

引用格式: GONG Hao, LEE Lu, DONG Yihui, et al. Analysis and Correction of Polarization-Induced Radiometric Calibration Deviation for Earth Radiometry Benchmark Infrared Sounder[J]. Acta Photonica Sinica, 2026, 55(7):0730001

龚昊,李路,董懿慧,等. 地球红外辐射测量基准载荷偏振诱导偏差规律分析及订正研究[J]. 光子学报, 2026, 55(7):0730001

地球红外辐射测量基准载荷偏振诱导偏差规律分析及订正研究

龚昊¹, 李路², 董懿慧³, 陈和¹, 顾明剑³, 丁雷³

(1 北京理工大学 光电学院, 北京, 100081)

(2 国家卫星气象中心, 北京, 100081)

(3 中国科学院上海技术物理研究所红外探测与成像重点实验室, 上海, 200083)

摘 要:为使地球红外辐射测量基准载荷对 $600\text{--}2700\text{ cm}^{-1}$ ($3.7\text{--}16.7\mu\text{m}$) 波段地气系统上行红外辐射光谱实现 0.1 K ($k=2$) 量级的辐射定标精度, 需要对扫描反射镜与主体光学系统组合偏振效应引入的偏差进行机理分析与订正。本文基于偏振光束传播理论, 结合红外高光谱探测仪辐射定标模型, 研究了偏振诱导偏差与仪器温差、扫描镜扫描角、仪器偏振角、光谱通道及场景亮温等因素的依赖关系。针对扫描镜-黑体温差引入部分偏振偏差的问题, 提出了在工程上通过热平衡方法降低该偏差的方案, 并对偏振偏差方程进行了合理性简化, 后续开展了相应的不确定度分析。在此基础上, 构建了偏振诱导偏差订正模型, 并基于仪器偏振测量参数与变温黑体定标试验对偏振偏差的订正效果进行了检验。结果表明, 入射辐射波长越短、观测场景温度越低, 偏振偏差越显著。经订正后, 系统整体定标偏差降低至 0.1 K 以内。通过辐射定标不确定度分析表明, 随着观测场景温度降低, 偏振效应会超越黑体不确定度, 成为定标不确定度主导因素, 经订正后全波段合成不确定度 ($k=2$) 小于 0.1 K 。

关键词:光谱学; 地球红外辐射基准载荷; 辐射定标; 红外高光谱; 偏振诱导辐射偏差

中图分类号: P414.4

文献标识码: A

doi: 10.3788/gzxb20265507.0730001

0 引言

地球红外辐射对关键强迫因子 (CO_2 、 CH_4 、 N_2O 、CFCs、气溶胶) 及反馈 (水汽、云、温度) 极为敏感, 高光谱红外遥感技术已成为监测全球气候变化的重要手段^[1-2]。研究表明, 为了能够在十年期的时间尺度上检测到气候变化的细微信号 (如每十年 $\sim 0.2\text{ K}$ 的大气温度变化), 卫星观测数据需在 95% 置信水平 ($2\text{-}\sigma$ 或 $k=2$) 条件下达到 0.1 K/decade 的测量稳定度^[3-5], 这一长期测量稳定度的实现首先建立在仪器具备绝对辐射定标精度 0.1 K ($k=2$) 的基础之上。然而, 常规气象/环境业务卫星不仅定标精度要求低于 0.1 K , 在轨性能及定标源退化也将导致长期定标稳定性不足, 并且在轨缺少统一测量基准也很难保证不同卫星仪器或接续卫星仪器测量数据的一致性。总之, 上述原因使得现有卫星数据难以满足长期气候变化监测的应用需求^[6]。

为此, 有必要部署一些具有 SI (Système Internationale) 可溯源能力的基准卫星 (SI Traceable Satellite, SITSat), 通过在定标黑体内部嵌入微型相变固定点, 将黑体温度锚定至绝对的开尔文温标上, 实现测量数据的 SI 溯源。这一设计使得基准卫星相当于星上“计量实验室”, 通过星下点交叉定标 (Simultaneous Nadir Overpasses, SNO) 技术为气象/环境遥感仪器提供空间辐射定标基准, 从而提高常规遥感卫星在轨辐射定标精度, 甚至最终形成具备气候监测能力的全球卫星网络^[7-8], 地球红外辐射测量基准载荷就是基准卫星即

基金项目:国家重点研发计划 (No.2023YFB3905400, No.2023YFB3905404)

第一作者:龚昊 (2001—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为红外高光谱探测仪辐射定标技术。Email: 3220240730@bit.edu.cn

通讯作者:李路 (1986—), 男, 副研究员, 博士, 主要研究方向为空间成像光谱仪定标与检验技术研究。Email: lilu@cma.gov.cn; 陈和 (1982—), 男, 副教授, 博士, 主要研究方向为激光雷达相关方面研究。Email: shinianshao@bit.edu.cn

收稿日期: 2026-03-10; **录用日期:** 2026-05-09

<http://www.photon.ac.cn>

将搭载的重要 SI-可溯源仪器。研究发现,无论是降低 SI 溯源链路中的不确定度,还是降低辐射定标基准传递中的不确定度,均需首先减小基准载荷在辐射测量中引入的定标偏差,使之达到 0.1 K ($k=2$) 的绝对辐射定标精度。

在红外高光谱探测仪辐射定标研究过程中发现,仪器偏振效应是一项不可忽视的辐射定标偏差产生源^[8-12]。PAGANO T S 等人^[13](2000)在发射前热真空试验期间测量了大气红外探测仪 AIRS (Atmospheric Infrared Sounder) 的扫描镜与光谱仪偏振响应,并指出二者耦合将导致观测信号会产生随扫描角变化的偏振诱导辐射偏差。比如,在亮温为 250 K 的观测场景下,当扫描角为 -50° 时,在 15 μm 波段产生的相对辐射值偏差可达约 0.5 % (等价亮温偏差约 0.4 K)。AIRS 仪器是一种色散型光谱仪,其中采用的光栅分光器件是产生偏振调制的^[14-15]主要来源之一。TAYLOR J K 等人^[16](2023)在研究跨轨红外探测仪 CrIS (Cross-track Infrared Sounder) 的偏振特性时发现,对于 CrIS 这种傅里叶变换光谱仪也会产生偏振诱导辐射偏差,特别对于 210 K 的低温观测场景,其长波 (LWIR)、中波 (MWIR)、短波 (SWIR) 最大亮温偏差分别达 0.1 K、0.2 K、0.56 K,短波波段的偏振偏差甚至已成为低温场景辐射定标不确定度的主要来源。对现有的红外探测仪,0.1-0.5 K 量级的辐射定标偏差可能对气象/环境应用没有显著影响,但对于长期气候监测所要求的 0.1 K 辐射定标精度却是不可接受的,因此需要对偏振诱导辐射偏差的产生机理、分布规律开展研究,并在此基础上制订合理的偏差订正方案。

本研究为订正偏振诱导辐射偏差、提高基准载荷定标精度,基于偏振光束传播理论,分析了偏振诱导辐射偏差产生的原理,考察了偏振偏差随扫描角、偏振角、光谱通道、观测场景亮温等因素的变化规律,结合辐射定标模型制订了偏差订正方案,并基于发射前黑体定标试验数据对偏差订正效果进行了检验,完成了基准载荷偏振效应不确定度分析。

1 偏振诱导辐射偏差基本理论

1.1 “扫描镜-仪器主光学”组合偏振效应

地球红外辐射测量基准载荷采用基于迈克尔逊干涉仪^[17]的傅里叶变换光谱仪体制^[8],仪器结构如图 1 所示,其采用一面金属反射扫描镜 (Scene Scanning Mirror, SSM) 将地球场景或星上定标源 (黑体、冷空、激光等) 的辐射通过“摆扫”方式 (whisk-broom) 引入仪器。由偏振光学原理可知,倾斜的金属表面对入射光总会引入一定的偏振调制^[18-19]。一般,扫描镜转轴与镜面法线夹 45° 角,以保持不同扫描角接收的入射辐射始终保持入射角恒定。因此,对所有观测场景,由扫描镜引入的偏振量始终保持不变;然而,随着转轴旋转,扫描镜的偏振平面也将围绕系统光轴进行旋转。另一方面,在除扫描镜之外的仪器主体光路中其他光学组件 (如反射镜、分束器、分光片等) 也会引入一定程度的偏振调制,但其偏振平面在仪器设计完成后即保持恒定而不会随扫描角变化。因而,由“扫描镜-仪器主光学”组合形成的偏振效应对入射光产生偏振调制,且偏振辐射随扫描角不断变化。如果不对这种偏振调制辐射进行订正,直接输入辐射定标模型,最终定标后的辐射也将随扫描角不断变化,对应辐射偏差就是所谓的偏振诱导辐射定标偏差。

1.2 偏振诱导辐射偏差形成分析

为便于分析,可以将扫描镜与仪器主光学引起的偏振效应等效为两个部分线偏振器组合,二者对入射光的偏振调制如图 2 所示。图中是典型的 45° 镜跨轨扫描地球场景,以星下点作为 0° 参考轴, δ 为扫描角,逆时针旋转为正, α 为仪器主光学偏振角。由马吕斯定律可知,当一束无偏光 (这里为地球辐射) 连续经过两个起偏器时,出射光强与两起偏器的偏振轴夹角相关,因此“扫描镜-仪器主光学”的组合偏振是一个与二者偏振椭圆长轴的相对夹角 $\delta-\alpha$ 有关的函数。当仪器观测不同场景时,组合偏振将对仪器探测信号产生微小调制,当 $\delta-\alpha=0^\circ$ 时,探测信号最大;当 $\delta-\alpha=90^\circ$ 时,探测信号最小。

定义扫描镜的 p 方向与 s 方向反射系数分别为 r_p, r_s , 仪器主光学等效最大偏振方向和最小偏振方向的透过系数分别为 $t_{\max}$ 和 $t_{\min}$, 对应偏振参考方向为 $e_{\max}, e_{\min}$, 则入射辐射经扫描镜与仪器主光学到达探测器的辐射电场矢量 $E_{\delta, \text{scene}}$ 可表示为:

$$E_{\delta, \text{scene}} = \left[r_p E_{\text{scene}} t_{\max} \cos(\delta - \alpha) \cos(\tau + \varphi_p) + r_s E_{\text{scene}} t_{\max} \sin(\delta - \alpha) \cos(\tau + \varphi_s) \right] e_{t_{\max}} + \left[r_p E_{\text{scene}} t_{\min} \sin(\delta - \alpha) \cos(\tau + \varphi_p) - r_s E_{\text{scene}} t_{\min} \cos(\delta - \alpha) \cos(\tau + \varphi_s) \right] e_{t_{\min}} \quad (1)$$

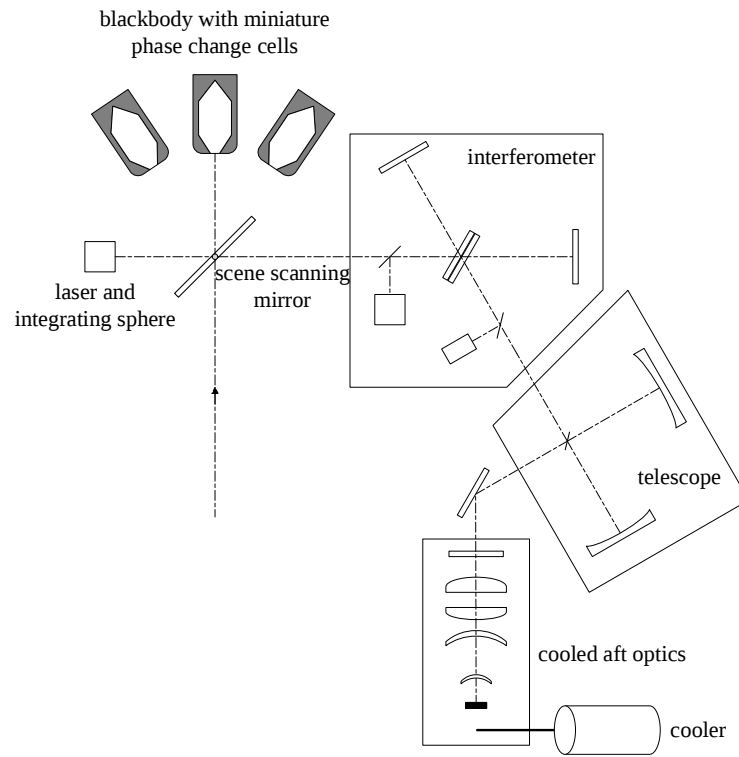


图1 地球红外辐射测量基准载荷仪器结构示意图

Fig. 1 Earth Radiometric Benchmark Infrared Sounder optical schematic

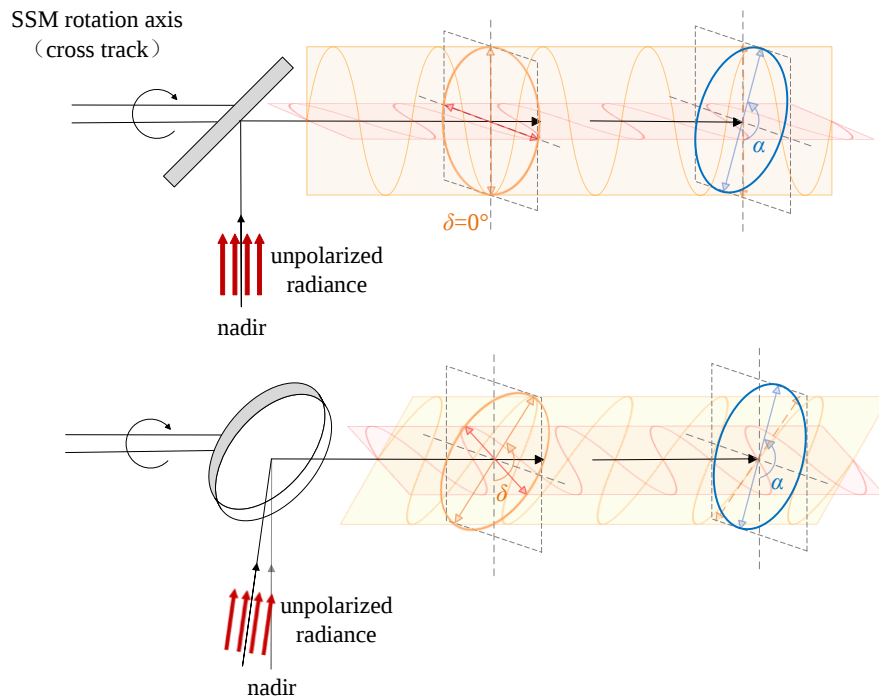


图2 “扫描镜-仪器主光学”组合偏振效应对入射辐射调制的示意图

Fig. 2 “SSM-instrument primary optics” combined polarization modulation of incident radiance

式中, E_{scene} 为入射辐射振幅, τ 表示入射辐射时空相位因子, φ_p, φ_s 分别为入射辐射在扫描镜偏振参考 p 方向与 s 方向的初相位, δ 代表扫描镜的 p 分量方位角(即扫描角), α 代表仪器最大偏振方向的方位角(即仪器偏振角)。由于入射辐射为无偏光束, 其振幅 E_{scene} 并非一个常数, 而是零均值、互不相关的随机振幅, 与光强(辐

亮度) L_{scene} 存在关系 $L_{\text{scene}} = \langle |E_{\text{scene}}|^2 \rangle$,且初相位 φ_p, φ_s 在 $0-2\pi$ 内随机均匀分布。因此,对应的光谱辐射强度 $L_{\delta, \text{scene}}$ 为:

$$L_{\delta, \text{scene}} = \frac{1}{2} L_{\text{scene}} R_p [T_{\max} \cos^2(\delta - \alpha) + T_{\min} \sin^2(\delta - \alpha)] + \frac{1}{2} L_{\text{scene}} R_s [T_{\max} \sin^2(\delta - \alpha) + T_{\min} \cos^2(\delta - \alpha)], \quad (2)$$

式中, R_p, R_s 分别表示扫描镜的 p 方向和 s 方向的反射率, $T_{\max}, T_{\min}$ 分别表示仪器主光学等效最大偏振方向和最小偏振方向的透过率,以上四个参数与反射系数和透过系数存在如下关系: $R_p = r_p^2; R_s = r_s^2; T_{\max} = t_{\max}^2; T_{\min} = t_{\min}^2$ 。

由于扫描镜并非理想反射镜,其反射率 R_p, R_s 不等于1,因此探测器接收的辐射还包括扫描镜自身辐射。定义其 p 方向和 s 方向的发射系数分别为 ξ_p, ξ_s ,发射率分别为 ϵ_p, ϵ_s 。不考虑吸收率,反射率、发射率和发射系数有如下关系: $\epsilon_p = 1 - R_p; \epsilon_s = 1 - R_s; \epsilon_p = \xi_p^2; \epsilon_s = \xi_s^2$ 。类似地,扫描镜自辐射到达探测器的偏振调制光谱辐亮度 $L_{\delta, \text{SSM}}$ 为

$$L_{\delta, \text{SSM}} = \frac{1}{2} L_{\text{SSM}} \epsilon_p [T_{\max} \cos^2(\delta - \alpha) + T_{\min} \sin^2(\delta - \alpha)] + \frac{1}{2} L_{\text{SSM}} \epsilon_s [T_{\max} \sin^2(\delta - \alpha) + T_{\min} \cos^2(\delta - \alpha)]. \quad (3)$$

由于仪器探测的光谱信号 C_δ 由场景入射辐射、扫描镜自辐射以及仪器自辐射三部分共同组成,因此结合式(2)与式(3),得到其表达式为:

$$\begin{aligned} C_\delta &= K_{\text{inst}} (L_{\delta, \text{scene}} + L_{\delta, \text{SSM}} + L_{\text{inst}}) \\ &= \frac{1}{2} L_{\text{scene}} R_p [T_{\max} \cos^2(\delta - \alpha) + T_{\min} \sin^2(\delta - \alpha)] \\ &\quad + \frac{1}{2} L_{\text{scene}} R_s [T_{\max} \sin^2(\delta - \alpha) + T_{\min} \cos^2(\delta - \alpha)] \\ &\quad + \frac{1}{2} L_{\text{SSM}} \epsilon_p [T_{\max} \cos^2(\delta - \alpha) + T_{\min} \sin^2(\delta - \alpha)] \\ &\quad + \frac{1}{2} L_{\text{SSM}} \epsilon_s [T_{\max} \sin^2(\delta - \alpha) + T_{\min} \cos^2(\delta - \alpha)] \\ &\quad + C_{\text{inst}}, \end{aligned} \quad (4)$$

式中, K_{inst} 为仪器响应率,此处为简便计将其视为单位响应率; $L_{\delta, \text{scene}}, L_{\delta, \text{SSM}}, L_{\text{inst}}$ 分别为 δ 扫描角下对应场景辐射、扫描镜自辐射、仪器自辐射的偏振调制分量; L_{scene} 为无偏场景辐射; L_{SSM} 为扫描镜等效黑体辐射; C_{inst} 为仪器自辐射光谱信号。

由于探测光谱信号 C_δ 为仪器对入射辐射响应后的数字量幅度谱[$\text{counts}/\text{cm}^{-1}$],红外高光谱辐射定标模型采用两点定标原理将其映射为具有绝对物理意义的辐亮度值[$\text{mW}/(\text{m}^2 \cdot \text{sr} \cdot \text{cm}^{-1})$],辐射定标基本方程表示如下^[20-22]:

$$L_{\delta, \text{EV}}(\sigma) = [L_{\text{BB}}(\sigma) - L_{\text{CS}}(\sigma)] \text{Re} \left[\frac{C_{\delta, \text{EV}}(\sigma) - C_{\delta, \text{CS}}(\sigma)}{C_{\delta, \text{BB}}(\sigma) - C_{\delta, \text{CS}}(\sigma)} \right] + L_{\text{CS}}(\sigma), \quad (5)$$

式中, $L_{\delta, \text{EV}}$ 为地球场景(Earth View, EV)定标后光谱辐亮度, $L_{\text{BB}}, L_{\text{CS}}$ 分别为星上黑体(Blackbody, BB)、冷空(Cold Space, CS)光谱辐亮度, $C_{\delta, \text{EV}}, C_{\delta, \text{CS}}, C_{\delta, \text{BB}}$ 分别为地球场景、冷空、黑体复数光谱信号。由于方程(5)复数定标方程本身具有相位校正功能,因此定标后光谱辐亮度 $L_{\delta, \text{EV}}$ 为实数(虚部为噪声^[23])。另一方面,由于在轨观测冷空温度极低(约3 K),因此 L_{CS} 值极小,可忽略不计。

在偏振光学中,通常采用偏振度来量化光学器件或光束的偏振强弱,定义扫描镜反射偏振度为 p_r 、仪器主光学透射偏振度为 p_t ,二者可由式(6)进行计算:

$$\begin{aligned} p_r &= \frac{R_p - R_s}{R_p + R_s}; \\ p_t &= \frac{T_{\max} - T_{\min}}{T_{\max} + T_{\min}}. \end{aligned} \quad (6)$$

将式(4)与式(6)代入式(5),得到偏振调制辐射的定标光谱相对理想光谱的一个偏差项,这就是偏振诱导辐射定标偏差 $E_{\delta, \text{EV}}$:

$$\begin{aligned} E_{\delta, \text{EV}} &= L_{\delta, \text{EV}} - L_{\text{EV}} \\ &= p_r p_t \frac{\begin{cases} L_{\text{EV}} \cos 2(\delta_{\text{EV}} - \alpha) - L_{\text{EV}} \cos 2(\delta_{\text{BB}} - \alpha) \\ -L_{\text{SSM}} \left[\cos 2(\delta_{\text{EV}} - \alpha) - \frac{L_{\text{EV}}}{L_{\text{BB}}} \cos 2(\delta_{\text{BB}} - \alpha) - \frac{L_{\text{BB}} - L_{\text{EV}}}{L_{\text{BB}}} \cos 2(\delta_{\text{CS}} - \alpha) \right] \end{cases}}{1 + \frac{L_{\text{BB}} - L_{\text{SSM}}}{L_{\text{BB}}} p_r p_t [\cos 2(\delta_{\text{BB}} - \alpha)] + \frac{L_{\text{SSM}}}{L_{\text{BB}}} p_r p_t \cos 2(\delta_{\text{CS}} - \alpha)}, \end{aligned} \quad (7)$$

式中, δ_{EV} 、 δ_{BB} 、 δ_{CS} 分别为仪器观测地球场景、星上黑体、冷空时的扫描角。考察方程(7)可知,偏振偏差与仪器参数(扫描角 δ 、仪器偏振角 α 、“扫描镜-仪器主光学”组合偏振度 $p_r p_t$)、入射辐射(地球场景辐射 L_{EV} 、扫描镜同温黑体辐射 L_{SSM} 、仪器自发辐射 L_{inst})和光谱通道(波数 σ)均相关。特别地,若 δ_{EV} 、 δ_{BB} 、 δ_{CS} 与 α 夹角均为 45° ,则偏振偏差恰好为零。

联合方程(5)和(7)不难推知,当采用基本辐射定标方程得到 $L_{\delta, \text{EV}}$ 后,只要根据方程(7)计算得到偏差项 $E_{\delta, \text{EV}}$,就可以从减去得到理想的辐亮度定标光谱 L_{EV} 。在方程(7)中,扫描角 δ 可由仪器扫描几何计算得到,仪器偏振角 α 与组合偏振度 $p_r p_t$ 可在地面实验室组件测量阶段测得,也可基于地面实验室黑体扫描观测数据或在轨冷空扫描观测数据进行拟合获得^[16];星上黑体辐射值 L_{BB} 可借助高精度黑体辐射模型计算得到;无偏地球辐射 L_{EV} 可由方程(5)得到的初始地球定标光谱 $L_{\delta, \text{EV}}$ 近似替代。然而, L_{SSM} 难以计算,这是由于扫描镜镜面通常无法布置温度测量点,且处于整个仪器系统光路的最外侧,易受外热流影响,温度难以准确表征。为了规避 L_{SSM} 的建模难题,可以发现当 $L_{\text{SSM}} = L_{\text{BB}}$ 时可以简化方程,且无需对 L_{SSM} 进行独立建模。因此需要在仪器设计阶段将黑体温度、扫描镜以及周围仪器结构保持热平衡状态。具体而言,可在扫描镜支撑框架及镜体背面关键位置布置加热片与恒温器,并布置高精度铂电阻温度传感器用于实时监测温度分布,通过反馈控制网络控制加热功率将扫描镜温度维持在定标黑体温度附近。此时方程(7)可进一步简化为方程(8):

$$E_{\delta, \text{EV}} = p_r p_t \frac{(L_{\text{EV}} - L_{\text{BB}}) [\cos 2(\delta_{\text{EV}} - \alpha) - \cos 2(\delta_{\text{CS}} - \alpha)]}{1 + p_r p_t \cos 2(\delta_{\text{CS}} - \alpha)}. \quad (8)$$

另一方面,由于定标黑体并非理想黑体,其发射率不等于 1 ($\epsilon_{\text{BB}} \neq 1$),因此除自身辐射 L_{BB} 外,还会反射部分来自周围结构的背景辐射,引入额外的辐射不确定度。当达成上述热平衡状态时,可以不需要研发极高发射率的黑体,还可以有效降低由黑体发射率引入的辐射定标不确定度^[24]。

值得注意的是,文献[16]提出的偏振偏差方程认为分母中 $p_r p_t$ 相关项影响很小而进行了简化,忽略了方程(7)中的分母项。然而,在基准载荷高精度辐射定标模型的开发过程中,发现该简化模型与完整物理模型(方程(7))之间存在一个微小的偏差,定量分析表明该偏差最高可达 $\sim 0.004 \text{ K}$ 量级。尽管此偏差值远低于基准载荷 0.1 K 的定标精度阈值,但在建立 SI 基准溯源链路时,须尽可能识别、建模并修正所有已知偏差,任何主动简化都可能引入一个不必要的近似偏差。为此,采用从偏振光学原理推导的完整偏振偏差模型具有原则上的重要性。

2 偏振诱导辐射偏差规律分析

2.1 基准载荷观测几何与偏振特性参数

业务化极轨卫星红外探测器通常采用大角度扫描范围以实现全球无缝覆盖,与之不同,基准载荷需采用 SNO 交叉定标方法对其他仪器实施辐射定标基准传递,为降低大角度情况下复杂大气路径给交叉定标引入的不确定度,同时又要尽可能多地获得 SNO 事件样本,因此基准载荷对地观测仅局限在以星下点为中心的小范围扫描角以内,当前设想的扫描几何如图 3 所示,仪器在 -24.3° — $+24.3^\circ$ 观测了 5 个角度的地球场景。为便于分析,这里将星上黑体温度设为 300 K ,观测角为 98° ,冷空观测角为对称的 -82° 。为研究方程(7)中各

项因素对偏振诱导辐射偏差的影响,针对图3所示的扫描几何,对偏差分布规律开展了模拟分析,其中仪器偏振参数使用实验室测量的平均光谱偏振度 $p_r=0.005$, $p_i=0.1$ 。

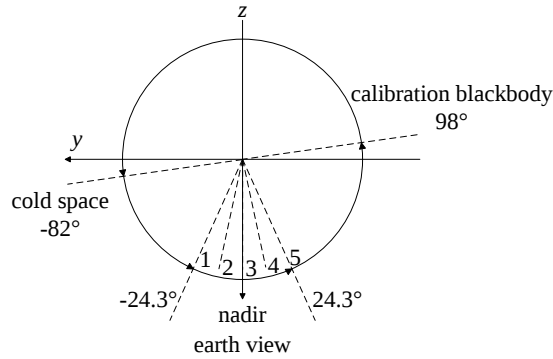


图3 设想的基准载荷扫描几何示意图

Fig. 3 Assumed Benchmark Infrared Sounder scan geometry

2.2 非热平衡条件下“扫描镜-定标黑体”温差对偏振偏差影响分析

根据研究,为了避免 L_{SSM} 建模,要求在仪器设计阶段保持扫描镜与定标黑体的热平衡。为验证热平衡方案的有效性,首先需要考察当二者未能达到热平衡时,“扫描镜-定标黑体”温差对偏振诱导辐射偏差的影响,本节基于完整的偏振偏差表达式(方程(7))展开分析。

由于典型地球场景可等效为温度287 K的黑体,所以考察仪器观测287 K黑体($T_{obs, BB}=287$ K)时的偏振偏差,设扫描镜温度 T_{SSM} 相对黑体温度 $T_{BB}=300$ K上下浮动5 K,每变化1 K考察一次对偏振偏差的光谱分布(以 $T_{SSM}=300$ K标称值时的偏差为基准)。为简化分析,假设仪器主光学偏振角 $\alpha=0^\circ$ 。由于基准载荷定标精度(0.1 K, $k=2$)是采用亮温定义的,因此还需要利用普朗克方程的反函数将光谱辐亮度转换为亮温(Brightness Temperature, BT)。首先分析星下点位置的定标偏差随波数变化,结果如图4所示。由图可见,当扫描镜温度与黑体温度不同时,即便扫描镜不摆动(这里是指向星下点固定位置),也会引入残余定标偏差,且二者温差越大,定标偏差也越大。扫描镜温度低于黑体温度与高于黑体温度时的偏差呈反相。另外,扫描镜-黑体温差引起的偏振偏差还会随波数增加而增大,在星下点处最大定标偏差不超过0.01 K。

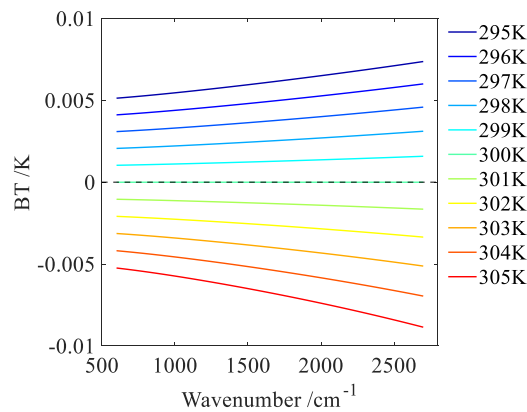


图4 不同“扫描镜-定标黑体”温差下偏振偏差的光谱分布($T_{obs, BB}=287$ K, $\delta=0^\circ$)

Fig 4 Spectral distribution of polarization-induced deviation under different “SSM-BB” temperature differences ($T_{obs, BB}=287$ K, $\delta=0^\circ$)

进一步分析偏振偏差随扫描角的变化规律,这里在600–2700 cm^{-1} 光谱范围内选取702 cm^{-1} 、1041 cm^{-1} 、1500 cm^{-1} 、2300 cm^{-1} 四个通道进行考察,结果如图5所示,图中两条竖虚线对应基准载荷对地观测角范围。

由图可知,当 $\alpha=0^\circ$ 时,定标偏差最大值位于星下点位置,且关于星下点对称。随着扫描镜-黑体温差的增大,定标偏差也将增大。并且还可以发现,对于等效为287 K黑体的典型地球观测场景,扫描镜-黑体温差

引入的定标偏差总体较小,上述四个通道的定标偏差均不超过0.01 K。

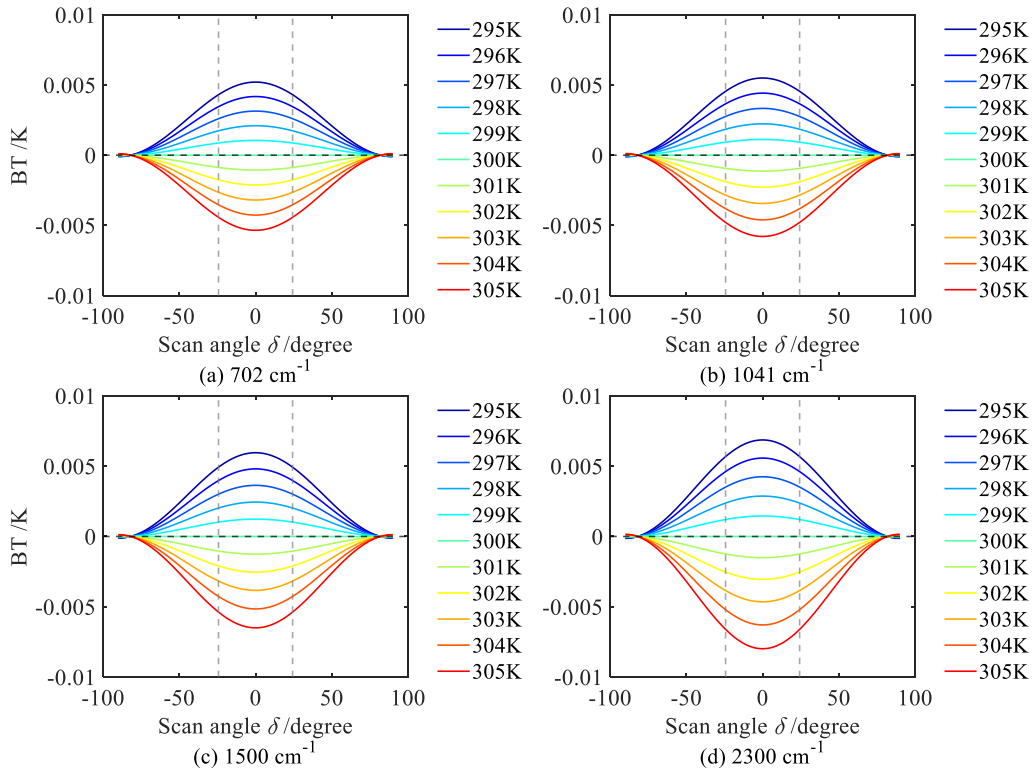


图5 “扫描镜-定标黑体”温差引入的定标偏差随扫描角的变化 ($T_{\text{obs, BB}}=287\text{ K}$)。(a) 702 cm^{-1} ; (b) 1041 cm^{-1} ; (c) 1500 cm^{-1} ; (d) 2300 cm^{-1}

Fig. 5 The variation of deviation induced by “SSM-BB” temperature differences with scan angle ($T_{\text{obs, BB}}=287\text{ K}$). (a) 702 cm^{-1} ; (b) 1041 cm^{-1} ; (c) 1500 cm^{-1} ; (d) 2300 cm^{-1}

然而,当仪器观测低温场景时,定标偏差将显著增大。图6展示了仪器观测210 K低温黑体时星下点定标偏差随波数的变化,图中浅色虚线规定了 $\pm 0.1\text{ K}$ 基准载荷定标精度上下阈值限。由图可见,随着波数增大,定标偏差显著增大,尤其对于短波波段,“扫描镜-黑体”温差超过1 K,引起的偏振偏差在 $2500\text{--}2700\text{ cm}^{-1}$ 就已超出0.1 K阈值范围,若温差增大至 $\pm 5\text{ K}$,偏差可达0.9 K。图7展示了观测210 K黑体时上述四个通道的定标偏差随扫描角的变化规律,对 702 cm^{-1} 通道, $\pm 5\text{ K}$ 扫描镜温差引起的定标偏差约0.01 K;对 1041 cm^{-1} 通道, $\pm 5\text{ K}$ 扫描镜温差引起的定标偏差最大约0.02 K;对 1500 cm^{-1} 通道, $\pm 5\text{ K}$ 扫描镜温差引起的定标偏差最大约0.05 K;对 2300 cm^{-1} 通道, $\pm 1\text{ K}$ 扫描镜温差引起的定标偏差已达到约0.07 K, $\pm 5\text{ K}$ 扫描镜温差引起的定标偏差最大约0.3 K,均显著超过了基准载荷要求的定标精度。

由分析可知,在非热平衡条件下,存在由扫描镜-黑体温差引入的额外偏振偏差,且由于扫描镜温度无法直接测量或进行精确建模,此偏差难以通过后续数据处理进行订正。因此,有必要将扫描镜、定标黑体与仪器周围结构置于同一热平衡环境中,从而规避了扫描镜温度的建模难题,降低了额外偏差,并将偏振偏差表达式简化为方程(8)。

2.3 热平衡条件下偏振偏差变化规律分析

在扫描镜-定标黑体热平衡条件下,考察仪器观测不同亮温黑体时偏振诱导辐射偏差随亮温变化的规律,目标黑体温度范围设置为210 K-320 K以覆盖实际观测地球场景时的辐射动态范围,并按10 K为间隔等分为12个能级。首先分析仪器主光学偏振角 $\alpha=0^\circ$ 的特殊情况。固定扫描角为星下点位置($\delta=0^\circ$),利用方程(8)计算不同黑体亮温偏振偏差的光谱分布,结果如图8所示。由图可见,随着黑体亮温降低,偏振偏差逐渐增大,这就说明仪器观测低温场景时比观测高温场景时偏振偏差更为显著。另一方面,随着波数增加(波长变短),偏振偏差也逐渐增大。这是因为根据普朗克黑体辐射规律,辐射峰值温度变化引起短波端的辐射变化较小,反之,相同辐射变化量在短波端引起的温度变化量也较峰值波长处更大。由此可知,随着场

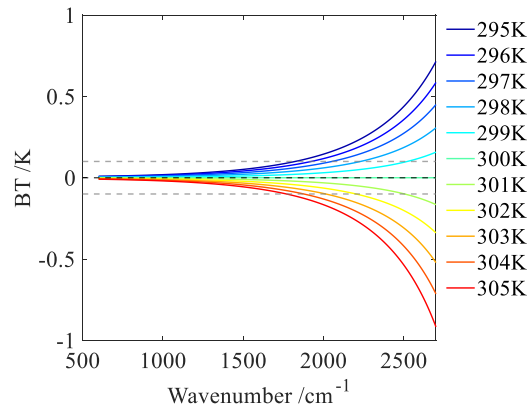


图6 不同“扫描镜-定标黑体”温差下偏振偏差的光谱分布 ($T_{\text{obs,BB}}=210\text{ K}$, $\delta=0^\circ$)

Fig 6 Spectral distribution of polarization-induced deviation under different “SSM-BB” temperature differences ($T_{\text{obs,BB}}=210\text{ K}$, $\delta=0^\circ$)

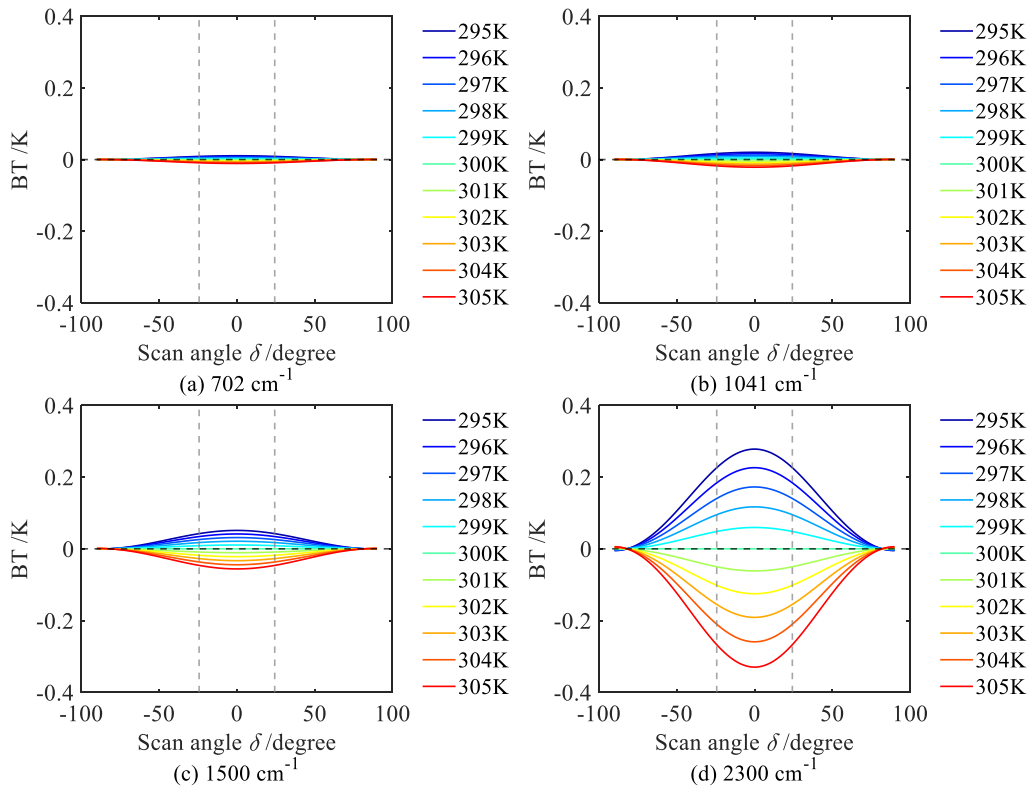


图7 “扫描镜-定标黑体”温差引入的定标偏差随扫描角的变化 ($T_{\text{obs,BB}}=210\text{ K}$)。 (a) 702 cm^{-1} ; (b) 1041 cm^{-1} ; (c) 1500 cm^{-1} ; (d) 2300 cm^{-1}

Fig. 7 The variation of deviation induced by “SSM-BB” temperature differences with scan angle ($T_{\text{obs,BB}}=210\text{ K}$). (a) 702 cm^{-1} ; (b) 1041 cm^{-1} ; (c) 1500 cm^{-1} ; (d) 2300 cm^{-1}

景辐射值的减小(场景亮温降低或波数增加),偏振调制引起的辐射值偏差也将减小,但以亮温为单位进行考察时偏差将逐渐增大。

接着考察偏振偏差随扫描角的变化,选取上述四个通道进行分析,结果如图9所示。由图可见,当仪器偏振角 $\alpha=0^\circ$ 时,各通道偏振偏差均在星下点位置出现极大值,且关于星下点对称分布。随着场景温度降低和波数增加,偏振偏差迅速增加。特别对于210 K低温观测黑体,长波 702 cm^{-1} 通道最大偏差约为0.14 K,到 1041 cm^{-1} 通道约为0.22 K, 1500 cm^{-1} 通道约为0.43 K,而对于短波 2300 cm^{-1} 通道却已超过1.5 K。

在上述分析中,仪器主光学偏振角设为 $\alpha=0^\circ$ 的特殊情况,但实际上,分束器、分色片、反射镜等仪器主

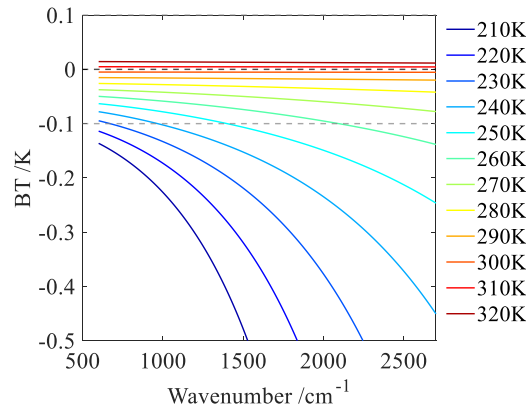

 图8 不同亮温观测场景下偏振偏差的光谱分布($\delta=0^\circ$)

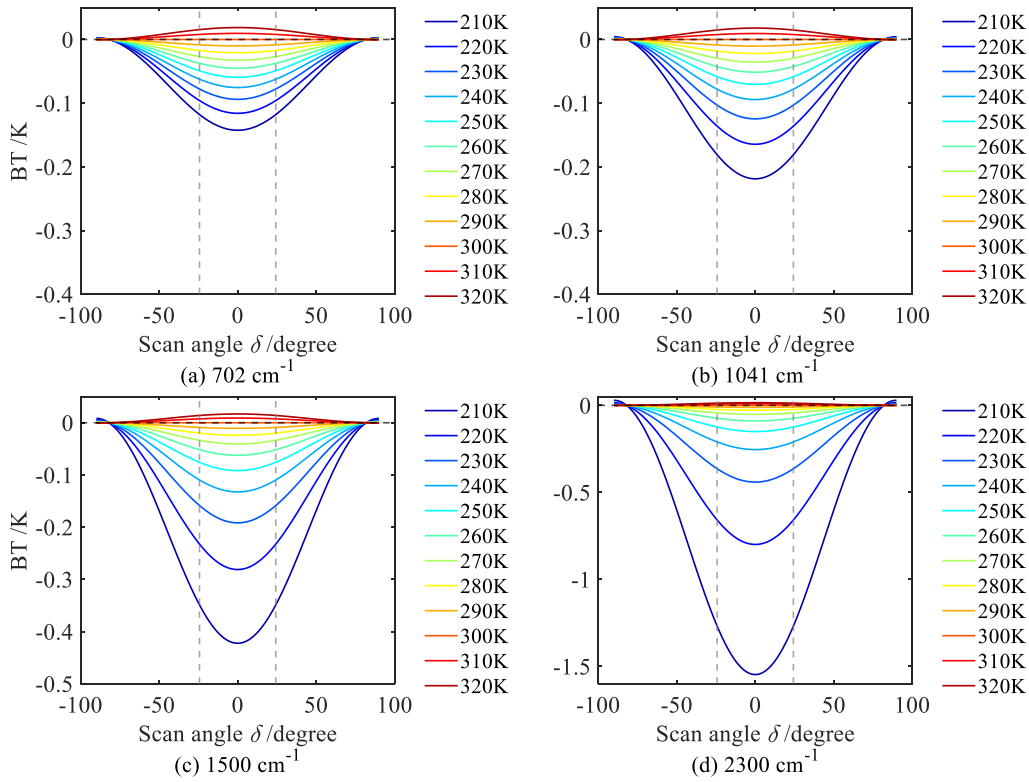
 Fig. 8 Spectral distribution of polarization-induced deviation under different brightness temperature scenes ($\delta=0^\circ$)

 图9 不同光谱通道的偏振偏差随场景亮温和扫描角 δ 的变化规律。(a)702 cm⁻¹; (b)1041 cm⁻¹; (c)1500 cm⁻¹; (d)2300 cm⁻¹

 Fig. 9 Variation of polarization-induced deviation with brightness temperature and scan angle δ in different spectral channels. (a) 702 cm⁻¹; (b) 1041 cm⁻¹; (c) 1500 cm⁻¹; (d) 2300 cm⁻¹

光学器件总会引入一定的偏振基态旋转,且安装工艺也很难保证 α 为理想的 0° ,因此还需考察不同仪器偏振角 α 条件下的偏振偏差分布特点。这里固定通道为1500 cm⁻¹,仪器 α 分别设为 0° 、 30° 、 60° 、 90° ,对应偏振偏差分布如图10所示。由图可见当 $\alpha \neq 0^\circ$ 时,偏振偏差随扫描角的变化曲线不再围绕星下点对称分布,极值位于 $\alpha - n \cdot 90^\circ$ (n 为整数)处。随着 α 从 0° 到 90° 不断变化,各黑体温度下的偏振偏差出现相移现象, $\alpha = 0^\circ$ 时的偏差极性在 $\alpha = 90^\circ$ 时变为反相。

3 基于黑体定标试验的偏振诱导偏差订正检验

在上述偏振诱导辐射偏差规律分析的基础上,采用变温黑体定标试验对偏振偏差订正效果进行检验。对于星载红外遥感仪器,在实验室真空罐利用变温黑体开展的辐射定标试验是测试仪器性能和检验辐射定

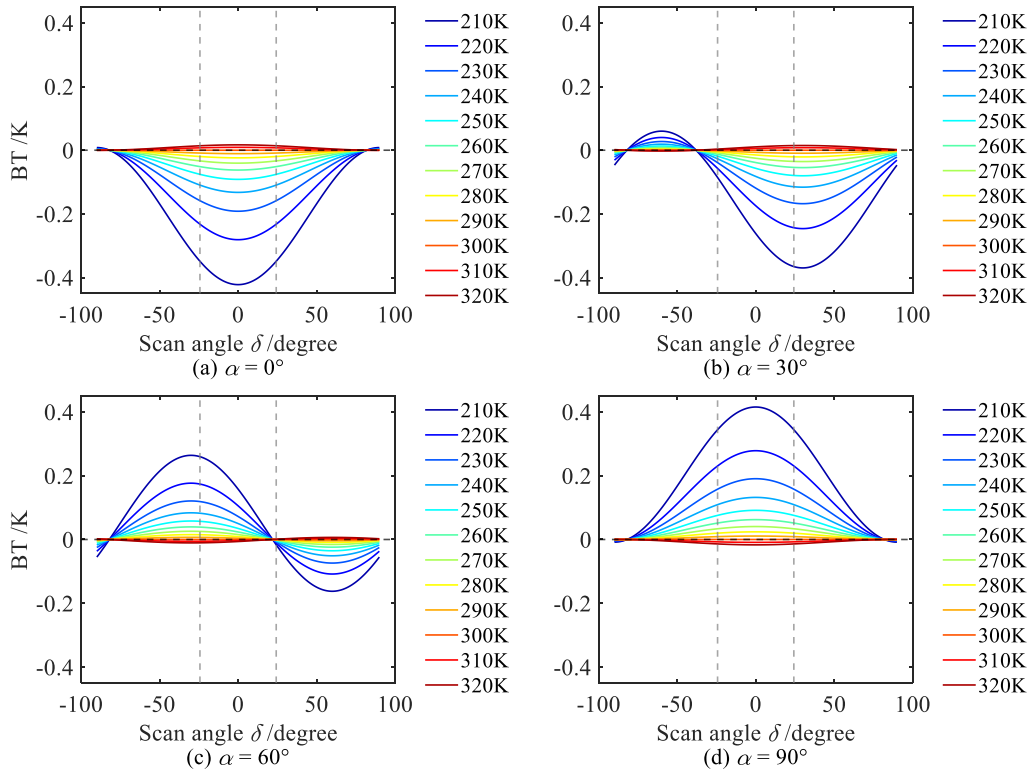


图10 不同仪器偏振角 α 情况下的偏振偏差随扫描角分布。(a) $\alpha=0^\circ$;(b) $\alpha=30^\circ$;(c) $\alpha=60^\circ$;(d) $\alpha=90^\circ$
 Fig. 10 Distribution of polarization-induced deviation with scan angle under different instrument polarization angle α . (a) $\alpha=0^\circ$;
 (b) $\alpha=30^\circ$; (c) $\alpha=60^\circ$; (d) $\alpha=90^\circ$

标算法的重要手段。由于变温黑体光谱辐射量可以精确计算,因此可以用于模拟仪器在轨观测地球场景并作为检验偏振偏差订正效果的可靠真值参考源。由于基准载荷无法采用单一红外探测器来响应 $600\text{--}2700\text{ cm}^{-1}$ 这样的宽光谱波段,实际是由长波、中波、短波三个探测器分别探测 $600\text{--}1150\text{ cm}^{-1}$ 、 $1150\text{--}2000\text{ cm}^{-1}$ 、 $2000\text{--}2700\text{ cm}^{-1}$ 三个谱段拼接而成。在光路中则采用两个分色片将宽光谱红外辐射分别引入三个探测通道,由于分色片对不同探测通道的偏振基态旋转不一致,仪器偏振角 α 在三个波段分别为 115.4° 、 116.2° 、 91.8° 。为覆盖地球辐射亮温范围,变温黑体温度 $T_{\text{obs,BB}}$ 分别设为 210 K、230 K、256 K、287 K、310 K。

3.1 非热平衡条件下偏振偏差订正效果

由第二章理论分析可知,在非热平衡条件下,扫描镜-定标黑体温差将在偏振偏差订正过程中引入一个残余定标偏差,尤其对于低温场景和短波波段十分敏感。因此这里考察变温黑体 210 K、扫描镜-黑体温差 5 K 时,偏振偏差订正前后的定标偏差。其中,变温黑体辐射值由发射率 and 对应温度计算得到;基于黑体观测数据,利用方程(5)计算得到偏振偏差订正前的黑体定标光谱,利用方程(5)与(8)计算偏差订正后的定标光谱,将订正前后的定标光谱与真值光谱转为亮温光谱后进行差减得到对应的定标偏差(单位 K)。结果如图 11 所示,其中,子图(a)为黑体辐射定标光谱,子图(b)为偏振偏差订正前的亮温偏差,子图(c)为偏振偏差订正后亮温偏差。各图的背景浅色实线为定标偏差样本,深色点实线为对样本平均后的结果,竖向虚线规定了长波红外、中波红外、短波红外的范围,横向虚线规定了 0.1 K 基准载荷定标精度阈值。

由图 11(b)与图 11(c)可见,经偏振偏差订正后,由仪器偏振效应引入的定标偏差显著减小,长波、中波、短波订正量分别为 0.15 K、0.4 K、3 K。然而,由于存在扫描镜-黑体温差,订正后的定标光谱仍残留了由该温差引入的额外定标偏差,且该偏差随着波数的增大而增大,其中长波波段定标偏差整体小于 0.1 K 定标精度阈值,最高约 0.05 K;中波 $1150\text{ cm}^{-1}\text{--}1700\text{ cm}^{-1}$ 波段定标偏差总体小于 0.1 K, $1700\text{ cm}^{-1}\text{--}2000\text{ cm}^{-1}$ 波段则存在大量通道定标偏差超过 0.1 K;短波 $2000\text{ cm}^{-1}\text{--}2700\text{ cm}^{-1}$ 波段受温差影响最为严重,所有通道的残余定标偏差均大于 0.1 K,且随波数增大而迅速增大,最大值已超 1 K。

上述分析表明,若扫描镜与定标黑体之间存在温差,即使对偏振偏差进行了订正,仍将引入显著的定标

偏差,尤其在中短波波段已严重超出基准载荷 0.1 K 的定标精度要求。这就表明,在工程实践中,实现扫描镜与定标黑体热平衡尤为重要,能够有效避免上述偏差,从而提升基准载荷的定标精度。

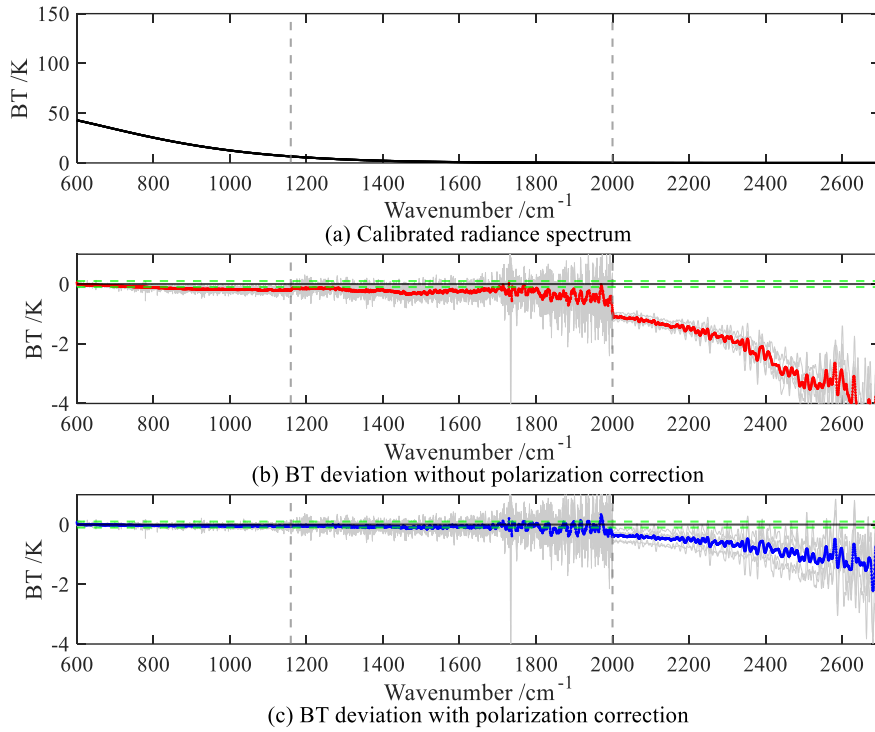


图 11 非热平衡条件下 600–2700 cm^{-1} 光谱范围的黑体定标偏差 ($T_{\text{obs, BB}}=210 \text{ K}$)。(a) 黑体辐射定标光谱;(b) 偏振偏差订正前光谱残差;(c) 偏振偏差订正后光谱残差

Fig. 11 Blackbody calibrated BT deviation over the 600–2700 cm^{-1} spectral band without thermal equilibrium ($T_{\text{obs, BB}}=210 \text{ K}$). (a) Calibrated radiance spectrum; (a) BT deviation without polarization correction; (b) BT deviation with polarization

3.2 热平衡条件下全光谱范围偏振偏差订正效果

由第二章分析可知,偏振偏差对低温场景较为敏感,所以这里主要考察热平衡条件下变温黑体温度为 210 K、256 K、287 K 时的订正效果,结果如图 12–图 14 所示。其中,子图(a)为黑体辐射定标光谱,子图(b)为偏振偏差订正前的亮温偏差,子图(c)为偏振偏差订正后亮温偏差。各图的背景浅色实线为定标偏差样本,深色点实线为对样本平均后的结果,竖向虚线规定了长波红外、中波红外、短波红外的范围,横向虚线规定了 0.1 K 基准载荷定标精度阈值。

由图 12–图 14 的子图(b)可见,若不对黑体定标光谱进行任何处理,偏振效应将在全光谱通道引入一定的定标偏差,且随着黑体温度降低,偏振偏差越显著;随着波数的增大,偏振偏差越大。如图 12(b)所示,黑体温度为 287 K 时,偏振偏差在全光谱通道较小且分布均匀,长波与中波波段的偏振偏差最大约 0.01 K,短波波段偏振偏差最大约 0.02 K。由图 13(b)可见,黑体温度为 256 K 时,偏振偏差逐渐增大,在三个波段分别达到 0.03 K、0.04 K、0.13 K。而对于图 14(b)所示的 210 K 黑体,即便是对偏振效应最不敏感的长波红外波段,大于 850 cm^{-1} 的偏振偏差也已超过 0.1 K,短波波段的偏差则随着波数增大而急剧增大,最大值已达到 3 K。

偏振偏差订正的结果分别如图 12(c)–图 14(c)所示,由图可见,287 K 黑体对应的偏振偏差虽然较小,订正后各波段的偏差进一步减小至 0 K;对于 256 K 黑体,三个波段订正后的偏差整体达到 0.01 K;对于 210 K 黑体,三个波段的偏差订正量分别为 0.14 K、0.4 K、3 K,订正后剩余三个波段的偏差整体也达到了 0.01 K 水平。须注意,偏差订正后在中波、短波部分通道出现偏差偏大,甚至超出 0.1 K 的现象。根据研究可知^[21],这是由与辐射定标过程中由定标模型与仪器响应率(与光谱通道相关)共同引起的一种系统性偏差,各波段仪器光谱响应率以及黑体辐亮度(以 287 K 黑体为例)如图 15 所示。其中,粗实线(左轴)为黑体辐亮度曲线,图中黑色细实线(右轴)表示归一化仪器响应率。可见在 600–2700 cm^{-1} 光谱范围内,黑体辐亮度自然信号

随波数增大逐渐减小,对于 $600\text{--}1150\text{ cm}^{-1}$ 长波波段,自然信号较大,仪器光谱响应率对辐射定标偏差的影响较低;到了 $1150\text{--}2000\text{ cm}^{-1}$ 中波波段,黑体辐射信号迅速减小,而光谱响应率(主要由于红外探测器响应特性)在 $1500\text{--}2000\text{ cm}^{-1}$ 也形成整体性的降低,导致辐射定标偏差也同步整体增大;而到了 $2000\text{--}2700\text{ cm}^{-1}$ 短波波段,黑体辐射自然信号本身已经很低,且光谱响应率在 $2400\text{--}2700\text{ cm}^{-1}$ 也呈现整体性衰减,最终也导致辐射定标偏差增大。综合分析图 12-图 14,当观测场景能量逐渐减小(如黑体温度从 287 K 降低到 210 K),仪器光谱响应率变化对辐射定标的影响也越来越突出,甚至已经超出偏振诱导产生的偏差,文献[21]对该问题已经有所研究,此处不再赘述。

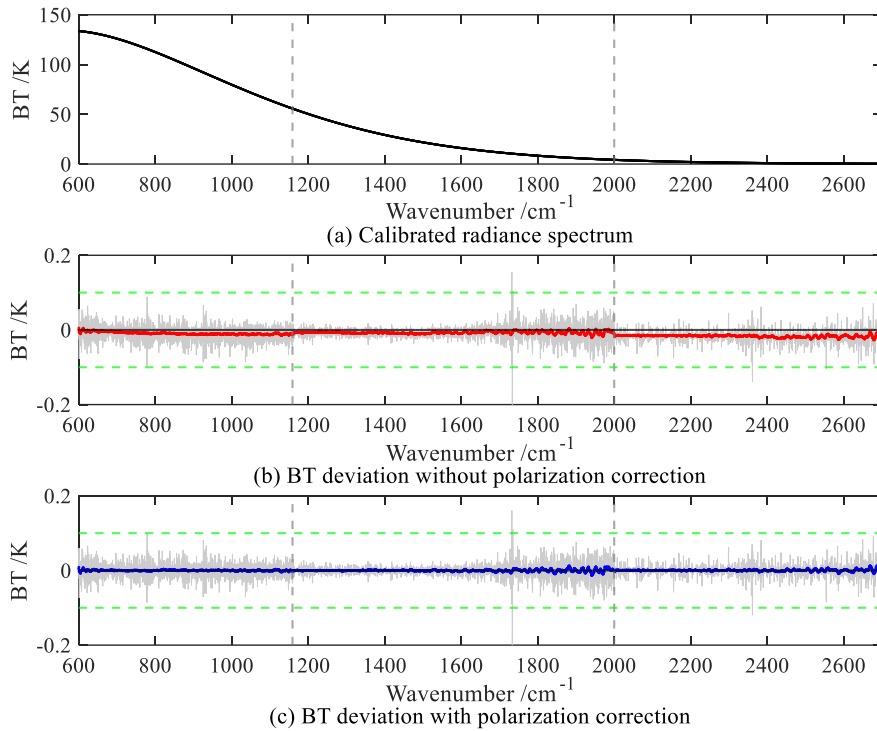


图 12 热平衡条件下 $600\text{--}2700\text{ cm}^{-1}$ 光谱范围的黑体定标偏差 ($T_{\text{obs, BB}}=287\text{ K}$)。(a)黑体辐射定标光谱;(b)偏振偏差订正前光谱残差;(c)偏振偏差订正后光谱残差

Fig. 12 Blackbody calibrated BT deviation over the $600\text{--}2700\text{ cm}^{-1}$ spectral band with thermal equilibrium ($T_{\text{obs, BB}}=287\text{ K}$). (a) Calibrated radiance spectrum; (a) BT deviation without polarization correction; (b) BT deviation with polarization correction

3.3 不同扫描角偏振偏差订正效果

为考察不同扫描角偏振偏差的订正效果,图 16 展示了各温度黑体随扫描角变化的订正前偏振偏差,其中浅色实线为由方程(8)计算的偏振偏差理论值,方块线代表各扫描角的数值定标偏差,两条竖虚线对应基准载荷对地观测角范围。由图可见,目标黑体定标光谱计算的数值偏差与偏振偏差计算结果高度一致,二者在大小及随扫描角的变化趋势上呈现良好吻合。由于实际仪器偏振角 α 与扫描几何的配置关系,长波与中波的偏差最大值出现在约 25° 扫描角,短波的偏差最大值出现在约星下点位置。并且在 $-24.3^\circ\text{--}+24.3^\circ$ 扫描过程中,长波与中波的偏振偏差将随扫描角增大而逐渐增大,而在短波呈现随扫描角增大呈先增大后减小的趋势。分析图 16(a)–(d)可知,偏振偏差随着黑体温度降低和波数增加而增大,特别对于 210 K 低温黑体, 702 cm^{-1} 通道的偏振偏差最大约 0.08 K ; 1041 cm^{-1} 通道的偏振偏差最大约 0.26 K ; 1500 cm^{-1} 通道的偏振偏差最大约 0.37 K ;短波 2300 cm^{-1} 通道的偏振偏差最为显著,已达到 1.7 K 。

图 17 显示的是偏振偏差订正后,不同温度黑体以及所选通道在各扫描角的定标偏差。由图 16(a)–(d)可见,订正后所有黑体在四个通道的定标偏差均小于 0.1 K ,最大残余偏差分别为 0.007 K 、 0.03 K 、 0.03 K 、 0.06 K 。

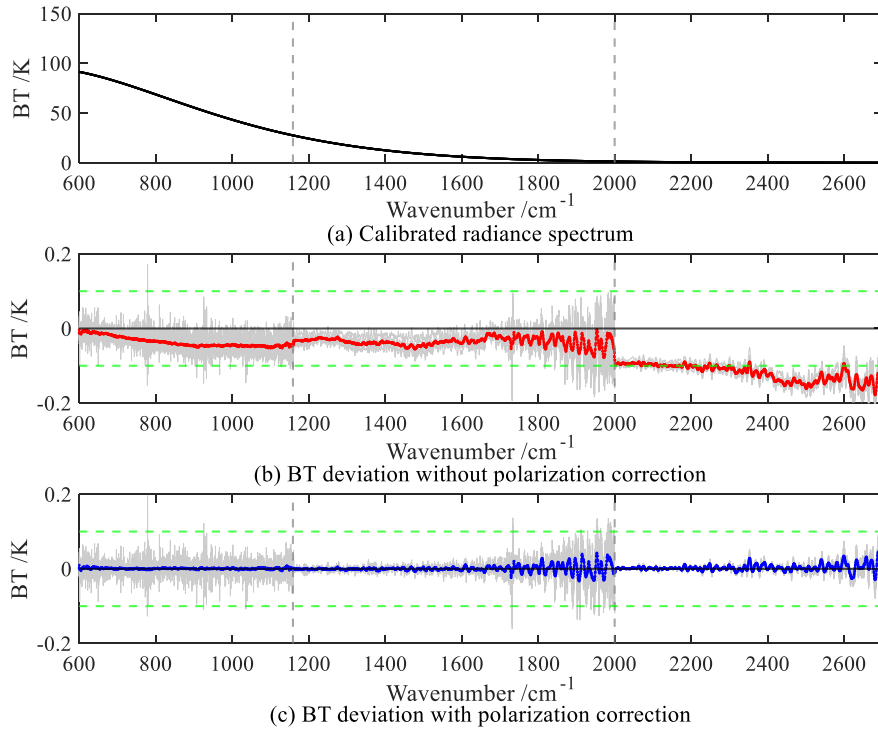


图 13 热平衡条件下 600-2700 cm⁻¹ 光谱范围的黑体定标偏差 ($T_{\text{obs, BB}}=256$ K)。(a) 黑体辐射定标光谱; (b) 偏振偏差订正前光谱残差; (c) 偏振偏差订正后光谱残差

Fig. 13 Blackbody calibrated BT deviation over the 600-2700 cm⁻¹ spectral band with thermal equilibrium ($T_{\text{obs, BB}}=256$ K). (a) Calibrated radiance spectrum; (a) BT deviation without polarization correction; (b) BT deviation with polarization correction

4 在轨运行阶段偏振效应不确定度预测

4.1 不确定度分析方法

根据国际计量学的基本准则,任何测量过程都受到仪器、环境及方法等固有局限性的制约,测量结果无法精确等于被测量的“真值”,只能是对真值的一个最佳估计。该估计值落在一个以特定区间为中心的范围,而不确定度正是对这一区间宽度的严格表征。因此,在偏振偏差订正效果的评估中,唯有对订正结果本身的辐射定标不确定度(Radiometric uncertainty, RU)进行量化,分析才具备计量学意义上的完备性。

不确定度的量化依赖于一套严谨的数学工具,即不确定度传递分析。根据国际《测量不确定度表示指南》(the Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement, GUM),若最终测量结果 y (此处为订正后的光谱辐射亮度) 是通过确定的函数关系 $y=f(x_1, x_2, \dots, x_N)$ 从 N 个输入量 x_i 计算得出,那么 y 的不确定度便由各 x_i 的不确定度及相关性共同决定:

$$u_c^2(y) = \sum_{i=1}^N \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \right)^2 u^2(x_i) + \sum_{i=1}^N \sum_{j=1, j \neq i}^N \frac{\partial f}{\partial x_i} \frac{\partial f}{\partial x_j} u(x_i, x_j), \quad (9)$$

式中, $u_c(y)$ 表示测量结果的标准差估计, f 表示测量值 y 与输入估计值 x_i 之间的函数关系(在辐射定标不确定度分析中, f 即为定标方程(5)), $u(x_i)$ 是各 x_i 对应的标准不确定度, $u(x_i, x_j)$ 为 x_i 与 x_j 的估计协方差,而偏导数 $\partial f / \partial x_i$ 通常称为敏感系数。若各不确定度相互独立,则 $u(x_i, x_j) = 0$, 此时方程(9)可简化为:

$$u_c^2(y) = \sum_{i=1}^N \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \right)^2 u^2(x_i). \quad (10)$$

该方法通常被称为不确定度传播律,在将估计标准偏差的不确定度分量进行合成时,常称作“平方和根(Root sum of square, RSS)法”。合成标准不确定度 u_c 是被广泛采用的不确定度量,然而在实际应用中,通常需要一个能以较高概率包含被测量真值的区间。为此,引入扩展不确定度 $U = k \times u_c$, 其中 k 为包含因

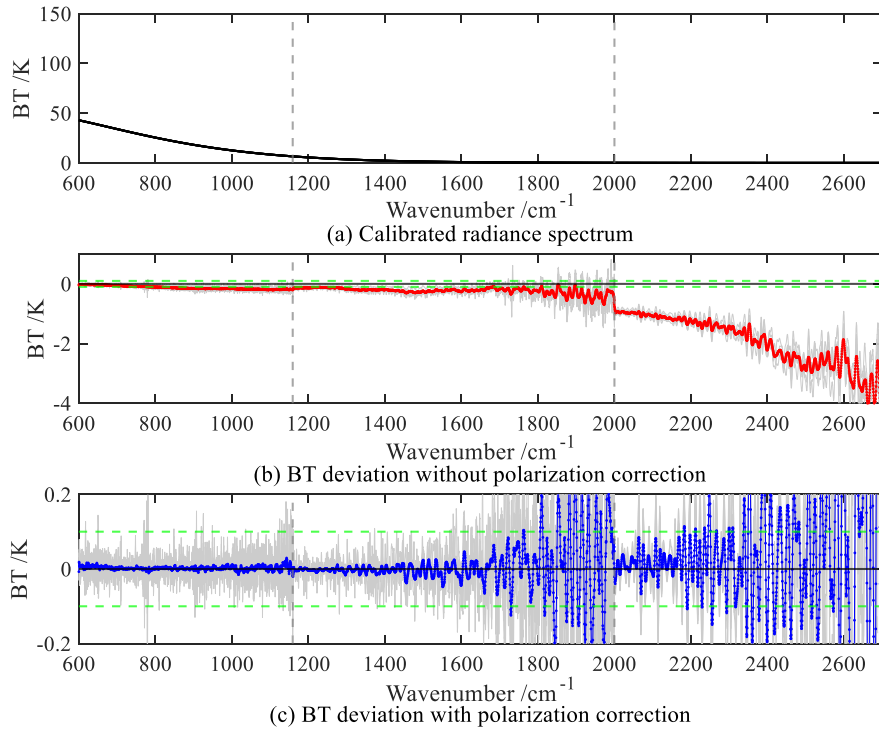


图 14 热平衡条件下 600-2700 cm^{-1} 光谱范围的黑体定标偏差 ($T_{\text{obs, BB}}=210\text{ K}$)。(a) 黑体辐射定标光谱; (b) 偏振偏差订正前光谱残差; (c) 偏振偏差订正后光谱残差

Fig. 14 Blackbody calibrated BT deviation over the 600-2700 cm^{-1} spectral band with thermal equilibrium ($T_{\text{obs, BB}}=210\text{ K}$). (a) Calibrated radiance spectrum; (a) BT deviation without polarization correction; (b) BT deviation with polarization correction

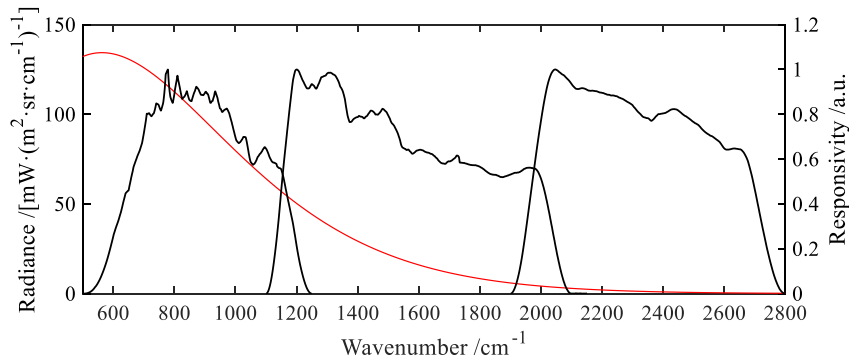


图 15 基准载荷仪器响应率与 287 K 黑体辐亮度

Fig. 15 Benchmark Infrared Sounder responsivity with respect to the radiance of 287 K blackbody

子。当误差分布接近正态时, $k=2$ 给出的区间具有约 95% 的置信水平(常表述为“ $2-\sigma$ ”不确定度), 而 $k=3$ 则对应高于 99% 的置信水平(“ $3-\sigma$ ”不确定度)。

4.2 偏振偏差相关参数不确定度贡献量

为评估基准载荷在轨运行阶段偏振效应引起的辐射定标不确定度, 基于变温黑体试验, 采用扰动分析法进行了分析。偏振相关贡献量各自的不确定度如表 1 所示, 其中定标黑体温度 T_{BB} 与扫描镜温度 T_{SSM} 不确定度由实验室测得; 冷空可视为不确定度为零的稳定定标源 ($u(T_{\text{CS}})=0$); 仪器偏振角 α 不确定度综合了光学元件安装角度偏差、光路准直偏差、测量噪声的影响; 组合偏振度 p_p 不确定度则考虑了仪器在轨运行阶段光学涂层微小变化、测量噪声等因素。以各参数标称值为基准, 分别施加 $\pm 1-\sigma$ 扰动, 计算其传递至偏振偏差订正前后辐射定标结果的系统不确定度。各参数间相互独立, 总合成标准不确定度可由各独立贡献的平方和根合成:

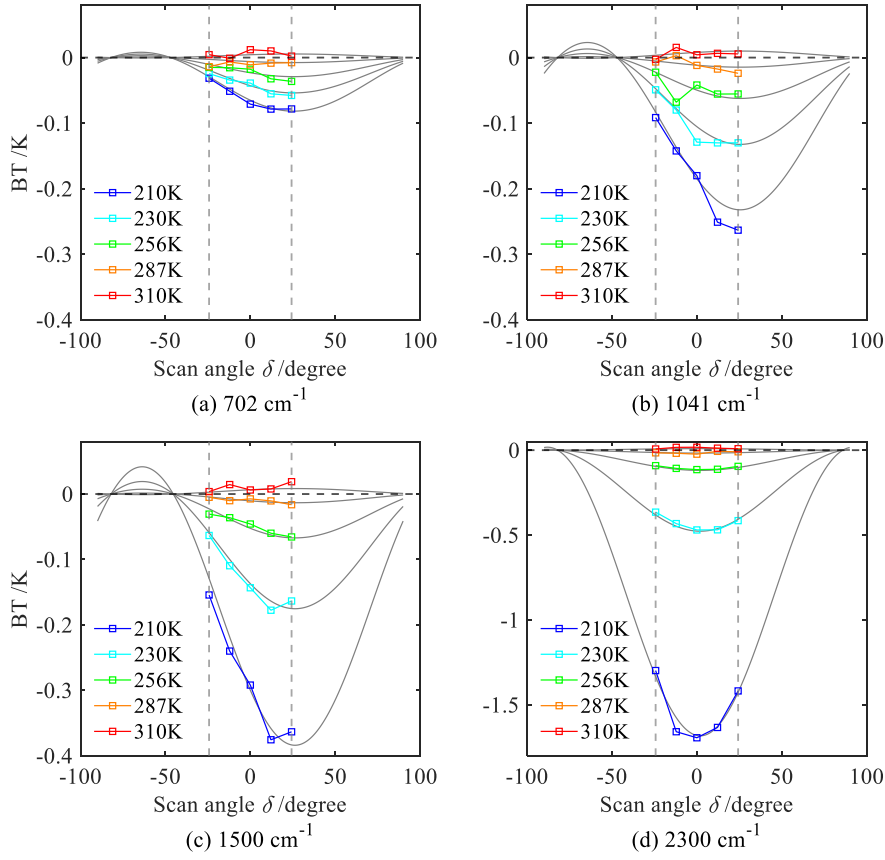

 图 16 各扫描角的订正前黑体定标偏差。(a)702 cm⁻¹; (b)1041 cm⁻¹; (c)1500 cm⁻¹; (d)2300 cm⁻¹

 Fig. 16 Blackbody calibrated BT deviation without polarization correction in every scan angle. (a) 702 cm⁻¹; (b) 1041 cm⁻¹; (c) 1500 cm⁻¹; (d) 2300 cm⁻¹

$$\begin{aligned}
 u_c^2(L_{EV}) = & \left(\frac{\partial L_{EV}}{\partial T_{BB}} \right)^2 u^2(T_{BB}) + \left(\frac{\partial L_{EV}}{\partial T_{SSM}} \right)^2 u^2(T_{SSM}) + \left(\frac{\partial L_{EV}}{\partial T_{CS}} \right)^2 u^2(T_{CS}) \\
 & + \left(\frac{\partial L_{EV}}{\partial \alpha} \right)^2 u^2(\alpha) + \left[\frac{\partial L_{EV}}{\partial (p_r p_t)} \right]^2 u^2(p_r p_t).
 \end{aligned} \quad (11)$$

偏振相关各参数传递至辐射定标结果的不确定度以及合成不确定度($k=2$)如图 18-图 20 所示,图中依次展示了基准载荷观测 287 K、256 K、210 K 黑体场景时的不确定度,图(a)为偏振偏差订正前的不确定度,图(b)为偏差订正后的不确定度。由图 18(b)-图 20(b)可知,经偏差订正后,系统不确定度得到了很大程度的降低。进一步分析可知,基准载荷在轨运行阶段时(采用冷空作为低温定标源),由定标黑体温度 T_{BB} 引起的系统不确定度将随观测场景亮温 C_{EV} 的降低而降低,而扫描镜温度 T_{SSM} 、仪器偏振角 α 以及组合偏振度引起的 $p_r p_t$ 将随场景亮温的降低而增大。这一规律可由 T_{BB} 的不确定度敏感度系数(方程(12))及系统不确定度计算结果得到印证。对图 18(b)所示的 287 K 黑体场景,经偏差订正后系统不确定度主要来自于 T_{BB} ,在全波段分布较为平均,约 0.03 K;偏振参数引起的不确定度较小,其中短波波段 T_{SSM} 较为显著,最高约 0.01 K,总不确定度最高约 0.04 K。对图 19(b)所示的 256 K 黑体场景,长波与中波波段的的不确定度同样主要来自 T_{BB} ,约 0.02 K,而在短波波段 T_{SSM} 与 α 引起的不确定度较为显著,分别最高可达 0.07 K、0.08 K,三波段总不确定度基本小于 0.1 K。对图 20(b)所示的 210 K 黑体场景, T_{BB} 引起的系统不确定度约 0.014 K, T_{SSM} 引起的不确定度最为显著, α 与 $p_r p_t$ 也同样是主导因素,特别对于短波波段,三者各自引起的系统不确定度可超过 0.5 K,小于 1700 cm⁻¹ 的光谱通道合成不确定度小于 0.1 K。综上可见,随着场景亮温降低与波数的增加,仪器偏振效应逐渐超过定标黑体温度测量不确定度,成为系统辐射定标不确定度的主导因素。

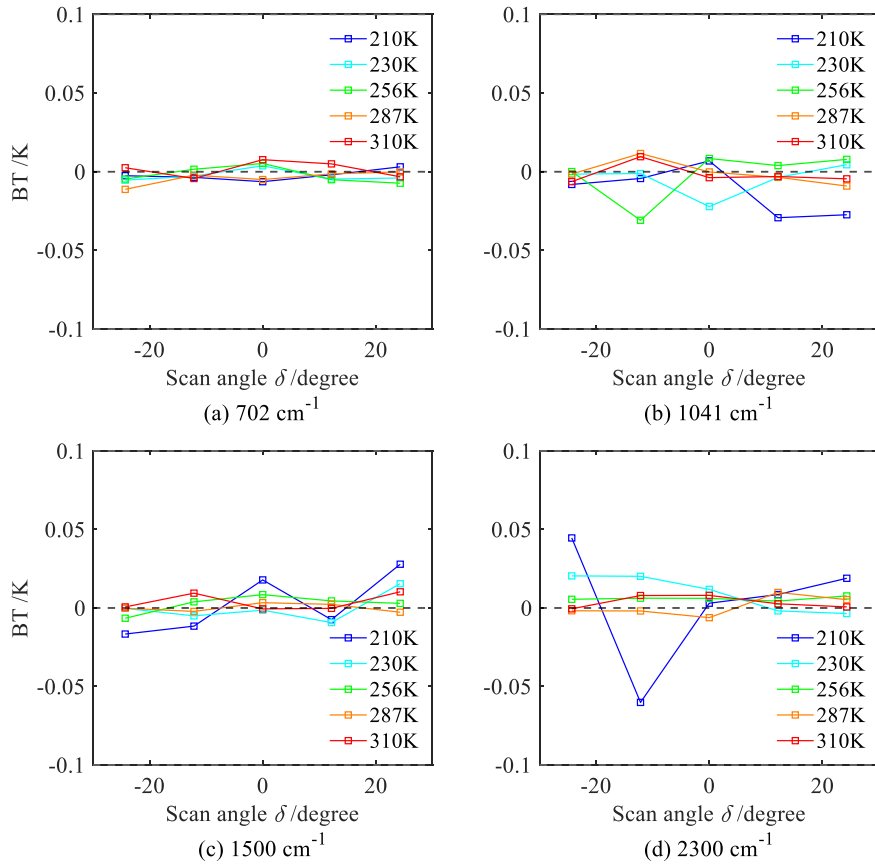


图 17 各扫描角的订正后黑体定标偏差。(a)702 cm⁻¹; (b)1041 cm⁻¹; (c)1500 cm⁻¹; (d)2300 cm⁻¹
 Fig. 17 Blackbody calibrated BT deviation with polarization correction in every scan angle. (a) 702 cm⁻¹; (b) 1041 cm⁻¹; (c) 1500 cm⁻¹; (d) 2300 cm⁻¹

表 1 偏振相关各贡献量不确定度

Table 1 Uncertainty sources related to polarization

Uncertainty Source	Nominal Value	Uncertainty ($k=2$)
BB Temperature (T_{BB})	300 K	0.030 K
SSM Temperature (T_{SSM})	300 K	3.33 K
CS Temperatue (T_{CS})	3 K	/
Instrument Polarization Angle (α)	115.4°(LWIR)	6.67°
	116.2°(MWIR)	
	91.8°(SWIR)	
“SSM—Instrument” Combined Polarization Degree ($p_i p_i$)	$2 \times 10^{-4} - 6 \times 10^{-4}$	13.33%

$$\frac{\partial L_{EV}}{\partial T_{BB}} = -L_{BB} \cdot \frac{C_{EV} - C_{CS}}{(C_{BB} - C_{CS})^2} \cdot \frac{\partial C_{BB}}{\partial T_{BB}} \quad (12)$$

5 结论

本文研究了地球红外辐射测量基准载荷中由“扫描镜-仪器主光学”组合偏振效应引起的辐射定标偏差问题。基于偏振光学理论得到了偏振诱导辐射偏差理论表达式,随后通过模拟分析研究了偏振偏差随仪器温差、扫描镜扫描角、仪器偏振角、光谱通道及观测场景亮温之间的变化规律。分析表明,由于相同辐亮度变化在低能量区将产生更大的亮温变化,偏振偏差在低温短波场景下显著增大。另外,由于扫描镜位于仪器最外侧,易受到外热流的影响而产生温度变化,然而镜面无法部署测温点导致难以对其温度进行精确建模,因此仪器在轨运行时可能存在不可测的扫描镜-定标黑体温差,从而引入额外的偏振偏差。当仪器观测

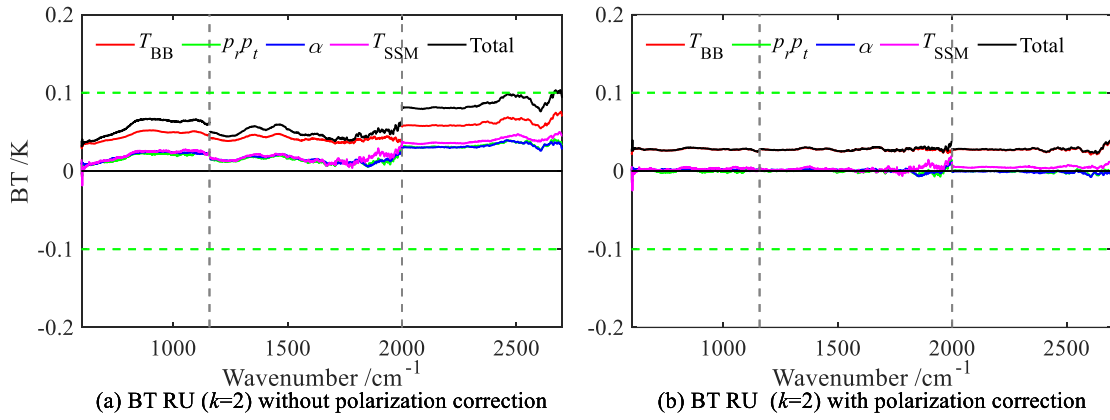


图 18 偏振相关参数不确定度($k=2$)($T_{\text{obs,BB}}=287\text{ K}$)。(a)偏振偏差订正前不确定度;(b)偏振偏差订正后不确定度
Fig. 18 RU ($k=2$) of polarization-related parameters ($T_{\text{obs,BB}}=287\text{ K}$). (a) RU without polarization correction; (b) RU with polarization correction

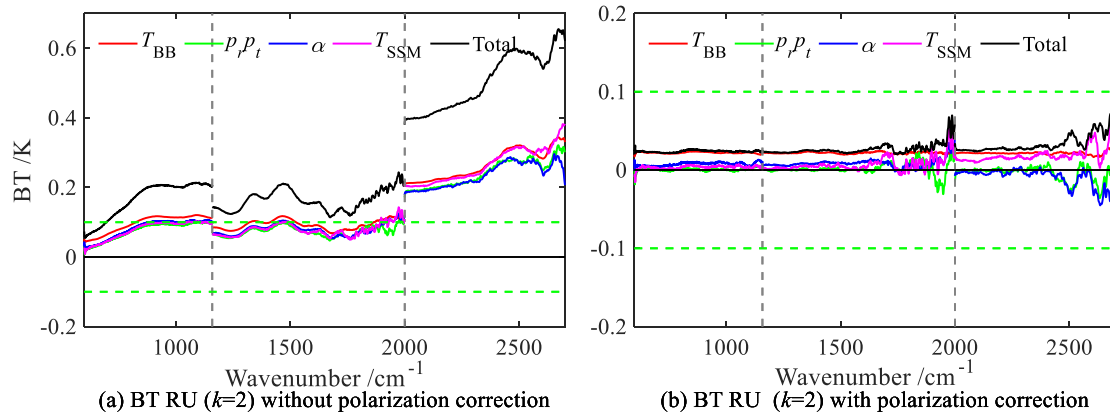


图 19 偏振相关参数不确定度($k=2$)($T_{\text{obs,BB}}=256\text{ K}$)。(a)偏振偏差订正前不确定度;(b)偏振偏差订正后不确定度
Fig. 19 RU ($k=2$) of polarization-related parameters ($T_{\text{obs,BB}}=256\text{ K}$). (a) RU without polarization correction; (b) RU with polarization correction

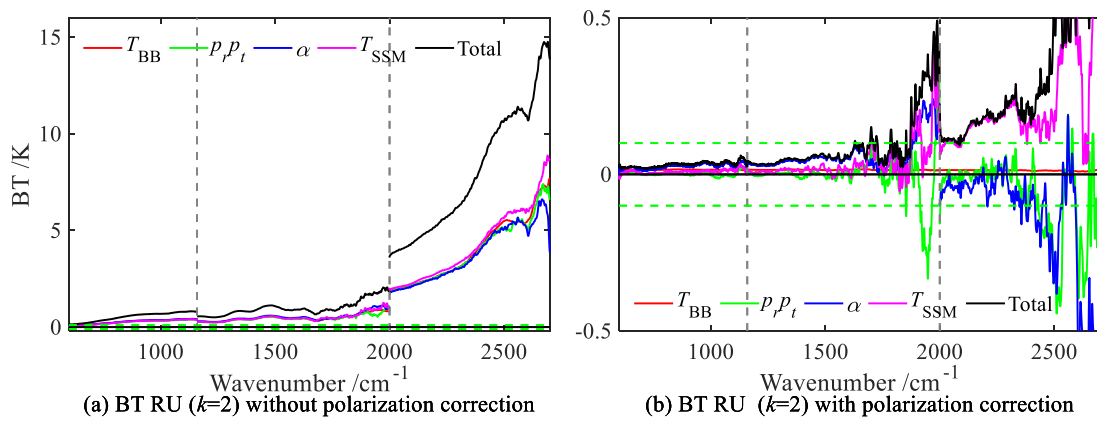


图 20 偏振相关参数不确定度($k=2$)($T_{\text{obs,BB}}=210\text{ K}$)。(a)偏振偏差订正前不确定度;(b)偏振偏差订正后不确定度
Fig. 20 RU ($k=2$) of polarization-related parameters ($T_{\text{obs,BB}}=210\text{ K}$). (a) RU without polarization correction; (b) RU with polarization correction

低温场景时,5 K的扫描镜-黑体温差将引入1 K以上的偏差。为减小该偏差的影响,提出在仪器设计阶段采用扫描镜与定标黑体热平衡的方案,这样可以避免扫描镜温度的复杂建模,并对偏振偏差方程进行合理简化。由于基准载荷尚未发射在轨,现阶段采用变温黑体定标试验进行偏振偏差订正效果检验,这是因为黑

体辐射可通过发射率和温度精确计算,从而提供定标光谱的参考“真值”,并且较大的变温范围可以覆盖地球辐射动态范围,因此黑体检验是后续大气应用的必要前提。试验结果表明,若不进行偏差订正,偏振效应将在全波段产生随光谱分布的定标偏差,而构建的偏差订正模型能够对黑体定标光谱的偏振偏差实施有效订正。对于偏振偏差最显著的 210 K 低温黑体观测数据,在长波、中波、短波三个波段的最大偏差订正量分别可达 0.14 K、0.4 K、3 K。偏差订正后,全谱段辐射定标精度达到基准载荷 0.1 K 定标偏差阈值内。不确定度分析结果表明,随着场景亮温的降低,由定标黑体引入的定标不确定度逐渐降低,而偏振效应逐渐成为系统不确定度的主导因素,这意味着高温场景下定标精度受限于定标黑体的温度准确性,而低温场景下的定标精度提升需从单纯依赖高精度黑体转向仪器偏振效应的精确控制与表征。需要说明的是,除定标黑体温度与偏振效应,非线性效应也是定标不确定度的主要组成之一,本文不涉及相关研究,但根据经验,在典型工程条件下(如探测器非线性度为 0.13%),经算法订正后,其残余不确定度小于 0.02 K。因此经偏差订正后,合成不确定度仍总体小于 0.1 K($k=2$)。上述结果证明了偏振偏差订正模型的有效性,未来在基准载荷成功发射之后,还将进一步应用于实际大气观测数据的偏振诱导偏差订正中。

参考文献

- [1] CHAHINE M T, PAGANO T S, AUMANN H H, et al. AIRS: Improving weather forecasting and providing new data on greenhouse gases[J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 2006, 87(7): 911-926.
- [2] MENZEL W P, SCHMIT T J, ZHANG P, et al. Satellite-based atmospheric infrared sounder development and applications[J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 2018, 99(3): 583-603.
- [3] OHRING G, WIELICKI B, SPENCER R, et al. Satellite instrument calibration for measuring global climate change: Report of a workshop[J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 2005, 86(9): 1303-1314.
- [4] COKKSEY C, DATLA R. Workshop on bridging satellite climate data gaps[J]. Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology, 2011, 116(1): 505.
- [5] XIONG X, CAO C, CHANDER G. An overview of sensor calibration inter-comparison and applications[J]. Frontiers of Earth Science in China, 2010, 4(2): 237-252.
- [6] OHRING G, TANSOCK J, EMERY W, et al. Achieving satellite instrument calibration for climate change[J]. Transactions American Geophysical Union, 2007, 88(11): 136 - 136.
- [7] WIELICKI B A, YOUNG D F, MLYNCZAK M G, et al. Achieving climate change absolute accuracy in orbit[J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 2013, 94(10): 1519-1539.
- [8] ZHANG P, LU N, LI C, et al. Development of the Chinese space-based radiometric benchmark mission LIBRA[J]. Remote Sensing, 2020, 12(14): 2179.
- [9] YOUNG J B, KNIGHT E, MERROW C. MODIS polarization performance and anomalous four-cycle polarization phenomenon[C]. Earth Observing Systems III. SPIE, 1998, 3439: 247-256.
- [10] KNIGHT E J, MERROW C, SALO C. Interaction between polarization and response vs. scan angle in the calibration of imaging radiometers[C]. Polarization: Measurement, Analysis, and Remote Sensing II. SPIE, 1999, 3754: 308-319.
- [11] SHAW J A. The effect of instrument polarization sensitivity on sea surface remote sensing with infrared spectroradiometers [J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 2002, 19(5): 820-827.
- [12] SUN J Q, XIONG X. MODIS polarization-sensitivity analysis[J]. IEEE transactions on geoscience and remote sensing, 2007, 45(9): 2875-2885.
- [13] PAGANO T S, AUMANN H H, OVEROYE K, et al. Scan-angle-dependent radiometric modulation due to polarization for the Atmospheric Infrared Sounder (AIRS)[C]. Earth Observing Systems V. SPIE, 2000, 4135: 108-116.
- [14] GIGIOLI Jr G W, PAGANO T S. AIRS instrument polarization response: measurement methodology [C]. Infrared Spaceborne Remote Sensing VII. SPIE, 1999, 3759: 279-291.
- [15] SHI Haodong, HAN Peng, GONG Chenjie, et al. Design of Broadband Infrared Double-Layer Slit Metal Wire Grid Polarization Array[J]. Acta Optica Sinica, 2025, 45(3): 0305001.
史浩东, 韩鹏, 龚晨杰, 等. 宽波段红外双层狭缝金属线栅偏振阵列设计[J]. 光学学报, 2025, 45(3): 0305001.
- [16] TAYLOR J K, REVERCOMB H E, TOBIN D C, et al. Assessment and Correction of View Angle Dependent Radiometric Modulation due to Polarization for the Cross-Track Infrared Sounder (CrIS) [J]. Remote Sensing, 2023, 15(3): 718.
- [17] YANG Shuai, SUN Jian, YAN Qiangqiang, et al. Study on the Flexible Support Structure of the Linear Moving Mirror of the Spaceborne Michelson Interferometer[J]. Acta Photonica Sinica, 2024, 53(10): 1022002.
杨帅, 孙剑, 严强强, 等. 星载迈克尔逊干涉仪直线动镜的柔性支撑结构研究[J]. 光子学报, 2024, 53(10): 1022002.
- [18] YANG Chennan, FU Yuegang, OUYANG Mingzhao, et al. Polarization Characteristics of Infrared Radiation on High-Temperature Metal Surfaces[J]. Acta Optica Sinica, 2025, 45(06): 1557-1565.

- 杨晨南,付跃刚,欧阳名钊,等. 高温金属表面红外辐射偏振特性研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2025, 45(06): 1557-1565.
- [19] GOLDSTEIN D H. Polarized light: Third edition[M]. New York: CRC press, 2011: 471-481.
- [20] REVERCOMB H E, BUIJS H, HOWELL H B, et al. Radiometric calibration of IR Fourier transform spectrometers: solution to a problem with the High-Resolution Interferometer Sounder[J]. Applied Optics, 1988, 27(15): 3210-3218.
- [21] LEE L, QI C, DING L. The instrumental responsivity effect to the calibrated radiances of infrared hyperspectral benchmark sounder[C]. Earth and Space: From Infrared to Terahertz (ESIT 2022). SPIE, 2023, 12505: 645-653.
- [22] LEE Lu, NI Zhuoya, QI Chengli, et al. Pre-Launch Radiometric Calibration of Geostationary Interferometric Infrared Sounder on FengYun-4B Satellite[J]. Acta Optica Sinica, 2022, 42(6): 0630001.
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.
- [23] LEE Lu, QI Chengli, ZHANG Peng, et al. Noise Estimation of Hyper-spectral Infrared Atmospheric Sounder Observations Using Principal Component Analysis[J]. Acta Optica Sinica, 2019, 48(02): 212001.
李路,漆成莉,张鹏,等. 应用主成分分析评估红外高光谱仪器噪声特性[J]. 光子学报, 2019, 48(02): 212001.
- [24] TOBIN D, REVERCOMB H, KNUTESON R, et al. Suomi-NPP CrIS radiometric calibration uncertainty[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2013, 118(18): 10,589-10,600.

Analysis and Correction of Polarization-Induced Radiometric Calibration Deviation for Earth Radiometry Benchmark Infrared Sounder

GONG Hao¹, LEE Lu², DONG Yihui³, CHEN He¹, GU Mingjian³, DING Lei³

(1 School of Optics and Photonics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

(2 National Satellite Meteorological Center, Beijing 100081, China)

(3 Key Laboratory of Infrared System Detection and Imaging Technology, Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Science, Shanghai 200083, China)

Abstract: In order to detect the tiny change of long-term global climate from satellite observations, the Earth Radiometry Benchmark Infrared Sounder is designed to provide the irrefutable benchmarking record by measuring the Earth-Atmospheric upwelling infrared radiance with an ultra-high accuracy of 0.1 K ($k=2$) over the $600 - 2700 \text{ cm}^{-1}$ ($3.7 - 16.7 \text{ }\mu\text{m}$) spectral band. In the calibration model research, it was found that the combined polarization of the scene scanning mirror (SSM) and the instrument's primary optics could modulate the incident radiation, ultimately resulting in a radiometric calibration deviation, which could be a significant radiometric uncertainty contributor. Thus, it is necessary to investigate the mechanism and distribution pattern of the polarization-induced deviation, leading to the formulation of a robust correction scheme. The expression for the polarization-induced radiometric deviation was derived from the principles of polarized optics. To investigate the influence of various factors on the polarization-induced deviation, including instrument temperature difference, scene brightness temperature, spectral channel, scan angle δ , instrument polarization angle α and combined degree of polarization p, p_i , a simulation analysis of its distribution pattern was conducted based on the currently assumed scan geometry of the benchmark sounder. The results indicate that due to the difficulty in deploying temperature sensors on the scanning mirror surface and the challenge of establishing accurate temperature model, the temperature difference between the SSM and the calibration blackbody (BB) introduces additional deviations in the polarization-induced deviation calculation, with a maximum exceeding 1 K. To address this issue, an engineering solution utilizing a "SSM-BB" thermal equilibrium method to reduce this deviation is proposed. A rational simplification of the polarization deviation equation is then performed, followed by a corresponding radiometric uncertainty analysis. Moreover, when assessed in terms of brightness temperature (BT), the non-linear conversion relationship between brightness temperature and radiance leads to a key characteristic: as radiance decreases, an identical amount of radiative modulation produces a larger brightness temperature deviation. Consequently, the polarization-induced deviation exhibits a strong spectral and scene temperature dependence. Specifically, the deviation increases with decreasing scene brightness temperature and with increasing wavenumber. In addition, α determines the

phase offset of the polarization deviation across different scan angles. Notice that, when α is 0° or 90° , the deviation is symmetrically distributed about the nadir. To validate the effectiveness of the polarization correction model, a variable-temperature blackbody calibration experiment—which provides a reliable reference source with known truth through its precisely calculable spectral radiance and primary design for simulating on-orbit Earth scenes—was conducted based on the analysis of polarization-induced radiometric deviation patterns. The instrument polarization angle α differed across the long-wave infrared (LWIR), mid-wave infrared (MWIR), short-wave infrared (SWIR) bands due to the polarization basis state rotation introduced by the dichroic beam splitters, measured as 115.4° , 116.2° , and 91.8° respectively. And the variable-temperature blackbody temperatures $T_{\text{obs, BB}}$ were set to 210 K, 230 K, 256 K, 287 K, and 310 K to cover the Earth's radiance brightness temperature range. The results indicate that polarization effects introduced a certain deviation trend across the three spectral bands. After applying the correction, the polarization-induced deviation was effectively reduced, with maximum corrections of 0.14 K, 0.4 K, and 3 K in the LWIR, MWIR, and SWIR, respectively. Following the validation of the correction model, a comprehensive on-orbit uncertainty analysis was performed according to the Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement (GUM) to assess the impact of polarization-related parameters on the radiometric calibration accuracy. Key uncertainty sources included the BB temperature (T_{BB}), SSM temperature (T_{SSM}), α , and $p_i p_r$. Their individual contributions were quantified, and the combined standard uncertainty was calculated using the root sum of squares (RSS) method. The analysis covered three representative scene temperatures: 287 K, 256 K, and 210 K. A clear trend was observed as the scene temperature decreased: the calibration uncertainty contributed by T_{BB} diminished, while those from T_{SSM} , α and $p_i p_r$ increased significantly. For the 287 K scene, the uncertainty with polarization correction was dominated by T_{BB} , with a maximum combined uncertainty ($k=2$) of approximately 0.04 K. For the 256 K scene, while T_{BB} remained the primary contributor in the LWIR and MWIR, the influence of T_{SSM} and α became noticeable in the SWIR, with the total uncertainty remaining below 0.1 K across most channels. For the critical 210 K low-temperature scene, polarization-related parameters emerged as the dominant uncertainty source, significantly exceeding the contribution from T_{BB} . The uncertainties contributed by T_{SSM} , α , and $p_i p_r$ were most significant, yet the combined uncertainty for spectral channels below 1700 cm^{-1} was lower than the 0.1 K threshold. In conclusion, this study has demonstrated the effectiveness of the polarization deviation correction model, with the thermal equilibrium design playing a critical role in diminishing additional calibration deviation caused by the “SSM-BB” temperature difference. Following the future successful launch of the Earth Radiometry Benchmark Infrared Sounder, it will be further applied to the polarization-induced deviation correction of actual atmospheric observation data.

Key words: spectroscopy; Earth Radiometry Benchmark Infrared Sounder; radiometric calibration; infrared hyperspectral; polarization-induced radiance deviation

OCIS Codes: 300.6300; 120.6200; 010.0280; 070.4790; 300.6340

CSTR: 32255.14.gzxb20265507.0730001