

# FY-3E/HIRAS-II 发射前热真空定标试验 非线性校正

杨天杭<sup>1,2,3</sup>, 顾明剑<sup>1,2\*</sup>, 邵春沅<sup>1,2</sup>, 吴春强<sup>4</sup>, 漆成莉<sup>4</sup>, 胡秀清<sup>4</sup>

(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. 中国科学院上海技术物理研究所 红外物理国家重点实验室, 上海 200083;

4. 国家卫星气象中心 中国遥感卫星辐射测量和定标重点开放实验室, 北京 100081)

**摘要:** 红外高光谱大气探测仪 II 型(HIRAS-II)是一台傅里叶变换光谱仪, 搭载于世界首颗民用晨昏轨道气象卫星 FY-3E 上, 其研制过程在 FY-3D/HIRAS-I 产品基础上, 重点提升了探测器灵敏度、光谱和辐射定标精度等方面。仪器发射前进行了全面的热真空定标试验, 其中非线性订正作为辐射定标过程的重要环节, 对辐射定标精度具有重要影响。针对 HIRAS-II 长波和中波 1 红外探测器产生的非线性效应, 通过缩放带内光谱对原始数据作非线性订正, 采用最小化不同温度点复原光谱各波数点的响应度分布和最小化变温黑体定标偏差分布两种方法推导非线性系数。对比辐射定标数据作非线性订正前后的光谱亮温偏差, 结果表明, 经过非线性订正后的辐射定标精度得到了明显提升。

**关键词:** HIRAS-II; 非线性校正; 辐射定标; 热真空试验

**中图分类号:** TN215 **文献标识码:** A

## Nonlinearity correction of FY-3E HIRAS-II in pre-launch thermal vacuum calibration tests

YANG Tian-Hang<sup>1,2,3</sup>, GU Ming-Jian<sup>1,2\*</sup>, SHAO Chun-Yuan<sup>1,2</sup>, WU Chun-Qiang<sup>4</sup>, QI Cheng-Li<sup>4</sup>, HU Xiu-Qing<sup>4</sup>

(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. National Laboratory for Infrared Physics, Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Science, Shanghai 200083, China;

4. Key Laboratory of Radiometric Calibration and Validation for Environmental Satellites, National Satellite Meteorology Center, China Meteorological Administration, Beijing 100081, China)

**Abstract:** The High-spectral Infrared Atmospheric Sounder II (HIRAS-II) is a Fourier transform spectrometer onboard the world's first civil early-morning-orbiting FengYun 3E (FY-3E) meteorological satellite, the FY-3E/HIRAS-II focus on a number of upgrades such as the sensitivity of the detector, the accuracy of spectral calibration and radiometric calibration, with the designed and manufactured processing based on the first Chinese hyperspectral infrared (IR) sounder FY-3D/HIRAS-I. We conducted a comprehensive pre-launch thermal vacuum (TVAC) calibration tests for HIRAS-II, including the nonlinearity (NL) correction which consists an essential part of radiometric calibration, the NL correction has considerable effects on radiometric accuracy. According to the HIRAS-II nonlinear behavior of the detectors for long-wave (LW) and mid-wave1 (MW1) infrared spectral bands, the NL correction of raw data in the spectral domain is a scaling of the observed spectrum, the NL correction coefficients are derived by the methods of minimizing the

收稿日期: 2021-09-09, 修回日期: 2021-09-26

Received date: 2021-09-09, Revised date: 2021-09-26

基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFB0504800, 2018YFB0504800)

Foundation items: Supported by the National Key R&D Program of China (2018YFB0504800, 2018YFB0504802)

作者简介(Biography): 杨天杭(1992—), 男, 吉林长春人, 博士后, 博士学位, 主要研究领域为红外高光谱数据处理、遥感应用, E-mail: yangtianhang@mail.sitp.ac.cn

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

spread of the responsivity of reconstructed spectrum in each wavenumber with varying temperature, or minimizing the spread of the bias of brightness temperature among calibration targets with varying temperature. The bias of spectral brightness temperature is assessed by comparing the NL correction and the non-NL correction radiometric calibration data, the results show that, the radiometric accuracy has been significantly improved via NL correction.

**Key words:** HIRAS-II, nonlinearity correction, radiometric calibration, TVAC tests

## 引言

2021年7月5日7时28分,我国成功在酒泉卫星发射中心用长征四号丙运载火箭将风云三号E星送入预定轨道,发射任务取得圆满成功。此次发射的风云三号E星是我国第二代极轨气象的第五颗卫星,运行于地球晨昏交界线上方的极地轨道上,是世界首颗民用晨昏轨道气象卫星,将与在轨的风云三号C星和D星组网运行,三星组网后,可填补全球数值天气预报6小时同化窗内卫星资料的空白,实现全球观测资料100%覆盖,有力提升我国气象预报预测、应对气候变化、构建防灾减灾体系、建立环境和生态监测、空间天气预报预警等能力<sup>[1]</sup>,我国也因此成为国际上唯一同时拥有上午、下午、晨昏三条轨道气象卫星组网观测能力的国家。

风云三号E星共装载了11台有效载荷,包括7台升级换代仪器,其中红外高光谱大气探测仪II型(FY-3E/HIRAS-II)主要任务为获取全球的大气温度、湿度廓线分布探测,通过测量大气在不同光谱通道的辐射值,根据大气中不同高度特定气体光谱吸收带与大气辐射的相互作用关系,求解权重函数分布参数和红外大气辐射传输方程,定量反演大气温湿度三维分布<sup>[2]</sup>,为数值天气预报提供基础数据。相对于风云三号D星红外高光谱大气探测仪I型<sup>[3]</sup>(FY-3E/HIRAS-I),国家卫星气象中心对HIRAS-II提出了新的技术指标要求,在维持光谱波段及光谱分辨率水平不变的条件下,提高了对红外宽波段连续高光谱探测、对地观测覆盖能力、辐射探测灵敏度,以及光谱和辐射定标精度的要求。

为实现仪器在轨运行后提供准确的业务观测资料,满足精度要求和定量化应用需求,2020年12月31日至2021年3月5日,仪器整机进行了全面的光谱和辐射热真空(Thermal Vacuum, TVAC)地面定标试验。光谱定标的目的是确定仪器的光谱线型,并且对光谱(波数表示)进行准确定位<sup>[4]</sup>;辐射定标的目的是建立仪器输出信号与外部辐射绝对物理量之间的定量关系<sup>[5]</sup>。

开展光谱和辐射地面定标是HIRAS-II标志性

能测试的重要环节,为仪器的在轨定标和资料应用奠定了基础。地面辐射定标过程中的非线性(Non-Linearity, NL)订正对辐射定标精度具有重要的影响,且通过热真空试验推导得到的非线性系数能够作为仪器发射后在轨订正的输入参数<sup>[6]</sup>。非线性与探测器自身、工作电路、模数转换器等多种因素相关,其中最主要因素来自于探测器自身<sup>[7]</sup>,非线性效应影响仪器干涉数据的准确度,使复原光谱信噪比降低。针对原始复原光谱带内信号的非线性订正算法最初由威斯康星大学麦迪逊分校的空间科学与工程中心(UW-SSEC)开发<sup>[8]</sup>,且在大多数干涉仪中成功应用<sup>[9]</sup>。国家卫星气象中心吴春强针对FY-3D/HIRAS-I在轨数据进行非线性订正,首次提出通过复原光谱各波数响应度分布趋势最小化推导非线性系数的方法,显著降低了HIRAS-I辐射定标不确定度<sup>[10]</sup>,该方法是本文对FY-3E/HIRAS-II开展非线性订正的重要参考。

本文对HIRAS-II热真空地面定标试验数据的非线性进行研究,针对长波红外和中波1红外探测器的自身特点,通过原始复原光谱信号分析二次项非线性产生的影响,基于带内光谱进行非线性订正,采用求解复原光谱各波数响应度和定标方程两种方法拟合二次项非线性系数,并对多个工况下的非线性系数评估稳定性和不确定度,最后比较非线性订正前后的辐射定标光谱亮温偏差变化。

## 1 HIRAS-II原始探测信号的非线性

### 1.1 探测器非线性信号成因

FY3E/HIRAS-II是一台干涉分光式傅里叶变换光谱仪(Fourier Transform Spectrometer, FTS),在3.92~15.38  $\mu\text{m}$ 的中、长波红外波段中,光谱探测通道大于1370个,光谱分辨率最高能够达到0.625  $\text{cm}^{-1}$ ,在FY-3D/HIRAS-I产品研制基础上,HIRAS-II驻留视场(FOR)内探元阵列由2×2排列提升至3×3排列,每一个探元的对地观测张角为1°(HIRAS-I为1.1°),具有更高的空间分辨率。HIRAS-II在探测灵敏度、光谱和辐射定量化精度以及使用寿命方面进行了重点提升,有利于观测资料精度的进一步

提高。

HIRAS-II 长波红外探测器使用光电导(Photoconductive, PC)型碲镉汞(Mercury Cadmium Telluride, HgCdTe)探测器,中波 1 红外探测器使用光生伏特(Photovoltaic, PV)型碲镉汞探测器,中波 2 红外探测器使用光生伏特型锑化铟(Indium Antimonide, InSb)探测器。理论上,探测器的输出信号大小与输入信号能量呈线性关系<sup>[11]</sup>,其中碲镉汞探测器的工作方式为电子的带间跃迁,具有高吸收系数、量子效率和高探测率等优点,但由于碲镉汞自身的特点,当入射光子数大于  $10^{19} \text{ photons} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$  时,由于载流子寿命问题,碲镉汞探测器会对光子产生明显的非线性响应<sup>[12]</sup>。辐射定标中黑体辐射的红外光被准直光路汇聚后入射到探测器上,导致探测器入射光子数大于上值,红外辐射探测器采集到的干涉数据存在非线性效应<sup>[13]</sup>,理想情况干涉数据强度  $I_{Li}$  与实际测量干涉数据强度  $I_{me}$  满足如下多项式函数关系:

$$I_{Li} = I_{me} + a_2 I_{me}^2 + a_3 I_{me}^3 + \dots \quad (1)$$

式(1)中,  $a_2$ 、 $a_3$  均为非线性待定系数。理想情况干涉图光强  $I_{Li}$  表示为测量干涉图光强  $I_{me}$  的各阶次叠加,由于实际仪器的三次及更高阶次的非线性影响较小,故忽略其高次非线性系数,仅考虑二次非线性对 HIRAS-II 光谱造成的影响,并且重点研究二次非线性订正方法。因此式(1)可简化为:

$$I_{Li} = I_{me} + a_2 I_{me}^2 \quad (2)$$

探测器的干涉信号包括与光程差有关的交流分量和与光程差无关的直流分量,根据普朗克定律以及傅里叶变换光谱仪干涉光强度表达式<sup>[14]</sup>能够模拟得到理想干涉数据,如图 1 所示为模拟得到的 300 K 温度、650~1 135  $\text{cm}^{-1}$  波段归一化干涉图的交流分量  $I$ 。

因此,可将式(2)中理想干涉图与实测干涉图的非线性关系模型改写为:

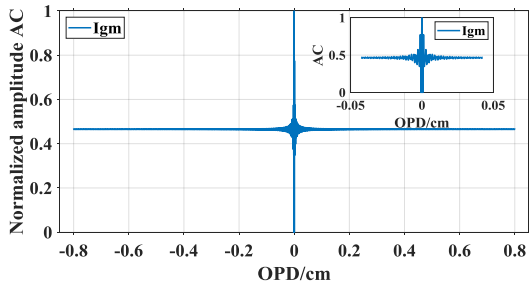


图 1 干涉图交流分量归一化模拟数据

Fig. 1 Normalized simulation AC interferogram

$$I_L + V_L = I_m + V_m + a_2 (I_m + V_m)^2 \quad (3)$$

式中,  $I_L$  和  $V_L$  分别是理想干涉图  $I_{Li}$  的交流分量和直流分量,同理  $I_m$  和  $V_m$  分别是测量干涉图  $I_{me}$  的交流分量和直流分量<sup>[14]</sup>。与光程差有关的交流分量  $I_L$  和  $I_m$  定义为探测器/前置放大器的输出电压;  $V_L$  和  $V_m$  定义为理想和实测的直流分量电压。

由于干涉图的直流分量在光谱维(即频域)位于 0 波数处,对光谱不产生影响,故可以对式(3)展开并去掉单纯的直流分量后得到:

$$I_L = (1 + 2a_2 V_m) I_m + a_2 I_m^2 \quad (4)$$

对式(4)作傅里叶变换后得到理想光谱与实测光谱的二次非线性关系:

$$C_L = (1 + 2a_2 V_m) C_m + a_2 C_m \otimes C_m \quad (5)$$

式中,  $C_L$  和  $C_m$  分别是理想和实测的原始光谱,实测干涉图平方项  $I_m^2$  经傅里叶变换后表现为光谱的自卷积  $C_m \otimes C_m$ 。图 2 为前述模拟的理想干涉图交流分量  $I$  和其平方项  $I^2$  分别作快速傅里叶变换(FFT)得到的归一化频谱图。

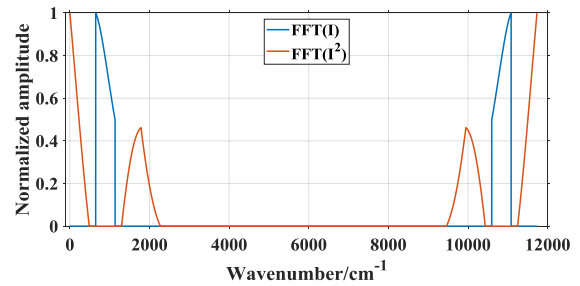


图 2 干涉图一次项和平方项分别 FFT 后的归一化频谱对比  
Fig. 2 Comparison of normalized spectrum between first-order and second-order interferogram after FFT

图 2 中蓝色曲线为理想干涉图  $I$  作 FFT 得到的原始双边频谱图,理想光谱位于 650~1 135  $\text{cm}^{-1}$  波段之间;而红色曲线表示干涉图平方项  $I^2$  作 FFT 后引起的光谱畸变,分别位于原始光谱频带外的低频(0~485  $\text{cm}^{-1}$ )和低频二次谐波(1 300~2 270  $\text{cm}^{-1}$ )区域,与带内(650~1 135  $\text{cm}^{-1}$ )光谱不重叠,对原始光谱未产生影响。结合式(5)表明二次非线性对原始光谱的影响可分为两部分,一是光谱自卷积部分  $a_2 C_m \otimes C_m$  (即干涉图平方项在光谱维的表现形式)引起带外光谱畸变;另一部分  $(1 + 2a_2 V_m) C_m$  引起带内光谱缩放,乘积项  $1 + 2a_2 V_m$  称为实测光谱  $C_m$  的缩放因子,包括二次非线性系数  $a_2$  和实测的直流分量电压  $V_m$ 。

## 1.2 HIRAS-II原始谱中信号成分

通过分析低频端带外光谱是否存在虚假的光谱响应<sup>[15]</sup>,是最早被提出判断傅里叶变换光谱仪探测数据是否存在上述式(1)多项式形式非线性响应的重要手段。以图3所示HIRAS-II热真空试验测量的内黑体(300 K)原始光谱数据为例,在原始长波光谱低频端(0波数附近)存在明显的信号电平,表明在该测量光谱中存在非线性效应,HIRAS-II的中波1测量光谱同样存在该非线性效应,而中波2测量光谱的非线性效应不明显。

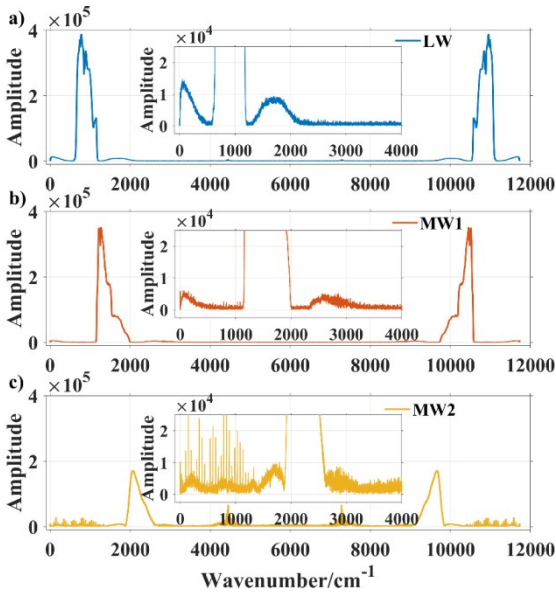


图3 HIRAS-II热真空试验内黑体(300 K)原始光谱:(a)长波,(b)中波1,(c)中波2

Fig. 3 Raw spectrum of internal calibration target at 300 K form HIRAS-II TVAC tests:(a) LW, (b) MW1, (c) MW2

另外,从图中能够看出长波、中波1原始光谱在带外高频端的二次谐波区域存在畸变,且不与带内信号重合,表现出非线性效应对光谱产生的影响。但在带外高频端的光谱畸变位置区域中,还包含了因探测器系统反射引起的二次反射谱(double-bounce),这是由于实际情况下有一小部分辐射由于二次反射,其采样干涉图的实际光程差变为原来的二倍,但作光谱转换时仍按照原光程差进行变换。图4根据上述原始内黑体光谱分别模拟得到了理想情况带内光谱、自卷积光谱以及double-bounce谱。

图中蓝色曲线是对原始光谱带外信号清零后模拟的理想情况信号成分;黄色曲线是模拟二阶干涉图表现在光谱域的自卷积信号成分,出现在带外低频和低频二次谐波位置;红色曲线则是二次反射

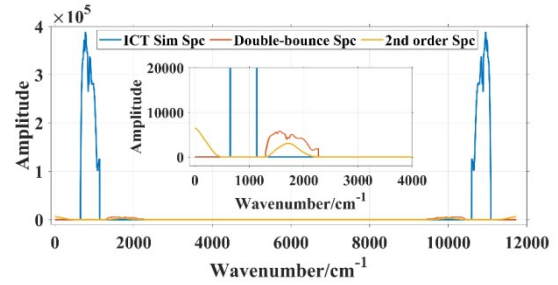


图4 HIRAS-II原始光谱中的各个信号成分

Fig. 4 Signal components in raw spectrum of HIRAS-II

形成的double-bounce谱,出现在带外高频二次谐波位置。可以看出,double-bounce与二次项非线性均在相同的带外高频位置对光谱产生影响,但double-bounce谱具有带内谱的特征,而由二次非线性引起的光谱畸变则较为光滑。包含上述各种信号成分的模拟原始谱和实测光谱如图5所示,其中红色曲线为模拟原始谱,蓝色曲线为实测光谱。

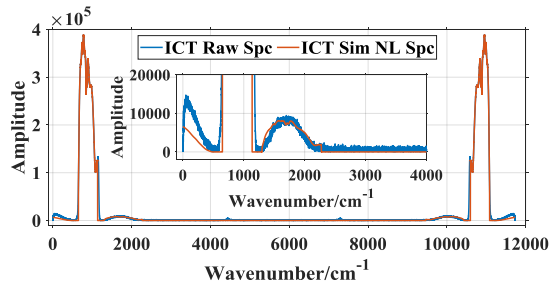


图5 HIRAS-II原始谱模拟与实测对比

Fig. 5 Comparison of the raw spectrum of HIRAS-II between simulation and measurement

通过对带外信号的分析可以确认,HIRAS-II的长波和中波1存在二次非线性效应,而中波2波段不明显,故需要对长波和中波1波段进行二次非线性修正,下面将介绍具体修正方法。

## 2 二次非线性修正方法

### 2.1 带内谱修正模型

二次项非线性对光谱造成的影响分别为引起带内光谱的缩放和引起带外光谱产生畸变,故非线性修正方法包括修正带内光谱缩放因子或使带外光谱畸变清零。根据HIRAS-II测量光谱中的信号成分,考虑到其带外高频二次谐波位置存在非线性畸变和double-bounce谱重叠的情况,故不使用带外二次谐波信号修正非线性。由于二次非线性引起的带外畸变与带内光谱不重叠,本文将通过带内光谱进行非线性修正,通过式(5)可分解出仅对带内

光谱有效的非线性订正方程,即:

$$C_L = (1 + 2a_2V_m)C_m \quad (6)$$

## 2.2 直流分量电压估算

HIRAS-II地面热真空试验辐射定标阶段,仪器安装在定标小车上,外部用一个冷黑体(Deep Space, DSP)作为低温定标源(或使用冷屏),以星上内黑体(Internal Calibration Target, ICT)作为高温定标源;定标小车另外一个方向安装一个变温外黑体(Earth Scene, ES)作为目标,温度范围在180~350 K,通过变温外黑体多个温度点测量的辐射光谱来获取仪器的非线性特性。HIRAS-II的常规扫描观测模式如图6所示,每条扫描线均扫描DSP、ICT和ES。

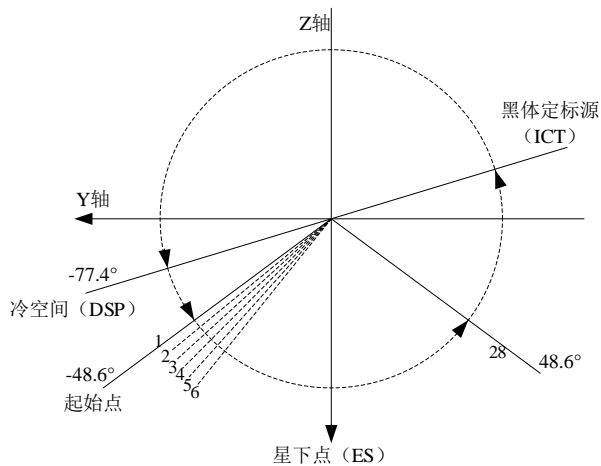


图6 HIRAS-II扫描方位图

Fig. 6 HIRAS-II scanning diagram

每个扫描周期起始时,扫描镜在星下点 $-48.6^\circ$ 方位开始对地(ES)驻留观测,完成观测后步进 $3.6^\circ$ 至下一观测点,完成第28个采样点后,扫描镜从星下点 $48.6^\circ$ 方位快速扫描到星上内黑体(ICT)定标源处(星下点 $+102.6^\circ$ ),完成2次采样点观测后回扫至冷空间(DSP)位置(星下点 $-77.4^\circ$ ),完成2次采样点观测后扫描到起始方位(星下点 $-48.6^\circ$ )。试验中通过分别指向DSP、ICT、ES扫描方位采集辐射数据。

对于DSP、ICT和ES的原始辐射光谱,根据式(6)求解理想光谱时,需动态计算式中缩放因子 $1 + 2a_2V_m$ 的直流分量电压 $V_m$ ,分别记为 $V_{DSP}$ 、 $V_{ICT}$ 和 $V_{ES}$ 。理论上,DSP光谱的直流分量电压 $V_{DSP}$ 主要由仪器背景发射和探测器暗电流产生;当仪器扫描方位从DSP转向ICT或ES时,前置放大器输出的直流电压会产生增量,记为 $\Delta_{ICT}$ 或 $\Delta_{ES}$ ,则有 $V_{ICT} = V_{DSP} + \Delta_{ICT}$

以及 $V_{ES} = V_{DSP} + \Delta_{ES}$ 。但由于HIRAS-II探测器输出的直流量经过了电路隔直,并且存在电路自身的直流偏移,无法重建探测器输出直流量,因此需通过测量的光谱近似估计直流分量电压。其中,DSP光谱直流分量电压 $V_{DSP}$ 近似计算表达式如下:

$$V_{DSP} \approx \frac{1}{2} \sum_n \left| \frac{C_{DSP,n_i}}{n/2} \right| * gain \quad (7)$$

式(7)中, $C_{DSP}$ 为复数形式的DSP光谱, $n$ 为通道数, $n_i$ 为具体通道, $gain$ 为引入的增益,数值为 $1/(2^{16}/20)$ 。

对于扫描ICT和ES过程产生的电压增量 $\Delta_{ICT}$ 和 $\Delta_{ES}$ 的计算表达式为:

$$\Delta_{ICT} = \frac{1}{2} \sum_n \left| \frac{C_{ICT,n} - C_{DSP,n_i}}{n/2} \right| * gain \quad (8)$$

$$\Delta_{ES} = \frac{1}{2} \sum_n \left| \frac{C_{ES,n} - C_{DSP,n_i}}{n/2} \right| * gain \quad (9)$$

式(8)和式(9)中, $C_{ICT}$ 和 $C_{ES}$ 分别是复数形式的ICT和ES光谱。

## 2.3 非线性系数推导方法

非线性系数 $a_2$ 的求解方法采用了两种方式,分别根据复原光谱各波数点的响应度在不同温度点的一致性和变温黑体定标偏差的一致性进行推导。

定义复原光谱各波数点的响应度为 $P_r$ ,当变温黑体温度在一段时间内缓慢变化时,通过ES光谱和DSP光谱进行求解:

$$P_r = |C_{L,ES} - C_{L,DSP}| / (B_{ES} - B_{DSP}) \quad (10)$$

式(10)中, $C_{L,ES}$ 和 $C_{L,DSP}$ 分别是给定非线性系数下根据式(6)计算得到的理想ES光谱和DSP光谱, $B_{ES}$ 是不同温度下的ES光谱辐射量, $B_{DSP}$ 是DSP的光谱辐射量。

对于线性系统, $P_r$ 不随变温黑体温度变化而改变,即不同温度点的 $P_r$ 具有一致性,定义代价函数 $Z_p$ 为给定光谱通道内不同ES温度下 $P_r$ 计数值的标准差之和,即:

$$Z_p = \sum_{i=1}^m \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{j=1}^n [P_r(\sigma_i) - \overline{P_r(\sigma_i)}]^2} \quad (11)$$

式(11)中, $\sigma_i$ 为第 $i$ 个通道的波数, $n$ 为变温黑体温度点数量, $m$ 为带内通道数, $\overline{P_r(\sigma_i)}$ 为通道 $i$ 在 $n$ 个温度点的响应度计数值的均值, $P_r(\sigma_i)$ 为通道 $\sigma_i$ 在温度点 $j$ 的响应度计数值。当代价函数 $Z_p$ 取得最小值时的非线性系数 $a_2$ 即为推导结果。

另外,也可以通过定标方程的方法推导非线性

系数,对于给定的非线性系数 $a_2$ ,计算理想情况下的 DSP 光谱 $C_{L,DSP}$ 、ICT 光谱 $C_{L,ICT}$ 和 ES 光谱 $C_{L,ES}$ ,以 ICT 作为热场景参考源,以 DSP 作为冷场景参考源,对 ES 光谱进行复数辐射定标,得到 ES 在不同温度点 $T_i$ 的光谱辐射 $B_{ES,i}$ ,定标方程如下:

$$B_{ES,i} = \text{Re} \left[ \frac{C_{L,ES} - C_{L,DSP}}{C_{L,ICT} - C_{L,DSP}} \right] * (B_{ICT} - B_{DSP}) + B_{DSP}, \quad (12)$$

式(12)中, $\text{Re}[\ ]$ 为取复数光谱的实部, $B_{ICT}$ 是 ICT 光谱辐射量, $B_{DSP}$ 是 DSP 光谱辐射量,根据普朗克公式,得到 $T_i$ 温度时变温黑体 ES 定标后光谱辐射 $B_{ES,i}$ 的亮温为:

$$B_{ES,i}(\sigma) = \frac{c_2 \sigma}{\ln \left( \frac{c_1 \sigma^3}{\pi B_{ES,i}} + 1 \right)}, \quad (13)$$

式(13)中, $c_1$ 为第一辐射常数 $c_1 = 3.7415 \times 10^{-5} \text{mW} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{cm}^{-4}$ , $c_2$ 为第二辐射常数 $c_2 = 1.43879 \text{cm} \cdot \text{K}$ , $\sigma$ 为波数。

设 ES 定标光谱亮温与实际温度 $T_i$ 在各个通道的亮温偏差函数为 $L_T$ ,则:

$$L_T = B_{ES,i} - T_i. \quad (14)$$

定义代价函数 $Z_L$ 为所有温度点的亮温偏差函数的标准差之和,即:

$$Z_L = \sum_{i=1}^m \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{j=1}^n [L_T(\sigma_i) - \overline{L_T(\sigma_i)}]^2}, \quad (15)$$

式(15)中, $\sigma_i$ 为第 $i$ 个通道的波数, $n$ 为 ES 温度点数量, $m$ 为带内通道数, $\overline{L_T(\sigma_i)}$ 为通道 $i$ 在 $n$ 个温度点的亮温偏差函数均值, $L_T(\sigma_i)$ 为通道 $\sigma_i$ 在温度点 $j$ 的亮温偏差。通过定标后的 ES 亮温偏差一致性,即代价函数 $Z_L$ 取得最小值时的非线性系数 $a_2$ 为推导结果。

### 3 非线性订正结果和分析

#### 3.1 非线性系数推导结果

HIRAS-II 热真空试验辐射定标阶段设置仪器 3 个试验工况(TVAC),如表 1 所示,考虑到在轨实际工作温度变化较小,分别设置为温控(以基板温度为准) $10^\circ\text{C}$ (探测器不温控)、温控 $10^\circ\text{C}$ (探测器工作在 85 K)、温控 $15^\circ\text{C}$ (探测器工作在 85 K)。

记三个试验工况分别为 TVAC1、TVAC2 和 TVAC3(或 S1、S2 和 S3),在每个试验工况下完成变温黑体的多个温度点辐射测量,各工况设置的黑体温度点分别为:190 K、195 K、200 K、205 K、210 K、215 K、220 K、225 K、230 K、235 K、240 K、245 K、

表 1 HIRAS-II 辐射定标试验工况

Table 1 TVAC tests of HIRAS-II radiometric calibration

试验工况	试验内容	热控温度	探测器状态
TVAC1	升降温曲线	$10^\circ\text{C}$	不温控
TVAC2	升降温曲线	$10^\circ\text{C}$	85K
TVAC3	升降温曲线	$15^\circ\text{C}$	85K

250 K、255 K、260 K、265 K、270 K、275 K、280 K、285 K、290 K、295 K、300 K、305 K、310 K 共 25 个点,选择 240~300 K 之间各温度点的原始数据求解非线性系数。

记升温曲线为 up,降温曲线为 dn,根据低温定标源选择不同(冷黑体 143K 或冷屏 15K),以工况一第一条升温曲线为例,当选择冷黑体时记为 TVAC1-up1,当选择冷屏时记为 TVAC1-up10,分别对 TVAC1-up1、TVAC1-up10、TVAC1-dn10、TVAC1-up20、TVAC2-up1、TVAC2-up10、TVAC2-dn1、TVAC2-dn10、TVAC2-up2、TVAC2-up20、TVAC3-up1、TVAC3-up10、TVAC3-up20 共 13 条工况曲线求解非线性系数。

记根据复原光谱各波数点的响应度在不同温度点的一致性推导非线性系数为方法一,记根据变温黑体定标偏差的一致性推导非线性系数为方法二。图 7-8 分别为采用方法一和方法二对上述 13 条工况曲线推导长波和中波 1 的非线性系数结果。

其中,图 7(a)和图 7(b)为长波分别采用方法一和方法二推导得到的各个 FOV 非线性系数,图 8(a)和图 8(b)为中波 1 分别采用方法一和方法二推导得到的各个 FOV 非线性系数,采用不同颜色柱形图表示各个工况曲线,相近颜色柱形图表示属于同一试验工况 TVAC。可以看出,不同 FOV 之间的非线性系数整体稳定,保持同一数量级;不同工况内的非线性系数相对稳定,无较大波动。另外,采用两种不同方法对同一 FOV 求解的非线性系数整体一致。

通过计算非线性系数在不同工况间的标准差和相同工况内的标准差分析各个 FOV 的系数稳定性,如图 9-10 所示分别为方法一和方法二的非线性系数标准差。

以上两图中,(a)和(b)分别为方法一(或方法二)长波和中波 1 各个 FOV 所有 13 条工况曲线非线性系数标准差,(c)和(d)分别为方法一(或方法二)长波和中波 1 各个 FOV 在 TVAC1、TVAC2 和 TVAC3 不同工况内的非线性系数标准差。其中,不同工况

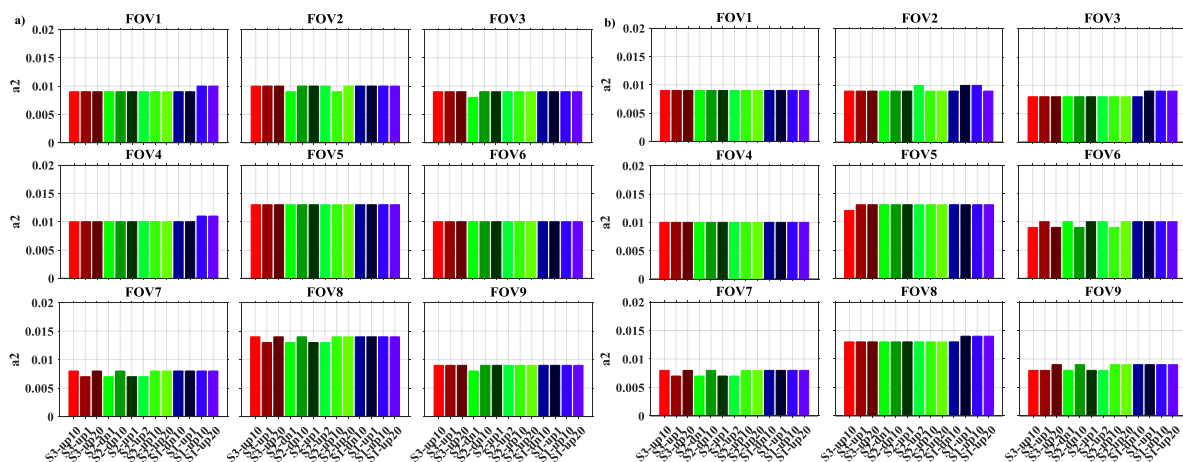


图7 长波非线性系数推导结果:(a)方法一,(b)方法二

Fig. 7 NL correction coefficients of LW:(a) first method, (b) second method

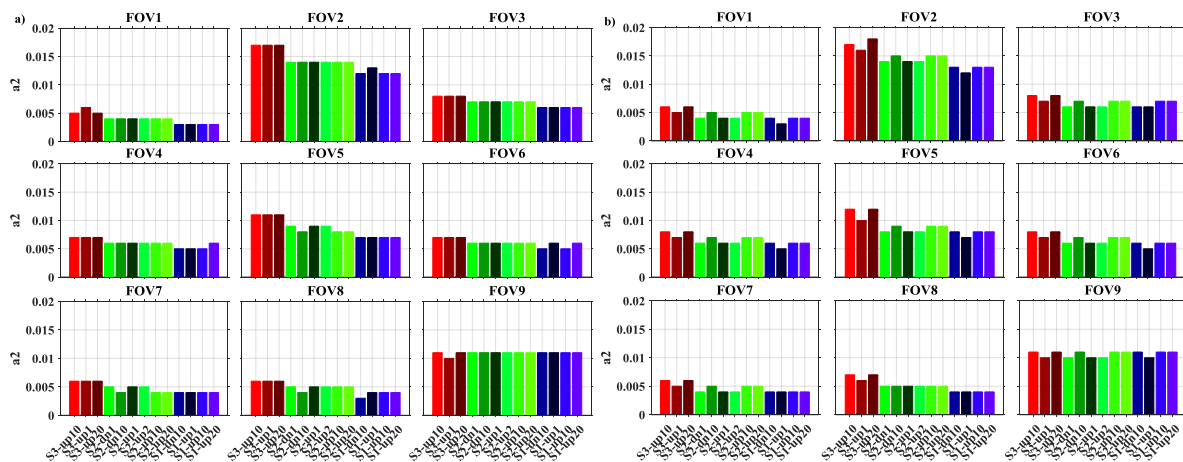


图8 中波1非线性系数推导结果(a)方法一,(b)方法二

Fig. 8 NL correction coefficients of MW1:(a) first method, (b) second method

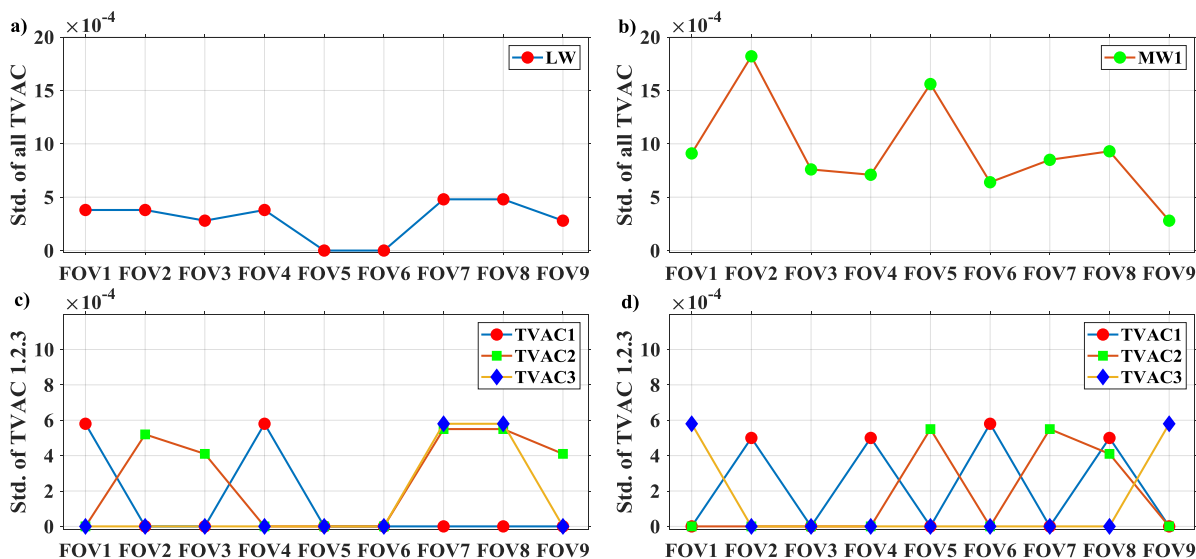


图9 方法一非线性系数标准差(a)长波所有工况,(b)中波1所有工况,(c)长波不同工况,(d)中波1不同工况

Fig. 9 Standard deviation of NL correction coefficients with the first method (a) LW of all TVAC, (b) MW1 of all TVAC, (c) LW of different TVAC, (d) MW1 of different TVAC

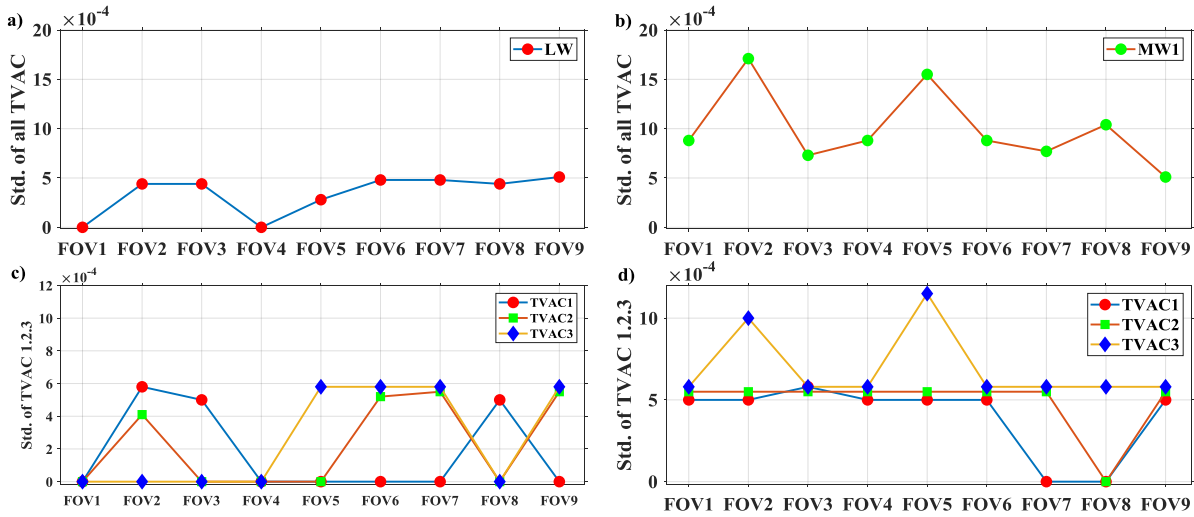


图 10 方法二非线性系数标准差(a)长波所有工况,(b)中波 1 所有工况,(c)长波不同工况,(d)中波 1 不同工况  
 Fig. 10 Standard deviation of NL correction coefficients with the second method (a) LW of all TVAC, (b) MW1 of all TVAC, (c) LW of different TVAC, (d) MW1 of different TVAC

间长波系数标准差小于  $4.8 \times 10^{-4}$ , 中波 1 系数标准差小于  $18.2 \times 10^{-4}$ , 工况间系数标准差绝大部分均在  $6 \times 10^{-4}$  以下, 以上结果能够反映出根据不同工况曲线和方法推导出的非线性系数均具有整体稳定的规律。

定义非线性系数标准差与均值之比的百分数形式为非线性系数的不确定度, 如图 11 所示。

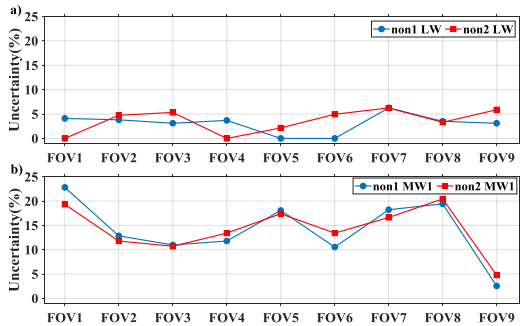


图 11 非线性系数不确定度 (a)方法一和方法二长波,(b)方法一和方法二中波 1

Fig. 11 The uncertainty of NL correction coefficients (a) LW of first and second method, (b) MW1 of first and second method

图 11(a)和(b)分别为方法一和方法二推导的长波和中波 1 各个 FOV 的非线性系数不确定度, 长波整体系数不确定度优于 6.25%, 绝大多数 FOV 优于 5%; 中波 1 整体系数不确定度优于 23%, 绝大多数 FOV 优于 20%。

### 3.2 非线性订正过程

以较为符合星上工作状态的 TVAC2 试验工况曲线为例, 分别分析非线性订正过程对方法一和方法二中代价函数产生的作用。图 12-13 分别为变温黑体 270~300 K 的长波和中波 1 采用作非线性订正前后的 FOV1 光谱各波数点响应度曲线对比。

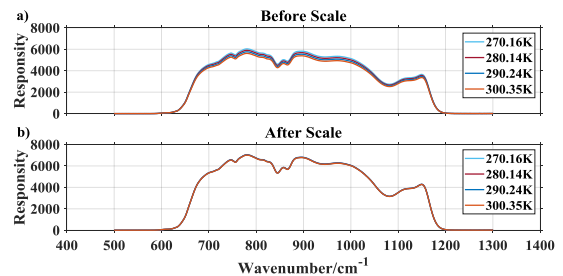


图 12 长波非线性订正前后的光谱各波数点响应度(a)订正前,(b)订正后

Fig. 12 Responsivity of each wavenumber in LW with NL correction and non-NL correction (a) before scale, (b) after scale

以上两图中, 上半部分曲线为原始光谱的各波数点响应度, 下半部分为非线性订正后的各波数点响应度。原始光谱在较高温度点(300 K)的响应度整体幅值明显低于较低温度点(270 K)响应度, 表现出明显的非线性效应; 经过非线性订正后的不同温度点复原光谱响应度整体幅值呈现聚合状态, 表现出良好的一致性。

对于方法二, 选择变温黑体 240.41 K、280.29



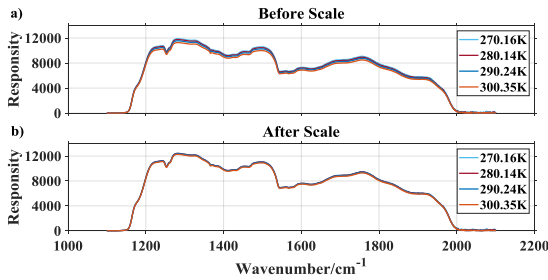


图 13 中波 1 非线性订正前后的光谱各波数点响应度(a)订正前, (b)订正后

Fig. 13 Responsivity of each wavenumber in MWI with NL correction and non-NL correction (a) before scale, (b) after scale

K 和 300.44 K 三个典型温度, 分别比较非线性订正前后的长波和中波 1 定标光谱亮温偏差, 以 FOV1 为例, 如图 14 所示。

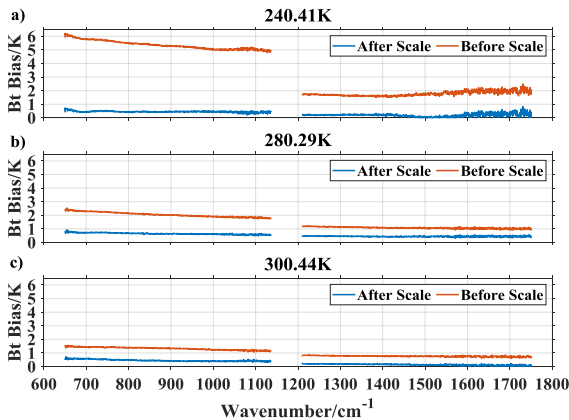


图 14 三个典型温度下订正前后变温黑体定标亮温偏差(a) 240.41 K, (b)280.29 K, (c)300.44 K

Fig. 14 BT bias of ES calibration target of three typical temperatures with NL correction and non-NL correction (a) 240.41 K, (b) 280.29 K, (c) 300.44 K

其中, 橙色曲线为原始定标光谱亮温偏差, 蓝色曲线为采用方法二非线性订正后的定标光谱亮温偏差, 从整体上能够看出订正后的亮温偏差明显降低, 偏差表现规律具备一致性, 图 15 为此工况所有温度点辐射数据作非线性订正后的定标光谱亮温偏差, 长波和中波 1 光谱亮温偏差均小于 1 K。

### 3.3 非线性订正结果分析

以 TVAC2-up20 工况曲线为例, 对原始数据作非线性订正, 通过对比订正前后 200~305 K 温度辐射定标光谱沿光谱维平均后的亮温偏差(图 16-17), 以及 280 K 温度的长波和中波 1 各个 FOV 的定标光谱亮温偏差(图 18), 分析非线性订正效果。

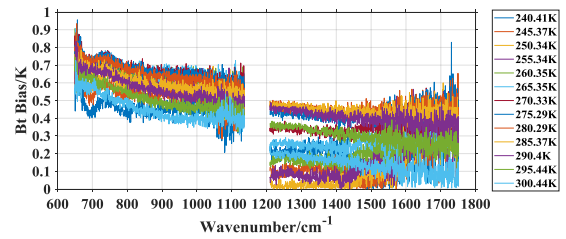


图 15 各个温度点下订正后的亮温偏差

Fig. 15 BT bias of various temperature points with NL correction

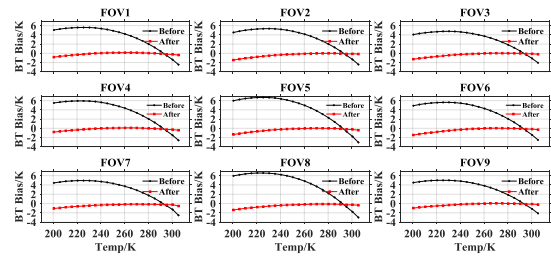


图 16 长波非线性订正后各温度点亮温偏差

Fig. 16 BT bias of various temperature points with NL correction in LW

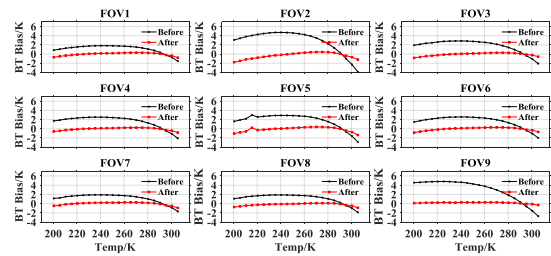


图 17 中波 1 非线性订正后各温度点亮温偏差

Fig. 17 BT bias of various temperature points with NL correction in MW1

图 16-17 分别为非线性订正前后长波和中波 1 波段各温度点的定标光谱亮温均值偏差曲线, 其中黑色曲线为原始定标光谱亮温偏差, 红色曲线为非线性订正后的定标光谱亮温偏差。订正后各个温度点的定标光谱亮温偏差整体优于原始偏差, 低温端订正效果更加明显。HIRAS-II 地面热真空辐射定标试验以 280K 作为考核温度点, 在考核温度点也表现出良好的订正效果。

图 18 为 280 K 温度点下长波和中波 1 各个 FOV 辐射定标数据作非线性订正后的光谱亮温偏差, 其中虚线为亮温偏差考核指标要求, 长波要求在  $\pm 0.4$  K 至  $\pm 1$  K 之间, 中波 1 要求在  $\pm 0.4$  K 至  $\pm 0.5$  K 之间, 依具体通道而定。经过非线性订正后的两个波段各个 FOV 的定标光谱亮温偏差均满足指标要求, 表明非线性订正显著提高了辐射定标数据精度。

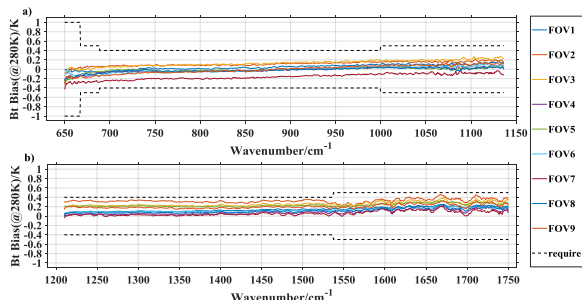


图18 280 K考核温度点亮温偏差

Fig. 18 BT bias at examined temperature point of 280 K

## 4 结语

由于FY-3E/HIRAS-II的长波红外和中波1红外探测器存在非线性效应,在辐射定标阶段需要对这两个波段的原始光谱进行订正,减少非线性对定标精度的影响。本文针对HIRAS-II发射前热真空地面定标试验数据,就长波和中波1原始光谱数据的二次非线性开展了以下研究:

(1) 针对HIRAS-II原始光谱数据分析了二次非线性产生的影响,通过缩放原始带内光谱进行非线性订正,缩放因子包含需动态计算的直流分量电压 $V_m$ 以及需推导求解的二次非线性系数 $a_2$ ;

(2) 采用了两种方法推导二次非线性系数 $a_2$ ,分别为求解复原光谱各波数点响应度在不同温度点的最小分布和求解变温黑体定标偏差的最小分布。根据不同工况数据获取的系数结果表明,非线性系数整体稳定,两种方法推导的系数对同一FOV具有一致性;

(3) 针对原始光谱数据分析了非线性订正前后的定标偏差变化,经过非线性订正后的辐射定标数据精度具有明显提升,如在280 K考核温度点下的定标亮温偏差均能满足指标要求。

研究HIRAS-II热真空地面定标试验数据的非线性效应对分析原始数据信号非线性产生机理、提升定标数据精度等方面具有重要作用,本文获取的非线性系数及其推导方法对仪器在轨运行后的辐射定标起到参考意义,后续将结合仪器在轨运行数据持续深入研究非线性订正方法,以支撑数据预处理环节和提高资料应用质量。

## References

[1] ZHANG Peng, YANG Lei, GU Song-Yan, *et al.* Meteorological requirements for the early-morning-orbit satellite [J]. *Advances in Meteorological Science and Technology*, 2015, **5**(02): 6-12. (张鹏, 杨磊, 谷松岩, 等. 晨昏轨道

卫星的气象应用需求分析. *气象科技进展*), 2015, **5**(02): 6-12.

- [2] Zhang C M, Gu M J, Hu Y, *et al.* A Study on the Retrieval of temperature and humidity profiles based on FY-3D/HIRAS infrared hyperspectral data [J]. *Remote Sensing*, 2021, **13**(11): 2157.
- [3] QI C L, WU C Q, HU X Q, *et al.* High spectral infrared atmospheric sounder (HIRAS): system overview and on-orbit performance assessment [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2020, **58**(6): 4335-4352.
- [4] QI Cheng-Li, ZHOU Fang, WU Chun-Qiang, *et al.* Spectral calibration of Fengyun-3 satellite high-spectral resolution infrared sounder [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2019, **27**(4): 747-755. (漆成莉, 周方, 吴春强, 等. 风云三号红外高光谱探测仪的光谱定标 [J]. *光学精密工程*), 2019, **27**(4): 747-755.
- [5] XU Na, HU Xiu-Qing, CHEN Lin, *et al.* Cross-calibration of FY-2E/VISSR infrared window and water vapor channels with TERRA/MODIS [J]. *J. Infrared Millim. Waves*, 2012, **31**(4): 319-324. (徐娜, 胡秀清, 陈林, 等. 利用MODIS对FY-2E/VISSR红外窗区和水汽通道的交叉绝对辐射定标 [J]. *红外与毫米波学报*), 2012, **31**(4): 319-324.
- [6] Tobin D, Revercomb H, Knuteson R, *et al.* Suomi-NPP CrIS radiometric calibration uncertainty [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2013, **118**: 10589-10600.
- [7] YANG Min-Zhu, ZOU Yao-Pu, ZHANG Lei, *et al.* Non-linear effects of the Fourier transform spectrometer detector and its correction [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2017, **46**(10): 1023001. (杨敏珠, 邹曜璞, 张磊, 等. 傅里叶变换光谱仪探测器非线性的影响及其校正方法 [J]. *红外激光与工程*), 2017, **46**(10): 1023001.
- [8] Revercomb H E. Techniques for avoiding phase and non-linearity errors in radiometric calibration: a review of experience with the airborne HIS and ground-based AERI [C]. *Proceedings of the 5th International Workshop on Atmospheric Science from Space using FTS*, 1994: 353-378.
- [9] Han Y, Revercomb H, Crompton M, *et al.* Suomi NPP CrIS measurements, sensor data record algorithm, calibration and validation activities, and record data quality [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2013, **118**: 12734-12748.
- [10] WU C Q, QI C L, HU X Q, *et al.* FY-3D HIRAS radiometric calibration and accuracy assessment [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2020, **58**(6): 3965-3976.
- [11] Broudy R M, Reine M B. Advances in HgCdTe infrared focal plane technology [C]. *21st Annual Technical Symposium. International Society for Optics and Photonics*, 1979: 62-68.
- [12] Knuteson R O, Revercomb H E, Best F A, *et al.* Atmospheric emitted radiance interferometer. Part II: instrument performance [J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2004, **21**(12), 1777-1789.
- [13] SUN Yong-Feng, XU Liang, SHEN Xian-Chun, *et al.* High-order nonlinear response correction method for infrared radiation detector [J]. *Acta Physica Sinica*, 2021, **70**(6): 060701. (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**(6): 060701.
- [14] ZHOU Shi-Chun. Introduction to advanced infrared optoelectronic engineering [M]. Beijing: Science Press, 2014.
- (周世椿. 高级红外光电工程导论) [M]. 北京: 科学出版社, 2014.
- [15] Chase D B. Nonlinear detector response in FT-IR [J]. *Applied spectroscopy*, 1984, **38**(4): 491-494.