

红外高光谱大气探测仪(FY-3E/HIRAS-II)在轨数据非线性校正方法

黄 硕^{1,2}, 顾明剑^{1,2*}, 胡 勇^{1,2}, 杨天杭^{1,2}, 邵春沅^{1,2}, 张春明^{1,2,3}

(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. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要:风云三号E星(FY-3E)搭载的高光谱大气探测仪(HIRAS-II)能够实现大气的垂直探测, 具有高光谱、高灵敏度、高精度的特点。仪器在轨之后由于仪器衰减和环境变化的原因产生非线性响应, 影响在轨定标精度。针对非线性响应的问题, 提出了一种基于带内光谱的非线性校正方法。首先基于带外低频光谱的非线性特征求解非线性校正系数, 将此系数作为初值输入到辐射定标模型中, 以星上测量的黑体带内光谱与理想光谱的偏差为目标函数, 通过迭代优化非线性校正系数。通过辐射定标实验得出, 校正后的黑体亮温偏差明显低于未校正和基于带外光谱的校正方法。将HIRAS-II的观测数据与IASI进行交叉比对并计算平均亮温偏差和偏差绝对值, 经过带内校正法非线性校正后的亮温平均偏差为-0.13 K, 优于带外校正方法。

关键词:HIRAS-II; 非线性校正; 在轨定标; 带内光谱

中图分类号: TN215

文献标识码: A

Nonlinear response correction method for on-orbit data of FY-3E hyperspectral infrared atmospheric sounder II

HUANG Shuo^{1,2}, GU Ming-Jian^{1,2*}, HU Yong^{1,2}, YANG Tian-Hang^{1,2}, SHAO Chun-Yuan^{1,2}, ZHANG Chun-Ming^{1,2,3}

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

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

3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: The Infrared Hyperspectral Atmospheric Sounder II (HIRAS-II) mounted on Funyun-3E satellite (FY-3E) can realize vertical atmospheric detection, featuring hyper spectral, high sensitivity and high precision. When the satellite has been on-orbit, nonlinear response would occur due to instrument attenuation and environmental change, which affects the accuracy of on-orbit calibration. For nonlinear response problems, a nonlinear correction method based on in-band spectrum is proposed. Firstly, the nonlinear correction coefficient was solved based on the nonlinear characteristics of the out-of-band in low-frequency spectra, and the coefficient was input into the radiological calibration model as the initial value. The deviation between the black-body spectrum measured on board and the ideal spectrum was taken as the objective function, and the nonlinear correction coefficient was optimized by iterative calculation. Radiation calibration experiments have shown that the brightness temperature deviation of black body is reduced compared to uncorrected result and the out-of-band correction method using the proposed method. Based on the simultaneous nadir overpass method, After matching the observed data of HIRAS-II with IASI and calculating the mean brightness temperature deviation and the absolute value of the deviation, the mean brightness temperature deviation after nonlinear correction by the in-

收稿日期: 2023-04-16, 修回日期: 2023-05-17

Received date: 2023-04-16, Revised date: 2023-05-17

基金项目: 国家重点研发计划(2018YFB0504800, 2018YFB0504802), 上海市“基础研究特区计划”(JCYJ-SHFY-2022-004)

Foundation items: Supported by the National Key R&D Program of China (2018YFB0504800, 2018YFB0504802), Shanghai Pilot Program for Basic Research - Chinese Academy of Sciences, Shanghai Branch (JCYJ-SHFY-2022-004)

作者简介 (Biography): 黄硕 (1990-), 男, 山东滕州人, 博士后, 博士学位, 主要研究领域为定量遥感、高光谱数据预处理。E-mail: huangshuo@mail.sitp.ac.cn

* 通讯作者 (Corresponding author): E-mail: gumingj@sina.com

band correction method is -0.13 K, which is better than the out-of-band correction method.

Key words: HIRAS-II, nonlinearity correction, on-orbit calibration, in-band spectrum

引言

风云三号E星(FY-3E)是全球首颗民用晨昏极轨气象卫星,于2021年7月5日在酒泉卫星发射中心成功发射。风云三号E星经过在轨测试和校准后投入使用,与风云三号上午星C星和风云三号下午星D星组网运行,可每6小时为数值天气预报提供一次全球覆盖的卫星资料,有效补充了6小时同化时间窗内卫星观测资料的空白^[1]。FY-3E/HIRAS-II (High-spectral Infrared Atmospheric Sounder II)是我国风云系列极轨气象卫星中所搭载的第二个红外高光谱大气探测仪,具有高光谱分辨率、高灵敏度和高精度等特点,在大气温湿度廓线反演、数值天气预报、气候变化研究和大气痕量气体探测等应用上具有显著优势,红外高光谱数据是全球气象观测资料的重要组成部分^[2]。

美国、欧洲和我国都在发展星载红外高光谱大气探测仪,美国于2002年5月4日发射了载于EOS-Aqua卫星的光栅式红外大气探测仪AIRS (Atmospheric Infrared Sounder),其通道数为2378个。欧洲气象局卫星应用组织MetOp-A/B/C系列星上的IASI (Infrared atmospheric sounder interferometer),其通道数为8461个。美国Suomi NPP和JPSS-1卫星的CrIS (cross-track infrared sounder),通道数为1305。我国自主研发的红外高光谱探测仪也实现了业务在轨运行,装载在风云三号D星的HIRAS, E星的HIRAS-II和装载在风云四号A星的GIIRS,都采用了干涉式分光技术。红外高光谱大气探测仪为高精度仪器,在实验室中经过了严格定标和检测。是在卫星发射后,受到外界因素的干扰,会造成仪器的性能相比于试验结果发生一定偏差,因此需要进行在轨定标。仪器自身光学系统和探测器材质、光学系统设计、电子学性能、仪器发射和在轨运行状态的变化和元器件衰减等因素的影响,造成了仪器入瞳辐射值和仪器输出值的非线性响应,如果依然采用线性模型进行近似,势必造成辐射定标误差。

基于目前的研究结果显示,热红外通道普遍存在不同程度的非线性响应,需要引入二次项或更高项定标系数,从而达到高定标精度。因此,实现红

外通道定标的非线性处理算法,通过定标数据拟合出热红外通道的辐射定标的非线性项系数是需要解决的技术关键。国内外学者对探测器的非线性响应进行了大量研究,矫正方法可分为硬件校正法和软件校正法,其中硬件方法主要通过补偿电路来校正非线性响应,软件方法主要通过构建干涉数据的非线性响应模型,获取非线性响应系数进而校正探测器产生的光谱畸变^[3]。例如美国极轨气象卫星的CrIS^[4]以带外(out-of-band)低频光谱范围(50~300 cm⁻¹)的光谱特征为依据,构建卷积方程求解非线性响应系数,校正光谱畸变,本文将此方法简称为带外校正法。欧洲气象局的机载大气测量(FAAM)中的红外干涉仪评价系统(ARIES)^[5]选择以波数为50~500 cm⁻¹和2000~2500 cm⁻¹两个特征区域为判断依据,通过交叉迭代二阶和三阶非线性响应系数对光谱误差进行拟合,校正光谱畸变^[3]。此方法研究两个特征区域求解多次项系数,计算复杂度较高。Wu等^[6]提出利用光谱响应度作为判断依据计算非线性校正系数,取得了较好辐射校正效果,但此类方法需要依赖大量的变温工况数据,计算量较大。

本文基于上述研究结果,提出了一种基于带内(in-band)光谱的非线性校正方法。以带外校正法求解的非线性校正系数为初值,再通过带内光谱辐射定标模型进行迭代优化,取得了较好的非线性校正效果。

1 高光谱探测仪的非线性

1.1 探测仪非线性响应原理

HIRAS-II采用了干涉式分光技术,测量数据为干涉图。当探测器的输出信号与入射能量呈非线性关系时,需要进行非线性校正。

非线性关系一般可以由如下关系式表示:

$$Q = C_1 \Delta n + C_2 (\Delta n)^2 + C_3 (\Delta n)^3 + \dots \quad (1)$$

其中 Q 为入射辐射强度, C 为系数, Δn 为光生导带电子浓度。理想的干涉图光强与入射辐射强度成正比,实测干涉图光强与光生导带电子浓度成正比,所以理想干涉图光强和实测干涉图光强具备如下关系:

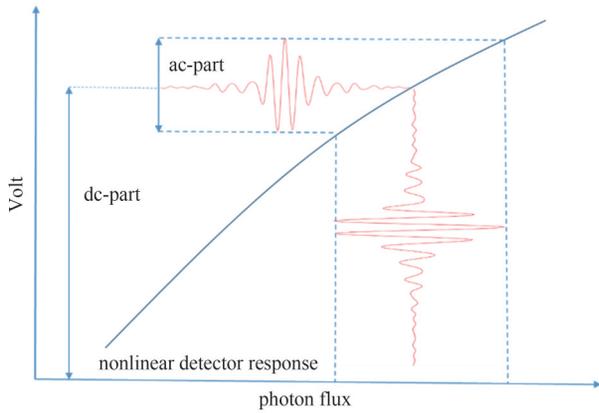


图1 非线性响应示意图

Fig. 1 Nonlinear response diagram

$$I_{\text{idea}} + V_{\text{idea}} = (I_m + V) + a_2(I_m + V)^2 + a_3(I_m + V)^3 \dots \quad (2)$$

其中 V 表示探测器输出的直流电压, 该电压由探测器光电流和暗电流产生, V_{idea} 表示理想直流电压。 I_{idea} 表示理想的干涉图光强, I_m 表示实测的干涉图光强, a_2 表示二次项系数, a_3 表示三次项系数。由于三阶项及以上在探测器中的影响表现不显著, 可以省略其非线性影响^[4], 故可以将式(2)转化成:

$$I_{\text{idea}} + V_{\text{idea}} = (I_m + V) + a_2(I_m + V)^2 \quad (3)$$

将式(3)展开并消除掉直流量项得到:

$$I_{\text{idea}} = I_m + 2a_2VI_m + a_2I_m^2 \quad (4)$$

通过傅里叶变换到频谱域, 得到:

$$\text{Spc}_{\text{idea}} = (1 + 2a_2V)\text{Spc}_m + a_2\text{Spc}_m \otimes \text{Spc}_m \quad (5)$$

其中 Spc_{idea} 为理想光谱, Spc_m 为实测光谱。非线性引起的光谱畸变由缩放因子和二次项产生, 需要根据光谱特征求解二次项系数 a_2 。

1.2 基于带外光谱的非线性校正方法

利用普朗克(Max Planck)定律可以得到理想黑体的光谱辐射能量。再通过仪器的光谱响应函数(Spectral Response Function, SRF)对理想光谱进行采样。光谱响应函数表达了传感器在每个波长处接收的单色辐亮度与入射的单色辐亮度的比值。可以模拟出仪器采集的理想光谱信号值 Spc 。

$$\text{Spc} = \text{SRF}(E) \quad (6)$$

其中 E 为入瞳处的黑体辐射能量。为了得到式(5)中的光谱自卷积信号, 首先需要进行傅里叶逆变换得到干涉图:

$$I = \text{ifft}(\text{Spc}) \quad (7)$$

将干涉图 I 求平方然后再进行傅里叶变换, 得到光谱自卷积信号 Spc_2 :

$$\text{Spc}_2 = \text{Spc} \otimes \text{Spc} = \text{fft}(I^2) \quad (8)$$

以长波为例, 设置黑体温度为 300 K, 光谱分辨率为 0.625 波数。长波光谱有效范围 650~1136 波数, 得到的模拟光谱辐射信号见图 2。

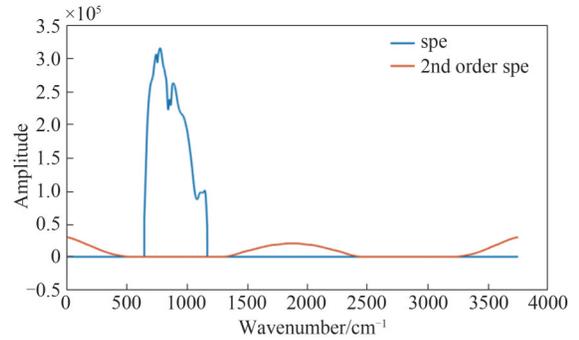


图2 模拟光谱信号

Fig. 2 Simulated spectral signal

将二次项光谱(长波)与原始光谱(长波)合并, 得到模拟的非线性特征光谱(长波)和理想光谱(长波)的对比图见图 3。

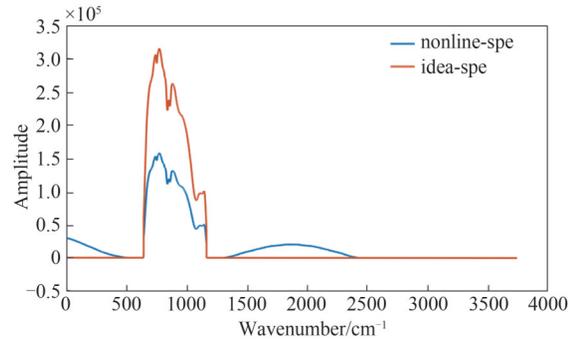


图3 模拟非线性数据信号

Fig. 3 Simulated nonlinear data signal

从模拟结果来看, 光谱自卷积信号出现在低频(0~500 cm^{-1})和低频(1 500~2 500 cm^{-1})区域, 都在长波的有效光谱范围以外, 即带外。在带外高频区处会受到与非线性无关的失真信号所影响, 例如二次反射谱(double-bounce), 所以可以将带外低频区域作为非线性特征的研究区域。CrIS^[4]带外低频的研究范围设为 50~300 cm^{-1} , 杨敏珠^[7]等将 50~500 cm^{-1} 作为研究区域。

根据以上模拟结果可以得出, 在带外低频范围内, 理想光谱信号值应该为 0, 所以式(5)可以转化为

$$(1 + 2a_2V)\text{Spc}_m + a_2\text{Spc}_m \otimes \text{Spc}_m = 0 \quad (9)$$

进而求解 a_2 :

$$a_2 = \frac{-\frac{\text{Spc}_m}{\text{Spc}_m \otimes \text{Spc}_m}}{1 + \frac{2V\text{Spc}_m}{\text{Spc}_m \otimes \text{Spc}_m}}, \quad (10)$$

令

$$S' = -\frac{\text{Spc}_m}{\text{Spc}_m \otimes \text{Spc}_m}, \quad (11)$$

则

$$a_2 = \frac{S'}{1 - 2VS'}. \quad (12)$$

直流电压 V 需要通过光谱信号进行估算。理论上,直流电压是由仪器的背景发射和探测器的暗电流产生的,可以利用观测冷空的光谱信号进行估计,即 V_{cs} 。

$$V_{cs} \approx \frac{1}{2} \sum_n \frac{|\text{Spc}_{cs}|}{n/2} G, \quad (13)$$

Spc_{cs} 为冷空的观测光谱, n 为通道数, G 为仪器观测引入的增益。当仪器观测黑体或地面目标时,前置放大器输出的直流电压会产生增量 ΔV_{bb} 或 ΔV_{es} , 则观测黑体或地面目标时的直流量 V_{bb} 或 V_{es} 可以表示为

$$V_{bb} = V + \Delta V_{bb}, \quad (14)$$

$$V_{es} = V + \Delta V_{es}. \quad (15)$$

观测黑体和目标的电压增量可以通过观测光谱计算:

$$\Delta V_{bb} \approx \frac{1}{2} \sum_n \frac{|\text{Spc}_{bb} - \text{Spc}_{cs}|}{n/2} G, \quad (16)$$

$$\Delta V_{es} \approx \frac{1}{2} \sum_n \frac{|\text{Spc}_{es} - \text{Spc}_{cs}|}{n/2} G. \quad (17)$$

得到直流量 V 后,可对式(12)进行求解。所以利用带外光谱低频范围内的采样点位就可以求解出非线性校正系数 a_2 。

2 基于带内光谱的非线性校正方法

2.1 辐射定标模型

辐射定标一般采用线性模型:

$$L_i = k_i \text{Spc}_i + \Delta L_i, \quad (18)$$

L_i 为探测器第 i 通道对应的辐亮度值, Spc_i 为探测器数字化后输出的光谱幅度值, k_i 为增益系数, ΔL_i 为辐亮度偏差。

在轨辐射定标一般采用两点法,利用冷空和变温黑体某一温度点对应的幅度值 Spc_{cs} 、 Spc_{bb} 和辐亮度 L_{cs} 、 L_{bb} 求解某一观测目标的辐亮度 L_{es} 。则在轨辐射定标方程如下:

$$L_{es} = \text{Re} \left[\frac{\text{Spc}_{es} - \text{Spc}_{cs}}{\text{Spc}_{bb} - \text{Spc}_{cs}} \right] (L_{bb} - L_{cs}) + L_{cs}, \quad (19)$$

其中 $\text{Re}[\]$ 代表取实部, Spc_{es} 代表地面目标的观测数据幅度值, L_{cs} 、 L_{bb} 的理想辐亮度值可以利用普朗克定律求得。

辐射定标模型对采集数据进行线性校正,无法校正非线性误差,因此在进行辐射定标之前要先进行非线性校正。

2.2 带内校正法

利用带外光谱进行非线性校正具有一定的不确定性,会导致校正效果并不理想原因有以下两点:1)在式(9)中假设在低频区域光谱信号为0,所以在低频光谱范围求解非线性系数,会得到与研究区域采样点个数相同的非线性系数 $[a'_1, a'_2, \dots, a'_n]$, 无法保证非线性系数的唯一性;2)在计算直流量电压时,由于直流电压无法直接进行测量,仪器本身带来的增益无法精确判断,所以通过光谱评估具有一定的误差。

在求解出非线性校正系数 a_2 后,需要代入式(5)中对光谱进行非线性校正。由于研究区域为带内光谱,可以去掉分布在带外的自卷积光谱信号。所以在带内的光谱,只需要通过求解的非线性系数进行缩放校正,即

$$\text{Spc}_{\text{idea}} = (1 + 2a_2V)\text{Spc}_m, \quad (20)$$

代入辐射定标方程式(19)中可以得到:

$$L_{es} = \text{Re} \left[\frac{(1 + 2a_2V_{es})\text{Spc}_{me} - (1 + 2a_2V_{cs})\text{Spc}_{me}}{(1 + 2a_2V_{bb})\text{Spc}_{mb} - (1 + 2a_2V_{cs})\text{Spc}_{me}} \right] (L_{bb} - L_{cs}) + L_{cs}. \quad (21)$$

利用方程(21)求解非线性系数 a_2 , 需要已知目标的辐亮度 L_{es} 。在轨定标中,将星上黑体变温后的黑体的观测辐度值 Spc_{mb}' 和理想辐亮度 L_{mb}' 作为目标辐亮度代入方程式中,以辐射偏差最小为目标求解非线性校正系数。目标函数为

$$\min f(\eta_2) = \min (|L_{mb} - \text{Spc}_{mb}'|). \quad (22)$$

基于目标函数进行迭代求解非线性系数。为了提升计算效率,将带外校正法求解的非线性系数作为迭代初值进行运算。

3 非线性校正结果与分析

3.1 在轨定标数据分析

实验数据为 FY-3E/HIRAS-II 的在轨测量数据。根据设计,HIRAS-II 仪器的常规对地观测模式下扫描镜跨轨扫描工作,每5个扫描行观测32个驻留视场,包括28个连续对地目标、2个冷空和2个星

上黑体观测目标(这些测量既包含干涉仪正向摆扫测量,也包含反向摆扫测量)。每个驻留视场称为 FOR(Field of Regard),包含 3×3 排列的 9 个探元,每个探元称为 FOV(Field of View)^[2]。直接测量数据为干涉图,经过傅里叶变换得到光谱图像,见图 4。

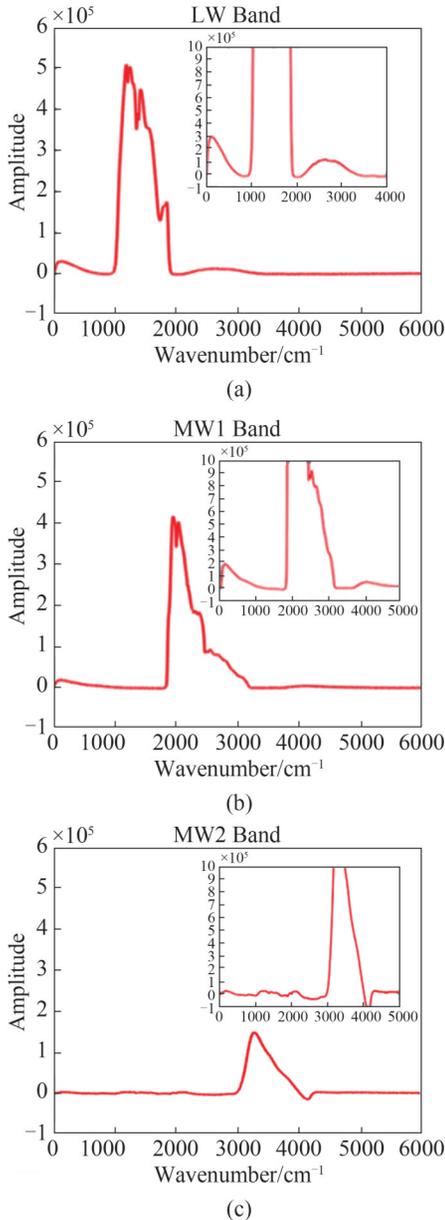


图 4 实测光谱数:(a)长波;(b)中波1;(c)中波2
Fig.4 Measured spectral data:(a) LW;(b) MW1;(c) MW2

从光谱图像中可以看出,长波、中波1具有明显的非线性特征,中波2没有明显的非线性特征,所以本文进行非线性校正的主要研究对象是长波红外和中波1红外光谱。选取 FY-3E/HIRAS-II 2021 年 11 月 4 日在轨运行的部分数据用于研究,黑体处于降温状态,见图 5。

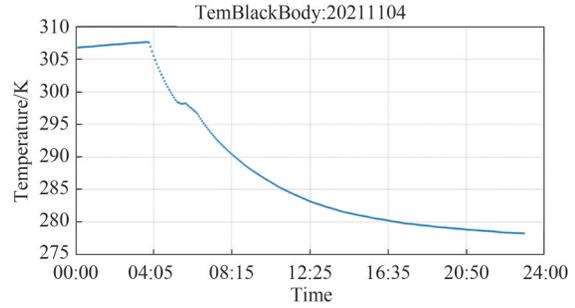


图 5 黑体温度变化曲线
Fig.5 Black body temperature curve

将降温数据分成 5 个降温曲线,利用带外校正法和带内校正法(本文方法)分别求解非线性系数进行对比,非线性系数结果见图 6。图像中中波、中波 1 的每个探测元(FOV)对应一个非线性校正系数。

从图 6 可以看出,在同一个 FOV 中不同的降温曲线中两种方法求解的非线性系数具有较高的一致性,且两种方法在不同 FOV 的非线性系数具有相同的趋势。

利用未经非线性校正光谱数据和经过带内、带外非线性校正方法得到的数据进行对比实验。将三种数据分别进行辐射定标得到的黑体光谱辐射亮温,计算不同温度点黑体的辐射亮温偏差,得到的结果见图 7~图 8。

从对比结果来看带内校正法校正后黑体不同温度的辐射亮温偏差长波在 1 K 以内,中波 1 在 2 K 以内,明显小于未校正和带外校正方法的结果。

对于线性系统,光谱响应度 P 在不同温度点应该具有一致性。基于此原理可以通过计算光谱响应度来验证非线性校正的效果^[8],计算公式如下:

$$P = |\text{Spc}_{\text{ES}} - \text{Spc}_{\text{DSP}}| / (L_{\text{ES}} - L_{\text{DSP}}) \quad (23)$$

其中 Spc_{ES} 代表观测目标的光谱, Spc_{DSP} 代表了对冷空间观测光谱, L_{ES} 代表目标理想光谱, L_{DSP} 代表冷空间理想光谱。将黑体作为观测目标代入公式,分别计算校正前和校正后在不同温度点的光谱响应度。从图 9 可以看出,带内校正法校正后的光谱响应度具有良好的 consistency。

3.2 交叉比对

为了检验 HIRAS-II 的非线性校正结果,可以将辐射定标后的数据与国际公认精度较高的 Metop-C IASI 的观测数据进行交叉比对。基于星下点交叉比对 SNO 方法,在满足时间、空间和观测几何一致性的条件下,匹配 HIRAS-II 和 IASI 的观测数据。从

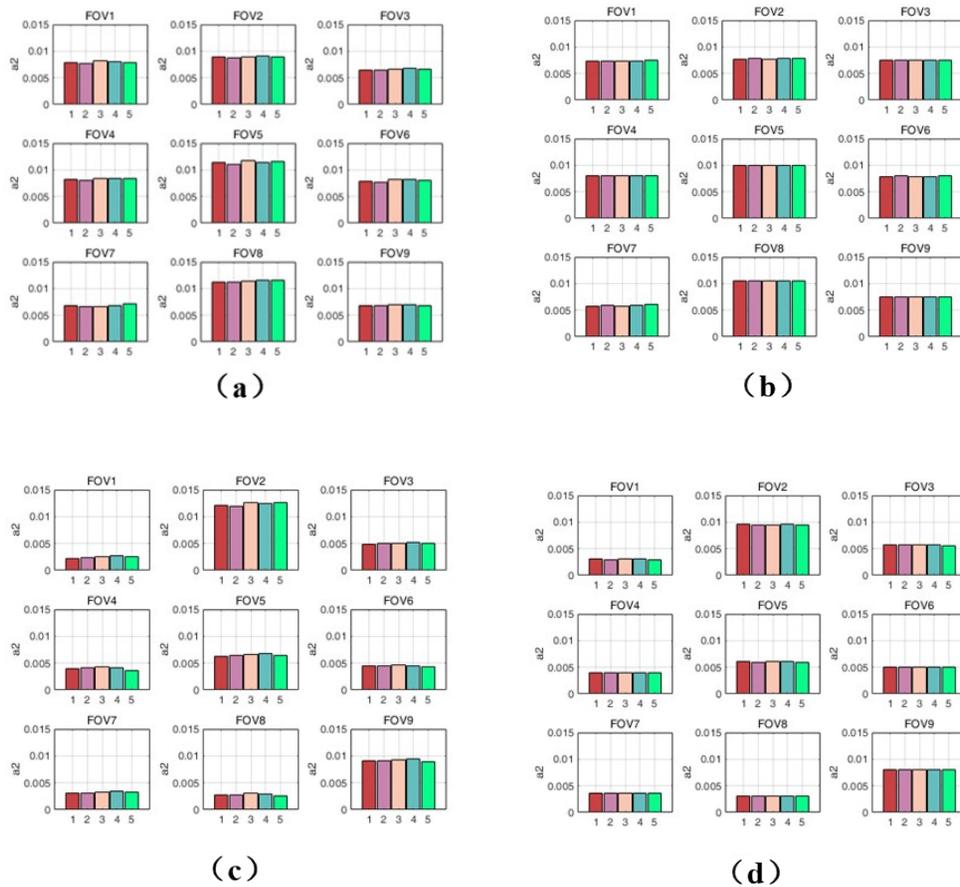


图6 非线性校正系数:(a)长波,带内校正法;(b)长波:带外校正法;(c)中波1:带内校正法;(d)中波1:带外校正法

Fig. 6 Nonlinear correction coefficient:(a) LW: in-band correction method;(b) LW: out-of-band correction method;(c) MW1: in-band correction method;(d) MW1: out-of-band correction method;

亮温对比图(图10)可以看出经过带内校正法的辐射定标后的亮温数据与IASI的匹配度明显优于带外校正法和没有经过非线性校正的图像。

选取HIRAS-II与IASI在2021-11-02的交叉匹配数据(见图11),满足SNO一致性条件共匹配到126个FOV。计算所有匹配点的平均亮温偏差分布(长波和中波1波段范围)结果见图12,亮温偏差和绝对亮温偏差的平均值见表1。

从HIRAS-II和IASI交叉匹配数据的平均亮温偏差可以看出,经过带内校正的辐射亮温偏差在长波和中波1光谱范围在 ± 5 K以内,大部分分布在 ± 2 K内,平均亮温偏差的均值为 -0.13 ,绝对均值为 1.63 ,优于带外校正法和没有校正的光谱。说明经过带内校正法非线性校正的观测数据与IASI的匹配精度优于带外校正法和没有经过非线性校正的光谱,此方法能够提升对地面目标的观测精度。

4 结论

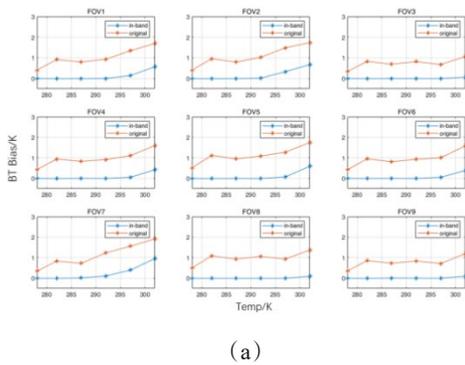
本文针对HIRAS-II在轨定标数据,提出了一种基于带内光谱的非线性校正方法,即带内校正法。通过实验得到以下结论:

(1)FY-3E/HIRAS-II的在轨定标测试中的黑体的长波、中波1光谱数据具有较明显的非线性特征;

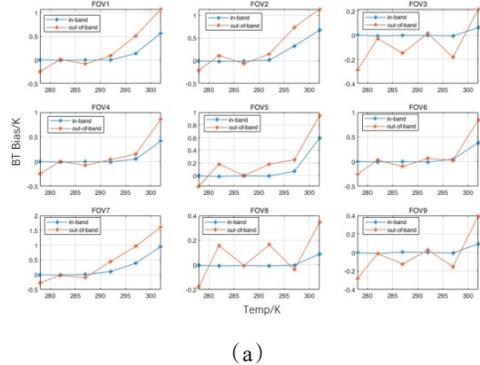
(2)利用本文方法计算的非线性系数在不同温度下具有较高的一致性。利用辐射定标后的光谱计算光谱响应度得出,经过本文方法非线性校正后的不同温度黑体的观测数据的光谱响应度具有较好的一致性;

(3)将本文方法校正后的数据进行辐射定标,在不同温度下,得到的黑体光谱辐射亮温偏差长波在1 K以内,中波1在2 K以内,明显小于未校正和带外校正法的结果;

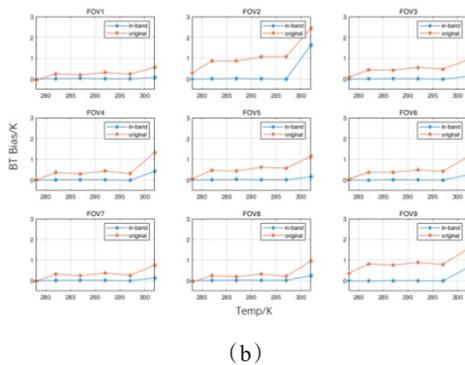
(4)将HIRAS-II辐射定标后的在轨数据与IASI进行交叉比对。在满足时间、空间和观测几何一致



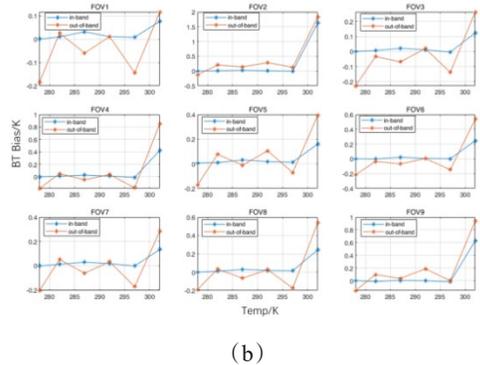
(a)



(a)



(b)



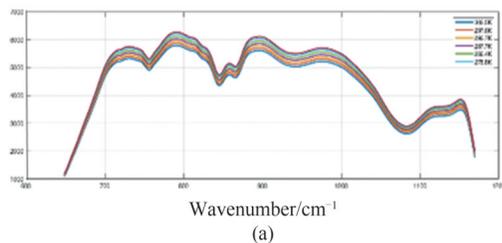
(b)

图7 不同探测元未校正和带内校正方法的平均亮温偏差 (a)长波;(b)中波1

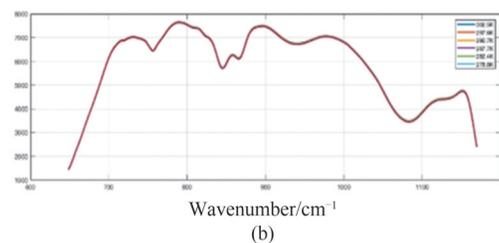
Fig. 7 Average brightness temperature deviations of medium-wave 1 by uncorrected and in-band correction methods of different FOV:(a) LW;(b)MW1

图8 不同探测元带内校正法和带外校正法的平均亮温偏差 (a)长波;(b)中波1

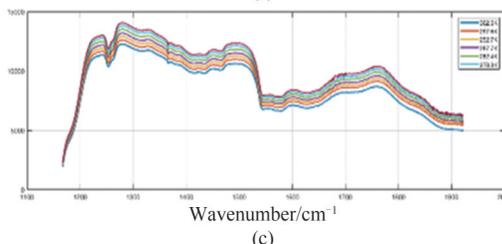
Fig. 8 Average brightness temperature deviations of medium-wave 1 by in-band and out-of-band correction methods of different FOV:(a) LW;(b)MW1



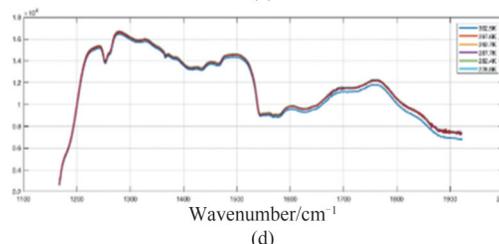
(a)



(b)



(c)



(d)

图9 光谱响应度对比:(a)长波校正前;(b)长波校正后;(c)中波1校正前;(d)中波1校正后

Fig. 9 Spectral responsivity comparison:(a) longwave before correction;(b) longwave after correction;(c) mediumwave1 before correction;(d) mediumwave1 after correction

性的条件下,经过本文方法非线性校正的目标观测

亮温与IASI的匹配度明显优于带外校正法和没有

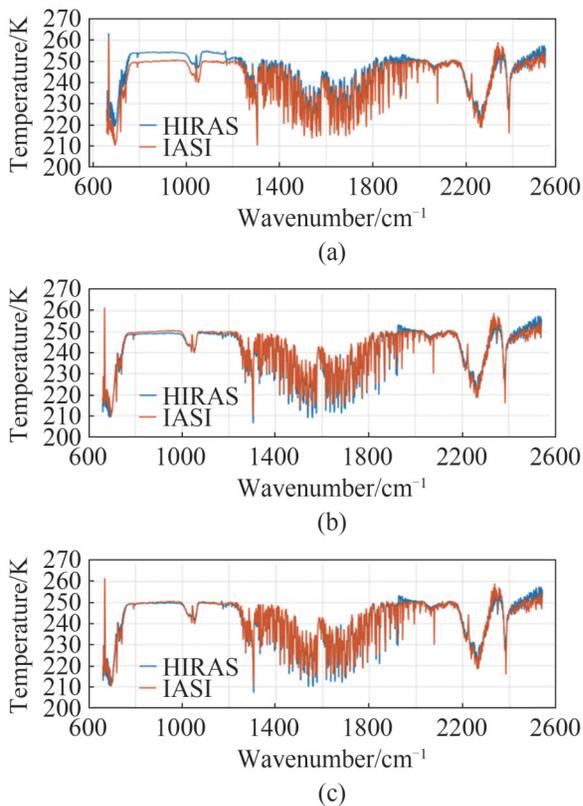


图 10 HIRAS-II 与 IASI 亮温对比图像:(a)未非线性校正;(b)带外校正法;(c)带内校正法
Fig. 10 Bright-temperature comparison of HIRAS-II and IASI: (a) no nonlinear correction; (b) out-of-band correction; (c) in-band correction

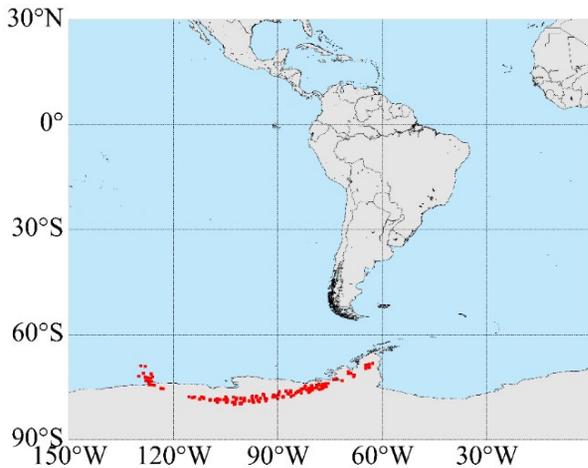


图 11 交叉匹配点的地理位置
Fig. 11 The geographic location of the cross-match points

经过非线性校正的光谱,提升了高光谱数据的对地观测精度。

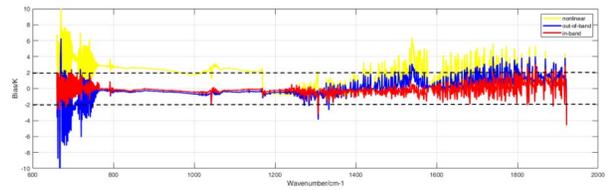


图 12 与 IASI 对地目标观测的平均辐射亮温偏差
Fig. 12 The average radiant brightness temperature bias of ground targets compared with IASI

表 1 平均亮温偏差

Table 1 Average brightness temperature deviation

非线性校正情况	未校正	带外校正法	带内校正法
平均亮温偏差的均值/k	4.60	-0.82	-0.13
平均亮温偏差的绝对均值/k	4.81	2.94	1.63

References

[1] Zhang P, Hu X Q, Lu Q F, et al. FY-3E: The first operational meteorological satellite mission in an early morning orbit[J]. *Adv. Atmos. Sci.*, 2022, **39**(1), 1-8, <https://doi.org/10.1007/s00376-021-1304-7>

[2] Zuo Fenghua, Hu Xiuqing, Wang Wia, et al. Positioning and calibration accuracy evaluation of HIRAS-II by FY-3E imager on same platform [J]. *Acta Optica Sinica*. (左丰华, 胡秀清, 王霞, 等. FY-3E 同平台成像仪对 HIRAS-II 定位与定标精度评估[J]. *光学学报*), 2022, **42**(24): 240-248.

[3] Sun Yongfeng, Xu Liang, Shen Xianchun, et al. High-order nonlinear response correction method for infrared radiation detector [J]. *Acta Physica Sinica*. (孙永丰, 徐亮, 沈先春, 等. 红外光谱辐射计探测器高阶非线性响应校正方法[J]. *物理学报*), 2021, **70**(06): 159-166.

[4] Algorithm theoretical basis document for the cross track infrared sounder (CrIS) sensor data records (SDR). Goddard Space Flight Center. http://www.star.nesdis.noaa.gov/jpss/documents/ATBD/D0001-M01-S01-002_JPSS_ATBD_CrIS-SDR_C.pdf. 2014

[5] Fiedler L, Newman S, Bakan S 2005 *Appl. Opt.* 44 5332

[6] Wu Chunqiang, Qi Chengli, Hu Xiuqing, et al. FY-3D HIRAS radiometric calibration and accuracy assessment [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2020, **58**(6): 3965-3976

[7] Yang Minzhu, Zou Yaopu, Zhang Lei, et al. Correction to nonlinearity in interferometric data and Its effect on radiometric calibration [J]. *Chinese Journal of Lasers*. (杨敏珠, 邹曜璞, 张磊, 等. 干涉数据中非线性的校正及其对辐射定标的影响[J]. *中国激光*), 2017, **44**(01): 272-278.

[8] Yang Tianhang, Gu Mingjian, Shao Chunyuan, et al. Non-linearity correction of FY-3E HIRAS-II in pre-launch thermal vacuum calibration tests [J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*. (杨天杭, 顾明剑, 邵春沅, 等. FY-3E/HIRAS-II 发射前热真空定标试验非线性校正[J]. *红外与毫米波学报*), 2022, **41**(03): 597-607.