

光学学报

FY-4B GHI 长波红外波段的发射前辐射表征和定标

李秀举^{1,2}, 曹琦^{1,2}, 周树添^{1,2}, 钱婧^{1,2}, 王保勇^{1,2}, 邹曜璞^{1,2}, 王静^{3**}, 沈霞^{1,2*}, 韩昌佩^{1,2}, 王利智^{1,2}, 周宇翔^{1,2},
李盼盼^{1,2}

¹中国科学院红外探测与成像技术重点实验室, 上海 200083;

²中国科学院上海技术物理研究所, 上海 200083;

³中国气象局国家卫星气象中心, 北京 100081

摘要 静止轨道快速成像仪(GHI)是风云四号B星(FY-4B)的主要有效载荷之一。针对该仪器长波红外波段的大视场、高空间分辨率等特点,提出了相应的发射前辐射定标和表征方法。建立了一套定标系统装置,实现了长波红外波段的发射前辐射定标,定标不确定度优于 $0.67\text{ K}@300\text{ K}$ 。测量并研究了长波红外波段的空间噪声特性。根据长波红外焦平面4个线阵的设计特点,提出了两种最佳成像探元选择方法,即基于信噪比最大化和响应信号固定图形噪声最小化的方法。测量并分析了这两种最佳成像探元组合线阵的温度探测灵敏度,均优于任务要求,平均水平达到了 $50\sim 60\text{ mK}@300\text{ K}$ 。评估了星上黑体参考标准的精度,星上黑体标称亮温比真实亮温偏低约 $0.42\text{ K}@300\text{ K}$,该结果对黑体的在轨应用具有重要参考意义。

关键词 测量; 辐射定标; 红外成像系统; 黑体; 光学遥感; 静止轨道快速成像仪; 风云四号

中图分类号 TP732.2

文献标志码 A

DOI: 10.3788/AOS221688

1 引言

风云四号是我国第二代静止轨道气象卫星序列,目前已经发射了风云四号A星(FY-4A)和风云四号B星(FY-4B)两颗卫星。FY-4B是该序列的首发业务星,于2021年6月3日发射成功,标志着我国新一代静止轨道气象卫星观测系统正式进入业务化发展阶段,对确保我国静止气象卫星升级换代,以及连续、可靠和稳定业务运行具有重大意义^[1]。静止轨道快速成像仪(GHI)是FY-4B上新搭载的光学有效载荷,该仪器由中国科学院上海技术物理研究所自主研制。快速成像仪在静止轨道上对 $2000\text{ km}\times 2000\text{ km}$ 大小的区域具备更高空间分辨率且时间分辨率小于 1 min 的成像能力,高频次的天气目标观测数据对快速变化的台风、强对流等极端天气有很好的观测与监视作用,对预报员预报天气系统发展和气象业务服务能力提高有重要作用^[2]。

辐射定标是光学遥感仪器定量反演的前提,其精度直接影响着遥感数据产品的精度。按照任务阶段划分,定标主要分为发射前的实验室定标和发射后的在

轨定标。在卫星发射前,应尽可能模拟在轨环境完成实验室定标以确定仪器状态与测量仪器性能指标、获取仪器的辐射响应模型和研究影响仪器性能的因素与影响的方式、程度等,为遥感仪器的在轨数据处理和应用提供支撑。在卫星入轨后,空间环境对仪器性能有较大影响,随着在轨时间的增加,仪器性能可能会发生变化^[3]。因此,仪器在轨运行期间要定期进行星上定标以保证遥感数据的持续准确性。静止轨道快速成像仪长波红外波段采用了实时观测冷空间和星上全光路全孔径面源黑体的星上定标方案。本文主要讨论了静止轨道快速成像仪长波红外波段的发射前实验室定标和辐射特性参数表征,主要包括通过真空低背景条件下辐射定标获取仪器的辐射响应模型、空间与时间噪声特性测量研究、最佳成像探元研究和星上黑体参考标准的检验等,该项实验研究工作是快速成像仪在轨应用的重要基础。

2 静止轨道快速成像仪简介

FY-4B GHI共有7个光谱波段,包括6个太阳反射波段和1个长波红外波段,表1给出了7个光谱波段

收稿日期: 2022-09-07; 修回日期: 2022-11-02; 录用日期: 2022-12-07; 网络首发日期: 2023-01-04

基金项目: 中国科学院青年创新促进会资助项目(2018273)

通信作者: *shenxia@mail.sitp.ac.cn; **wjing@cma.gov.cn

的主要性能指标要求^[2],其中 IFOV 为瞬时视场角, SNR 为信噪比, NETD 为噪声等效温差。GHI 的光机结构布局和星上定标方案整体上继承了多通道扫描辐射计 (AGRI) 的特点, 采用双扫描镜 [南北 (NS) 扫描镜与东西 (EW) 扫描镜] 结合离轴三反主光学系统、长线阵焦平面探测器和机械制冷器的扫描成像技术^[4-7]。图 1 给出了 GHI 对星上黑体、地球场景/地面黑体和宇宙空间等目标进行观测的光路示意图。长波红外波段采用大面源星上黑体定标方案, 可以实现全孔径、全光路、全视场的星上辐射定标。来自地球景物的辐射经南北扫描镜和东西扫描镜反射到离轴三反主光学系统

中, 通过中继光学系统将入射辐射分成 4 个可见光波段、2 个近红外波段和 1 个长波红外波段。探测器将景物辐射转换成电信号, 经过前放和主放后获得 7 个波段的数据, 在扫描同步信号的控制下, 进行模数 (A/D) 转换并缓存, 将数字量编码送到卫星平台上, 经数传分系统下传^[4,8]。

GHI 在国内首次将长线阵焦平面探测器技术应用于地球静止轨道气象卫星中。对于长波红外长线阵焦平面探测器中存在的盲元, 采用了 4 个线阵互相备份从中选优的技术方案, 实现了卫星云图中无盲元成像。

表 1 GHI 光谱波段主要性能参数
Table 1 Main performance parameters of spectral bands of GHI

Band	Bandwidth / μm	IFOV / μrad	SNR	NETD	Dynamic range	Primary use
B01	0.450-0.750	7	300@100%		0-100%	Panchromatic, land surface, vegetation, stars
B02	0.445-0.495	14	200@100%		0-100%	Blue, small particle aerosol
B03	0.520-0.570	14	300@100%		0-100%	Green, aerosol
B04	0.620-0.670	14	300@100%		0-100%	Red, aerosol
B05	1.371-1.386	14	150@100%		0-100%	Cirrus cloud
B06	1.580-1.640	14	300@100%		0-100%	Low cloud/snow, water cloud/ice cloud recognition
B07	10.300-12.500	56		0.2 K@300 K	180-330 K	Cloud, land surface temperature

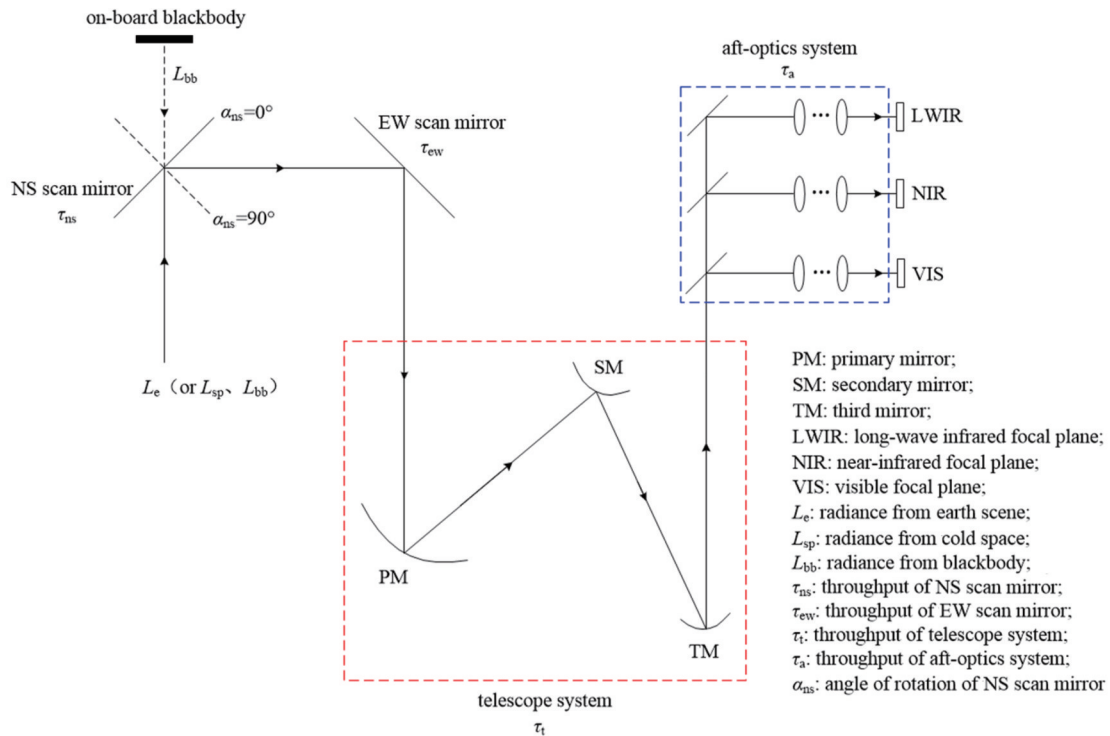


图 1 GHI 的主要光学布局示意图^[4]
Fig. 1 Main optical layout diagram of GHI^[4]

3 发射前定标原理和装置

发射前辐射定标的主要目的是建立辐射测量仪器的响应信号与绝对辐射量之间的定量关系, 从而评价

仪器的综合性能^[3]。黑体辐射源可用作遥感仪器红外波段辐射定标的标准光源。目前, 实验室中常用的辐射定标方法有点源黑体结合平行光管法和近距离大面积扩展源黑体法^[9]。点源黑体结合平行光管法将点源

黑体放置在平行光管的焦面处实现定标光束的扩束准直,从而使定标光束可以充满仪器的入瞳和视场。近距离大面积扩展源黑体法能够提供具有良好稳定性、均匀性、朗伯性和大口径的定标光源,不需要配置造价昂贵的低温平行光管和精确的平行光管校准参数,该方法已被广泛应用于航天光学遥感仪器红外波段的实验室定标领域中。

GHI长波红外波段的辐射定标方程^[4, 10]可以表示为

$$\begin{cases} L_{\text{target}}^{(\text{eff})} - L_{\text{sp}}^{(\text{eff})} = q \cdot S_{\text{target}}^2 + m \cdot S_{\text{target}} + l \\ S_{\text{target}} = S_{\text{target}}^{(\text{ori})} - S_{\text{sp}}^{(\text{ori})} \end{cases}, \quad (1)$$

式中: $L_{\text{target}}^{(\text{eff})}$ 为观测目标时到达入瞳的有效辐亮度; $L_{\text{sp}}^{(\text{eff})}$ 为观测冷空间时到达入瞳的有效辐亮度; q 、 m 和 l 为辐射定标系数; S_{target} 为观测该目标时仪器的净响应信号计数值; $S_{\text{target}}^{(\text{ori})}$ 和 $S_{\text{sp}}^{(\text{ori})}$ 分别为观测目标和冷空间的原始信号计数值。

当观测目标为冷空间时,入瞳处的总有效辐亮度为

$$L_{\text{sp}}^{(\text{eff})} = L_{\text{sp}} \tau_{\text{ns}}^{(\text{sp})} \tau_{\text{ew}}^{(\text{sp})} + L_{\text{ns}} [1 - \tau_{\text{ns}}^{(\text{sp})}] \tau_{\text{ew}}^{(\text{sp})} + L_{\text{ew}} [1 - \tau_{\text{ew}}^{(\text{sp})}], \quad (2)$$

式中: L_{sp} 、 L_{ns} 和 L_{ew} 分别为冷空间、南北镜和东西镜的热辐射亮度; $\tau_{\text{ns}}^{(\text{sp})}$ 和 $\tau_{\text{ew}}^{(\text{sp})}$ 分别为指向冷空间时南北镜和东西镜的光学效率(反射率)。

在实际应用中,冷空间通常选择宇宙空间(在轨)或深低温冷屏(实验室),都可以被当作“零辐射”基准来处理,故式(2)可以简化为

$$L_{\text{sp}}^{(\text{eff})} = L_{\text{ns}} [1 - \tau_{\text{ns}}^{(\text{sp})}] \tau_{\text{ew}}^{(\text{sp})} + L_{\text{ew}} [1 - \tau_{\text{ew}}^{(\text{sp})}]. \quad (3)$$

类似地,当观测目标为黑体时,入瞳处的总有效辐亮度为

$$L_{\text{bb}}^{(\text{eff})} = L_{\text{bb}} \tau_{\text{ns}}^{(\text{bb})} \tau_{\text{ew}}^{(\text{bb})} + L_{\text{ns}} [1 - \tau_{\text{ns}}^{(\text{bb})}] \tau_{\text{ew}}^{(\text{bb})} + L_{\text{ew}} [1 - \tau_{\text{ew}}^{(\text{bb})}], \quad (4)$$

式中: L_{bb} 为黑体的热辐射亮度; $\tau_{\text{ns}}^{(\text{bb})}$ 与 $\tau_{\text{ew}}^{(\text{bb})}$ 分别为指向黑体时南北镜与东西镜的光学效率(反射率)。

对于黑体观测操作,GHI快速连续地执行“冷空间观测→黑体观测→冷空间观测”过程,整个过程持续时间大约在分钟量级以内或十几秒,在该时间内光学元件温度场基本保持不变,故辐亮度 L_{ns} 、 L_{ew} 在式(3)和式(4)中是一致的。根据式(3)、式(4)和式(1),可以推导出GHI长波红外波段基于黑体的辐射定标方程为

$$\begin{cases} L_{\text{bb}} \tau_{\text{ns}}^{(\text{bb})} \tau_{\text{ew}}^{(\text{bb})} + L_{\text{ns}} \left\{ [1 - \tau_{\text{ns}}^{(\text{bb})}] \tau_{\text{ew}}^{(\text{bb})} - [1 - \tau_{\text{ns}}^{(\text{sp})}] \tau_{\text{ew}}^{(\text{sp})} \right\} + L_{\text{ew}} \left\{ [1 - \tau_{\text{ew}}^{(\text{bb})}] - [1 - \tau_{\text{ew}}^{(\text{sp})}] \right\} = q \cdot S_{\text{bb}}^2 + m \cdot S_{\text{bb}} + l \\ S_{\text{bb}} = S_{\text{bb}}^{(\text{ori})} - S_{\text{sp}}^{(\text{ori})} \end{cases}, \quad (5)$$

式中: S_{bb} 为观测黑体时仪器的净响应信号计数值; $S_{\text{bb}}^{(\text{ori})}$ 和 $S_{\text{sp}}^{(\text{ori})}$ 分别为观测黑体和冷空间时的原始信号计数值。

式(5)给出了双扫描镜扫描成像系统基于黑体的辐射定标方程的一般形式,该式考虑了辐射响应模型中可能存在的二次非线性和扫描镜光学效率(反射率)随入射角度的变化对定标的影响^[10-16],两个花括号项是观测黑体与观测冷空间时扫描镜光学效率(反射率)差异引入的辐亮度贡献。中国科学院上海技术物理研究所风云四号有效载荷团队研究了这种扫描镜反射率随入射角度的变化对定标的影响,并提出了相应的校正处理方法^[4]。后面涉及到的仪器输出信号计数值都经过了这种校正处理,故在任何情况下该因素都不会对本文描述的现象和结论产生显著影响。扫描镜反射率影响校正后的GHI长波红外波段的辐射定标方程为

$$\begin{cases} L_{\text{bb}} = a \cdot S_{\text{bb}}^2 + b \cdot S_{\text{bb}} + c \\ S_{\text{bb}} = S_{\text{bb}}^{(\text{ori, correct})} - S_{\text{sp}}^{(\text{ori})} \end{cases}, \quad (6)$$

式中: $a = q \sqrt{\tau_{\text{ns}}^{(\text{bb})} \tau_{\text{ew}}^{(\text{bb})}}$ 、 $b = m \sqrt{\tau_{\text{ns}}^{(\text{bb})} \tau_{\text{ew}}^{(\text{bb})}}$ 和 $c = l \sqrt{\tau_{\text{ns}}^{(\text{bb})} \tau_{\text{ew}}^{(\text{bb})}}$ 为改写形式后的定标系数; $S_{\text{bb}}^{(\text{ori, correct})}$ 为校正处理后的黑体观测原始信号计数值。改写后的定标系数(a 、 b 和 c)通过拟合不同温度黑体的辐亮度和相应

的净响应信号计数值得到。

黑体辐射的辐亮度 L_{bb} 由普朗克定律、黑体的光谱发射率和仪器的相对光谱响应函数经加权平均计算得到,相应的公式^[17]为

$$\begin{cases} L_{\text{bb}}(T) = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \epsilon(\lambda) L_{\text{bb}}^{(\lambda)}(\lambda, T) R(\lambda) d\lambda}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} R(\lambda) d\lambda} \\ L_{\text{bb}}^{(\lambda)}(\lambda, T) = \frac{c_1}{\pi \lambda^5} \frac{1}{\exp\left(\frac{c_2}{\lambda T}\right) - 1} \end{cases}, \quad (7)$$

式中: λ 为波长; T 为黑体温度,由高精度铂电阻传感器测量得到; ϵ 为黑体的光谱发射率,由中国计量科学研究院测试提供; R 为仪器的相对光谱响应函数,由实验室测量得到; λ_1 和 λ_2 分别为仪器光谱响应的起始波长和终止波长; $L_{\text{bb}}^{(\lambda)}$ 为绝对黑体辐射的光谱辐亮度; c_1 为第一辐射常数; c_2 为第二辐射常数。

本实验采用近距离大面源黑体法定标,该方法的优点为面源黑体提供的大面积均匀光源可以实现静止轨道快速成像仪全视场、全孔径的辐射定标。定标装置布局如图2所示,快速成像仪、地面黑体和深低温冷屏等工装设备均置于真空罐内,冷屏和黑体均沿着星下点方向放置,位于仪器光学口径正上方,黑体置于冷

屏之后。真空罐内真空度优于 1.3×10^{-3} Pa, 热沉温度低于 100 K, 罐壁内表面发射率优于 0.9, 构建了一个真空低背景辐射实验条件, 可以较好地模拟在轨空间环境。地面黑体由中国科学院上海技术物理研究所研制, 辐射面直径为 300 mm, 有效发射率约为 0.99, 发射率由中国计量科学研究院标定给出, 控温范围为 180~330 K, 控温分辨率为 0.001 K, 30 min 内的控温稳定性优于 0.05 K。采用 7 支四线制 Pt1000 铂电阻传感器测温, 铂电阻测温准确度(不确定度)优于 0.1 K(包含因子 $k=2$), 辐射面温度非均匀性优于 0.2 K。冷屏用来模拟在轨 4K 宇宙冷空间, 作为仪器观测时的“零辐射”基准。冷屏形状为矩形, 长度为 1340 mm, 宽度为 1230 mm, 几何中心开有一个直径为 295 mm 的圆孔, 地面黑体位于冷屏圆孔后方。冷屏工作时温度低于 85 K, 表面有效发射率优于 0.9。

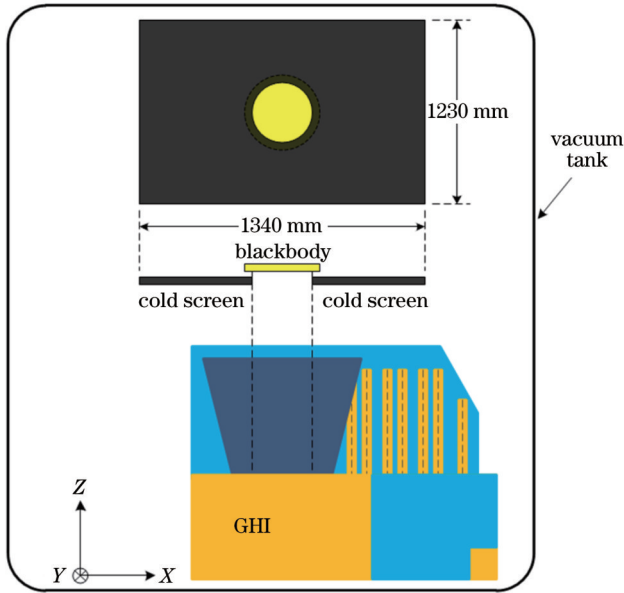


图 2 发射前实验室定标装置示意图

Fig. 2 Schematic diagram of prelaunch laboratory calibration device

实验时, GHI 采用扫描模式按顺序依次划过冷屏、地面黑体和冷屏。南北镜机械转角(α_{ns})指向 0° (星下点)后保持不动, 东西镜机械转角(α_{ew})在 $-4^\circ \sim 4^\circ$ 之间扫描运动, 该过程中仪器会依次划过并采集“冷空间→地面黑体→冷空间”的遥感数据, 对应遥感数据流如图 3 所示。在测试中, 在 180~330 K 温度范围内对地面黑体设置了 16 个变温点的辐亮度等级, 如表 2 所示。在实验期间, 同步开展了天上黑体观测。

文中涉及的各项测试项目都是在如下重要部件温度工况内完成的, 即长波红外焦平面探测器工作温度为 54 K、光学平台(主光学系统)温度为 5°C 和扫描镜框架温度为 5°C 。

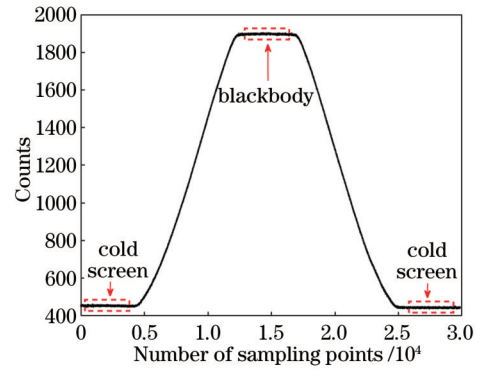


图 3 扫描实验室黑体的遥感数据示意图

Fig. 3 Schematic diagram of remote sensing data obtained by scanning laboratory blackbody

表 2 实验室黑体的温度和辐亮度

Table 2 Temperature and radiance of laboratory blackbody

Serial No.	Temperature / K	Radiance / ($\text{W} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1} \cdot \mu\text{m}^{-1}$)
1	179.851	5.3038×10^{-5}
2	184.472	6.3351×10^{-5}
3	189.253	7.5456×10^{-5}
4	194.224	8.9690×10^{-5}
5	199.066	1.0527×10^{-4}
6	208.888	1.4244×10^{-4}
7	219.004	1.8913×10^{-4}
8	233.935	2.7501×10^{-4}
9	249.589	3.8844×10^{-4}
10	264.824	5.2315×10^{-4}
11	278.475	6.6492×10^{-4}
12	290.539	8.0702×10^{-4}
13	295.159	8.6565×10^{-4}
14	300.279	9.3331×10^{-4}
15	314.389	1.1345×10^{-3}
16	330.094	1.3835×10^{-3}

4 发射前定标和辐射特性测量结果

4.1 辐射定标结果

如第 3 章所述, 在发射前辐射定标测试中设置了 16 个地面黑体温度点。以 GHI 长波红外波段对地面黑体观测的净响应信号计数值(S_{bb})为横坐标数据点序列, 以地面黑体平均光谱辐亮度(L_{bb})为纵坐标数据点序列, 通过多项式拟合可以得到长波红外波段 4 个线阵逐探元的辐射定标曲线和系数。

图 4 展示了线阵 1~4 的首探元、中间探元和末探元的辐射定标曲线。表 3 展示了对应线阵探元的辐射定标系数, 其中 adjrsquare 为自由度调整后的决定系数, rmse 为均方根误差。从图 4 和表 3 中可以直观看出, 采用二次多项式可以很好地描述 GHI 长波红外波段的辐射响应模型, 定标方程具有良好的拟合优度。

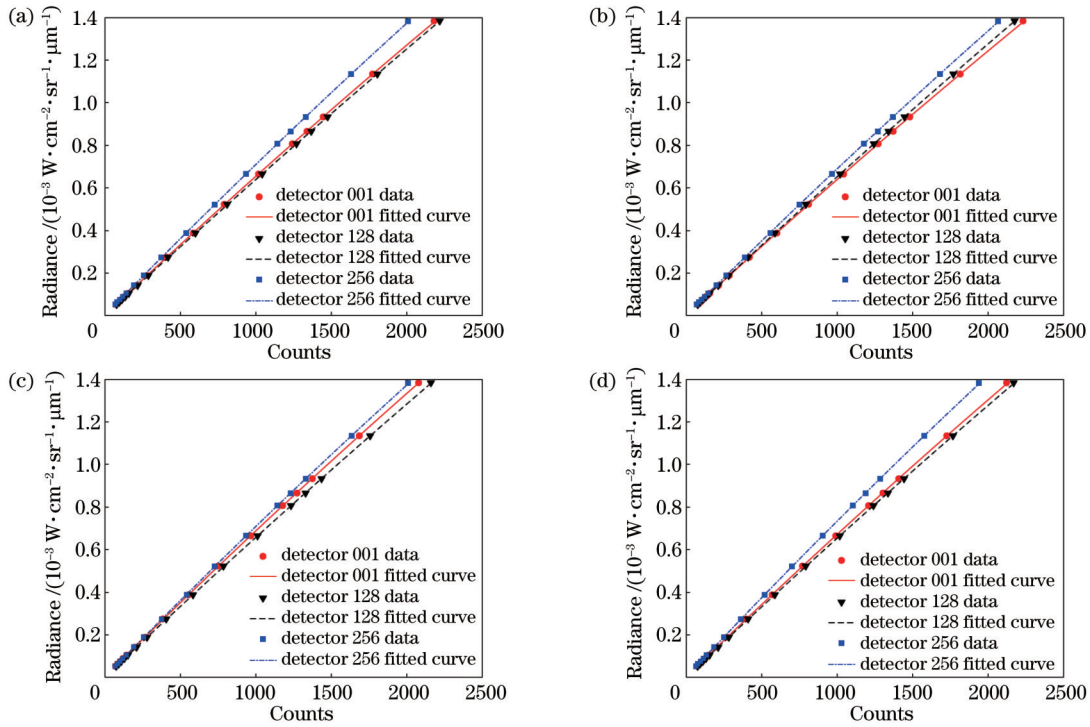


图 4 线阵的首探元、中间探元和末探元的辐射定标曲线。(a)线阵 1;(b)线阵 2;(c)线阵 3;(d)线阵 4

Fig. 4 Radiometric calibration curves of first, intermediate and last detector in line array. (a) Line array 1; (b) line array 2; (c) line array 3; (d) line array 4

表 3 线阵的首探元、中间探元和末探元的辐射定标系数

Table 3 Radiometric calibration coefficients of first, intermediate and last detector in line array

Line array No.	Detector No.	$a / (W \cdot cm^{-2} \cdot sr^{-1} \cdot \mu m^{-1})$	$b / (W \cdot cm^{-2} \cdot sr^{-1} \cdot \mu m^{-1})$	$c / (W \cdot cm^{-2} \cdot sr^{-1} \cdot \mu m^{-1})$	adjrsquare	rmse
1	001	-1.7641×10^{-11}	6.6946×10^{-7}	2.7764×10^{-6}	0.99999	1.2114×10^{-3}
	128	-1.1635×10^{-11}	6.4881×10^{-7}	2.0480×10^{-6}	0.99999	1.0898×10^{-3}
	256	-2.1534×10^{-11}	7.2884×10^{-7}	2.5243×10^{-6}	0.99999	1.2001×10^{-3}
2	001	-1.6018×10^{-11}	6.5251×10^{-7}	2.8364×10^{-6}	0.99999	1.1461×10^{-3}
	128	-1.3049×10^{-11}	6.6345×10^{-7}	2.0588×10^{-6}	0.99999	1.3667×10^{-3}
	256	-1.9475×10^{-11}	7.0662×10^{-7}	2.3772×10^{-6}	0.99999	1.0155×10^{-3}
3	001	-1.9640×10^{-11}	7.0470×10^{-7}	3.4054×10^{-6}	0.99998	1.7347×10^{-3}
	128	-1.4515×10^{-11}	6.7023×10^{-7}	1.9698×10^{-6}	0.99999	1.0144×10^{-3}
	256	-2.1621×10^{-11}	7.2901×10^{-7}	1.7858×10^{-6}	0.99999	1.3148×10^{-3}
4	001	-1.8531×10^{-11}	6.8758×10^{-7}	2.9306×10^{-6}	0.99999	1.2538×10^{-3}
	128	-1.4150×10^{-11}	6.6644×10^{-7}	1.6627×10^{-6}	1.00000	7.9752×10^{-4}
	256	-2.3346×10^{-11}	7.5504×10^{-7}	2.4607×10^{-6}	0.99999	1.1148×10^{-3}

为了客观定量评估辐射响应模型的拟合精度,将根据定标方程计算的地面黑体辐亮度与真实辐亮度进行比较,相对偏差为

$$e_{RD} = \frac{L_{bb,cal} - L_{bb,true}}{L_{bb,true}} \times 100\%, \quad (8)$$

式中: e_{RD} 为相对偏差; $L_{bb,cal}$ 为根据定标方程计算的黑体辐亮度; $L_{bb,true}$ 为真实辐亮度。

表 4 展示了典型温度 300 K 下实验室辐射定标结果的验证情况。该表给出了每个线阵除首元之外所有探元的相对偏差统计结果。除辐亮度相对偏差外,还

给出了与辐亮度等效的亮温偏差的统计结果。可以看出,GHI长波红外波段辐射响应模型拟合精度(300 K 温度下)整体优于 0.34%,换算成等效亮温偏差为优于 0.23 K。

在遥感仪器定标过程中会不可避免地引入一些误差,这些误差影响着仪器的定标精度,它们主要来自定标过程中的测量仪器、测量环境、测量人员与测量方法,以及遥感仪器自身因素等。对于GHI长波红外波段的发射前定标,主要误差来源及量值分析如下:黑体

表 4 300 K 温度下实验室辐射定标结果验证

Table 4 Verification of laboratory radiometric calibration results at temperature of 300 K

Line array No.	Relative deviation $e_{RD} / \%$			Brightness temperature deviation / K		
	minimum	maximum	average	minimum	maximum	average
1	-0.238	0.331	0.042	-0.164	0.228	0.029
2	-0.084	0.285	0.049	-0.058	0.196	0.034
3	-0.161	0.211	0.035	-0.111	0.145	0.024
4	-0.067	0.152	0.047	-0.046	0.105	0.033

的光谱发射率由中国计量科学研究院测试给出,测量不确定度为 0.3% ($k=2$), 换算成 GHI 长波红外波段在温度 300 K 处的亮温不确定度约为 0.104 K ($k=1$); 黑体的铂电阻传感器测温不确定度优于 0.050 K ($k=1$), 由铂电阻校准证书给出; 30 min 内的黑体温度稳定性标称设计值为 0.050 K, 实际测试评估稳定性为 0.040 K ($k=1$), 由规定时间段内黑体温度多次测量的标准差给出; 黑体温度非均匀性为 0.200 K ($k=1$), 由多个位置测温点的标准差给出。辐射响应模型在温度 300 K 处的拟合残差优于 0.230 K ($k=1$); GHI 长波红

外波段的时间噪声对定标不确定度也有影响, 采用温度 300 K 处的探测灵敏度 (NETD) 来评价该项贡献, 300 K 探测灵敏度平均值为 0.060 K ($k=1$); 经过逐元辐射定标后, GHI 长波红外波段在 300 K 温度下的响应非均匀性 (残余空间噪声) 为 0.04% ($k=1$), 换算成亮温约为 0.028 K ($k=1$)。GHI 长波红外波段发射前辐射定标的各不确定度分量与合成后扩展不确定度如表 5 所示, 合成不确定度由各不确定度分量平方和的平方根给出, 合成后扩展不确定度优于 0.670 K ($k=2$)@300 K。

表 5 300 K 温度下实验室辐射定标不确定度分析

Table 5 Uncertainty analysis of laboratory radiometric calibration at temperature of 300 K

Error source	Uncertainty / K
Measurement uncertainty of blackbody spectral emissivity ($k=1$)	0.104
Temperature measurement uncertainty of platinum resistance sensor ($k=1$)	0.050
Stability of blackbody temperature ($k=1$)	0.040
Nonuniformity of blackbody temperature ($k=1$)	0.200
Fitting residual error of GHI radiometric response model ($k=1$)	0.230
Influence of GHI temporal noise ($k=1$)	0.060
Influence of GHI spatial noise ($k=1$)	0.028
Expanded uncertainty ($k=2$)	0.670

4.2 空间噪声特性

红外焦平面在均匀辐照条件下, 各有效像元输出电压相对平均值偏差的均方根值被称为固定图形噪声 (FPN), 也被称为空间噪声。固定图形噪声包含响应率非均匀性和暗电流非均匀性产生的噪声, 是不随时间变化的^[18-19]。

在温度为 T 的黑体辐照下, 固定图形噪声的计算公式^[19]为

$$\begin{cases} n_{FPN} = \sqrt{\frac{1}{N-(d+h)} \sum_{i=1}^N [\overline{V}_{DS}(i, T) - \overline{V}_{DS}(T)]^2} \\ \overline{V}_{DS}(T) = \frac{1}{N-(d+h)} \sum_{i=1}^N \overline{V}_{DS}(i, T) \end{cases}, \quad (9)$$

式中: N 为长线阵焦平面探元总数; d 为死探元数; h 为过热探元数; i 为有效探元序号; $\overline{V}_{DS}(i, T)$ 为有效探元 i 在温度 T 下的输出信号电压; $\overline{V}_{DS}(T)$ 为各有效探元在温度 T 下输出信号电压的平均值。

图 5 展示了 GHI 长波红外波段 4 个线阵的固定图

形噪声随不同温度黑体辐亮度的变化情况, 每张图中三组数据分别对应原始输出信号、暗电流信号和净响应信号的固定图形噪声, 其中 R^2 为决定系数。可以看出: 该长波红外焦平面探测器原始输出信号的固定图形噪声主要来源于暗电流的非均匀性; 响应非均匀性产生的固定图形噪声随着温度的上升而增加, 与辐亮度成正比; 暗电流非均匀性产生的固定图形噪声不随温度变化。这一结果也符合红外焦平面探测器的空间噪声特性规律。

4.3 最佳成像探元选择

对于长波红外焦平面上的不可用探元问题, GHI 采用了 256×4 的长线阵探测器技术来实现 4 列相互备份, 从中选择最佳成像探元, 线阵排布如图 6 所示。在选择最佳成像探元时需要综合考虑探测灵敏度、辐射响应非均匀性、光谱响应非一致性和非线性等因素的影响^[20]。通过对实验数据的研究分析, 提出了两种最佳成像探元选择依据, 即信噪比最大化原则和响应信号固定图形噪声最小化原则。

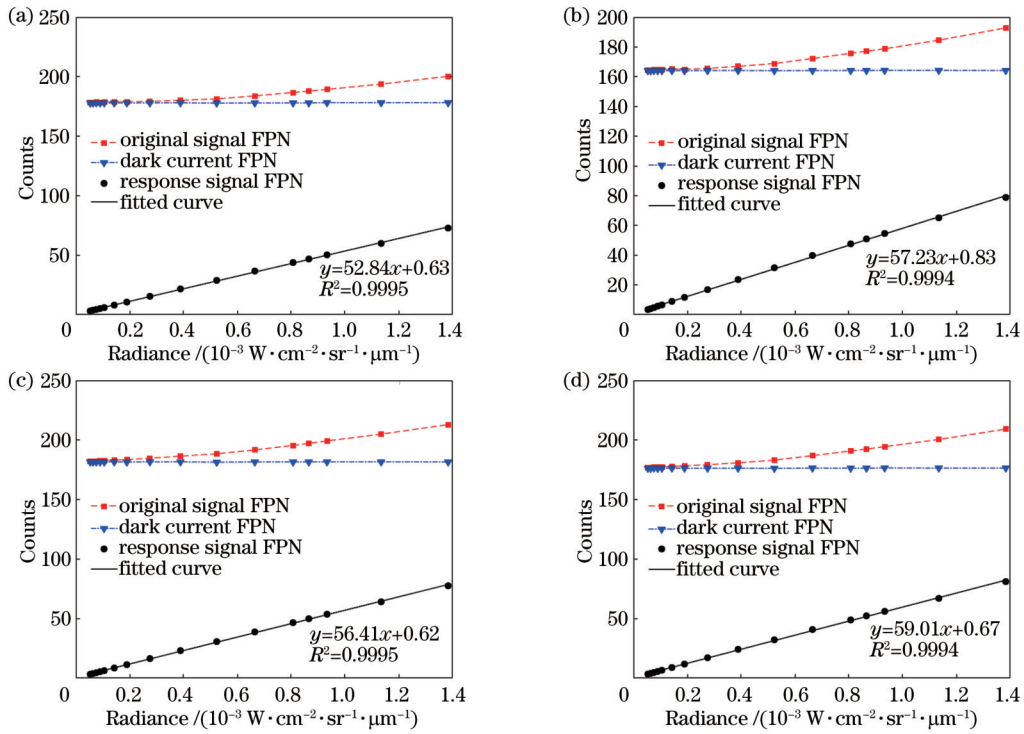


图 5 固定图形噪声与辐亮度的关系。(a)线阵 1;(b)线阵 2;(c)线阵 3;(d)线阵 4

Fig. 5 Relationship between fixed pattern noise and radiance. (a) Line array 1; (b) line array 2; (c) line array 3; (d) line array 4

信噪比最大化原则的具体处理过程为:在剔除每个线阵的不可用探元后,计算在典型黑体温度 300 K 下每个线阵逐探元的信噪比,在每一行(1~256)位置上从 4 个线阵中选择信噪比最大的探元单独组合成一个新的线阵,如图 6 所示。

响应信号固定图形噪声最小化原则的具体处理过

程为:在剔除每个线阵的不可用探元后,计算在典型黑体温度 300 K 下 4 个线阵所有探元净响应信号的平均值,在每一行(1~256)位置上从 4 个线阵中选择净响应信号与该平均值最接近的探元单独组合成一个新的线阵,如图 6 所示。实际上,该方法只是一种简单近似处理。

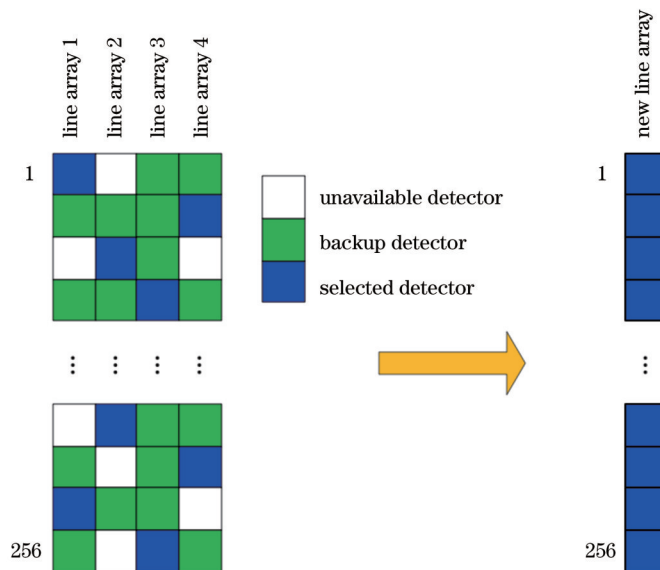


图 6 红外焦平面阵列排布与最佳成像探元选择示意图

Fig. 6 Schematic diagram of infrared focal plane array arrangement and best imaging detector selection

图 7 展示了基于上述两种方法得到的最佳成像探元组合线阵。图 8 给出了这两种新线阵的响应信号固

定图形噪声比较结果。从图 8 可以看出,基于响应信号固定图形噪声最小化的新线阵具有较好的响应一致

性,其响应非均匀性引起的空间噪声约为信噪比最大化新线阵的 48%。基于信噪比最大化和响应信号固定图形噪声最小化这两种选择方法分别侧重于仪器的

时间噪声和空间噪声两个方面,两种方法的实际效果通过在轨应用进行验证。

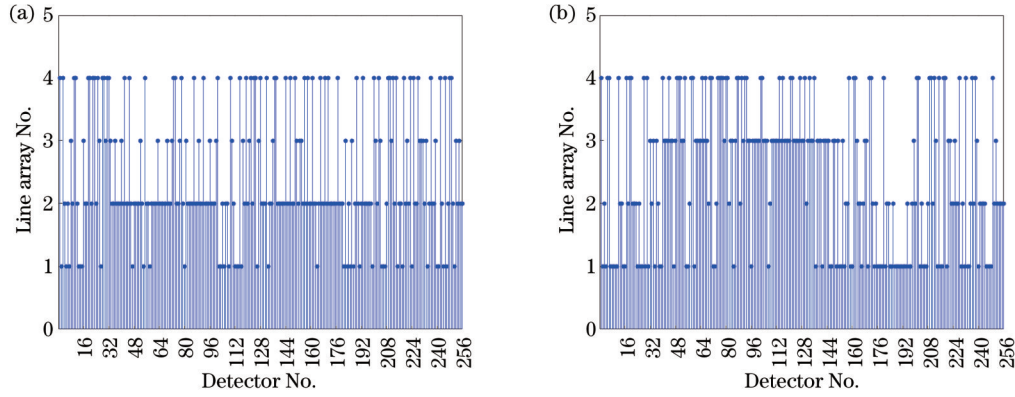


图 7 两种新线阵。(a)基于 SNR 最大化的新线阵;(b)基于响应信号 FPN 最小化的新线阵

Fig. 7 Two new line arrays. (a) New line array based on maximizing SNR; (b) new line array based on minimizing response signal FPN

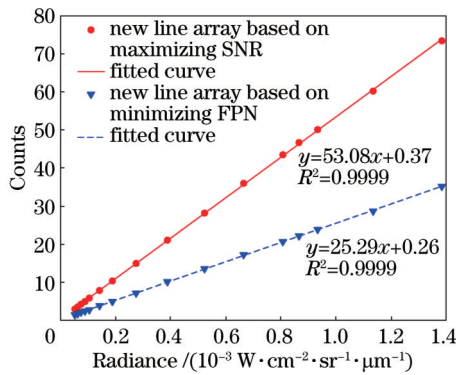


图 8 两种新线阵的响应信号 FPN 对比

Fig. 8 Comparison of response signal FPN of two new line arrays

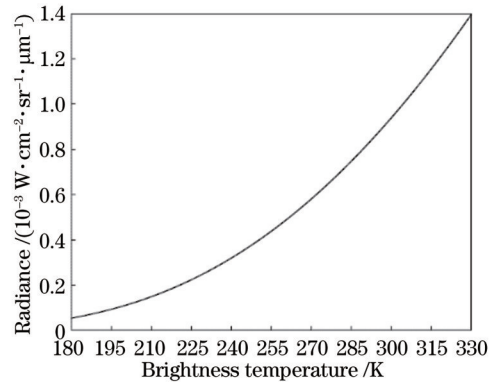


图 9 辐亮度与亮温关系曲线

Fig. 9 Relationship curve between radiance and brightness temperature

4.4 探测灵敏度

温度探测灵敏度通常用 NETD 来表示,反映了系统的电噪声性能,它可以由噪声等效辐亮度和辐亮度-亮温关系曲线计算得到,即

$$L(T + T_{NETD}) = L(T) + L_{NE\Delta L}, \quad (10)$$

式中: L 是考虑了仪器相对光谱响应函数之后的加权平均光谱辐亮度; T_{NETD} 是仪器在温度 T 处的 NETD; $L_{NE\Delta L}$ 是仪器在温度 T 处的噪声等效辐亮度。图 9 给出了辐亮度与亮温的关系曲线。

根据式(10)计算得到 GHI 长波红外波段在典型温度 300 K 处的探测灵敏度,如图 10 所示。该图同时展示了基于信噪比最大化和响应信号固定图形噪声最小化两种组合线阵的探测灵敏度,两种线阵的探测灵敏度均优于 0.2 K 的技术指标要求。对于信噪比最大化组合线阵来说,在 300 K 温度下的探测灵敏度整体优于 0.1 K,平均水平达到了 50 mK 左右。

4.5 星上黑体参考标准的检验

在发射前实验室辐射定标时,除了地面黑体定标

测试外,还同步开展了星上黑体定标测试。星上黑体设计为只能在有限温度范围内变温,测试时依次控温在 290、295、300、305、310 K 5 个温度点附近。根据地面黑体变温获取的全动态范围(180~330 K)辐射定标方程来检验星上黑体参考标准,如图 11 所示。具体处理过程为:当星上黑体的铂电阻传感器测量温度为 T_{Pt} 时,仪器观测星上黑体的净响应信号为 S_0 ,将该信号代入地面黑体变温获取的全动态范围辐射定标方程中可以计算出此时的辐亮度 L_0 ,记为真实辐亮度,其公式为

$$L_0 = a \cdot S_0^2 + b \cdot S_0 + c, \quad (11)$$

将铂电阻测量温度 T_{Pt} 、星上黑体光谱发射率 ϵ 、仪器相对光谱响应函数 R 与普朗克公式结合也可以计算出一个辐亮度 L'_0 ,记为标称辐亮度,其公式为

$$L'_0 = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \epsilon(\lambda) L_{bb}^{(\lambda)}(\lambda, T_{Pt}) R(\lambda) d\lambda}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} R(\lambda) d\lambda}, \quad (12)$$

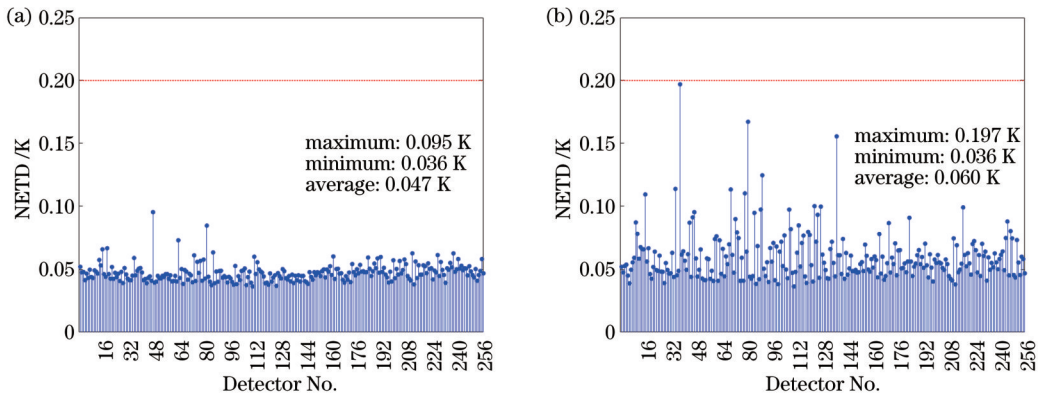


图 10 300 K 温度下的探测灵敏度。(a)基于 SNR 最大化的新线阵;(b)基于响应信号 FPN 最小化的新线阵

Fig. 10 Detection sensitivity at temperature of 300 K. (a) New line array based on maximizing SNR; (b) new line array based on minimizing response signal FPN

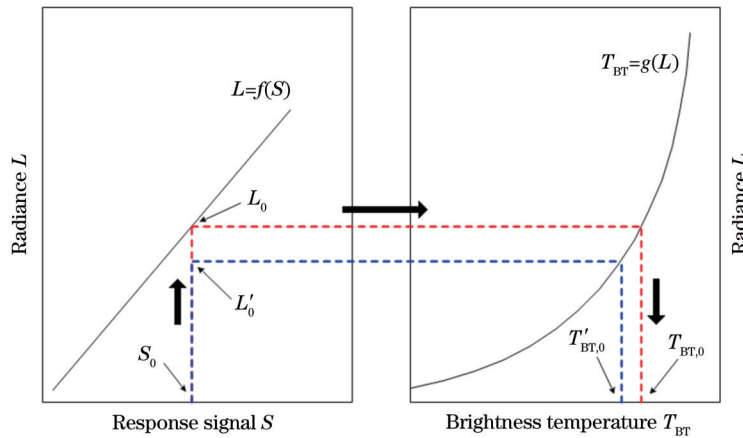


图 11 星上黑体参考标准检验示意图

Fig. 11 Schematic diagram of validation of on-board blackbody reference standard

将真实辐亮度 L_0 和标称辐亮度 L'_0 分别代入辐亮度-亮温关系曲线可以计算出对应的真实亮温 $T_{BT,0}$ 和标称亮温 $T'_{BT,0}$ 。

对星上黑体 5 个控温点 (290、295、300、305、310 K) 处的真实亮温 T_{BT} 与标称亮温 T'_{BT} 进行线性多项式拟合,以 $T_{BT} = k_0 \cdot T'_{BT} + k_1$ 的形式表示,其中 k_0 和 k_1 为拟合系数。图 12 分别给出了基于信噪比最大化和响应信号固定图形噪声最小化两种组合线阵的首探元、中间探元和末探元的星上黑体真实亮温 T_{BT} 与标称亮温 T'_{BT} 的关系拟合曲线。表 6 给出了相应的拟合系数。从图 12 和表 6 可以看出:星上黑体的标称亮温 T'_{BT} 略低于真实亮温 T_{BT} ;在典型目标温度 300 K 处,标称亮温比真实亮温低约 0.42 K (线阵平均值)。通过对 GHI 星上黑体周围结构部件和国际类似遥感仪器星上黑体定标修正算法的初步分析判断,造成星上黑体标称亮温比真实亮温偏低的主要原因是该黑体并非理想黑体(发射率小于 1)。当仪器观测非理想星上黑体时,接收到的辐射量不仅来自该黑体,还来自该黑体反射的它周围结构部件的热辐射量^[10, 21-22],如扫描光学系统结构部件和腔体表面的热辐射在定标时可能会

被星上黑体反射而进入定标光路中,文中给出的辐射定标方程模型尚未考虑这一部分辐射的贡献,后续会根据整机系统光机热建模仿真分析和在轨实测数据研究探索适用于 GHI 的星上黑体定标修正算法。

5 结 论

针对风云四号 B 星静止轨道快速成像仪长波红外波段的任务需求和设计特点,研究了基于近距离大面积扩展黑体辐射源的发射前定标和辐射特性测量方法,并搭建了相应的定标装置来实现定标参数测量和辐射特性表征。通过对发射前定标过程误差源的有效控制,达到了 0.67 K@300 K 的定标不确定度。测量并研究了 GHI 长波红外波段的空间噪声特性和温度探测灵敏度。根据空间噪声和时间噪声特性,提出了两种最佳成像探元选择方法(信噪比最大化原则和响应信号固定图形噪声最小化原则),通过最佳成像探元的选择可以实现长线阵焦平面探测器卫星云图上的无盲元成像,同时还可以实现平均水平为 50~60 mK@300 K 的探测灵敏度。根据地面黑体测量获取的全动态范围辐射定标方程,检验评估了星上黑体参考标准

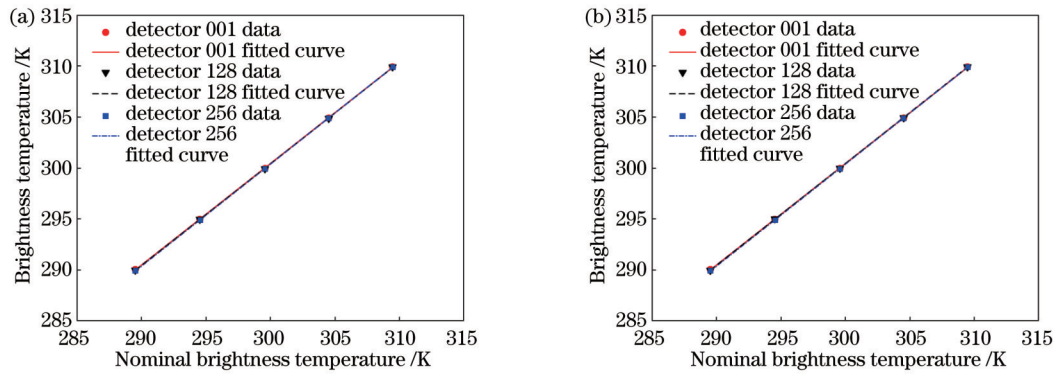


图 12 星上黑体真实亮温与标称亮温关系的拟合曲线。(a)基于 SNR 最大化的新线阵;(b)基于响应信号 FPN 最小化的新线阵
Fig. 12 Fitting curves of relationship between true brightness temperature and nominal brightness temperature of on-board blackbody.

(a) New line array based on maximizing SNR; (b) new line array based on minimizing response signal FPN

表 6 星上黑体真实亮温与标称亮温关系的拟合系数

Table 6 Fitting coefficients of relationship between true brightness temperature and nominal brightness temperature of on-board blackbody

New line array	Detector No.	k_0	k_1 / K	adjrsquare	rmse
Based on maximizing SNR	1	0.9959	1.6543	0.99993	0.0679
	128	0.9973	1.2101	0.99991	0.0750
	256	1.0010	0.0790	0.99997	0.0463
Based on minimizing response signal FPN	1	0.9959	1.6543	0.99993	0.0679
	128	0.9990	0.7154	0.99997	0.0418
	256	1.0010	0.0790	0.99997	0.0463

的精度,星上黑体的标称亮温稍低于真实亮温,在典型目标温度 300 K 处,约低了 0.42 K。初步分析判断该现象可能是由星上黑体(发射率小于 1)反射周围结构部件的热辐射引起的,后续将根据在轨数据开展关于星上黑体定标修正算法方面的研究工作。

参 考 文 献

- [1] 中国气象局国家卫星气象中心. 风云四号 B 星介绍[EB/OL]. [2022-08-24]. <http://www.nsmc.org.cn/nsmc/cn/satellite/FY4B.html>. National Satellite Meteorological Center, China Meteorological Administration. Introduction to FengYun-4B satellite[EB/OL]. [2022-08-24]. <http://www.nsmc.org.cn/nsmc/cn/satellite/FY4B.html>.
- [2] 中国气象局国家卫星气象中心. 快速成像仪介绍[EB/OL]. [2022-08-24]. <http://www.nsmc.org.cn/nsmc/cn/instrument/GHI.html>. National Satellite Meteorological Center, China Meteorological Administration. Introduction to geostationary high-speed imager [EB/OL]. [2022-08-24]. <http://www.nsmc.org.cn/nsmc/cn/instrument/GHI.html>.
- [3] Yoon H W, Kacker R N. Guidelines for radiometric calibration of electro-optical instruments for remote sensing: NISTHB 157 [R]. Gaithersburg: National Institute of Standards and Technology, 2015.
- [4] 李秀举, 王保勇, 吴亚鹏, 等. 扫描镜热辐射校正对 FY-4A 星 AGRI 定标精度的提升研究[J]. 红外与毫米波学报, 2022, 41(3): 608-617. Li X J, Wang B Y, Wu Y P, et al. Study on the improvement of scan mirror thermal radiation correction on the calibration accuracy of FY-4A AGRI[J]. Journal of Infrared and Millimeter Waves, 2022, 41(3): 608-617.
- [5] 王静, 刘成保, 杨磊, 等. 静止气象卫星标称网格的计算方法及其在风云四号中的应用[J]. 光学学报, 2018, 38(12): 1211001. Wang J, Liu C B, Yang L, et al. Calculation of geostationary satellites' nominal fixed grid and its application in FY-4A advanced geosynchronous radiation imager[J]. Acta Optica Sinica, 2018, 38(12): 1211001.
- [6] 李路, 倪卓娅, 漆成莉, 等. 风云四号 B 星干涉式红外探测仪发射前辐射定标[J]. 光学学报, 2022, 42(6): 0630001. Li L, Ni Z Y, Qi C L, et al. Pre-launch radiometric calibration of geostationary interferometric infrared sounder on FengYun-4B satellite[J]. Acta Optica Sinica, 2022, 42(6): 0630001.
- [7] 陈凡胜, 胡璋悦, 李满雁, 等. 宽幅高分辨热红外遥感成像技术研究[J]. 中国激光, 2021, 48(12): 1210002. Chen F S, Hu Z Y, Li X Y, et al. Research on wide-range and high-resolution thermal infrared remote sensing imaging technology[J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(12): 1210002.
- [8] 董瑶海. 风云四号气象卫星及其应用展望[J]. 上海航天, 2016, 33(2): 1-8. Dong Y H. FY-4 meteorological satellite and its application prospect[J]. Aerospace Shanghai, 2016, 33(2): 1-8.
- [9] Grant B G. Field guide to radiometry[M]. Bellingham: SPIE Press, 2011: 73-84.
- [10] Datla R, Shao X, Cao C Y, et al. Comparison of the calibration algorithms and SI traceability of MODIS, VIIRS, GOES, and GOES-R ABI sensors[J]. Remote Sensing, 2016, 8(2): 126.
- [11] Weinreb M, Jamieson M, Fulton N, et al. Operational calibration of Geostationary Operational Environmental Satellite-8 and-9 imagers and sounders[J]. Applied Optics, 1997, 36(27): 6895-6904.

- [12] Chiang K F, Xiong X X. Pre-launch characterization of aqua MODIS scan mirror response versus scan angle for thermal emissive bands[J]. Proceedings of SPIE, 2007, 6677: 66771J.
- [13] Xiong X, Chiang K, Chen N, et al. Results and lessons from MODIS thermal emissive bands calibration: pre-launch to on-orbit[J]. Proceedings of SPIE, 2006, 6296: 62960A.
- [14] Xiong X X, Sun J Q, Wu A S, et al. Terra and Aqua MODIS calibration algorithms and uncertainty analysis[J]. Proceedings of SPIE, 2005, 5978: 59780V.
- [15] Guenther B, Xiong X, Barnes W L, et al. A calibration algorithm design and analysis for VIIRS Thermal Emissive Bands based on the EOS MODIS approach[C]//IGARSS 2003. 2003 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Proceedings, July 21-25, 2003, Toulouse, France. New York: IEEE Press, 2003: 3036-3038.
- [16] Oudrari H, McIntire J, Xiong X X, et al. Prelaunch radiometric characterization and calibration of the S-NPP VIIRS sensor[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2015, 53(4): 2195-2210.
- [17] 周世椿. 高级红外光电工程导论[M]. 北京: 科学出版社, 2014: 21-27, 235-239.
Zhou S C. Introduction to advanced infrared photoelectric engineering[M]. Beijing: Science Press, 2014: 21-27, 235-239.
- [18] 陈伯良, 李向阳. 航天红外成像探测器[M]. 北京: 科学出版社, 2016: 145-147.
Chen B L, Li X Y. Infrared imaging detectors for space applications[M]. Beijing: Science Press, 2016: 145-147.
- [19] 国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 红外焦平面阵列参数测试方法: GB/T 17444—2013[S]. 北京: 中国标准出版社, 2014.
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. Measuring methods for parameters of infrared focal plane arrays: GB/T 17444—2013[S]. Beijing: Standards Press of China, 2014.
- [20] 李文力, 李秀举, 屠黄唯, 等. 像元间光谱响应非均匀性与条带噪声的关系[J]. 光学学报, 2022, 42(12): 1211001.
Li W L, Li X J, Tu H W, et al. Relationship between spectral response non-uniformity of pixels and stripe noise[J]. Acta Optica Sinica, 2022, 42(12): 1211001.
- [21] Johnson R X, Weinreb M P. GOES-8 imager midnight effects and slope correction[J]. Proceedings of SPIE, 1996, 2812: 596-607.
- [22] Baker N. Joint Polar Satellite System (JPSS) VIIRS Radiometric Calibration Algorithm Theoretical Base Document (ATBD): 423-ATBD-001[R]. Greenbelt: National Aeronautic and Space Administration (NASA), 2014: 1-195.

Prelaunch Radiometric Characterization and Calibration for Long Wave Infrared Band of FY-4B GHI

Li Xiuju^{1,2}, Cao Qi^{1,2}, Zhou Shutian^{1,2}, Qian Jing^{1,2}, Wang Baoyong^{1,2}, Zou Yaopu^{1,2}, Wang Jing^{3**}, Shen Xia^{1,2*}, Han Changpei^{1,2}, Wang Lizhi^{1,2}, Zhou Yuxiang^{1,2}, Li Panpan^{1,2}

¹Key Laboratory of Infrared Detection and Imaging Technology, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China;

²Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China;

³National Satellite Meteorological Centre, China Meteorological Administration, Beijing 100081, China

Abstract

Objective Calibration is the process of describing the parameters needed to understand and quantify the expected application performance of a sensor. In the prelaunch radiometric characterization and calibration, the on-orbit environment should be simulated as much as possible, and the tests are performed in a controlled environment using a standard source of known radiation. The measurements made during the prelaunch radiometric calibration are used to verify whether the instrument status is correct, quantify the calibration equation and radiometric measurement model parameters, and estimate the measurement uncertainty. The measurement performance and limitations are determined, and whether the sensor meets the mission requirements are verified. By identifying and characterizing unique sensor performance characteristics, the influence of sensor behavior on expected measurement is minimized. The Geostationary High-speed Imager (GHI) is one of the main payloads of Fengyun-4B (FY-4B) satellite, the research in this paper is an important basis of the on orbit quantitative application for long wave infrared (LWIR) band of GHI.

Methods The commonly used radiometric calibration methods in the laboratory are the distant small source combined with the collimator method and the near extended source method. The distant small source combined with collimator method is to place the point source blackbody at the focal plane of the collimator to realize the beam expansion and collimation of the calibration beam, so that the calibration beam can fill the instrument's entrance pupil and field of view. The near extended source method can provide a standard calibration source with good stability, uniformity, Lambertian and large aperture, and does not require expensive low-temperature collimators and accurate collimator calibration parameters. In this paper, the large-area and near extended source blackbody calibration method is used, which can realize

the full field of view and full aperture radiometric calibration of GHI. GHI, external blackbody, deep low temperature cold screen and other equipment are placed in the vacuum tank. The cold screen and external blackbody are placed along the direction of the sub-satellite point, directly above the optical aperture of the instrument, and the blackbody is placed behind the cold screen (Fig. 2). The vacuum in the tank is better than 1.3×10^{-3} Pa, the heat sink temperature is lower than 100 K, and the effective emissivity of the tank wall surface is better than 0.9. The effective emissivity of the external blackbody is about 0.99, and the temperature control range is 180–330 K. Within this range, the radiance levels of 16 temperature points are set (Table 2). During the experiment, the on-board blackbody observation will be performed simultaneously. The cold screen is used to simulate the 4K space view in orbit, as the "zero radiation" standard for instrument observation, the temperature of the cold screen is lower than 85 K, and the effective emissivity of the surface is better than 0.9.

Results and Discussions The quadratic polynomial can be used to describe the radiometric response model of GHI LWIR, and the calibration equation has good goodness of fit (Fig. 4 and Table 3). At the typical temperature of 300 K, the fitting accuracy of radiometric response model is better than 0.23 K (Table 4). The analysis and evaluation of various error values in the calibration process show that the prelaunch calibration uncertainty is better than 0.670 K (coverage factor is 2) at 300 K (Table 5). The spatial noise characteristics are measured and studied, and the relationship between the fixed pattern noise (original signal, dark current and response signal) and the radiance is analyzed (Fig. 5). For the problem of unavailable detector on LWIR focal plane, GHI adopts 256×4 to realize mutual backup of 4 line arrays and select the best imaging detector (Fig. 6). Through the research and analysis of the experimental data, two kinds of the best imaging detector selection criteria are proposed, namely, the principle of maximizing the signal-to-noise ratio and the principle of minimizing the fixed pattern noise of response signal. Thus, two kinds of the best imaging detector combination line arrays are given (Fig. 7). The detection sensitivity at a typical temperature of 300 K is measured (Fig. 10). The detection sensitivity of the two new line arrays mentioned above meets the mission requirements (better than 0.2 K). In particular, for the new line array based on maximizing the signal-to-noise ratio, the overall detection sensitivity at 300 K is better than 0.1 K, and the average level is about 50 mK. The on-board blackbody reference standard is validated according to the full dynamic range (180–330 K) radiometric calibration equation obtained from the external blackbody (Fig. 11). Linear fitting between the true brightness temperature and the nominal brightness temperature at the five temperature points (290, 295, 300, 305, 310 K) of the on-board blackbody is performed (Fig. 12 and Table 6). The nominal brightness temperature of the on-board blackbody is slightly lower than the true brightness temperature. At the typical temperature of 300 K, the nominal brightness temperature is about 0.42 K lower than the true brightness temperature (the average value of the line array). Through the preliminary analysis and judgment of the structural components around the on-board blackbody of GHI and the calibration correction algorithm of the on-board blackbody of similar remote sensing instruments, the main reason why the nominal brightness temperature of the on-board blackbody is lower than the true brightness temperature is that the blackbody is not an ideal blackbody (emissivity is less than 1). When the instrument observes the non-ideal on-board blackbody, the radiation received is not only from the blackbody, but also includes the thermal radiation from the surrounding structural components reflected by the blackbody.

Conclusions In view of the mission requirements and design characteristics of the LWIR band of the FY-4B GHI, the prelaunch calibration and radiometric characteristic measurement methods based on the large-area and near extended blackbody radiation source are studied, and the corresponding calibration device is built to achieve calibration parameter measurement and radiometric characteristic characterization. Through the effective control of the error source of the prelaunch calibration process, the calibration uncertainty is better than 0.67 K@300 K. The spatial noise characteristics and detection sensitivity are measured and studied. According to the characteristics of spatial noise and temporal noise, two methods to select the best imaging detector are proposed, which are based on maximizing the signal-to-noise ratio and minimizing the fixed pattern noise of response signal. Through the selection of the best imaging detector, the problem of no non-effective detector imaging on the satellite image of the long linear focal plane array can be solved. At the same time, the temperature detection sensitivity (average) can reach 50–60 mK@300 K. According to the full dynamic range radiometric calibration equation obtained from the external blackbody measurement, the accuracy of the on-board blackbody reference standard is evaluated. The nominal brightness temperature of the on-board blackbody is slightly lower than the true brightness temperature, approximately 0.42 K lower at the typical temperature of 300 K. It is preliminarily analyzed and judged that this phenomenon may be caused by the reflection of thermal radiation from the surrounding structural components by the on-board blackbody. Subsequently, the research on the calibration correction algorithm of the on-board blackbody will be performed according to the on-orbit data.

Key words measurement; radiometric calibration; infrared imaging system; blackbody; optical remote sensing; Geostationary High-speed Imager; Fengyun-4