

傅里叶变换光谱仪的红外探测器非线性校正

郭玲玲*, 赵其昌, 杨勇, 何军, 张扬

上海卫星工程研究所, 上海 201109

摘要 针对傅里叶变换光谱仪的红外探测器非线性, 提出了一种适用于干涉图直流信号值缺失情况的非线性校正方法。针对需要实施校正的光谱计算基于带外虚假成分的相对校正因子, 结合无需实施校正的光谱计算一致性校正因子。实验结果表明, 实施本文所提非线性校正方法后, 辐射定标曲线的线性拟合优度可以由校正前优于0.99提升至0.9999以上, 且辐射标定后的各通道的辐亮度绝对偏差均不超过 $0.15 \text{ mW} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{cm} \cdot \text{sr}^{-1}$ 。相比已有的校正方法, 所提方法避免了对干涉图直流信号的依赖性, 但增加了对多个温度点黑体辐射定标数据的依赖性。一旦得到一致性校正因子后, 在探测器稳定工作的前提下, 可以实施对任一光谱图的非线性校正。

关键词 光谱学; 傅里叶变换光谱仪; 非线性校正; 红外波段; 探测器

中图分类号 TP73

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202040.0530002

A Nonlinearity Correction Method for the Response Produced by the Infrared Detectors of the Fourier Transform Spectrometers

Guo Lingling*, Zhao Qichang, Yang Yong, He Jun, Zhang Yang

Shanghai Institute of Satellite Engineering, Shanghai 201109, China

Abstract In this study, we propose a nonlinear correction method to deal with the nonlinear response produced by the infrared detectors of the Fourier transform spectrometers when the direct current (DC) signal of the interferogram is not available. Initially, the relative correction factor is derived based on the out-of-band spectrum of the spectrum that is to be corrected, and the consistency correction factor is subsequently calculated by the spectra without correction. The experimental results show that the goodness of the linear-fit curve in case of radiometric calibration can be improved from more than 0.99 to more than 0.9999 after the implementation of the proposed nonlinear correction method; further, the absolute bias of the radiance of each channel is observed to become less than $0.15 \text{ mW} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{cm} \cdot \text{sr}^{-1}$ after radiometric calibration. When compared with the existing correction methods, the proposed method avoids the demand from the direct-current (DC) signal of the interferogram. However, the proposed method is considerably dependent on the blackbody spectra measured at multiple temperatures during radiometric calibration. After obtaining the consistency correction factor, nonlinear correction can be achieved for any spectrum as long as the detector operates in a stable manner.

Key words spectroscopy; Fourier transform spectrometer; nonlinearity correction; infrared waveband; detectors

OCIS codes 300.6190; 300.6300; 300.6340; 300.6170

1 引言

傅里叶变换光谱仪(FTS)具有光通量高, 易实现高光谱分辨率、宽谱段等特点, 故而在精细谱探测领域具有广泛的应用, 可以通过气球、机载、星载等方式在红外谱段实现对大气水汽、二氧化碳、臭氧等成分的反演^[1-3], 典型的仪器包括 Suomi NPP、JPSS 上的垂轨红外探测器(CrIS)^[4-7]、MetOp 上的红外

大气探测干涉仪(IASI)^[8]、风云三号上的红外高光谱大气探测仪(HIRAS)^[9]等。

傅里叶变换光谱仪核心部件为迈克耳孙干涉仪, 典型的干涉组件包含分束器、平面定镜、平面动镜等, 动镜的往复运动形成光程差的变化, 从而可以在单元探测器上获得时间调制的干涉图。通过对干涉图进行傅里叶变换即可计算得到光谱图。通过辐射定标, 建立光谱图与入射辐射能量之间的量化关

收稿日期: 2019-10-22; 修回日期: 2019-11-10; 录用日期: 2019-11-26

基金项目: 上海市自然科学基金(18ZR1437200)

* E-mail: ustllg@foxmail.com

系,从而可以保证仪器后续的高精度量化应用。

红外探测器(尤其是碲镉汞探测器)的响应可能存在一定程度的辐射响应非线性,即探测器输出信号大小与输入信号能量不满足严格的线性关系,在这种情况下由干涉图计算得到的光谱图存在畸变,故而影响傅里叶变换光谱仪的高精度量化应用。为了便于仪器实施两点定标,提高量化精度,需要实施非线性校正。

为了避免碲镉汞探测仪非线性对刻画傅里叶变换光谱仪辐射响应的影响,现有的处理方法分为两类。一类为干涉图域的校正方法,如应用在开放通道傅里叶变换红外光谱仪(OP/FT-IR)中的方法^[10],针对干涉图中的最大值点及两个相邻点进行校正。更为广泛采用的方法为光谱图域的方法^[11-15]。其基本思路均建立在探测器非线性响应所导致的带外虚假成分之上,通过卷积运算或者建立多项式模型,基于迭代的方式最小化带外虚假成分。这类方法有一个共同点,即需要知道原始干涉图中的直流信号大小。实际应用中的傅里叶变换光谱仪,可能存在只输出干涉图交流信号的情况,因为如果不存在明显的非线性响应,直流信号对于后续处理无显著作用,仅输出交流信号可以确保探测器有限的量化位数,以便表达更关键的交流信息。若傅里叶变换光谱仪在设计中使用隔直电路,即损失了直流信号值的信息,则将直接导致现有方法不再适用。

针对干涉图直流信号值缺失的情况,本文提出了一种新的非线性校正方法,在地面辐射定标数据的基础上,针对需要实施校正的光谱进行基于带外虚假成分的相对校正因子计算,结合无需实施校正的光谱进行一致性校正因子计算。该方法不用分别单独计算干涉图直流信号与二次项系数,仅在地面多个温度点辐射定标数据可获取的基础上,就可以有效实施任一光谱图的非线性校正。

2 探测器非线性校正原理

2.1 非线性响应影响

利用傅里叶变换光谱仪直接得到的数据是干涉图,干涉图 $I(\delta)$ 是关于光程差 δ 的函数,光谱图 $S(\nu)$ 与干涉图 $I(\delta)$ 为傅里叶变换对的关系,即

$$S(\nu) = \mathcal{F}\{I(\delta)\}, \quad (1)$$

式中: \mathcal{F} 表示傅里叶变换; ν 表示波数。

以 $I_{\text{ideal}}(\delta)$ 表示理想线性响应情况下的干涉图有效交流成分, I_{DC} 表示干涉图的直流分量值,实际非线性响应情况下的探测器输出为 $I_{\text{nonlinear}}(\delta)$ (包

含交流分量及直流分量),其与理想情况下的线性响应输出的关系可以用一个非线性函数来表达,即

$$I_{\text{nonlinear}} = f(I_{\text{ideal}} + I_{\text{DC}}). \quad (2)$$

将非线性函数 f 的多项式展开,即有

$$I_{\text{nonlinear}} = a_0 + a_1(I_{\text{ideal}} + I_{\text{DC}}) + a_2(I_{\text{ideal}} + I_{\text{DC}})^2 + a_3(I_{\text{ideal}} + I_{\text{DC}})^3 + \dots, \quad (3)$$

式中: a_0, a_1, a_2, \dots 为多项式系数。对于性能稳定的探测器,可认为在一定时间段内,输入、输出的函数关系确定,即多项式系数固定。在实际仪器中,高阶的非线性系数通常极小,可以忽略,故本文仅分析至二阶的非线性系数。当忽略三阶及以上的非线性项时,有

$$I_{\text{non}} = (a_1 + 2a_2 I_{\text{DC}})I_{\text{ideal}} + a_2 I_{\text{ideal}}^2, \quad (4)$$

式中: I_{non} 为傅里叶变换光谱仪输出的干涉图(仅包含交流成分)。不失一般性,可令 $a_1 = 1$, 即当二次项次数为 0 时,仪器输出的、仅包含交流成分的干涉图 I_{non} 即为理想干涉图 I_{ideal} , 有

$$I_{\text{non}} = (1 + 2a_2 I_{\text{DC}})I_{\text{ideal}} + a_2 I_{\text{ideal}}^2. \quad (5)$$

根据傅里叶变换性质,可知干涉图 I_{non} 经傅里叶变换后的光谱图 S_{non} 满足

$$S_{\text{non}} = (1 + 2a_2 I_{\text{DC}})S_{\text{ideal}} + a_2 S_{\text{ideal}} \otimes S_{\text{ideal}}, \quad (6)$$

式中: \otimes 表示卷积运算; S_{ideal} 为理想干涉图 I_{ideal} 经傅里叶变换后得到的理想光谱图。

在实际应用中,仪器通常只针对特定谱段进行设计,如 CrIS 仪器的三个谱段分别是 $650 \sim 1095 \text{ cm}^{-1}$ 、 $1210 \sim 1750 \text{ cm}^{-1}$ 、 $2155 \sim 2550 \text{ cm}^{-1}$, 对于每个谱段,到达探测器的光谱输入是带通信号。理想的干涉图是关于零光程差位置偶对称的,故其傅里叶变换也是实偶函数,所以光谱图隐含一个完全对称的负频率部分,如图 1 所示。

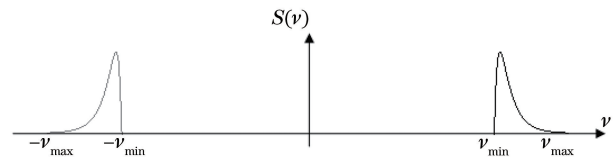


图 1 理想光谱示意图

Fig. 1 Diagrammatic sketch of an ideal spectrum

记光谱图 $S(\nu)$ 正频率部分为 $\tilde{S}(\nu)$, $\tilde{S}(\nu)$ 仅在 $\nu_{\text{min}} \sim \nu_{\text{max}}$ 范围内为非零值,那么光谱图 $S(\nu) = \tilde{S}(\nu) + \tilde{S}(-\nu)$ 。类似地, $S_{\text{ideal}} \otimes S_{\text{ideal}}$ 可以表示为

$$S_{\text{ideal}} \otimes S_{\text{ideal}} = \int_{-\infty}^{+\infty} S_{\text{ideal}}(m) S_{\text{ideal}}(\nu - m) dm = \int_{-\infty}^{+\infty} [\tilde{S}_{\text{ideal}}(m) + \tilde{S}_{\text{ideal}}(-m)][\tilde{S}_{\text{ideal}}(\nu - m) + \tilde{S}_{\text{ideal}}(-\nu + m)] dm, \quad (7)$$

式中： $\tilde{S}_{ideal}(\nu)$ 为理想光谱图 $S_{ideal}(\nu)$ 的正频率部分； m 为由 $-\infty \sim +\infty$ 范围内的任一波数。若记 $\tilde{S}_{ideal}(\nu)$ 与自身卷积的结果为 $\tilde{S}_{conv}(\nu)$ ，与自身相关运算的结果为 $S_{corr}(\nu)$ ，即

$$\begin{cases} \tilde{S}_{conv}(\nu) = \tilde{S}_{ideal} \otimes \tilde{S}_{ideal} = \int_{-\infty}^{+\infty} \tilde{S}_{ideal}(m)\tilde{S}_{ideal}(\nu-m)dm \\ S_{corr}(\nu) = \tilde{S}_{ideal} \odot \tilde{S}_{ideal} = \int_{-\infty}^{+\infty} \tilde{S}_{ideal}(m)\tilde{S}_{ideal}(m-\nu)dm \end{cases}, \quad (8)$$

代入(7)式即可得到

$$S_{ideal} \otimes S_{ideal} = \tilde{S}_{conv}(\nu) + \tilde{S}_{conv}(-\nu) + 2S_{corr}(\nu). \quad (9)$$

若 \tilde{S}_{ideal} 为带通信号,有效范围为 $\nu_{min} \sim \nu_{max}$,那么 $\tilde{S}_{conv}(\nu)$ 仅在 $2\nu_{min} \sim 2\nu_{max}$ 取非零值, $S_{corr}(\nu)$ 仅在 $(\nu_{min}-\nu_{max}) \sim (\nu_{max}-\nu_{min})$ 取非零值。若 $2\nu_{min} > \nu_{max}$ 成立,那么二阶非线性系数对带通信号的影响如下:等比例压缩了带内光谱成分;在带外的低频和高端分别产生了一个虚假成分。这一结论在实际傅里叶变换光谱仪光谱图中也得到了验证,图2所示为一幅实际的未标定光谱图,在带外低频端与高频端的虚假成分未与带内信号混叠,若用 S_{in} 、 S_{out} 分别表示光谱图 S_{non} 的带内分量与带外分量,即

$$\begin{cases} S_{in} = (1 + 2a_2 I_{DC})S_{ideal} \\ S_{out} = a_2 S_{ideal} \otimes S_{ideal} \end{cases}, \quad (10)$$

那么,通过理想光谱图可表示为

$$S_{ideal} = \frac{1}{1 + 2a_2 I_{DC}} S_{in}. \quad (11)$$

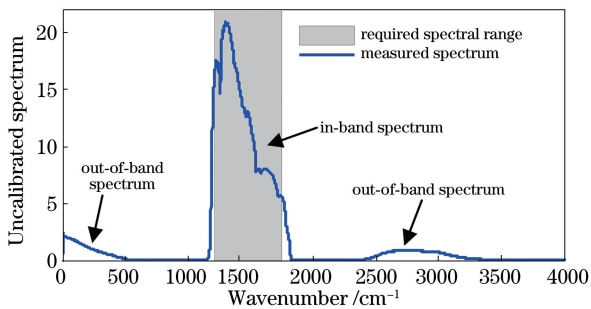


图2 傅里叶变换光谱仪观测低温黑体的原始未标定光谱图
Fig. 2 Raw spectrum of a low-temperature blackbody observed by FTS

现有方法是分别获取直流分量 I_{DC} 与二次项系数 a_2 后实施校正,得到线性响应下的光谱图。根据文献[4-5],可知对于工作温度点稳定不变的红外探测器,其输入与输出之间的响应关系在一定时间内固定,即 a_2 不随仪器观测目标的变化而变化。而直流分量 I_{DC} 与观测目标相关,即每一干涉图都需要

实时获取其对应的直流分量值。现有方法均建立在可以直接通过干涉图或者仪器辅助数据信息实时获取直流分量 I_{DC} 的基础之上,当仪器无法从硬件设计中获取该值时,现有方法无法适用。

2.2 非线性校正方法

针对直流分量 I_{DC} 不可获取的场景,根据(10)式,可知

$$S_{out} = \frac{a_2}{(1 + 2a_2 I_{DC})^2} S_{in} \otimes S_{in}, \quad (12)$$

式中任一干涉图 S_{in} 、 S_{out} 均已知,故对于对所有通道, $S_{in}(\nu)$ 不恒为零时便可计算得到 $a_2/(1+2a_2 I_{DC})^2$ 。由(11)式可知,线性响应下的光谱与实测带内光谱之间仅相差一个比例因子 $1/(1+2a_2 I_{DC})$ 。而 a_2 是不随仪器观测目标的变化而变化的,由此可知,若得到 $a_2/(1+2a_2 I_{DC})^2$ 后,新的线性响应光谱可表示为

$$S_{linear} = k \cdot S_{in}, \quad (13)$$

$$k = \frac{\sqrt{|a_2|}}{1 + 2a_2 I_{DC}}. \quad (14)$$

式中:系数 k 仅为相对校正因子,直接影响到后续辐射定标的系数。由于一般情况下,二次项系数 a_2 的数值很小,故会导致辐射定标系数发生数量级改变。该方式的另一缺陷为:相比带内信号 S_{in} ,带外信号 S_{out} 值较小,当到达探测器的辐射信号能量低于一定量级时,即 S_{in} 值较小时,带外信号 S_{out} 被淹没在噪声中,故无法准确计算 $a_2/(1+2a_2 I_{DC})^2$ 。

由于辐射非线性校正与辐射定标系数息息相关,进一步利用傅里叶变换光谱仪观测不同温度下黑体目标的干涉图发现,在入射能量较小时带外虚假成分不明显(如图3所示),且响应较线性(如图4所示,图中仅随机列举了光谱波段范围内部分通道

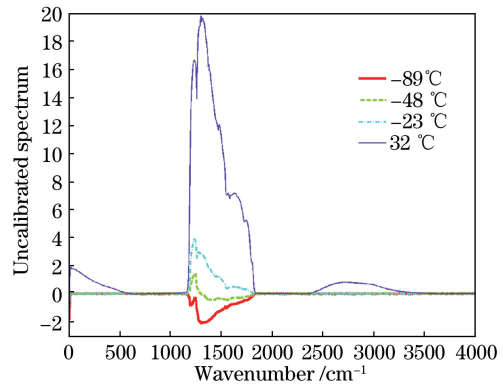


图3 傅里叶变换光谱仪观测不同温度下黑体的光谱图
Fig. 3 Measured spectra of the external blackbody at different temperatures observed by the FTS

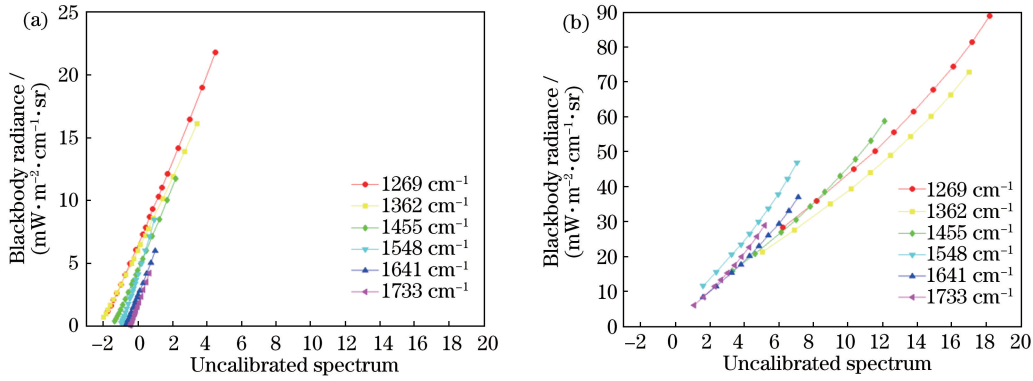


图 4 傅里叶变换光谱仪未标定光谱与黑体辐亮度响应关系。(a)动态范围低端；(b)动态范围高端
Fig. 4 Response relationship between uncalibrated spectra and blackbody radiances observed by FTS.

(a) Lower range; (b) higher range

的响应关系),故为了避免动态范围低端信号计算 $a_2/(1+2a_2I_{DC})^2$ 精度不高的问题,可以不校正该类响应较线性的光谱。为了保证校正与未校正光谱辐射定标系数的一致性,基于 N 个不同温度点的黑体观测数据,采用最优化的方法,求解一致性校正因子估计值

$$\hat{t} = \underset{t, C(\nu)}{\operatorname{argmin}} \sum_{i=1}^N \left\| \frac{\mathbf{S}^{(i)}(\nu)}{t \cdot k^{(N)} \cdot \mathbf{S}_{in}^{(N)}(\nu)} - \frac{\mathbf{R}^{(i)}(\nu) - \mathbf{C}(\nu)}{\mathbf{R}^{(N)}(\nu) - \mathbf{C}(\nu)} \right\|, \quad (15)$$

式中: $\mathbf{R}^{(i)}(\nu)$ 表示辐射定标中获取的第 i 个温度点的黑体辐亮度,温度点由低到高的黑体辐亮度依次为 $\mathbf{R}^{(1)}(\nu), \mathbf{R}^{(2)}(\nu), \dots, \mathbf{R}^{(N)}(\nu)$; $\mathbf{C}(\nu)$ 为傅里叶变换光谱仪的自发发射背景,在仪器工作温度稳定的情况下, $\mathbf{C}(\nu)$ 不随目标辐射发生变化; $k^{(i)}$ 为不同辐射输入下根据 (14) 式计算得到的系数; $\mathbf{S}^{(i)}(\nu)$ 为期待的线性响应下的光谱,在辐射定标数据中分两类,一类为不需要校正的数据,此时 $\mathbf{S}^{(i)}(\nu) = \mathbf{S}_{in}^{(i)}(\nu)$, 一类为需要实施校正的数据,此时 $\mathbf{S}^{(i)}(\nu) = t \cdot k^{(i)} \cdot \mathbf{S}_{in}^{(i)}(\nu)$; t 为一致性校正因子。是否需要实施校正可以根据光谱噪声 DN 值与带外光谱 \mathbf{S}_{out} 来确定; $\|\cdot\|$ 表示向量范数,即对于光谱通道内数据构建向量。值得注意的是, (15) 式暗含的要求为所有干涉图均满足相位对齐的条件。

得到估计值 \hat{t} 后,对于需要实施校正的光谱,实施非线性校正,即校正后的光谱可表示为

$$\mathbf{S}_{corrected} = \hat{t} \cdot k \cdot \mathbf{S}_{in}. \quad (16)$$

3 实验与分析

为了验证所提方法对傅里叶变换光谱仪探测器

进行非线性校正的有效性,基于地面辐射定标数据,进行了实测数据校正。实验中对所测干涉图进行相位对齐,实施傅里叶变换,并对未标定的光谱是否需要实施校正进行判别。然后对需要实施校正的光谱,计算相对校正因子。利用相对校正因子与无需实施校正的数据进行一致性校正,计算校正系数 \hat{t} 。

在系数 \hat{t} 的计算过程中,预留一组已知的黑体辐亮度的光谱数据不参与计算,用于后续对校正效果的检验。

图 5 所示为基于带内信号的自卷积结果与带外虚假成分进行相对因子计算的结果,计算中采用线性拟合求解 $a_2/(1+2a_2I_{DC})^2$,采用拟合优度 R^2 来量化拟合方程与实际数据点的吻合程度,对应图 5 所示的相对系数计算中的拟合优度统计如表 1 所列。由图 5 及表 1 可知:当输入辐射能量越高时,计算结果 R^2 越接近 1,线性拟合吻合度越好;计算得到的相对系数 k 在 10^{-3} 量级。

表 1 相对系数计算中拟合优度

Temperature of external blackbody / °C	R^2	k
7	0.9520	0.002025
17	0.9794	0.002081
22	0.9845	0.002117
27	0.9897	0.002183
32	0.9930	0.002250
37	0.9949	0.002325
42	0.9965	0.002392
52	0.9976	0.002560

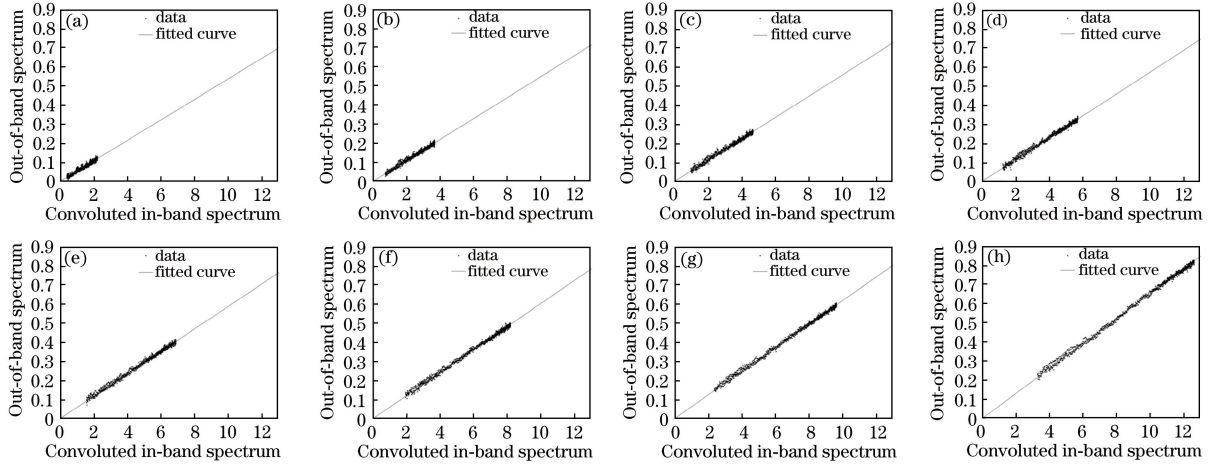


图 5 傅里叶变换光谱仪观测不同温度下外部黑体的相对系数计算结果。(a) 7 °C; (b) 17 °C; (c) 22 °C; (d) 27 °C; (e) 32 °C; (f) 37 °C; (g) 42 °C; (h) 52 °C

Fig. 5 Relative coefficients calculation corresponding to measured spectra of the external blackbody observed by FTS at different temperatures. (a) 7 °C; (b) 17 °C; (c) 22 °C; (d) 27 °C; (e) 32 °C; (f) 37 °C; (g) 42 °C; (h) 52 °C

结合低端无需实施校正的数据最优化求解一致性校正因子,得到最终的校正系数。对于地面辐射定标数据,在实施校正前,未标定光谱相对黑体辐亮度响应关系如图 6(a)所示,经本文方法进行校正后,校正后的未标定光谱相对黑体辐亮度的响应关系如图 6(b)所示。从图 6 可以看出,实

施非线性校正后的光谱响应线性度被极大地改善。以拟合优度 R^2 来评价线性拟合的符合程度,图 6 中所示的典型波数通道对应的线性拟合的拟合优度结果统计如表 2 所示。由表 2 可以看出,本文方法可以将线性拟合优度 R^2 由校正前的优于 0.99 提升到 0.9999 以上。

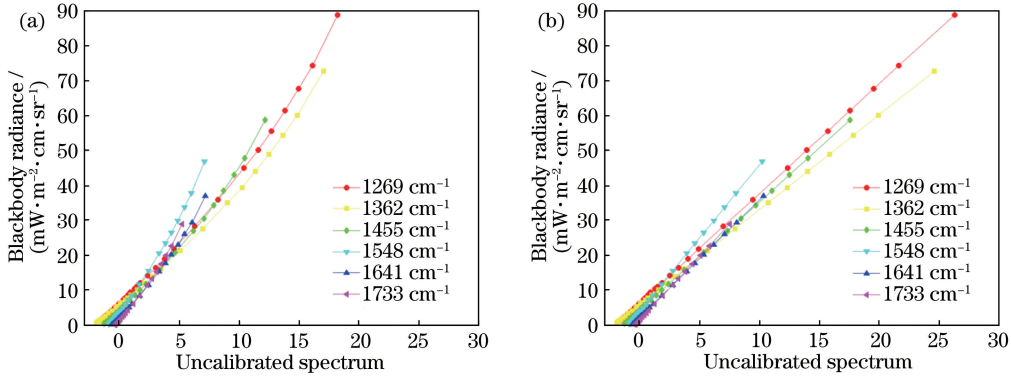


图 6 傅里叶变换光谱仪未标定光谱与黑体辐亮度响应关系。(a)非线性校正前;(b)非线性校正后

Fig. 6 Response relationship between uncalibrated spectra and blackbody radiances. (a) Before nonlinearity correction; (b) after nonlinearity correction

表 2 图 6 中所示的典型波数通道对应的线性拟合的拟合优度
Table 2 Goodness of linear fit corresponding to the typical wavenumber channel shown in Fig. 6

Wavenumber / cm^{-1}	Before correction	After correction
1269	0.990493	0.999993
1362	0.991194	0.999997
1455	0.991103	0.999992
1548	0.991715	0.999996
1641	0.991664	0.999985
1733	0.991451	0.999965

在实验中,预留一组已知的黑体辐亮度的光谱数据(傅里叶变换光谱仪观测温度为 47 °C 时黑体的光谱数据)不参与校正系数及后续定标系数的运算,利用该数据作为检验数据对校正方法与校正后的线性定标系数进行验证。

将图 7 所示的校正后光谱利用已经计算得到的线性定标系数映射到光谱辐亮度单位,并与根据黑体发射率及 Planck 公式计算得到的辐亮度进行对比,偏差如图 8(a)所示。将该偏差绝对值与黑体辐亮度值相除计算相对偏差,结果如图 8(b)所示,由

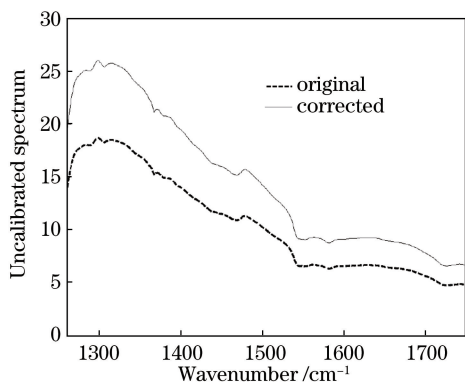


图 7 校正前后的光谱对比

Fig. 7 Comparison of original and corrected spectra

图中结果可以看出,对于 47 °C 黑体观测数据,利用本文方法进行非线性校正后,辐射标定后的辐亮度绝对偏差不超过 $0.15 \text{ mW} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{cm} \cdot \text{sr}^{-1}$,相对偏差不超过 0.5%。

为了进一步研究本文方法针对不同目标辐射进行非线性校正后的精度,采用相同的处理方法,更换

预留的不参与相对校正因子与线性定标系数计算的数据,实施同样的处理流程,对傅里叶变换光谱仪观测温度为 27 °C 时的黑体数据进行非线性校正,非线性校正后基于线性辐射定标的偏差如图 9(a)所示,图 9(b)为对应的相对偏差。由图 9 可知,绝对偏差仍优于 $0.15 \text{ mW} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{cm} \cdot \text{sr}^{-1}$,而对应的相对偏差增大,对各通道相对偏差小于 0.7%。此外,对无需实施非线性校正的 -3 °C 黑体观测数据,同样应用线性定标系数计算对应的光谱辐亮度,该辐亮度与已知黑体辐亮度之间的偏差结果如图 10(a)所示,图 10(b)为对应的相对偏差。图 10 中,绝对偏差仍优于 $0.15 \text{ mW} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{cm} \cdot \text{sr}^{-1}$,而对应的相对偏差进一步增大。由图 8~ 10 可知,对于不同黑体温度点下的观测目标,无论是无需实施校正的数据,还是经非线性校正后的数据,基于线性辐射定标后结果的辐亮度相对偏差随入射辐射增强而减小,而绝对偏差均优于 $0.15 \text{ mW} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{cm} \cdot \text{sr}^{-1}$ 。

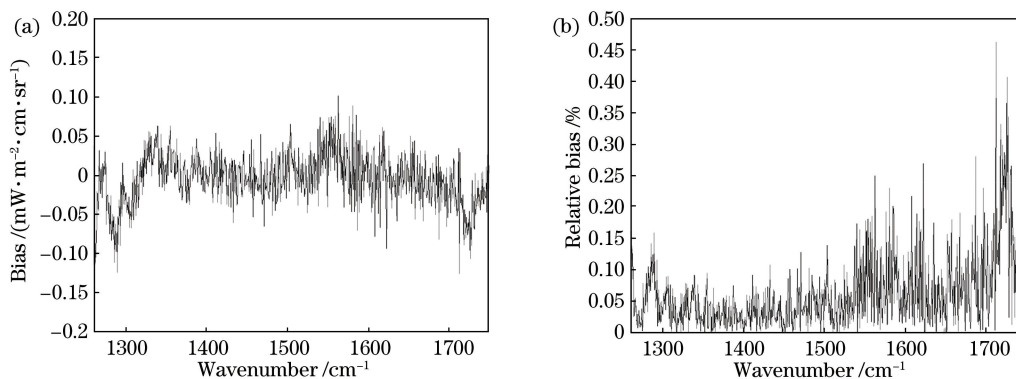


图 8 非线性校正后 47 °C 黑体观测数据基于线性辐射定标的辐亮度偏差。(a)偏差;(b)相对偏差

Fig. 8 Radiance bias of the 47 °C blackbody radiance based on linear radiometric calibration after nonlinearity correction.

(a) Bias; (b) relative bias

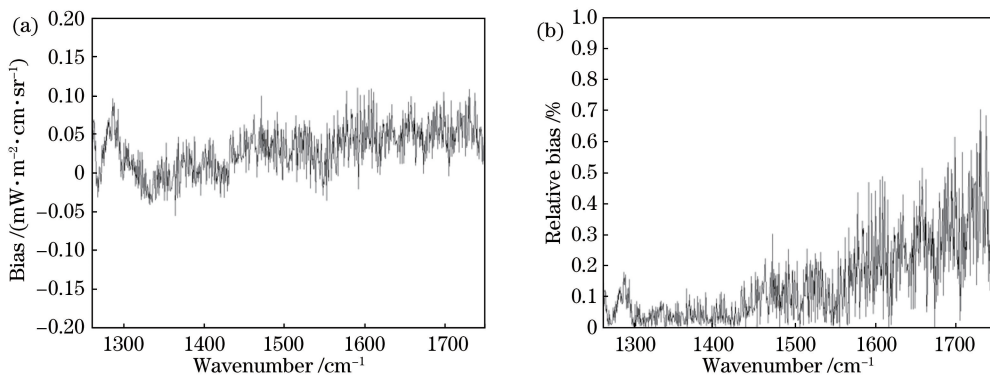


图 9 非线性校正后 27 °C 黑体观测数据基于线性辐射定标的辐亮度偏差。(a)偏差;(b)相对偏差

Fig. 9 Radiance bias of the 27 °C blackbody based on linear radiometric calibration after nonlinearity correction.

(a) Bias; (b) relative bias

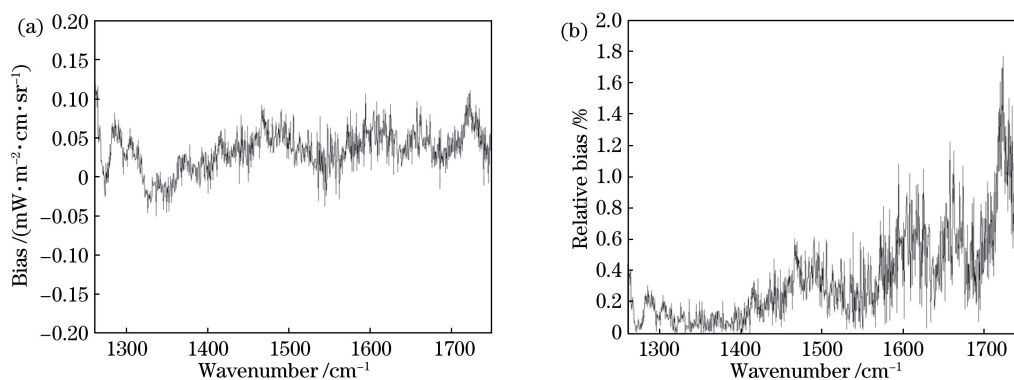


图 10 $-3\text{ }^{\circ}\text{C}$ 黑体观测数据基于线性辐射定标的辐亮度偏差。(a) 偏差; (b) 相对偏差

Fig. 10 Radiance bias of the $-3\text{ }^{\circ}\text{C}$ blackbody based on linear radiometric calibration. (a) Bias; (b) relative bias

4 结 论

傅里叶变换红外光谱仪易受探测器影响导致辐射响应非线性, 针对干涉图直流信号值缺失的情况, 本文针对需要实施校正的光谱进行基于带外虚假成分的相对校正因子计算, 然后结合无需实施校正的光谱进行一致性校正因子计算。实验结果表明, 所提方法可以将辐射定标曲线的线性拟合优度由校正前的优于 0.99 提升至 0.9999 以上, 且校正后辐射标定各通道的辐亮度绝对偏差均不超过 $0.15\text{ mW}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{cm}\cdot\text{sr}^{-1}$ 。相比已有的校正方法, 本文通过多个温度点辐射定标数据获取校正因子, 避免了对干涉图直流信号的依赖性, 在探测器稳定工作的前提下, 可以实施对同一傅里叶变换红外光谱仪任一光谱图的非线性校正。

参 考 文 献

- [1] Wilson S H S, Atkinson N C, Smith J A. The development of an airborne infrared interferometer for meteorological sounding studies [J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 1999, 16 (12): 1912-1927.
- [2] Han Y, Revercomb H, Crompt 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(22): 12734-12748.
- [3] 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.
- [4] Tobin D, Revercomb H, Knuteson R, et al. Suomi-NPP CrIS radiometric calibration uncertainty [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2013, 118(18): 10589-10600.
- [5] Vladimir V, Chad S, Gail E, et al. Preflight assessment of the cross-track infrared sounder (CrIS) performance [J]. *Proceedings of SPIE*, 2011, 8176: 817606.
- [6] Zavyalov V, Esplin M, Scott D, et al. Noise performance of the CrIS instrument [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2013, 118 (23): 13108-13120.
- [7] Knuteson R, Tobin D, Revercomb H, et al. The Cross-track Infrared Sounder (CrIS) on SUOMI NPP: nonlinearity assessment and on-orbit monitoring [C]// *Proceedings of the 93rd AMS Annual Meeting*, January 5-10, 2013, Austin, Tex. [S. l.: s. n.], 2013.
- [8] Jacqueline E, Jouglet D, Standfuss C, et al. Non linearity correction of IASI on board MetOp-A and MetOp-B [C/OL]// *4th IASI conference*, April 11-15, 2016, Antibes Juan-les-pins, France. [2019-09-28] https://iasi.cnes.fr/sites/default/files/drupal/201612/default/bpc_iasi-conference4-1_03_non_linearity_jacquette.pdf.
- [9] Yang T H, Hu X Q, Xu H L, et al. Radiation calibration accuracy assessment of FY-3D hyperspectral infrared atmospheric sounder based on inter-comparison [J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, 39 (11): 1130003.
杨天杭, 胡秀清, 徐寒列, 等. 基于交叉比对的风云三号 D 星红外高光谱大气探测仪辐射定标性能评估 [J]. *光学学报*, 2019, 39(11): 1130003.
- [10] Shao L M, Griffiths P R. Correcting nonlinear response of mercury cadmium telluride detectors in open path Fourier transform infrared spectrometry [J]. *Analytical Chemistry*, 2008, 80 (13): 5219-5224.
- [11] Jeseck P, Camy-Peyret C, Payan S, et al. Detector nonlinearity correction scheme for the LPMA balloonborne Fourier transform spectrometer [J].

- Applied Optics, 1998, 37(27): 6544-6549.
- [12] Fiedler L, Newman S, Bakan S. Correction of detector nonlinearity in Fourier transform spectroscopy with a low-temperature blackbody [J]. Applied Optics, 2005, 44(25): 5332-5340.
- [13] National Aeronautics and Space Administration. Joint Polar Satellite System (JPSS) Cross Track Infrared Sounder (CrIS) Sensor Data Records (SDR) algorithm theoretical basis document (ATBD) [M]. Washington D.C.: NASA, 2014.
- [14] Yang M Z, Zou Y P, Zhang L, et al. Correction to nonlinearity in interferometric data and its effect on radiometric calibration [J]. Chinese Journal of Lasers, 2017, 44(1): 0110002.
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(1): 0110002.
- [15] Yang M Z, Zou Y P, Zhang L, et al. Nonlinear 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]. 红外与激光工程, 2017, 46(10): 1023001.