

# 干涉数据中非线性的校正及其对辐射定标的影响

杨敏珠<sup>1,2</sup>, 邹曜璞<sup>1,2</sup>, 张磊<sup>1,2</sup>, 韩昌佩<sup>2</sup>

<sup>1</sup>中国科学院大学, 北京 100049;

<sup>2</sup>中国科学院上海技术物理研究所中国科学院红外探测与成像技术重点实验室, 上海 200083

**摘要** 对大气垂直探测仪(AVS)的探测器引入的非线性进行了分析,通过对比理想的干涉数据和带有二次项非线性的模拟干涉数据,研究了二次项非线性对光谱的影响。对实际采集的干涉数据的二次项非线性进行了校正,并将校正后的数据运用到了 AVS 的辐射定标中。实验结果表明,校正后数据的定标曲线拟合优度大约提高了0.3%。在星上两点定标中,校正后的数据比校正前的更准确。

**关键词** 遥感; 非线性; 校正; 辐射定标; 带内光谱

**中图分类号** O433.4; TH744.1

**文献标识码** A

**doi:** 10.3788/CJL201744.0110002

## Correction to Nonlinearity in Interferometric Data and Its Effect on Radiometric Calibration

Yang Minzhu<sup>1,2</sup>, Zou Yaopu<sup>1,2</sup>, Zhang Lei<sup>1,2</sup>, Han Changpei<sup>2</sup>

<sup>1</sup>University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

<sup>2</sup>Key Laboratory of Infrared Detection and Imaging Technology, Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China

**Abstract** The nonlinearity introduced by the detector of atmospheric vertical sounder (AVS) is analyzed. The comparison between the ideal interferometric data and the simulated interferometric data with quadratic nonlinearity is conducted, and the influence of quadratic nonlinearity on spectrum is illuminated. The correction to quadratic nonlinearity in the practically acquired interferometric data is performed and the corrected data are adopted to the radiation calibration of AVS. The experimental results indicate that the goodness-of-fit of calibration curves after data correction is approximately increased by 0.3%. The data after correction are more accurate than before in the two-point calibration on stars.

**Key words** remote sensing; nonlinearity; correction; radiometric calibration; in-band spectrum

**OCIS codes** 120.0280; 040.5160; 260.3160

## 1 引 言

我国第二代静止轨道气象卫星风云四号搭载的大气垂直探测仪是以迈克耳孙干涉仪为原型的,采用了干涉分光技术,通过动镜运动产生光程差来生成带有光谱信息的干涉图。采集到的干涉图经过傅里叶变换后能够得到相应的光谱图,通过反演可以得到大气温度、湿度、水汽轮廓线等的垂直分布情况<sup>[1]</sup>,这对气象分析以及天气预报意义重大。21 世纪初,世界气象组织提出了大气探测目标:温度探测准确为 1 K,湿度探测准确度为 10%~15%,垂直分辨率为 1~2 km<sup>[2]</sup>。因此,确保干涉数据的准确性是非常必要的。但在实际

**收稿日期:** 2016-08-08; **收到修改稿日期:** 2016-12-25

**基金项目:** 中国科学院上海技术物理研究所创新基金(CX-12)

**作者简介:** 杨敏珠(1991—),女,博士研究生,主要从事傅里叶光谱仪数据处理及压缩方面的研究。

E-mail: 15821372732@163.com

**导师简介:** 韩昌佩(1979—),男,博士,研究员,主要从事航天光学载荷整机集成标定、遥感信息定量化方面的研究。

E-mail: changpei\_han@mail.sitp.ac.cn(通信联系人)

应用过程中,探测器、读出电路、预放、模数转换器(ADC)等引入的非线性会对干涉数据的准确性造成影响。

随着用户对数据准确性要求的提高,对数据非线性进行校正成为必须。本文对干涉数据非线性的主要来源进行了研究,主要分析了二次项非线性对带内光谱造成的影响,并对干涉数据的非线性进行了校正,将校正后的数据运用到辐射定标实验中。实验结果表明,非线性校正后的数据线性拟合优度更好,更接近1;在星上两点定标中,非线性校正后的数据比校正前的数据更准确。

## 2 探测器非线性

干涉数据的非线性主要来自探测器。常用的光电导(PC)型和光生伏特(PV)型碲镉汞(MCT)探测器,它们的输出信号与入射光辐射强度呈线性关系;但当入射辐射强度超过一定值时,探测器输出信号呈非线性。PC型探测器一般会表现出非线性现象,PV型探测器可能在某些波段表现出非线性,例如交叉跟踪红外探测器(CrIS)的PV型探测器在中波和长波波段存在非线性<sup>[3]</sup>。

### 2.1 探测器非线性表达式

PC型和PV型探测器的入射辐射强度 $Q$ 与光生导带电子浓度 $\Delta n$ 的关系可描述为<sup>[4]</sup>

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

式中 $C_1, C_2, C_3$ 为系数。理想干涉图光强 $I_i$ 与入射辐射强度成正比,测量干涉图光强 $I_m$ 与光生导带电子浓度成正比, $I_i$ 与 $I_m$ 满足

$$I_i = I_m + a_2 I_m^2 + a_3 I_m^3 + \dots, \quad (2)$$

式中 $a_2, a_3$ 等均为待定系数。

三次及其以上非线性影响较小,可忽略不计,下面着重讨论二次非线性引起的光谱变化及其校正。理想干涉图 $I_i$ 与测量干涉图 $I_m$ 的关系简化为

$$I_i = I_m + a_2 I_m^2. \quad (3)$$

### 2.2 二次项非线性所造成的影响

干涉图光强 $I$ 的函数表达式是由与光程差无关的直流部分( $I_{dc}$ )以及与光程差相关的交流部分( $I_{ac}$ )组成:

$$I = I_{dc} + I_{ac} = 2 \int_0^{\infty} B(\nu) d\nu + 2 \int_0^{\infty} B(\nu) \cos(2\pi\nu\Delta) d\nu, \quad (4)$$

式中 $I$ 为干涉光的强度, $B(\nu)$ 为入射的准直光束的光强随波数的光谱分布函数, $\nu$ 为波数, $\Delta$ 为光程差。图1为归一化后的干涉图<sup>[3]</sup>。

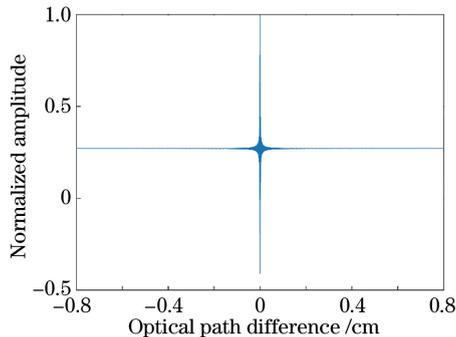


图1 归一化后的干涉图

Fig. 1 Normalized interferogram

根据(4)式, $I_i$ 与 $I_m$ 可写为

$$\begin{cases} I_i = I_{idc} + I_{iac} \\ I_m = I_{mdc} + I_{mac} \end{cases}, \quad (5)$$

将(5)式代入(3)式,得

$$I_{idc} + I_{iac} = I_{mdc} + I_{mac} + a_2 (I_{mdc} + I_{mac})^2, \quad (6)$$

将(6)式等号两边展开,去掉直流部分,即

$$I_{iac} = I_{mac} + a_2 I_{mac}^2 + 2a_2 I_{mdc} I_{mac}, \quad (7)$$

对(7)式作傅里叶变换,得

$$S_{iac} = (1 + 2a_2 I_{mdc})S_{mac} + a_2 S_{mac} \otimes S_{mac}, \quad (8)$$

式中  $S_{iac}$ 、 $S_{mac}$  分别为与光程差相关的交流部分理想光谱和测量干涉光谱。

根据普朗克定律和(4)式,通过 MATLAB 模拟出一组不带直流的理想干涉数据  $I_a$ ,并对  $I_a$  以及  $I_a^2$  分别进行了快速傅里叶变换(FFT),归一化后的频谱对比图如图 2 所示。

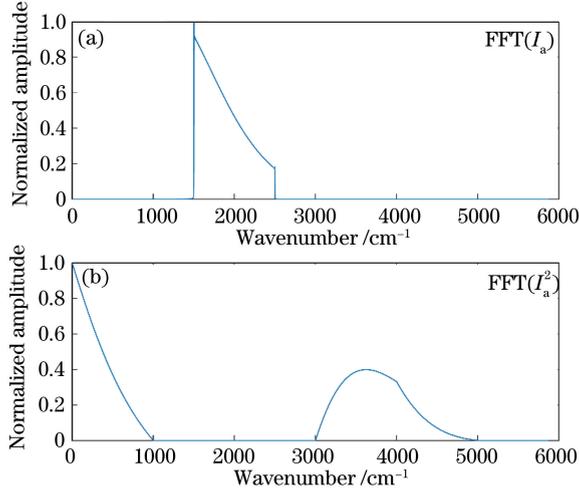


图 2 FFT 后的频谱对比图

Fig. 2 Comparison of spectra obtained after FFT

由图 2 可以发现,干涉图平方项对原带内光谱未产生影响,仅对带外光谱的低频和低频产生影响。(8)式左边  $S_{iac}$  是不受非线性影响的理想光谱,(8)式右边分两部分:乘积项  $1 + 2a_2 I_{mdc}$  是光谱  $S_{mac}$  的一个缩放因子;卷积项  $S_{mac} \otimes S_{mac}$  是平方项  $I_{mac}^2$  在频域的表现方式,它引起了两处带外畸变。

### 2.3 二次项非线性系数 $a_2$ 的计算

将实际采集的中波 340 K 干涉光强数据去直流,并进行傅里叶变换和归一化处理,所得的频谱图如图 3 所示,其中插图为放大后的非线性部分。可以看到,带外有两处畸变,是二次项非线性引起的,这与上述分析相符;缩放因子  $1 + 2a_2 I_{mdc}$  对带内光谱的影响在图中表现并不明显。

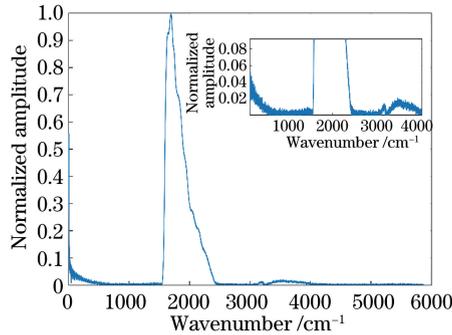


图 3 受非线性影响的实际光谱图

Fig. 3 Actual spectrum under the influence of nonlinearity

要得到更准确的气象分析结果,必须对带内光谱进行矫正。缩放因子  $1 + 2a_2 I_{mdc}$  中的  $I_{mdc}$  是测量干涉图  $I_m$  的直流量,可通过计算平均值近似得到,因此矫正带内光谱首先要计算  $a_2$ 。使用 ADC 输出码值计算时,CrIS 中波和长波通道的二次项非线性系数  $a_2$  约为  $10^{-6}$  量级<sup>[5]</sup>,可作为参考进行  $a_2$  的计算。

如图 3 所示,在二次项非线性引起的两处带外畸变中,高频处的光谱畸变靠左侧有一个小犄角,与图 2(b)高频处的畸变存在差异。结合文献可知,除了二次项非线性外,高频处畸变还存在其他复杂成因,因

此采用低频处的畸变对  $a_2$  进行估算<sup>[3,6]</sup>。为了避免  $0 \text{ cm}^{-1}$ 附近的直流量影响,选取光谱图  $50 \sim 500 \text{ cm}^{-1}$  区间进行估算。

经分析,在理想光谱中, $50 \sim 500 \text{ cm}^{-1}$ 对应的的光谱幅度值应该为 0,根据(8)式有

$$0 = (1 + 2a_2 I_{\text{mdc}})S_{\text{mac}} + a_2 S_{\text{mac}} \otimes S_{\text{mac}}, \quad (9)$$

于是有

$$a_2 = \frac{a'_2}{1 - 2a'_2 I_{\text{mdc}}}, \quad (10)$$

式中  $a'_2 = -\frac{S_{\text{mac}}}{S_{\text{mac}} \otimes S_{\text{mac}}}$ 。

需要注意的是,这里求出的  $a_2$  是一个数组,需要采用雅克比扰动法使这个数组收敛,进而得到系数  $a_2$ 。经实测数据求得  $a_2 = -9.96 \times 10^{-6}$ 。

由分析可知,带外畸变与带内畸变相互独立存在,互不影响。所以对于带内光谱,有  $S_{\text{iac}} = (1 + 2a_2 I_{\text{mdc}})S_{\text{mac}}$ ,据此可求得理想带内光谱的幅值。因为  $a_2 < 0$ ,所以  $S_{\text{iac}} < S_{\text{mac}}$ ,带内光谱幅度值在非线形影响下增大。另外,缩放因子  $1 + 2a_2 I_{\text{mdc}}$  与  $a_2$ 、 $I_{\text{mdc}}$  有关,且  $I_{\text{mdc}}$  随温度的升高而增大,因此温度越高,非线性影响越明显。

### 2.4 对非线性的校正

将校正前、后的干涉图进行傅里叶变换和归一化处理,得到的光谱对比图如图 4 所示。可以看到,进行非线性校正后,带外的两处畸变均减小,且校正后的带内光谱在校正前的下方,符合带内光谱幅度值在非线形影响下增大的分析结果。

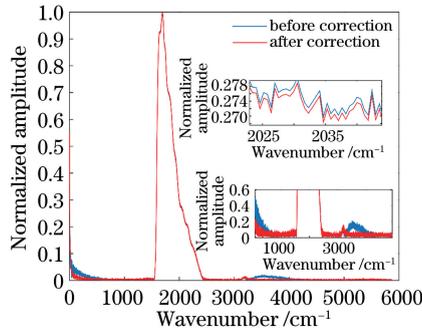


图 4 非线性校正前后的光谱对比图

Fig. 4 Comparison of spectra before and after nonlinearity correction

## 3 辐射定标实验分析、仿真与结果

辐射定标一般采用线性模型

$$L_i = c_i D_{Ni} + L_{i0}, \quad (11)$$

式中  $D_{Ni}$  为遥感器的数字量化输出经 FFT 后的的光谱幅度值,  $L_i$  为探测器第  $i$  通道暗电流对应的辐亮度值,  $c_i$  为对应的系数,  $L_{i0}$  为第  $i$  通道暗电流对应的辐亮度值。

在发射过程以及在轨运行期间,大气垂直探测仪的光学结构和电子部件会发生性能改变,导致实验室辐射定标建立的数字化输出和地面景物辐亮度之间的关系发生改变。为了得到准确的数据,必须对这些变化进行校正,这就要求在地面定标的基础上对光谱仪进行星上定标。因此辐射定标分为地面辐射定标和星上两点定标。根据以上分析,干涉数据的非线性会造成带内、外光谱的畸变,使复原光谱信噪比降低。联系(11)式可知,数据非线性的确会引起辐射定标的误差,下面详细分析非线性校正运用于辐射定标中的情况。

### 3.1 地面辐射定标

地面定标是将仪器输出的干涉光强度量化值,经 FFT 处理后得到光谱幅度值  $D_{Ni}$ ,再通过普朗克定律计算出相应温度下的辐亮度值  $L_i$ 。

图 5(a)所示为实际采集的各个温度点的数据在  $1800\text{ cm}^{-1}$  处的定标曲线,图 5(b)所示为这些数据校正后的在  $1800\text{ cm}^{-1}$  处的定标曲线。由图 5 可知,校正后的数据实际连线与拟合的直线更吻合。

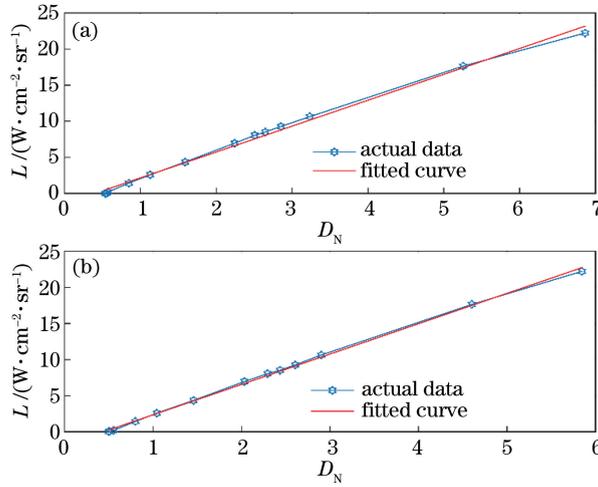


图 5  $1800\text{ cm}^{-1}$  处定标实际数据连线以及拟合曲线对比。(a) 校正前;(b) 校正后

Fig. 5 Comparison between connection of actual calibration data and fitted curve at  $1800\text{ cm}^{-1}$ .

(a) Before correction; (b) after correction

采用拟合优度  $R^2$  来量化线性拟合直线与实际数据点的吻合程度,表达式为

$$R^2 = \frac{\sum (\tilde{L}_i - \bar{L})^2}{\sum (L_i - \bar{L})^2}, \quad (12)$$

式中  $\tilde{L}_i$  为拟合出来的预测值,  $L_i$  为实际值,  $\bar{L}$  为平均值。  $R^2$  越接近 1, 实际数据与定标拟合直线越吻合, 线性度就越好。 5 个不同波数下校正前后的拟合优度  $R^2$  见表 1。

表 1 校正前后的  $R^2$

Table 1  $R^2$  before and after correction

Wavenumber / $\text{cm}^{-1}$	1700	1800	1900	2000	2100
$R^2$ (before correction)	0.9956	0.9953	0.9961	0.9960	0.9934
$R^2$ (after correction)	0.9990	0.9988	0.9991	0.9987	0.9969

表 1 表明,校正后的拟合优度  $R^2$  更接近 1,较校正前的提高了约 0.3%,即校正后的数据实际连线具有更好的线性度。

### 3.2 星上辐射定标

与地面辐射定标的多点拟合不同,星上进行的是两点定标,即采用冷空间 2 K 和星上黑体 340 K 两个温度点对应的  $D_N$  值以及辐亮度  $L$  拟合出直线。但受非线性的影响,拟合出的直线可能无法很好地代表其他温度点的数据。

采用 MATLAB 模拟若干温度点的干涉图数据,加入  $-9.96 \times 10^{-6}$  二次项非线性进行校正。进行傅里叶变换后得到每个温度下的模拟光谱,在  $1800\text{ cm}^{-1}$  波数下进行两点定标,得出归一化后的  $D_N$  与  $L$  的线性关系。

图 6 所示为模拟数据校正前、后的定标情况对比图。很明显,校正前的定标曲线(红)无法很好代表数据点(蓝),校正后的数据点(绿)能够更好地贴合定标曲线(黑)。

另外,校正后的数据点(绿)在校正前数据点(蓝)的左边,随着温度的增加,校正前、后数据点的距离增大,这进一步验证了第 2.3 节的结论,即带内光谱幅度值在非线性影响下会增大、且温度越高非线性表现越明显。

采用相同方法对实际采集的多个温度的干涉图数据进行处理,结果如图 7 所示。由于地面定标时无法达到 2 K 的冷空间低温,因此采用能够达到的 100 K 作为两点定标的起点,高温 340 K 作为两点定标的另一点。

表 2 列出了 5 个不同波数下校正前、后的拟合优度  $R^2$ 。

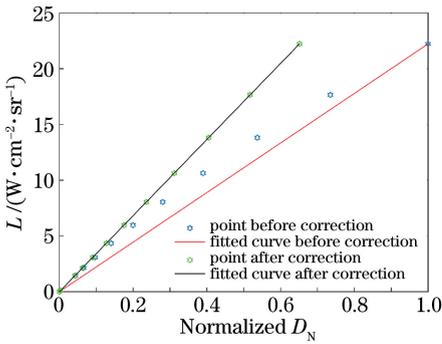


图 6 模拟定标数据校正前后对比

Fig. 6 Comparison of simulated calibration data before and after correction

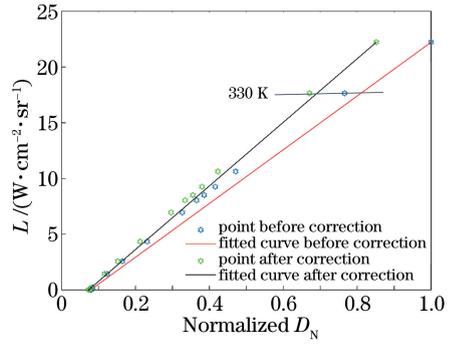


图 7 实际定标数据校正前后对比

Fig. 7 Comparison of actual calibration data before and after correction

表 2 校正前后的  $R^2$

Table 2  $R^2$  before and after correction

Wavenumber / $\text{cm}^{-1}$	1700	1800	1900	2000	2100
$R^2$ (before correction)	0.9844	0.9854	0.9872	0.9762	0.9818
$R^2$ (after correction)	0.9961	0.9961	0.9967	0.9877	0.9918

由表 2 可知,在不同波数下,非线性校正后两点定标曲线的拟合优度更接近 1,实际观测点离拟合直线较近。

图 6 与图 7 均是  $1800 \text{ cm}^{-1}$  下的定标曲线,根据分析,每个波数都有各自的定标曲线以及光谱幅度值点。如图 7 所示,在 330 K 对应的辐亮度值处画一条直线,与红色定标曲线的交点代表校正前定标曲线 330 K 对应的的光谱幅度值;蓝色点代表校正前 330 K 对应的的光谱幅度值;与黑色定标曲线的交点代表校正后定标曲线 330 K 对应的的光谱幅度值;绿色点代表校正后 330 K 对应的的光谱幅度值。对每一个波数都作上述处理并分别取 4 个点,将其连起来可得图 8。图 8 是模拟数据与实际数据在 330 K 下的归一化光谱图。

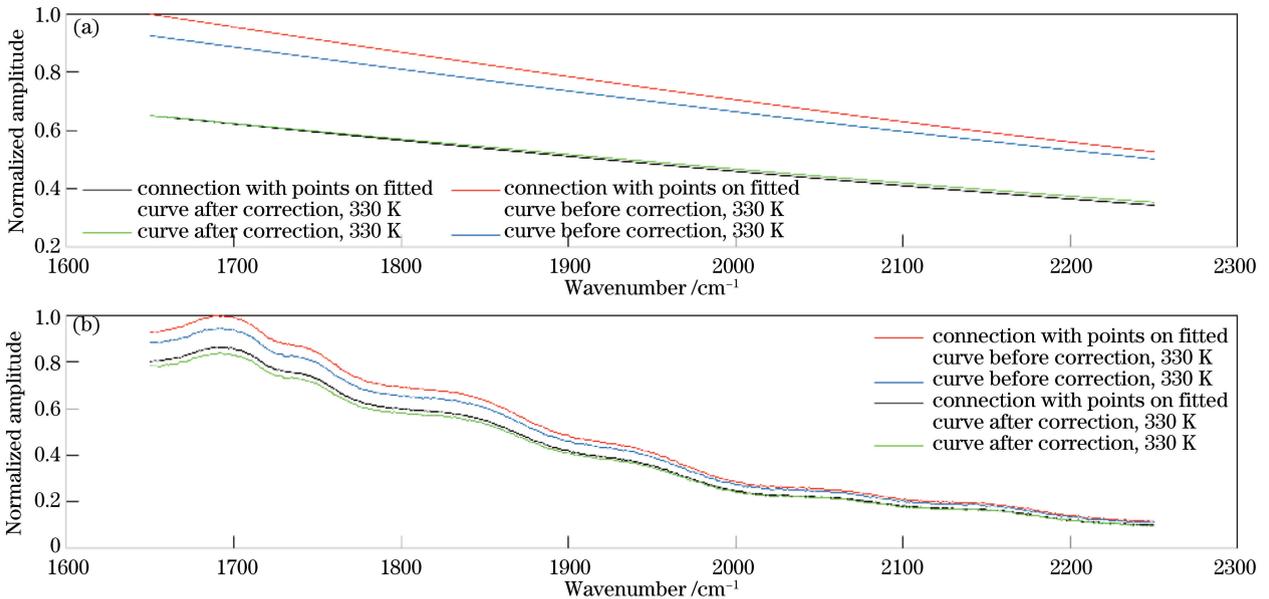


图 8 (a)模拟数据与(b)实际数据在校正前后的归一化光谱

Fig. 8 Normalized spectra of (a) simulated data and (b) actual data before and after correction

从模拟数据可以看到,绿色线与黑色线几乎重合,较红色与蓝色有着更好的相合性。说明非线性校正后经两点定标得到的 330 K 数据更接近实际数据。

对实际数据,可以用光谱失真度( $R_{EQ}$ )来判断红色和蓝色、黑色和绿色线之间的相合性,即

$$R_{\text{EQ}} = \frac{\sqrt{\int_{f_1}^{f_2} |\tilde{S}(\tilde{f}) - S(\tilde{f})|^2 d\tilde{f}}}{\int_{f_1}^{f_2} \tilde{S}(\tilde{f}) d\tilde{f}}, \quad (13)$$

式中  $S(\tilde{f})$  为原始光谱幅度值;  $\tilde{S}(\tilde{f})$  为采用两点定标所推得的光谱幅度值;  $\tilde{f}$  为波数;  $f_1$  与  $f_2$  分别表示光谱的上限和下限, 在这里  $f_1$  取  $1650 \text{ cm}^{-1}$ ,  $f_2$  取  $2250 \text{ cm}^{-1}$ 。表 3 列举了 5 个温度点校正前、后的光谱失真度。

表 3 校正前后的  $R_{\text{EQ}}$   
Table 3  $R_{\text{EQ}}$  before and after correction

Temperature /K	180	250	280	300	330
$R_{\text{EQ}}$ (before correction)	0.0035	0.0053	0.0064	0.0057	0.0026
$R_{\text{EQ}}$ (after correction)	0.0035	0.0030	0.0029	0.0024	0.0014

由表 3 可知, 在不同温度下, 校正非线性后, 光谱失真度明显减小。

综上所述, 表 2 和表 3 分别从波数和温度两个不同角度证明了校正后的数据较校正前的更为准确。

## 4 结 论

利用入射辐射强度  $Q$  与光生导带电子浓度  $\Delta n$  的关系量化了非线性, 建立了理想干涉图与测量干涉图之间的关系, 主要分析了二次项非线性对带内光谱的影响。结果表明, 二次项非线性使光谱幅度值增大, 且温度越高, 非线性的影响就越明显。对 340 K 实际中波干涉数据的非线性进行了校正, 校正系数  $a_2 = -9.96 \times 10^{-6}$ 。利用非线性校正后的数据进行辐射定标, 地面辐射定标中校正后的数据拟合优度较未校正的更接近 1。在星上两点定标中, 从波数和温度两个方面证明了非线性校正后的数据更为准确。

## 参 考 文 献

- [1] Zhang Chunming. Interference imaging spectroscopy[M]. Beijing: Science Press, 2010.  
张淳民. 干涉成像光谱技[M]. 北京: 科学出版社, 2010.
- [2] Li J, Sun F Y, Schmit T, *et al.* Study of the hyperspectral environmental suite (HES) on GOES-R [C]. 20th International Conference on IIPS, Seattle, 2004.
- [3] Liu Jiaqing. Research on real-time data processing techniques for infrared interferometer [D]. Shanghai: Shanghai Institute of Technical Physics of Chinese Academy of Sciences, 2014: 29-33, 61-66.  
刘加庆. 红外干涉仪器实时数据处理技术研究[D]. 上海: 中国科学院上海技术物理研究所, 2014: 29-33, 61-66.
- [4] Broudy R M, Reine M B. Advances in HgCdTe infrared focal plane technology[C]. SPIE, 1979: 62-68.
- [5] Zavyalov V V, Fish C S, Bingham G E, *et al.* Preflight assessment of the cross-track infrared sounder (CrIS) performance[C]. SPIE, 2011, 8176: 817606.
- [6] Goddard Space Flight Center. Algorithm theoretical basis document for the cross track infrared sounder (CrIS) sensor data records (SDR) [EB/OL]. (2014-12-23) [2016-8-7]. [http://www.star.nesdis.noaa.gov/jpsj/documents/ATBD/D0001-M01-S01-002\\_JPSS\\_ATBD\\_CrIS-SDR\\_C.pdf](http://www.star.nesdis.noaa.gov/jpsj/documents/ATBD/D0001-M01-S01-002_JPSS_ATBD_CrIS-SDR_C.pdf).