

基于响应率修正的傅里叶变换光谱仪非线性校正算法研究

邹曜璞^{1,2}, 冯 绚^{3*}, 韩昌佩^{1,2*}, 李利兵^{1,2}, 梁 骁^{2,4}, 钱 婧^{1,2}, 李秀举^{1,2}

(1. 中国科学院红外探测与成像技术实验室, 上海 200083;

2. 中国科学院上海技术物理研究所, 上海 200083;

3. 中国科学院空间应用工程与技术中心太空应用重点实验室, 北京 100094;

4. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 傅里叶变换高光谱仪器在定量化遥感领域展现出极大的优势, 非线性校正是保证在轨辐射定标精度不可缺少的过程。针对搭载于风云四号静止轨道干涉式红外探测仪(FY-4/GIIRS)运行轨道受日晒分布不均匀、仪器环境温度日变化剧烈的特点, 推导出一种基于仪器光谱响应率修正的非线性校正算法, 通过测量一组标准参考辐射源光谱量化值和光谱响应率, 拟合得到光谱响应率一次项修正系数。在仪器环境温度变化后, 利用一次项修正系数、黑体观测光谱值和黑体观测光谱响应率重新计算光谱响应率常数项修正系数, 就可以得到任意仪器环境温度下的仪器非线性校正系数。经仪器发射前地面热真空(TVAC)定标试验数据验证, 该算法简单有效, 在各试验环境温度工况下, 对 180~320 K 观测范围内的辐射定标精度均有明显的提高。

关键词: 红外探测; 辐射定标; 非线性校正; 傅里叶变换光谱仪; 高光谱

中图分类号: TN215

文献标识码: A

Research on nonlinear correction algorithm of Fourier transform spectrometer based on responsivity correction

ZOU Yao-Pu^{1,2}, FENG Xuan^{3*}, HAN Chang-Pei^{1,2*}, LI Li-Bing^{1,2}, LIANG Xiao^{2,4},
QIAN Jing^{1,2}, LI Xiu-Ju^{1,2}

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

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

3. Key Laboratory of Space Utilization, Technology and Engineering center for Space Utilization, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China;

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

Abstract: Fourier transform spectrometer shows great advantages in the field of quantitative remote sensing. Nonlinear correction is an important part to ensure the accuracy of on-orbit radiometric calibration. The FY-4/GIIRS located in the stationary orbit has the characteristics of uneven sunlight exposure and severe daily changes in the background temperature of the instrument. A nonlinear correction algorithm based on instrument spectral responsivity correction is derived. By measuring a set of standard reference radiation source spectral quantification values and spectral responsivity, fitting the correction coefficient of the primary term of spectral responsivity. After the ambient temperature of the instrument changes, the correction coefficient of the response rate constant term can be recalculated using the correction coefficient of the first-order term, the spectral value and the spectral responsivity of the black body observation, and the nonlinear correction coefficient of the instrument under any instrument background temperature can be obtained. Verified by the ground thermal vacuum (TVAC) calibration tests data before the launch of the instrument, the algorithm is simple and effective. In each ambient temperature test, the radiometric calibration accuracy in the observation range of 180-320 K

收稿日期: 2022-10-26, 修回日期: 2023-02-15

Received date: 2022-10-26, Revised date: 2023-02-15

基金项目: 国家自然科学基金项目(41905033)

Foundation item: The National Natural Science Foundation of China (41905033)

作者简介(Biography): 邹曜璞(1989—), 男, 江苏徐州人, 副研究员, 博士学位, 主要研究领域为静止轨道高光谱遥感仪器电路系统研制, 高光谱遥感数据处理, Email: zyp@mail.sitp.ac.cn

*通讯作者(Corresponding authors): Email: fengxuan@csu.ac.cn; changpei_han@mail.sitp.ac.cn

has been improved significantly.

Key words: infrared detection, radiometric calibration, nonlinearity correction, FTIR, hyper spectrum

引言

碲镉汞(MCT)红外光导探测器以其在长波红外波段优秀的光敏特性,在高光谱遥感仪器中被广泛采用。风云四号(FY-4)搭载的静止轨道干涉式红外探测仪(GIIRS)是一台傅里叶变换型红外高光谱大气探测仪,其长波红外通道便是采用光导型面阵碲镉汞探测器^[1]。傅里叶变换光谱仪具有高光通量的特点,而MCT在高光通量时,电导率与光照强度呈现出明显的非线性关系^[2]。此外,探测器光照的不均匀性、电路非均匀性等也会造成系统非线性响应^[3]。在以量化应用为目的的气象卫星载荷中,不进行非线性校正会使得定标结果产生较大的精度误差^[4]。

关于如何消除傅里叶变换光谱仪红外非线性影响,国内外进行了很多研究。有些方法是从仪器结构或放大电路的设计上削弱非线性的影响,如采用双口输出干涉仪的两个相反相位输出抵消非线性影响^[5],偏置或前置放大器电路中添加正反馈来克服每个探测器引线串联电阻产生的非线性等^[6]。这些硬件校正非线性的方法有较差的适应性,因此也出现了许多针对傅里叶变换型光谱仪非线性校正(NL correction)的软件校正算法。非线性校正算法发展到如今,校正效果比较有效的主要有自适应校正法(ACCM)和迭代收敛校正法(CICM)^[7],以及基于上述两种方法进行的适应性改进算法。ACCM在三次校准测量后拟合出干涉图校正系数,直接对干涉图进行非线性校正,但是该方法不适用于仪器自身辐射变化的情况。CICM是通过收敛迭代最小化带外畸变光谱来达到非线性校正的目的。此外,吴春强^[8]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。上述方法都需要获得准确干涉图的直流量。针对探测器输出采用交流耦合放大形式的电路,杨天杭^[9]等人给出了详细的采用带内光谱估算干涉图直流分量的方法。叶松^[10]等人指出当直流分量误差大于8%时,校正精度下降到小于90%。

针对运行于静止轨道FY-4/GIIRS温度场日变化剧烈、长波碲镉汞探测器输出电压交流耦合的特点,本文推导出一种基于光谱响应率修正的傅里叶

变换光谱仪非线性校正算法。该算法无需估算干涉图直流分量,且当仪器背景温度改变后,仅需根据定标黑体光谱值和黑体光谱响应率就可以更新校正参数。经发射前仪器地面定标试验数据验证,该算法计算简单,且对仪器非线性响应有很好的校正效果。

1 非线性响应数学模型

假设照射在探测器上的光强为 I ,系统的非线性响应(包括探测器非线性和放大电路非线性响应) $R(I)$ 可以用 I 的多项式展开来表示^[11]:

$$R(I) = a_0 + a_1 I + a_2 I^2 + a_3 I^3 + \dots \quad (1)$$

对于时间调制型傅里叶变换光谱仪,在探测器上接收的是动镜运动调制后的相干光,光强为 $I_{idle}(x)$, x 为两束相干光的光程差。其与目标的光谱 $S_{idle}(\nu)$ 有傅里叶变换关系^[12],如式(2):

$$I_{idle}(x) = \int_0^{\infty} 2S_{idle}(\nu) d\nu + \int_0^{\infty} 2S_{idle}(\nu) \cos(2\pi\nu x) d\nu. \quad (2)$$

在实际系统中,三次及三次以上的高阶非线性影响比较小,本文只考虑系统二次非线性,得到实际系统非线性输出 $I_m(x)$ 为:

$$I_m(x) = a_0 + a_1 I_{idle}(x) + a_2 I_{idle}^2(x) \quad (3)$$

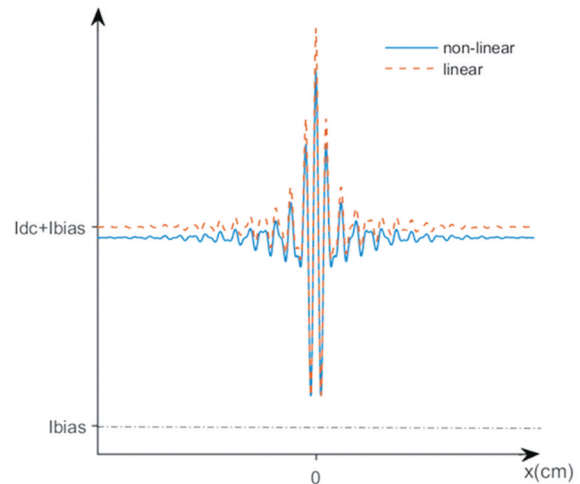


图1 干涉图非线性响应示意

Fig. 1 Interferogram nonlinear response schematic

如图1所示,探测器输出的完整的干涉图由探测器本底偏置 I_{bias} ,干涉图直流分量 I_{dc} 和干涉图交流分量 I_{ac} 组成, I_{bias} 体现在 a_0 中,因此式(3)可以改为:

$$I_m(x) = a_0 + a_1(I_{dc}(x) + I_{ac}(x)) + a_2(I_{dc}(x) + I_{ac}(x))^2 \quad (4)$$

当放大电路采用交流耦合形式对探测器响应进行放大后,干涉图直流部分被隔离,将式(4)展开并去除直流部分后得到系统实际测得干涉图为:

$$I_m(x) = (a_1 + 2a_2I_{dc})I_{ac}(x) + a_2I_{ac}(x)^2 \quad (5)$$

对式(5)等号两边进行傅里叶变换得到:

$$S_m(\nu) = (a_1 + 2a_2I_{dc})S_{idle}(\nu) + a_2S_{idle}(\nu) \otimes S_{idle}(\nu) \quad (6)$$

$S_m(\nu)$ 表示系统实测光谱,由于二次非线性的影响,表现在光谱上的结果是增加一个缩放因子和光谱自卷积项,光谱自卷积项是在光谱带外引发的畸变^[13]。如图2所示,当光谱有效波段 $2\nu_{\min} > \nu_{\max}$ 时,卷积项并不会对有效光谱范围内的光谱造成影响,本文只考虑利用带内光谱信息进行非线性校正。

$$S_m^{in-band}(\nu) = (a_1 + 2a_2I_{dc})S_{idle}^{in-band}(\nu) \quad (7)$$

2 非线性校正方法

2.1 辐射定标原理

不考虑系统噪声和非线性因素,系统实测光谱由目标辐射和仪器自身背景辐射共同组成,即:

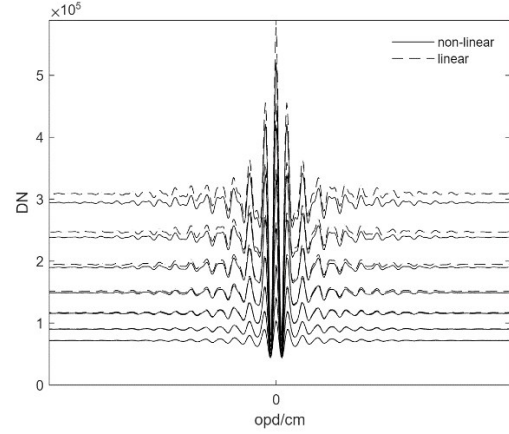
$$S^S(\nu) = G(\nu)(L^S(\nu) + L^I(\nu)) \quad (8)$$

$S^S(\nu)$ 是仪器获得的目标光谱响应值,为未经校准的数字量化值,以 DN (digital Number) 表示。 $L^S(\nu)$ 和 $L^I(\nu)$ 分别是目标和背景光谱辐亮度,单位是 $mW/(m^2 \cdot sr \cdot cm^{-1})$ 。 $G(\nu)$ 是仪器光谱响应率,表示仪器测量光谱量化值与输入光谱辐亮度的响应关系,单位是 $DN/[mW/(m^2 \cdot sr \cdot cm^{-1})]$ 。辐射定标的最终目的是获得精确的目标光谱辐亮度 $L^S(\nu)$,仪器通过测量低温标准参考源光谱 $S^{CB}(\nu)$ 和高温标准参考源光谱 $S^{HB}(\nu)$ 来计算仪器光谱响应率。仪器在轨工作时,通常以内置黑体作为高温标准参考源,以地球外冷空间作为低温标准参考源,且每隔一定的时间进行一次内黑体和冷空观测,以保证目标观测与黑体冷空观测的仪器背景温度一致。为了与下文表述一致,以下将低温标准参考源光谱称为冷黑体,将高温标准参考源光谱称为热黑体,热黑体观测和冷黑体观测的公式如下:

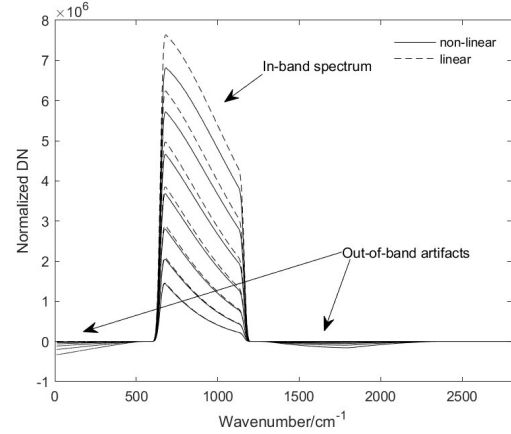
$$S^{HB}(\nu) = G(\nu)(L^{HB}(\nu) + L^I(\nu)) \quad (9)$$

$$S^{CB}(\nu) = G(\nu)(L^{CB}(\nu) + L^I(\nu)) \quad (10)$$

式中 $L^{HB}(\nu)$ 、 $L^{CB}(\nu)$ 为热黑体和冷黑体光谱辐亮度,由式(9)、(10)得:



(a)



(b)

图2 (a)非线性干涉示意图,(b)二次非线性引起光谱带外畸变

Fig. 2 (a) The schematic diagram of nonlinear interferogram, (b) spectral out-of-band distortion due to quadratic non-linearity

$$G(\nu) = \frac{S^{HB}(\nu) - S^{CB}(\nu)}{L^{HB}(\nu) - L^{CB}(\nu)} \quad (11)$$

由此得到标准两点辐射定标方程:

$$L^S(\nu) = \frac{S^S(\nu) - S^{CB}(\nu)}{G(\nu)} + L^{CB}(\nu) \quad (12)$$

实际上,由于采样延迟、噪声以及光学系统的影响,傅里叶变换光谱仪采集的干涉图并非零光程差两侧完全对称的,因此仪器实际得到的是复数光谱。傅里叶变换光谱仪复数辐射定标公式为:

$$L^S(\nu) = \text{Re} \left[\frac{\tilde{S}^S(\nu) - \tilde{S}^{CB}(\nu)}{\tilde{G}(\nu)} \right] + L^{CB}(\nu) \quad (13)$$

式中 $\text{Re}[\]$ 为取实部运算,标识符上的波浪号代表该值为复数值。 $\tilde{S}^S(\nu)$ 、 $\tilde{S}^{CB}(\nu)$ 与 $\tilde{G}(\nu)$ 做复数运算可

以消除绝大部分相位,残余虚部用于定标产品质量评估^[14]。

2.2 非线性校正原理

当仪器整体表现为理想线性系统时,理想线性系统光谱响应率 $G(\nu)$ 为常量。通过测量热黑体和冷黑体的光谱量化值就可以计算出全部仪器动态响应范围内的目标光谱辐射值。当系统引入二次非线性后,系统实测光谱是理想光谱引入增益系数,由式(7)、(8)可得:

$$S_m^S(\nu) = G(\nu)(a_1 + 2a_2 I_{dc})(L^S(\nu) + L^I(\nu)). \quad (14)$$

实际系统获得光谱为复数光谱,定义目标实测光谱响应率模值为 $G_m^S(\nu)$,相位角为 $\varphi_{G_m}(\nu)$,理想线性系统光谱响应率的相位角为 $\varphi_c(\nu)$,则:

$$G_m^S(\nu)e^{i\varphi_{G_m}(\nu)} = G(\nu)e^{i\varphi_c(\nu)}(a_1 + 2a_2 I_{dc}). \quad (15)$$

光谱响应率相位角是复数热黑体光谱和冷黑体光谱相减的结果,图3所示为GIIRS测量不同亮温黑体的光谱响应率相位角,除受噪声影响较大的180 K黑体光谱响应率相位角略偏离其他亮温黑体光谱响应率相位角外,其他各温度点光谱响应率相位角标准差均小于0.01 rad,系统非线性对光谱响应率相位角的影响可以忽略。此外,FY-4B/GIIRS 5个月在轨测试数据表明,光谱响应率相位角长期保持稳定(图4),因此可以令 $\varphi_{G_m}(\nu) = \varphi_c(\nu)$,得:

$$G_m^S(\nu) = G(\nu)(a_1 + 2a_2 I_{dc}) \quad (16)$$

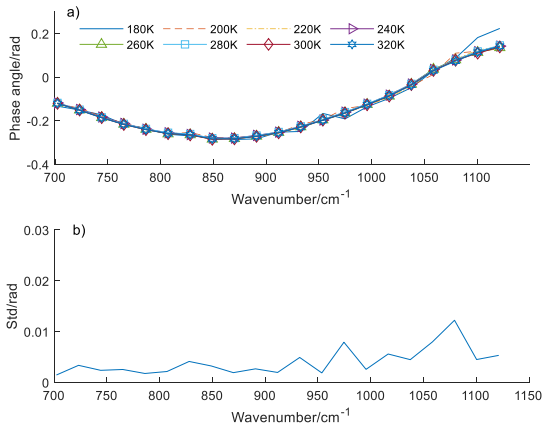


图3 不同黑体亮温光谱响应率相位角变化情况

Fig. 3 Variation of phase angle of different blackbody brightness temperature responsivity

式(2)第一个积分项为干涉图直流分量:

$$I_{dc} = \int_0^{\infty} 2S_{idle}(\nu) d\nu \quad (17)$$

即干涉图直流分量与光谱和成正比:

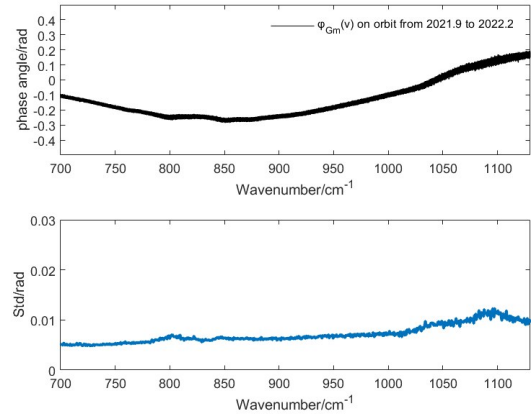


图4 FY-4B/GIIRS 在轨5个月黑体光谱响应率相位角变化情况

Fig. 4 Variation of blackbody spectral responsivity phase angle for 5 months in orbit

$$I_{dc} = k \sum_{\nu=vl}^{vh} S_{idle}(\nu) \quad (18)$$

式中 vl 和 vh 分别为光谱有效波数带宽的上下限。同理,非线性干涉图直流分量 I_{mdc} 与非线性光谱和成正比关系。由于干涉图直流量通常处于较低光通量区,在干涉仪调制度100%时,直流量大小为零光程差干涉图幅值的一半,受非线性影响相对较小,本文近似以非线性直流量值替代线性直流量,即:

$$I_{dc} \approx I_{mdc} = k \sum_{\nu=vl}^{vh} S_m(\nu) \quad (19)$$

令 $\mu = 2ka_2$,并将式(19)代入式(16)得:

$$G_m^S(\nu) = G(\nu)(a_1 + \mu \sum_{\nu=vl}^{vh} S_m(\nu)) \quad (20)$$

$G(\nu)$ 为常数,令 $a(\nu) = \mu G(\nu)$, $b(\nu) = a_1 G(\nu)$ 公式(20)可以改写为:

$$G_m^S(\nu) = a(\nu) \sum_{\nu=vl}^{vh} S_m(\nu) + b(\nu) \quad (21)$$

由上述公式可知,目标实测光谱响应率模值与光谱和近似线性关系,在同一仪器背景温度下测量两个以上的黑体亮温即可计算出 $a(\nu)$ 和 $b(\nu)$,从而得到在该仪器背景温度下光谱响应率与光谱和的线性关系。对热黑体进行大范围多点变温测试,可以获得光谱响应率与光谱和更准确的线性拟合结果,如式(22)所示, $S_m^r(\nu)$ 与 $G_m^r(\nu)$ 为不同黑体亮温下测量光谱量化值与该亮温下计算得到的光谱响应率。

$$[a(\nu), b(\nu)] = polyfit([G_m^{r_1}(\nu) G_m^{r_2}(\nu) \dots G_m^{r_n}(\nu)], [\sum_{\nu=vl}^{vh} S_m^{r_1}(\nu) \sum_{\nu=vl}^{vh} S_m^{r_2}(\nu) \dots \sum_{\nu=vl}^{vh} S_m^{r_n}(\nu)]) \quad (22)$$

图 5 所示为不同仪器背景温度下 $G_m^S(\nu)$ 与

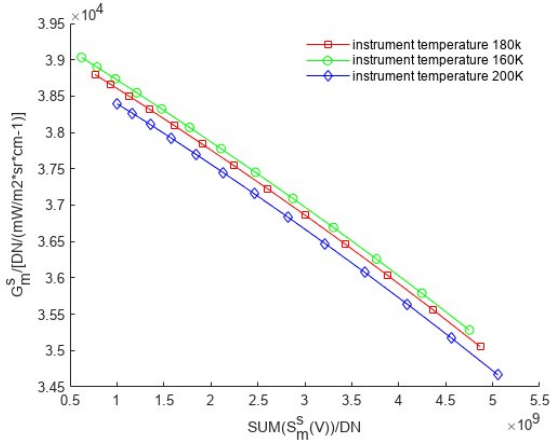


图 5 光谱响应率与光谱值近似线性关系仿真
Fig. 5 Simulation of approximate linear relationship between spectral responsivity and spectral value

$\sum_{\nu=vl}^{vh} S_m^S(\nu)$ 的线性关系仿真结果,从图中可以看出, $G_m^S(\nu)$ 与光谱和具有很强的线性相关性,拟合曲线的斜率即是 $a(\nu)$,由仪器非线性特性和理想线性光谱响应率决定,通常该值在较长的一段时间内保持稳定。当仪器背景温度改变后,拟合曲线的截距 $b(\nu)$ 发生变化,需要重新对其计算。假设当背景辐射改变后,热黑体观测的光谱值为 $S'_m{}^{HB}(\nu)$,拟合曲线的截距为 $b'(\nu)$,则其光谱响应率模值 $G'_m{}^{HB}(\nu)$ 为:

$$G'_m{}^{HB}(\nu) = a(\nu) \sum_{\nu=vl}^{vh} S'_m{}^{HB}(\nu) + b'(\nu), \quad (23)$$

则:

$$b'(\nu) = G'_m{}^{HB}(\nu) - a(\nu) \sum_{\nu=vl}^{vh} S'_m{}^{HB}(\nu). \quad (24)$$

从公式(24)可以得出,当仪器背景温度场改变后,只需要根据该温度下测量的热黑体光谱量化值和光谱响应率,便可以获得当前仪器背景温度场下目标辐射光谱响应率与光谱响应值的拟合曲线:

$$G'_m{}^S(\nu) = a(\nu) \sum_{\nu=vl}^{vh} S'_m{}^S(\nu) + b'(\nu). \quad (25)$$

定义仪器背景温度场改变后热黑体光谱响应率相位角 $\varphi'_{Chb}(\nu)$,将式(25)代入式(13)得到任意仪器背景温度下辐射定标非线性校正公式:

$$L^S(\nu) = \text{Re} \left[\frac{\tilde{S}_m^S(\nu) - \tilde{S}_m^{CS}(\nu)}{G'_m{}^S(\nu) e^{i\varphi'_{Chb}(\nu)}} \right] + L^{CS}(\nu). \quad (26)$$

3 算法验证与结果分析

本文利用 FY-4B GIRS 发射前热真空辐射定标试验数据进行算法验证。试验根据在轨仪器环境温度仿真情况分别设置 5 种不同的环境温度工况,如表 1 所示。每种工况下均设置冷黑体 80 K,变温热黑体的温度点分别为:180.15 K、190.15 K、200.15 K、210.15 K、220.15 K、230.15 K、235.15 K、240.15 K、245.15 K、250.15 K、255.15 K、260.15 K、265.15 K、270.15 K、280.15 K、290.15 K、295.15 K、300.15 K、305.15 K、310.15 K、315.15 K、320.15 K。上述黑体亮温是黑体设置亮温,实际计算中使用逐波数校准后的黑体亮温数据。通过二维扫描镜旋转分别指向冷黑体和变温热黑体,测量仪器对不同目标辐射的响应情况。

表 1 地面辐射定标试验工况

Table 1 TVAC tests of GIRS radiometric calibration

测温点 名称	不同工况下仪器部分结构测温(摄氏度)				
	TVAC1	TVAC2	TVAC3	TVAC4	TVAC5
扫描镜	26	13	13	5	40
北冷板	10	0	0	-10	20
隔热罩	2	-8	10	-11	12
散热北板	-15	12	12	-20	19
散热南板	-10	-10	-10	-40	20

选择 200~320 K 黑体观测数据求解光谱响应率校正系数 $a(\nu)$ 和 $b(\nu)$ 。不同环境温度工况下, $a(\nu)$ 原则上相同。分别对 5 种工况黑体变温试验数据拟合各工况下的 $a(\nu)$,将各工况下计算的 $a(\nu)$ 求平均,得到平均光谱响应率非线性修正系数 $\bar{a}(\nu)$,如图 6 所示。选择各温度工况下黑体亮温 300.15 K 的观测光谱数据作为标准参考热黑体光谱 $\tilde{S}_m{}^{HB}(\nu)$,并计算该工况下目标光谱值与光谱响应率拟合曲线的截距 $b(\nu)$,得到不同仪器背景温度场下目标光谱值与光谱响应率的线性关系,如图 7 所示。从图中可以看出,拟合结果与实测光谱响应率值基本一致。

利用式(24)、(25)对各工况黑体变温测量光谱进行光谱响应率非线性校正和辐射定标。图 8~10 为黑体亮温设置 220.15 K、250.15 K、280.15 K、320.15 K 时,各试验工况下非线性校正前与非线性

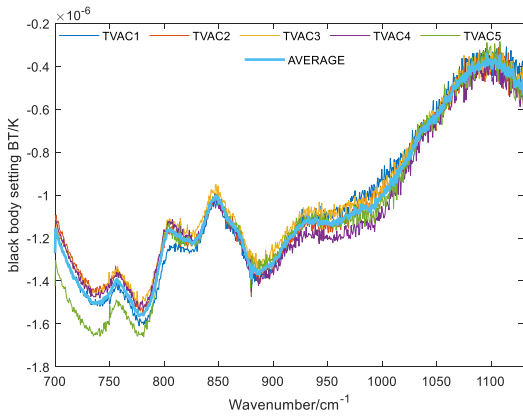


图6 TVAC1~TVAC5 长波全波段光谱响应率修正系数 $\alpha(v)$ 拟合值与平均值

Fig. 6 Long-wave full-band responsivity correction coefficient of TVAC1-TVAC5 fitted value and average value

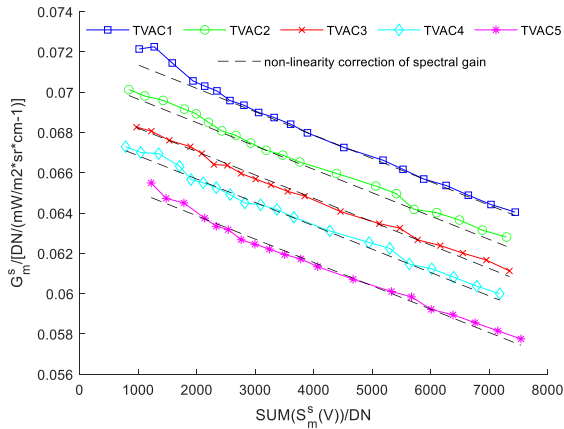


图7 TVAC1~TVAC5 目标光谱值与光谱响应率的线性关系

Fig. 7 The linear relationship between the target spectral value and the spectral responsivity of TVAC1-TVAC5

校正后长波第73像元的辐射定标结果,其中图8为辐射定标后的亮温曲线,从图中可以看出,以300.15 K黑体为高温标准参考源,非线性校正前,低于高温标准参考源的目标辐射定标结果比实际偏高,高于标准参考源的目标辐射定标结果比实际偏低,非线性校正后,辐射定标结果与黑体亮温基本一致。图9为定标后的亮温与黑体校准亮温偏差,经过非线性校正后,偏差均值均优于0.7 K,其中220 K低温目标和320 K高温目标部分波数由于光谱响应率较低,受试验环境噪声影响定标偏差略微超过0.7 K。图10为不同工况定标结果标准差,从图中可以看出,220 K低温目标由于目标辐射较低,非线性校正前和非线性校正后定标结果标准差基本一致,其他温度点目标辐射定标结果一致性在

非线性校正后均有不同程度改善。

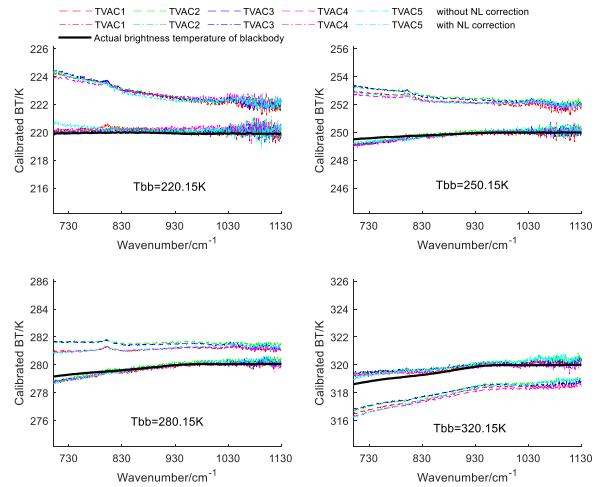


图8 非线性校正前后辐射定标亮温对比

Fig. 8 Brightness temperature of radiometric calibration comparison before and after nonlinear correction

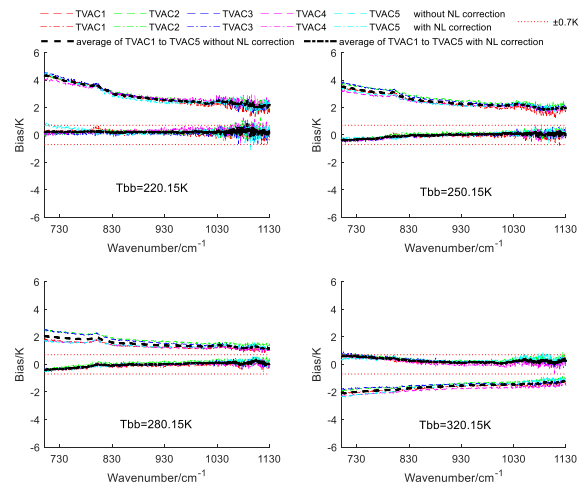


图9 非线性校正前后辐射定标亮温偏差对比

Fig. 9 Brightness temperature deviations comparison before and after nonlinear correction

以 850 cm^{-1} 和 950 cm^{-1} 为例, FY-4B/GIIRS 长波所有128个像元除去个别缺陷像元后,所有工况下180~320 K目标辐射非线性校正前后定标亮温曲线对比如图11所示。相对于非线性校正前,辐射定标精度有明显提升,250 K附近观测目标平均定标偏差从大于2 K降至0.2 K。图12为观测目标亮温180~320 K范围内所有像元平均亮温偏差,在200~320 K观测范围内,非线性校正后平均亮温偏差优于0.7 K,在180~200 K低温观测目标范围内,由于光谱相位一致性较差、噪声影响较大等原因,光谱响应率拟合曲线与实际偏差较大,部分波数定

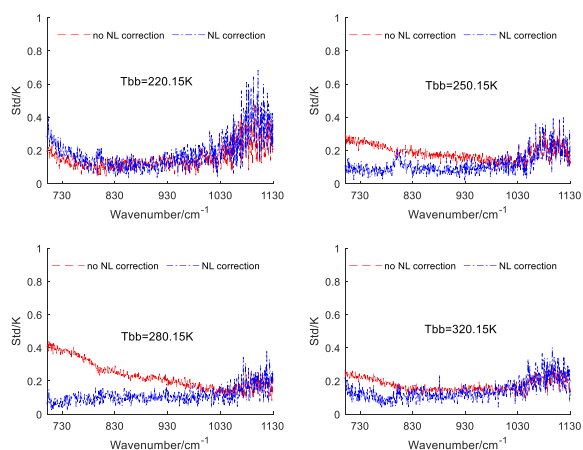


图 10 非线性校正前后亮温标准差对比

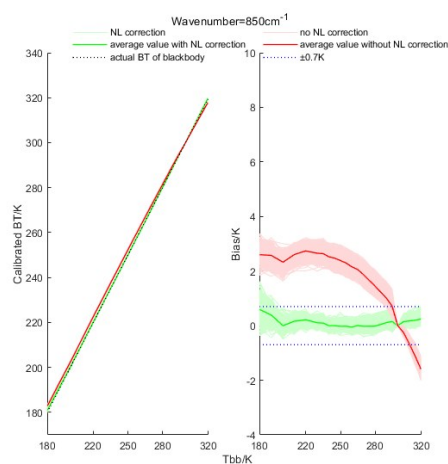
Fig. 10 Brightness temperature standard deviation comparison before and after nonlinear correction

标偏差超出 0.7 K。图 13 为观测目标亮温 280 K 光谱响应率修正后所有像元的平均亮温偏差,从图中可以看出,在五种工况下有效波段 700~1 130 cm^{-1} 内定标亮温偏差优于 0.7 K。

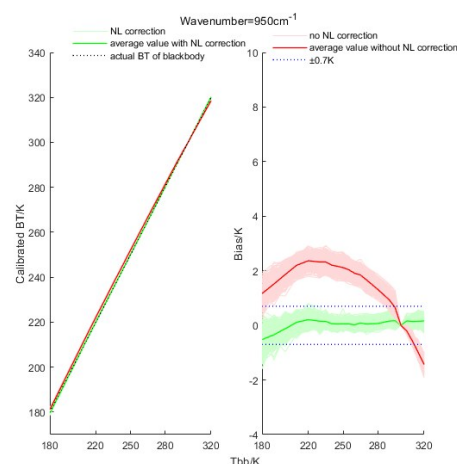
4 结论

傅里叶变换高光谱探测仪的非线性响应是辐射测量主要误差来源之一,作为面向气象应用的高光谱遥感仪器,高精度辐射定标是实现卫星资料量化应用的基础。本文针对静止轨道傅里叶变换光谱仪运行环境特点,从非线性响应原理和辐射定标原理推导出一种基于光谱响应率修正的非线性校正算法,该算法无需测量或者估算干涉图直流分量,适用于仪器在轨运行环境温度变化剧烈的情况。经过风云四号 B 星静止轨道红外探测器发射前地面热真空辐射定标试验数据验证,该算法对不同仪器环境温度下,观测目标亮温 180~320 K 范围内的辐射定标精度均有明显的改善,并且该算法简单易实现,仅需要对定标黑体的测量光谱值和光谱响应率进行一次运算就可以得到非线性校正系数,无需反复迭代计算。

本文的非线性校正算法对 200 K 以下低温目标的校正仍存在一定误差,部分波数误差约 2 K 左右。此外,该算法基于二次非线性响应系数长期稳定的情况下进行在轨非线性校正,实际仪器在轨运行过程中,受器件老化等因素影响,非线性系数可能会发生变化,需要定期进行一次在轨



(a)



(b)

图 11 观测目标亮温 180~320 K 范围所有像元全部工况非线性校正前后亮温偏差对比:(a)850 cm^{-1} , (b)950 cm^{-1} Fig. 11 Comparison of calibration deviations before and after nonlinear correction for all pixels in the range of 180-320 K of brightness temperature of the observation target: (a) 850 cm^{-1} , (b) 950 cm^{-1}

黑体变温来重新拟合光谱响应率校正系数。

References

- [1] Feng X, LI Li-Bing, Chen B Y, *et al.* Post-launch calibration and validation of the Geostationary Interferometric Infrared Sounder (GIIRS) on FY-4A [J]. *J. Infrared Millim. Waves*, (冯绚, 李利兵, 陈博洋, 等. 风云四号 A 星干涉式大气垂直探测仪在轨定标及性能评价. *红外与毫米波学报*), 2019, **38**(5):7.
- [2] Carter III R O, Lindsay N E, Beduhn D. A solution to baseline uncertainty due to MCT detector nonlinearity in FT-IR [J]. *Applied spectroscopy*, 1990, **44**(7): 1147-1151.
- [3] Rahmelow K. Electronic influences on an infrared detector

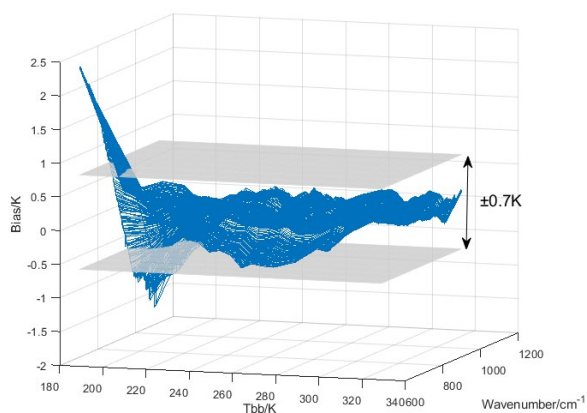


图 12 观测目标亮温 180~320 K 范围所有像元非线性校正后平均亮温偏差

Fig. 12 The average deviation of calibration after nonlinear correction of all pixels in the range of 180-320 K brightness temperature of the observation target

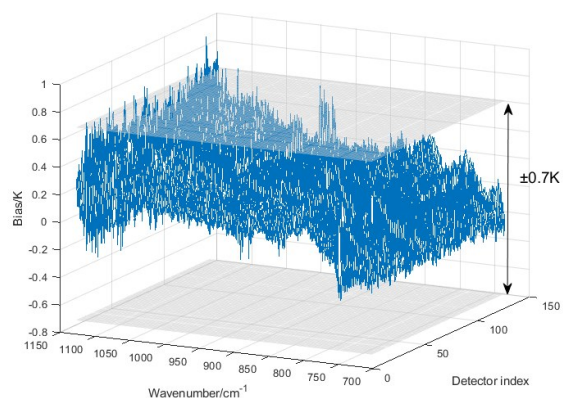


图 13 观测目标亮温 280 K 非线性校正后定标结果 TVAC1~TVAC5 平均亮温偏差

Fig. 13 Observation target brightness temperature 280 K TVAC1-TVAC5 calibration average deviation after nonlinear correction

signal: nonlinearity and amplification [J]. *Applied optics*, 1997, **36**(10): 2123-2132.

[4] Chase D B. Nonlinear detector response in FT-IR [J]. *Ap-*

plied spectroscopy, 1984, **38**(4): 491-494.

[5] Guelachvili GI. Distortion free interferograms in Fourier transform spectroscopy with nonlinear detectors [J]. *Applied Optics*. 1986 Dec; **25**(24):4644.

[6] Rahmelow K. Electronic influences on an infrared detector signal: nonlinearity and amplification [J]. *Applied optics*, 1997, **36**(10): 2123-2132.

[7] Minzhu Y, Yaopu Z, Lei Z, *et al.* Nonlinear effects of the Fourier transform spectrometer detector and its correction [J]. *Infrared and laser engineering*, 2017, **46** (10) : 1023001-1023001 (7). (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]. *红外与激光工程*), 2017, **46**(10): 319-325.

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

[9] Yang Tian-hang, Gu Ming-jian, Shao Chun-yuan, *et al.* Nonlinearity correction of FY-3E HIRAS-II in pre-launch thermal vacuum calibration tests [J]. *J. Infrared Millim. 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. *红外与毫米波学报*), 2022, **41**(3): 597-607.

[10] Ye S, Sun Y, Li Z, *et al.* High Order Nonlinearity Responses of Detector of Infrared Hyperspectral Interferometric Spectrometer [J]. *Acta Optica Sinica*, 2018. (叶松, 孙永丰, 李志伟, 等. 红外超光谱干涉光谱仪探测器高阶非线性响应研究 [J]. *光学学报*), 2018, **38** (6) : 0612007.

[11] Lachance, Richard. Non-linearity correction of FTIR instruments [R]. Fifth Workshop of Infrared Emission Measurements by FTIR. Quebec, Canada: ABB Bomen Inc., 2000.

[12] 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.

[13] Abrams M C, Toon G C, Schindler R A. Practical example of the correction of Fourier-transform spectra for detector nonlinearity [J]. *Applied optics*, 1994, **33**(27): 6307-6314.

[14] Li Lu, Ni Zhuo-ya, Qi Cheng-li, *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.