴放大率，有：

$$-\frac{d}{D} = -\frac{l'}{l} \quad (14)$$

把公式 (13) 代入公式 (12) 得：

$$f' = -\frac{ld}{(D+d)} \quad (15)$$

当场镜放在物镜焦平面上时， $S=0$ ， $-l=f'$ ，于是场镜的直径为：

$$D_1 = D_p = 2f'tgw \quad (16)$$

探测器尺寸为：

$$d = \frac{f_1'D}{f' - f_1'} \quad (17)$$

实际设计时，物镜选用平凸透镜用于聚焦目标辐射；场镜选用具有最小化几何像差的正弯月透镜，用于将聚焦的目标辐射准直到热电堆探测器上。平凸透镜和正弯月透镜的两面均镀有增透膜，增加对红外辐射的透射作用。正弯月透镜位于平凸透镜焦平面内，探测器放置在平凸透镜的共轭平面内，这种设计具有以下三个优点：(1) 在不改变像方视场 (Field of View, FOV) 的情况下可以改变物方 FOV；(2) 能够有效防止渐晕现象；(3) 能够有效保证入射到热电堆探测器上的辐射能量是均匀的，保护了热电堆探测器免受热斑点的影响，避免了由于热电堆探测器不均匀的响应灵敏度引起的问题。

将初始参数输入 ZEMAX 光学仿真软件中，将各组的间隔以及焦距大小设为变量，在评价函数中加入操作数 EFFL 控制焦距，加入操作数 CVGT 控制透镜的曲率，光学系统优化结果如图 3 所示。

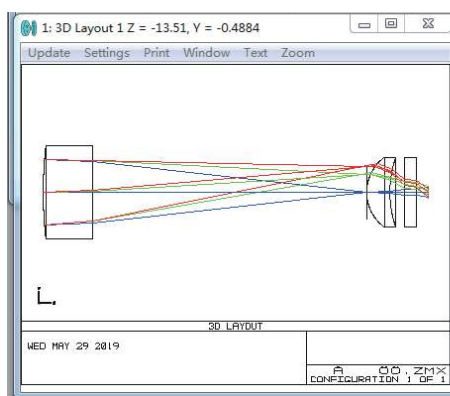


图 3 ICFR 光学系统

Fig.3 Optical system of ICFR

红外通道式野外辐射计光学系统为非成像系统，目的是将目标辐射能量均匀会聚到探测器光敏面上。通过如图 4 所示的点列图可以看出，不同波长的弥散斑形状接近于圆形，不同视场的弥散斑圆心的相对距离均小于 0.2 mm，且最大光斑直径为 0.45 mm，小于探测器光敏面尺寸 0.61 mm×0.61 mm，能够保证热电堆探测器接收视场内的全部能量。不同波长的光线分布较为均匀，可以有效保护热电堆探测器受热斑点的影响，避免由于热电堆探测器不均匀的响应灵敏度引起的问题。故该设计满足设计要求。

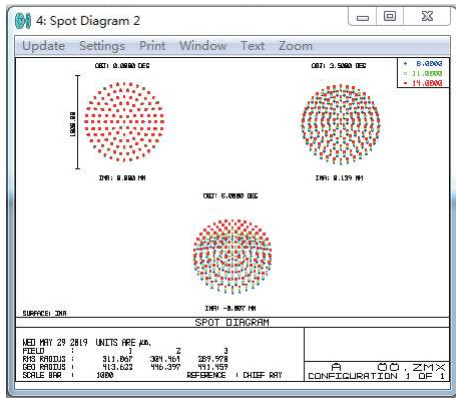


图 4 ICFR 光学系统点列图

Fig.4 Diffuse spots of optical system of ICFR

1.4 红外探测器

红外探测器是红外通道式野外辐射计的核心器件,其性能指标直接影响红外辐射测量精度。红外探测器最基本的要求是光谱响应范围覆盖 8~14 μm ,其次,为提高信噪比,光谱响应尽可能高,噪声等效功率尽可能小。综合考虑各项指标,最终选择了 Dexter Research Center 公司的 ST60 TO-5 热电堆探测器,其主要性能参数如表 3 所示。ST60 TO-5 热电堆探测器有效光敏面积为 0.61 mm \times 0.61 mm,光谱响应范围为 8~14 μm ,其最大特点是具有较高的信噪比(4792 Hz^{1/2}),较低的等效噪声功率(0.52 nW/Hz^{1/2})和较小的时间常

表 3 ST60 TO-5 的性能参数

Tab.3 Characteristics of ST60 TO-5

Parameters	Values
Active area size/mm	0.61 \times 0.61
Number of junctions	80
Signal-to-noise ratio/Hz ^{1/2}	4792
Responsivity/V \cdot W ⁻¹	105.9
Resistance/k Ω	105.9
Temperature coefficient of R/ $^{\circ}\text{C}$	0.11%
Noise voltage/nV \cdot Hz ^{1/2}	33.8
Noise equivalent power/nW \cdot Hz ^{1/2}	0.52
Detectivity/cm ⁻¹ \cdot Hz ^{1/2} W ⁻¹	2.38 \times 10 ⁸
Time constant/ms	18
Field of view/ $^{\circ}$	81
Germanium window with nonreflective coating/ μm	8-14

数(18 ms),各项参数保证了红外通道式野外辐射计高精度快速地完成辐射测量。

1.5 结构设计

ICFR 的光学头部外形为圆柱形结构,整体尺寸为 $\Phi 82 \times 145$ mm,具有尺寸较小,质量较轻等特点,适合单人操作,ICFR 结构示意图如图 5 所示。光学头部采用模块化设计,便于安装、固定、维修,主要包括

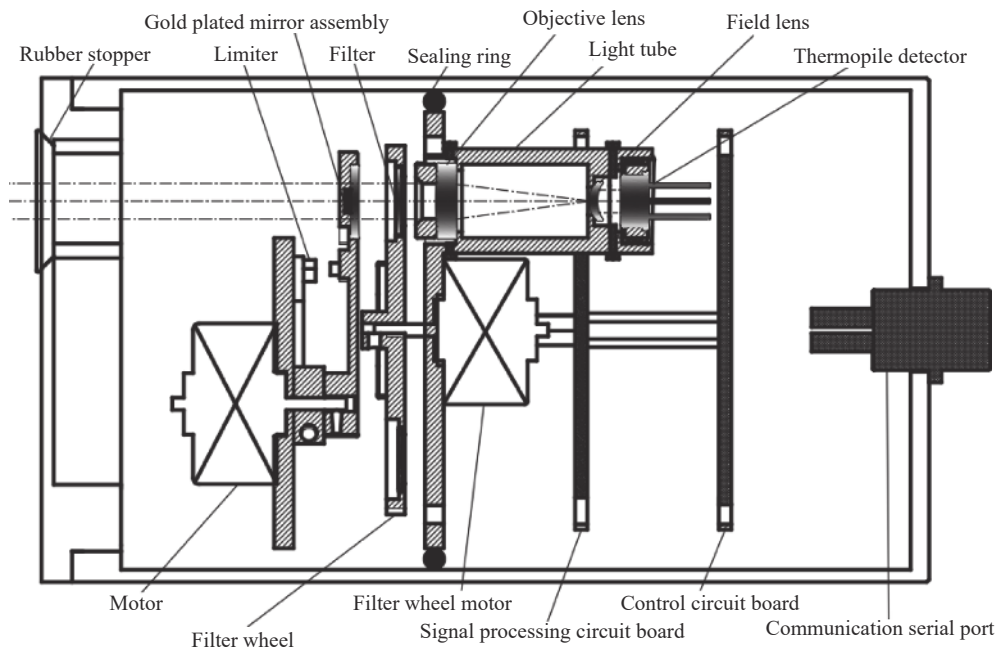


图 5 ICFR 光学头部结构示意图

Fig.5 Schematic diagram of ICFR optical head structure

镀金反射镜模块、分光模块、红外光学系统、探测器模块和信号采集及预处理模块等。

光学系统中的平凸透镜和弯月透镜采用压板固定在光筒内,如图 6 所示。平凸透镜和弯月透镜两侧设有顶丝,可以进行垂轴方向定心调校,使光学透镜的光轴与基准轴具有良好的同轴度,减小中心偏差。热电堆探测器采用螺旋套圈固定,使其能够前后调

整,可以有效消除光学系统的离焦,从而保证光学系统的性能。

电控单元位于光学头部的最内侧,采用橡胶圈对内部进行密封隔离,能够有效地阻止水汽、尘沙进入到仪器内部,实现对电子学器件的保护,提高设备的适用性。

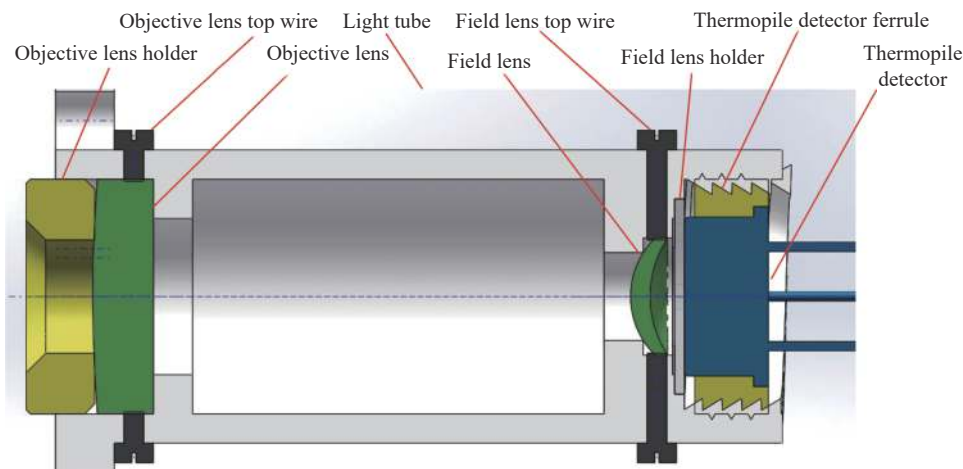


图 6 ICFR 光筒结构示意图

Fig.6 Light barrel structure diagram of ICFR

2 性能测试

2.1 辐射定标

仪器组装调试完成后,采用 Electro Optical Industries

公司生产的 CES100-06 面源黑体作为参考辐射源对整机进行辐射定标,该黑体采用面板键盘进行快捷有效控制,可溯源到美国国家标准技术研究院 (NIST),具体技术指标如表 4 所示。

表 4 CES100-06 黑体性能参数

Tab.4 Performance parameters of CES100-06 blackbody

Parameter	Value
Radiation area/mm ²	250×250
Temperature range/°C	-50-100
Uniformity	±0.03% thereafter within central 80%
Temperature control accuracy/°C	±0.03, 0-100 ±0.05, -50-0
Emissivity	0.992±0.001
Controller size/mm	133.35×482.6×457.2
Voltage VAC	100-240±10% (50/60 Hz)

当 ICFR 测量黑体时,通道 i 接收的通道辐亮度为:

$$L_i(T) = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{c_1}{\pi \lambda^5 (\exp(c_2/\lambda T) - 1)} RSR(\lambda) d\lambda \quad (18)$$

对公式 (17) 进行简化,可表示为:

$$L_i(T) = \frac{a_1}{\exp\left(\frac{b_i}{T^{n_i}}\right) - d_i} \quad (19)$$

式中: T 表示黑体的卡尔文温度,单位为 K; $L_i(T)$ 的单

位为 $\text{mW}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{sr}^{-1}$; a_i 、 b_i 、 n_i 和 d_i 为 ICFR 通道 i 的通道参数, 只与 ICFR 的通道光谱响应函数有关, 通道参数拟合结果如表 5 所示。

根据 ICFR 测量原理可知, 当采用黑体对 ICFR 进行辐射定标时, 则:

$$V_{BB,i} - V_{mirror,i} = S_i \cdot [L_i(T_{BB}) - L_i(T_{mirror})] \quad (20)$$

$$V_{BB,i} - V_{mirror,i} = S_i \cdot \left[\frac{a_i}{\exp\left(\frac{b_i}{T_{BB}^{n_i}}\right) - d_i} - \frac{a_i}{\exp\left(\frac{b_i}{T_{mirror}^{n_i}}\right) - d_i} \right] \quad (21)$$

表 5 ICFR 通道参数拟合结果

Tab.5 Values of the parameters fitting the ICFR channels

Channel/ μm	a_i	b_i	n_i	d_i
8-14	989.14228	1303.31397	0.98601	3.29853
8.2-9.2	2724.55731	1629.11314	0.99239	1.73586
10.3-11.3	781.95613	1307.12426	0.9978	1.02869
11.5-12.5	452.36975	1153.00413	0.99486	0.98921

通过测量不同黑体温度, 即可拟合得到各通道的定标系数 S_i , ICFR 四通道定标曲线如图 7 所示。

通过图 7 可以看出, ICFR 各通道 ΔL 随 ΔDN 的增大而增大, 且具有较高的线性度。

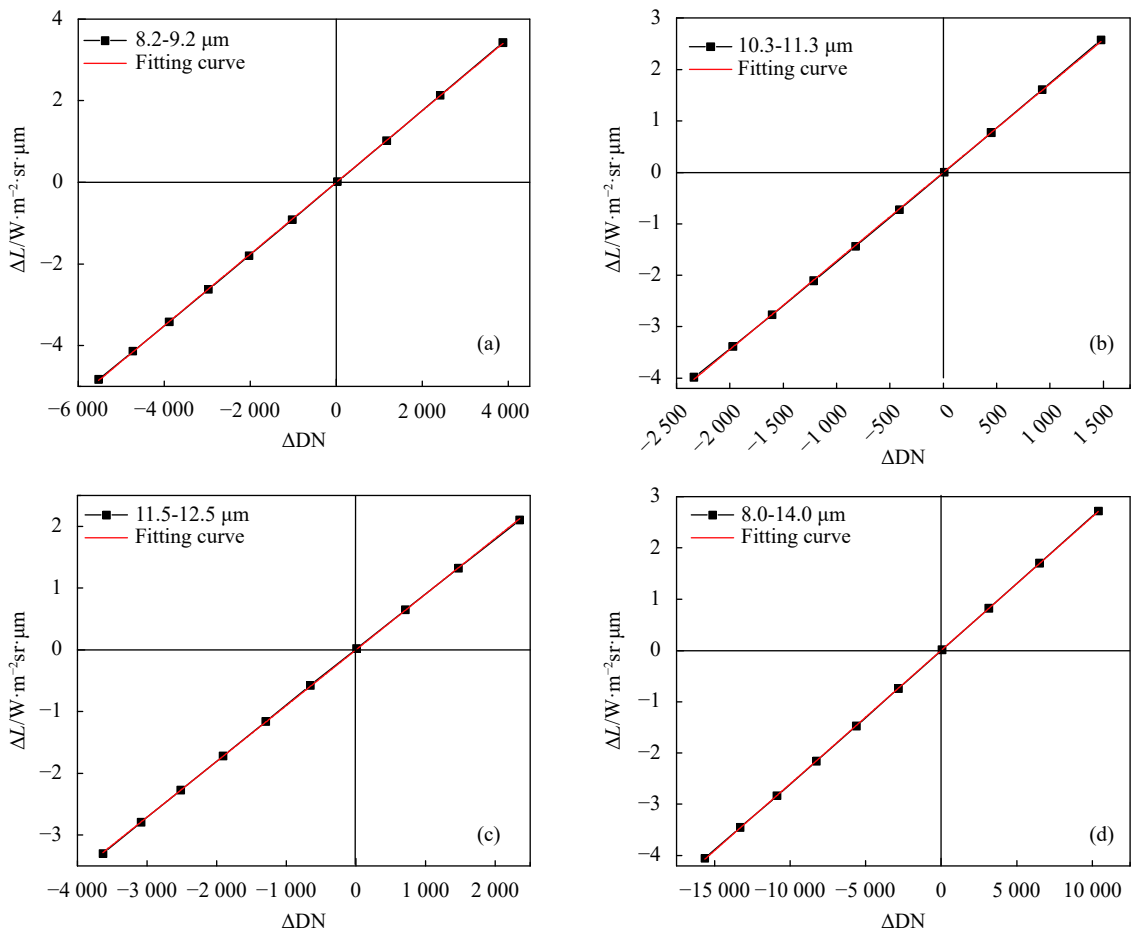


图 7 ICFR 四通道辐射定标曲线

Fig.7 Radiance calibration curve of the ICFR four channels

2.2 定标不确定度分析

采用黑体辐射源对 ICFR 进行辐射定标时, 定标不确定来源主要包括^[15]: 黑体辐射源发射率不确定度 u_1 , 黑体辐射源控温不确定度 u_2 , 定标系数拟合不确定度 u_3 。

面源黑体发射率不确定度为 0.1%, 控温不确定度为 0.03 K, 定标系数是利用 Origin 数值拟合得到, 拟合造成的相对不确定度约为 0.019%, 不确定度分析结

果如表 6 所示。合成标准不确定度 u_c 为:

$$u_c = \sqrt{(u_1^2 + u_2^2 + u_3^2 + u_4^2)} \quad (22)$$

扩展不确定度 U 为:

$$U = k \cdot u_c (k = 2) \quad (23)$$

通过表 6 可以看出, 利用高精度面源黑体定标 ICFR 的联合不确定度为 0.114%, 相当于 303 K 时 11 μm 波段黑体温度不确定度为 0.16 K($k=2$)。

表 6 辐射定标联合不确定度

Tab.6 Combined uncertain of radiometric calibration

Sources of uncertainty	Symbol	Uncertainty type	Uncertainty
Blackbody emissivity	u_1	<i>B</i>	0.100%
Blackbody temperature accuracy	u_2	<i>B</i>	0.043%
Calibration coefficient fitting	u_3	<i>A</i>	0.019%
Uniformity	u_4	<i>B</i>	0.03%
Combined uncertainty	u_c	-	0.114%
Equivalent temperature uncertainty (K@303 K, 11 μm)	-	-	0.16($k=2$)

2.3 抗热冲击测试

抗热冲击性是野外设备的重要考量参数之一。实验室搭建了检验 ICFR 抗热冲击性装置, 见图 8。

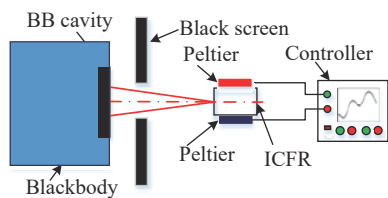


图 8 抗热冲击测量装置示意图

Fig.8 Schematic diagram of thermal shock resistance measuring device

实验过程为: (1) 搭建实验装置; (2) 将黑体开机预热, 并设置为温度 T_{BB} ; (3) ICFR 开机预热, 采用帕尔帖对 ICFR 腔体进行快速升温/降温控制, 其腔体温度变化趋势如图 9 所示, 13:20~13:30 温度缓慢下降, 13:31~13:45 施加热冲击使其温度快速提高; 13:46~14:00 温度缓慢下降; 14:00~14:20 再使其温度快速提升; 14:21~14:35 另其自然降温; (4) 将 ICFR 各通道辐射测量黑体温度 T_{measure} 与 T_{BB} 进行比较。

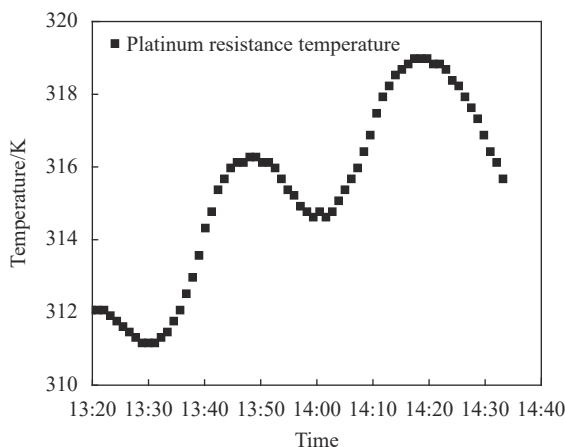


图 9 帕尔帖温度设置

Fig.9 Temperature setting of Peltier

图 10 总结了热冲击期间, T_{measure} 与 T_{BB} 之间的偏差。由此可以看出, ICFR 受热冲击影响期间, 各通道测量值与真实值之间的偏差均小于 ± 0.1 K, 标准偏差均小于 0.02 K, 与其辐射定标精度相当, 表明了热冲击对 ICFR 辐射测量影响较小, ICFR 具有较强的抗热冲击能力。

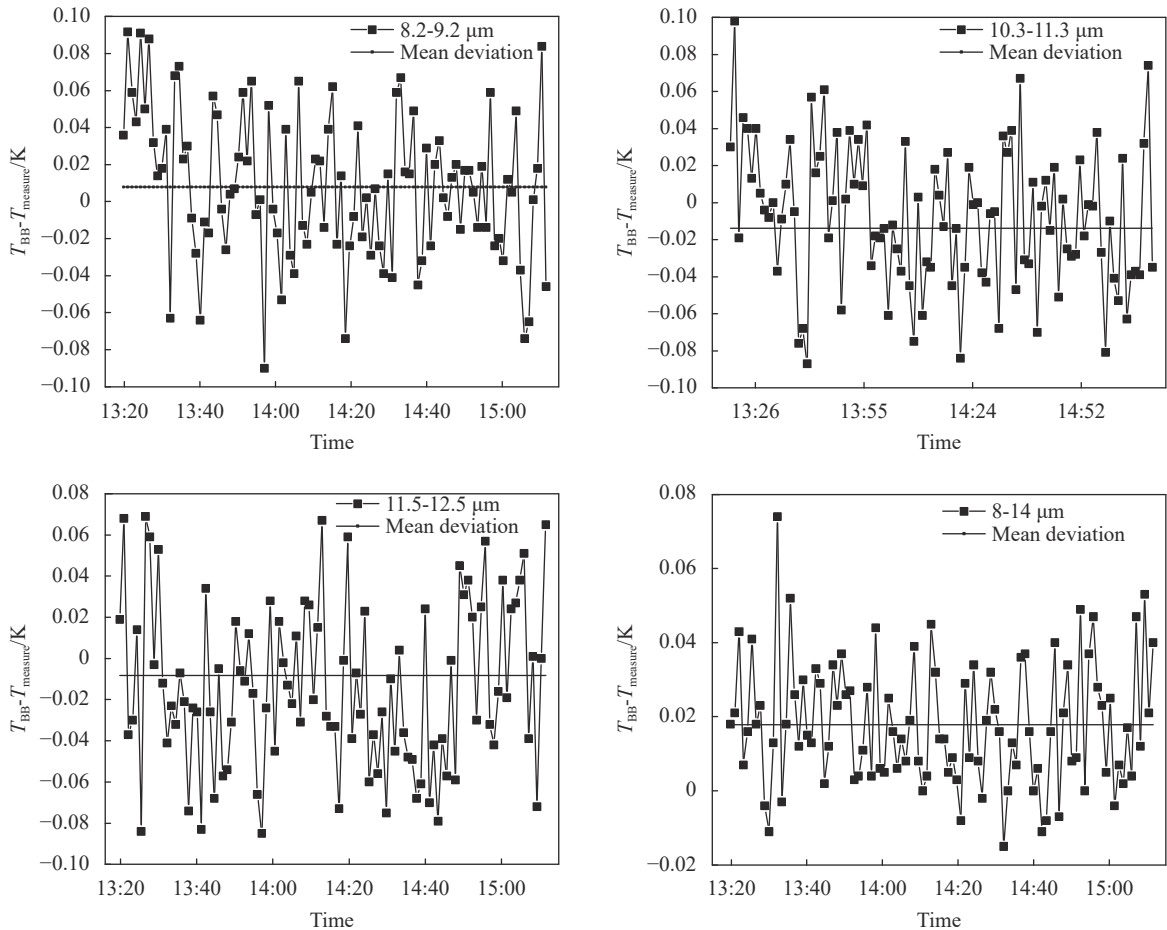


图 10 热冲击下, ICRF 测量黑体温度与设置温度之间差值

Fig.10 Difference between ICRF measured blackbody temperature and set temperature under thermal shock

2.4 工作环境适应性测试

ICRF 作为野外设备, 常年布设在辐射定标场内, 用于开展地表红外辐射测量和遥感器在轨辐射定标工作。通过对国内较为典型的敦煌陆面试验场和青海湖水面试验场进行调研可知, 敦煌辐射校正场常年近地表气温变化范围为 $-15\sim 50\text{ }^{\circ}\text{C}$, 青海湖常年近地表气温变化范围为 $-20\sim 25\text{ }^{\circ}\text{C}$ ^[16]。为检验 ICRF 在不同工作环境温度下的适用性, 利用高低温控箱对 ICRF 进行了不同工作环境温度模拟, 实验装置如图 11 所示。实验中, 将 ICRF 光学头部、控制箱、参考测量板和铂电阻置于高低温箱中, 设置高低温箱温度为 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$, 稳定 2 h 后快速升温至 $50\text{ }^{\circ}\text{C}$, 再稳定 2 h, 观察 ICRF 长时间周期内工作是否正常, 铂电阻固定于参考测量板背部, 用于接触式测量参考测量板物理学温度。ICRF 测量参考板亮温和铂电阻测量参考板物理学温度结果如图 12 所示。

图 12 中, 铂电阻输出的参考板温度间接反映了高低温箱的温度设置情况。在 $-20\sim 50\text{ }^{\circ}\text{C}$ 工作温度范围内, ICRF 各通道测得参考板温度随参考板自身温度的变化而变化, 且具有较高的一致性; 辐射测量值

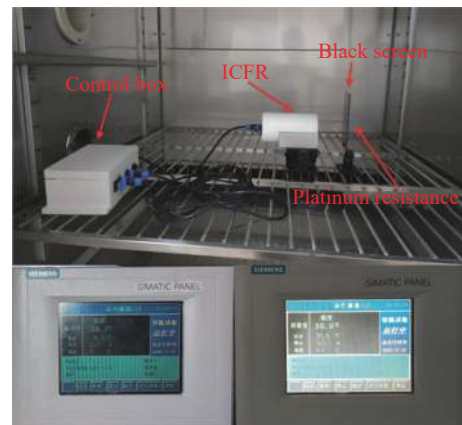


图 11 ICRF 工作环境温度适用性实验装置

Fig.11 Working environment temperature suitability test device of ICRF

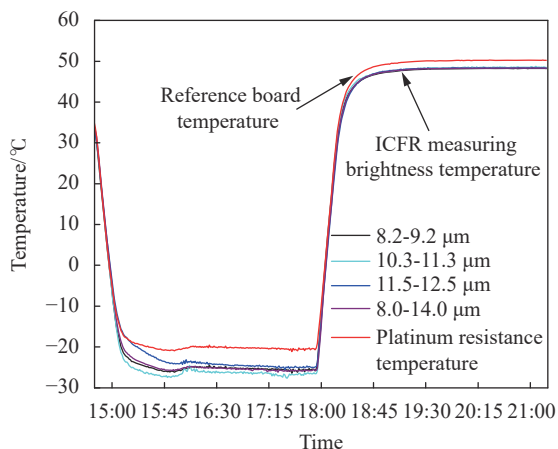


图 12 ICFR 测量参考板亮温和铂电阻测量参考板物理学温度结果

Fig.12 Result of ICFR measures the brightness temperature of the reference plate and Platinum resistance measures the physical temperature of the reference plate

与接触测量值的差异是由于参考板表面发射率不为 1。总体来说,ICFR 在-20~50 °C 工作温度范围内工作正常,后期将开展野外比对试验,更加全面地检验 ICFR 的性能。

3 外场比对试验

为检验 ICFR 野外工作性能,2021 年 10 月,笔者课题组在国家高分辨率遥感综合定标场开展了 ICFR 和 CE312 的外场比对实验。采用三脚架固定的方式将 ICFR 和 CE312 安装在地势相对平坦,地表相对均匀区域,光学头部朝向正南,避免 ICFR 和 CE312 视场覆盖区域被阴影遮挡,如图 13 所示。图 14 所示为 10 月 14 日 ICFR 和 CE312 测量地表亮温结果,该

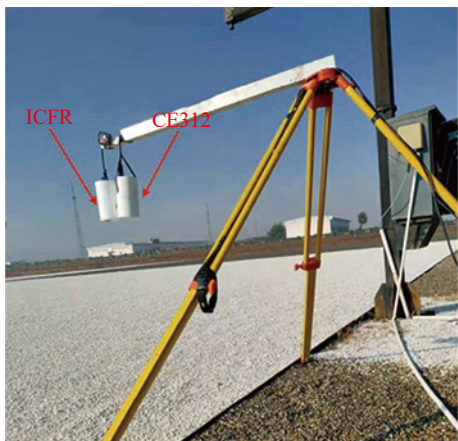


图 13 外场比对实验

Fig.13 Field comparison experiment

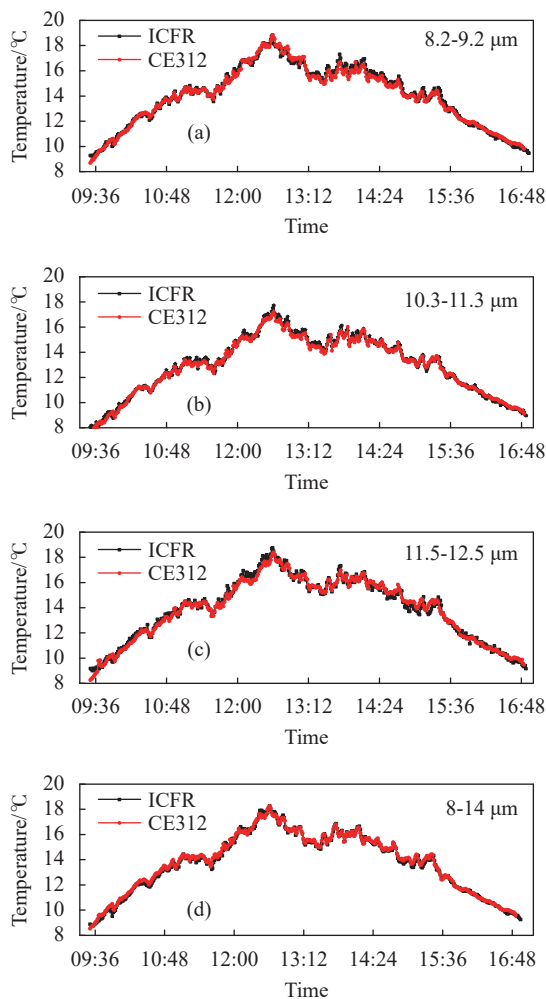


图 14 ICFR 和 CE312 对应通道获取地表亮温数据比较

Fig.14 Comparison of the surface brightness temperature data obtained by the corresponding channels of ICFR and CE312

日天气晴朗,中午有少量云团,环境温度为 10~20 °C,气压 780 hPa,相对湿度约 23%,测量时间为 9:00~17:00,数据比对分析结果如表 7 所示。

通过图 14 可以看出,ICFR 和 CE312 获得的场地亮温具有相似的变换趋势,9:30~12:30 随着太阳直照强度的增加,地表亮温呈现明显上升趋势,12:30~17:00 随着太阳高度的增加,地表亮温缓慢降低,由于云层遮挡等因素的影响,数据呈现了几次波动。

通过表 7 可以看出,ICFR 和 CE312 对应通道获得地表亮温偏差分别为: $0.0651 \pm 0.261K$, $0.090 \pm 0.210 K$, $0.0353 \pm 0.302 K$, $-0.0745 \pm 0.183 K$ 。两台设备对应通道的平均偏差均小于 0.1 K,标准偏差均小于 0.3 K,究其原因,可能是由于观测区域不完全相同,云层遮挡导致不同区域受太阳直照影响不同等原因导致。

表 7 ICFR 和 CE312 测量地表亮温均值和标准偏差分析

Tab.7 Analysis of the mean value and standard deviation of the brightness temperature of the ground surface measured by ICFR and CE312

Bands/ μm	Mean/K	Std dev/K	Min/K	Max/K
8.2-9.2	0.065 1	0.261 34	-0.843 15	0.866 88
10.2-11.2	0.090 89	0.210 4	-0.535 71	0.682 09
11.5-12.5	0.035 26	0.302 11	-0.928 53	0.908 3
8-14	-0.074 5	0.182 78	-0.970 53	0.586 3

4 结 论

文中介绍了用于现场测量的红外通道式野外辐射计的整机工作原理, 光学系统设计和结构设计。仪器组装调试完成后开展了辐射定标, 抗热冲击测试、工作环境适用性测试和外场比对测试等工作。初步证实了红外通道式野外辐射计具有较高的辐射测量精度和较强的野外适用性, 满足遥感器热红外波段场地定标应用中的需求。后期将利用 ICFR 开展遥感器热红外波段场地定标工作, 为基于自主知识产权的红外辐射计开展遥感器高精度场地辐射定标提供有力技术支持。

参考文献:

[1] Zhang Y X, Li X, Li C, et al. Design and performance test of self-calibration multi-channel infrared radiometer [J]. *Journal of Applied Optics*, 2020, 42: 743-753. (in Chinese)

[2] Tang H Z, Xie J F, Tang X M, et al. On-orbit absolute radiometric calibration and validation of ZY3-02 satellite multispectral sensor [J]. *Sensors*, 2022, 22(5): 2066.

[3] Thome K, Arai K, Hook S, et al. ASTER preflight and in-flight calibration and the validation of level 2 products [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1998, 36(4): 1161-1172.

[4] Legrand M, Pietras C, Brogniez G, et al. A high-accuracy multi-wavelength radiometer for in situ measurements in the thermal infrared. Part I: Characterization of the instrument [J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2000, 17(9): 1203-1214.

[5] Pietras C M, Abuhassan N K. Development and qualification of the conveyable thermal infrared field radiometer CLIMAT [J]. *International Society for Optics and Photonics*, 1995, 2578: 282-293.

[6] Liu L, Gu X F, Yu T, et al. Research on calibration methods of ground-based thermal-infrared radiometer CE312 [J].

Spectroscopy and Spectral Analysis, 2012, 32(2): 343-348. (in Chinese)

[7] Hu X Q, Rong Z G, Qiu K M, et al. In-flight radiometric calibration for thermal channels of FY-1 C and FY-2 B meteorological satellite sensors using Qinghai lake [J]. *Chinese Journal of Space Science*, 2001(4): 370-380. (in Chinese)

[8] Rong Z G, Qiu K M, Hu X Q, et al. Comparison of pre-launch calibration in lab with the radiometric calibration in orbit for FY-2 B meteorological satellite's IR channel [J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2002, 21(6): 408-412. (in Chinese)

[9] Sun J J, Ma G Q, Zeng Y, et al. Absolute radiometric calibration and the uncertainty analysis of CBERS-02 TIR band [J]. *Spacecraft Recovery & Remote Sensing*, 2007, 28(1): 33-38. (in Chinese)

[10] Han Q J, Min X J, Fu Q Y. In-flight absolute radiometric calibration for thermal infrared band of HJ-1 B [J]. *Journal of Remote Sensing*, 2010, 14(6): 1212-1225.

[11] Liu L, Gu X F, Yu T, et al. HJ-1 B thermal infrared band in-flight radiometric calibration and validation [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(5): 1119-1125.

[12] Yan Lin, Hu Yonghong, Zhang Yong, et al. Radiometric calibration evaluation for FY-3 D MERSI-II thermal infrared channels at Lake Qinghai [J]. *Remote Sensing*, 2021, 13(3): 466.

[13] Zhu X M, Gao W R, Zhu Y. Improved Kohler illumination-based full-field optical coherence tomography system [J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(5): 0511002. (in Chinese)

[14] Yu D Y, Tan H Y. *Engineering Optics* [M]. Beijing: Machinery Industry Press, 2006: 30-31. (in Chinese)

[15] Xu J. Research on calibration of ambient temperature blackbodies based on a thermal-infrared standard radiometer [D]. Hefei: Hefei Institutes of Physical Science of Chinese Academy of Sciences, 2013: 61-64. (in Chinese)

[16] Zhang Y, Qi G L, Rong Z G, et al. Radiation Calibration Model and Method of Satellite Infrared Remote Sensor [M]. Beijing: Science Press, 2015: 166-174. (in Chinese)