

红外超光谱干涉光谱仪探测器高阶非线性响应研究

叶松^{1,4}, 孙永丰^{1,2,3}, 李志伟^{2,3}, 施海亮^{2,3*}, 熊伟^{2,3}, 王新强^{1,4}, 汪杰君^{1,4}, 张文涛^{1,4}

¹ 桂林电子科技大学电子工程与自动化学院, 广西 桂林 541004;

² 中国科学院安徽光学精密机械研究所, 安徽 合肥 230031;

³ 中国科学院通用光学定标与表征技术重点实验室, 安徽 合肥 230031;

⁴ 桂林电子科技大学广西光电信息处理重点实验室, 广西 桂林 541004

摘要 针对红外超光谱干涉光谱仪的技术特点, 分析其探测器非线性响应的形成机理, 仿真含有高阶非线性误差的干涉数据, 并研究二、三阶非线性响应对光谱的影响; 提出一种迭代方法, 即通过交叉迭代使光谱带外畸变最小, 从而确定校正系数进而校正非线性响应; 通过获取不同温度黑体观测的干涉数据, 用交叉迭代法校正实测数据并复原光谱, 将未吸收波数光谱响应与黑体辐射亮度进行拟合。结果表明: 二阶非线性响应主要影响带外数据, 三阶非线性响应主要影响带内数据, 仅校正二阶非线性响应时, 光谱带内数据仍会有残留误差; 交叉迭代法可以校正探测器的非线性响应, 且三阶非线性校正的精度比二阶的提高了约 7.26%; 校正后的拟合优度比校正前的提高了约 0.4%, 校正后的干涉数据更准确。

关键词 探测器; 遥感; 非线性响应; 交叉迭代; 红外超光谱; 校正

中图分类号 TP731; TN215

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201838.0612007

High Order Nonlinearity Responses of Detector of Infrared Hyperspectral Interferometric Spectrometer

Ye Song^{1,4}, Sun Yongfeng^{1,2,3}, Li Zhiwei^{2,3}, Shi Hailiang^{2,3}, Xiong Wei^{2,3},
Wang Xinqiang^{1,4}, Wang Jiejun^{1,4}, Zhang Wentao^{1,4}

¹ School of Electronic Engineering and Automation, Guilin University of Electronic Technology,
Guilin, Guangxi 541004, China;

² Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei, Anhui 230031, China;

³ Key Laboratory of General Optical Calibration and Characterization, Chinese Academy of Sciences,
Hefei, Anhui 230031, China;

⁴ Guangxi Key Laboratory of Optoelectronic Information Processing, Guilin University of Electronic Technology,
Guilin, Guangxi 541004, China

Abstract In consideration of technical characteristics of the infrared hyperspectral interferometric spectrometer, we analyze the formation mechanism of nonlinear responses of its detector. The influences of second-order and third-order nonlinear responses on spectra are studied by means of simulating interference data with high-order nonlinear errors. An iterative method is proposed to minimize the out-of-band distortion by cross-iteration, thus the correction coefficient is determined to correct the non-linear responses. The interference data observed by the blackbody at different temperatures are corrected by the cross-iteration method, and then the spectra are recovered. The spectral response of the undisturbed wavenumber is fitted to the blackbody radiance. The results show that the second-order nonlinearity response has a major impact on the out-of-band data, while the third-order nonlinearity response mainly affects the in-band data. So the in-band data will still have residual errors when only the second-order nonlinear response is corrected. The cross-iterative method can correct the nonlinear response of the detector, and the accuracy produced by the third-order nonlinearity correction is improved about 7.26% compared to the second-order

收稿日期: 2017-12-29; 收到修改稿日期: 2018-02-11

基金项目: 国家自然科学基金(41561079)、遥感科学国家重点实验室开放基金(Y7Y00100KZ)、桂林市科学研究与技术开发计划(2016012003)、广西研究生教育创新计划(YCSW2017145)

作者简介: 叶松(1979—), 男, 博士, 研究员, 主要从事光学遥感方面的研究。E-mail: yesongmail@sina.com

* 通信联系人。E-mail: hlshi@aiofm.ac.cn

correction. The corrected goodness of fit is improved by about 0.4%, and the corrected interference data are more accurate than before.

Key words detectors; remote sensing; nonlinearity response; cross-iteration; infrared hyperspectrum; correction

OCIS codes 230.0040; 120.0280; 070.4790

1 引 言

红外超光谱干涉光谱仪采用傅里叶变换干涉分光技术,获取的光谱数据具有宽波段、高信噪比、高分辨率等优点,可以获得高精度的地球辐射谱^[1]。结合红外大气辐射传输模型,通过反演可得到大气温湿度和水汽垂直轮廓线等气象学所需数据,以及大气化学组分、重要痕量气体和温室气体浓度分布等环境研究所需数据^[2],这对天气预报、气象学、环境和全球气候变化等研究具有重要意义。

红外焦平面探测器是红外超光谱干涉光谱仪的核心部件,其作用是实现干涉数据信号的采集。理想的红外焦平面探测器具有良好的线性响应特性,在固定积分时间的条件下,探测器输出的数位(DN)值大小与入射辐射能量呈线性关系^[3]。但实际上受制作工艺的限制,探测器无法做到完美的线性响应,并且读出电路和数模转换器也存在非线性响应,尤其是长时间工作或环境变化剧烈时,红外焦平面阵列对入射光线能量的光电响应特性将不再是严格的线性变化,而是表现出一定的非线性特征,这主要包括 2 个方面,既“死区”的存在和非线性响应效应^[4-5]。

红外焦平面探测器响应非线性特征的存在会对干涉数据产生影响,干涉数据的变化必然导致复原光谱数据的失真。为了满足高精度光谱复原的要求,必须对探测器响应进行精确校正。干涉数据非线性校正方法主要有硬件方法和软件方法。其中硬件方法主要通过补偿电路来校正非线性,例如, Schindler^[6]提出利用系列电阻补偿 PC 型碲镉汞(MCT)探测器非线性的校正电路,以及 Carangelo 等^[7]提出利用预放校正探测器的非线性,这 2 种方法都通过调整参数使干涉图二次项引起的光谱缺陷在低波数谱段最小。软件方法主要是构建干涉数据的非线性响应模型,通过某些准则获取非线性系数。例如,美国极地气象轨道卫星上搭载的交叉跟踪红外探测器(CrIS)^[8],基于光谱低波数带外响应为 0 的特点,通过构建卷积方程来获取二阶非线性系数,从而校正探测器非线性响应。上述硬件方法和软件方法均主要校正了二阶非线性响应。随着红外超光谱干涉光谱仪研发和测量精度的提高,探测器的三阶非线性响应将不可忽略,需要进行进一步校正。

本文将讨论探测器响应非线性对干涉数据及复原光谱的影响,阐述一种探测器高阶非线性响应的校正方法。通过仿真探测器测量干涉数据研究各阶非线性响应的特点,并选取特征区域,通过交叉迭代各阶非线性响应系数进行非线性校正。利用红外超光谱干涉光谱仪样机观测不同温度下的黑体辐射,获取干涉数据,分析其因响应非线性引起的干涉光谱失真,并进行校正。将光谱响应与黑体辐射亮度 L 进行曲线拟合,考察校正后拟合曲线的拟合优度,以及三阶校正精度。

2 探测器非线性响应原理分析

以 MCT 探测器为代表的第三代红外探测器广泛应用于航天气象遥感领域。其工作方式电子的带间跃迁,即材料吸收外来光子后,电子从价带跃迁到导带。此类探测器的优点为光吸收率大、响应率高、响应快,并且材料的禁带宽度可以灵活调整。但是材料本身的特质使得当入射能量较高时,探测器输出信号会产生非线性响应^[9]。PC 型 MCT 探测器往往会表现出非线性响应;PV 型 MCT 探测器在某些波段也存在非线性响应,例如,芬兰国家极地轨道伴随卫星(NPP)上搭载的 CrIS^[8]使用的 PV 型 MCT 探测器在中波和长波波段存在非线性响应效应。

Broudy 等^[10]的研究表明,一般 PC 型 MCT 探测器入射辐射强度 Q 与光生导带电子浓度 Δn 的关系为

$$Q = c_1 \Delta n + c_2 (\Delta n)^2 + c_3 (\Delta n)^3 + \dots, \quad (1)$$

式中: c_1 、 c_2 、 c_3 为电子浓度的各阶响应系数。

探测器工作时,测量干涉图 I_m 与光生导带电子浓度成正比,理想干涉图 I_c 与入射辐射强度成正比,两者关系满足

$$I_c = I_m + a_2 I_m^2 + a_3 I_m^3 + a_4 I_m^4 + \dots, \quad (2)$$

式中: a_2 、 a_3 、 a_4 为二、三、四阶非线性响应系数。

实际上,仪器输出干涉测量 DN 值除了包含与光程差有关的交流分量 I_m 外,还包含直流分量 V_m ,因此上述干涉图光强表达式应为

$$I = I_c + V_c = (I_m + V_m) + a_2 (I_m + V_m)^2 + a_3 (I_m + V_m)^3 + a_4 (I_m + V_m)^4 + \dots, \quad (3)$$

式中: I 为探测器输出的理想干涉图; V_c 为理想干涉图中的直流分量。

根据干涉原理和 Planck 黑体辐射定律,可以对理想黑体辐射进行仿真,仿真红外超光谱干涉光谱仪采集 1500 K 黑体辐射的干涉数据,探测器响应的波数范围为 $750\sim 1900\text{ cm}^{-1}$,光谱响应函数采用理想矩形窗。假定获取探测器的线性响应干涉数据为 $I(x)$,分别求取干涉数据的二阶响应 $I^2(x)$ 、三阶响应 $I^3(x)$ 和四阶响应 $I^4(x)$,采用傅里叶变换复原光谱。图 1 所示为各阶非线性响应复原的光谱。由图 1 可知,在光谱的带外区域,其响应的理论值为 0,但是非线性响应会使带外产生畸变。在低波

数带外区域,畸变主要由二阶和四阶非线性响应引起;在高波数带外区域,畸变主要由二阶和四阶非线性响应引起,同时三阶非线性响应也对其产生了影响。由图 1(c)可知,三阶非线性响应主要影响光谱的带内区域。由图 1(b)和图 1(d)可知,二、四阶非线性响应形状相似,影响区域相同。实际上,所有偶数阶非线性响应均与二阶非线性响应相似,所有奇数阶非线性响应均与三阶非线性响应相似,因此校正时只需要考虑二、三阶非线性响应即可完成对红外超光谱干涉光谱仪探测器非线性响应的校正。

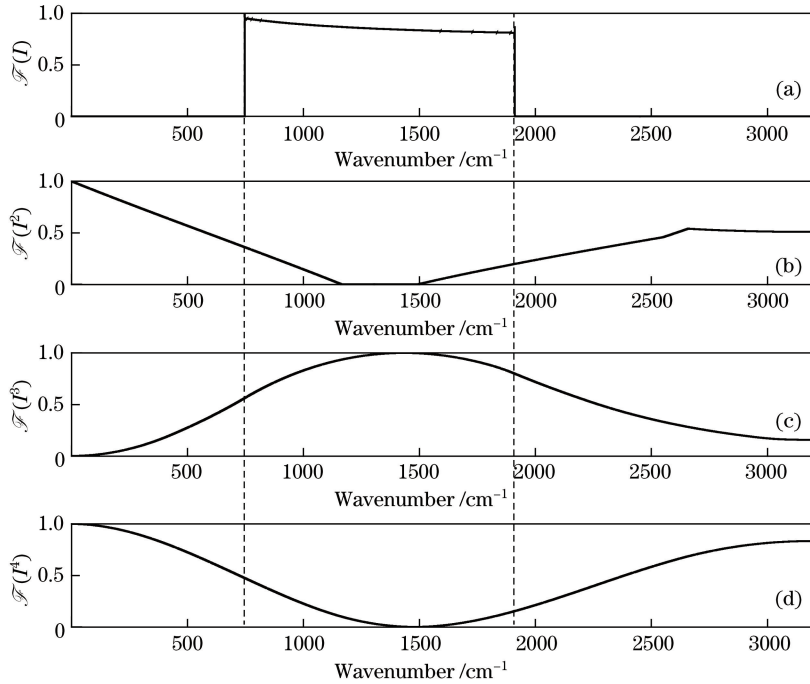


图 1 不同阶干涉数据复原光谱。(a)一阶响应;(b)二阶响应;(c)三阶响应;(d)四阶响应

Fig. 1 Spectra recovered from interferograms with different orders. (a) The first order response; (b) the second order response; (c) the third order response; (d) the fourth order response

3 非线性响应校正

3.1 二阶非线性响应分析及校正

目前,在国内外星载数据处理中,探测器非线性响应的影响分析和校正方法以二阶为主。例如,美国的 CrIS 和中国风云四号卫星^[11]在辐射定标中选取光谱的低波数带外数据构建卷积方程对二阶非线性响应进行校正,具体算法如下。

(3)式为非线性响应干涉光强表达式,当考虑干涉数据仅受二阶非线性响应的影响时,可以忽略式中高阶项,保留一、二阶项,获取的干涉图光强为

$$I_{c,2} = (I_m + V_m) + a_2(I_m + V_m)^2, \quad (4)$$

式中: $I_{c,2}$ 为仅包含二阶非线性响应的干涉图光强。为了提高光谱数据信噪比,探测器采样会加入滤波

电路,去除干涉数据中的直流信号。对(4)式进行化简,只关注其中的交流项,则干涉图光强为

$$I_{c,2} = (1 + 2a_2V_m)I_m + a_2I_m^2. \quad (5)$$

对(5)式进行傅里叶变换,则包含二阶非线性响应的光谱图为

$$S_{c,2} = (1 + 2a_2V_m)S_m + a_2S_m \otimes S_m, \quad (6)$$

式中: $S_{c,2}$ 和 S_m 分别为理论光谱和测量光谱; $S_m \otimes S_m$ 为测量光谱的卷积,其在光谱带外区域产生二阶畸变。理论上,低波数带外区域响应为 0,可以假定低波数带外区域为二阶非线性响应的特征区域,求解(6)式即可获得二阶非线性响应系数,进而校正干涉数据的非线性响应。

随着载荷性能指标和应用需求的逐步提升,尤其是用于大气探测的红外超光谱仪器,只校正二阶

非线性响应很难满足数据反演应用精度要求^[12]。此外,随着仪器工作时间延长,在太阳观测和临边观测模式时,入射能量较高,需要进一步讨论探测器的三阶非线性响应。此时,在(4)式的基础上添加三阶非线性响应,展开后去掉直流项,则包含三阶非线性响应系数的校正公式为

$$I_{c,3} = (1 + 2a_2V_m + 3a_3V_m^2)I_m + (a_2 + 3a_3V_m)I_m^2 + a_3I_m^3, \quad (7)$$

式中: $I_{c,3}$ 为包含二、三阶非线性响应的干涉强度。

三阶非线性响应对二阶系数带来了偏差($3a_3V_m$),对带内光谱数据产生了影响($3a_3V_m^2I_m$)。图2所示为包含二、三阶非线性响应的干涉光谱。由图2可知,虽然系数 a_3 较小,使得光谱图的三阶畸变并不明显,但探测器两端的直流电压 V 对三阶非线性系数的放大作用会使带内数据产生一定误差。若此时依然仅校正二阶非线性,则会影响二阶非线性系数获取的准确性,校正后的光谱图会有残留误差。

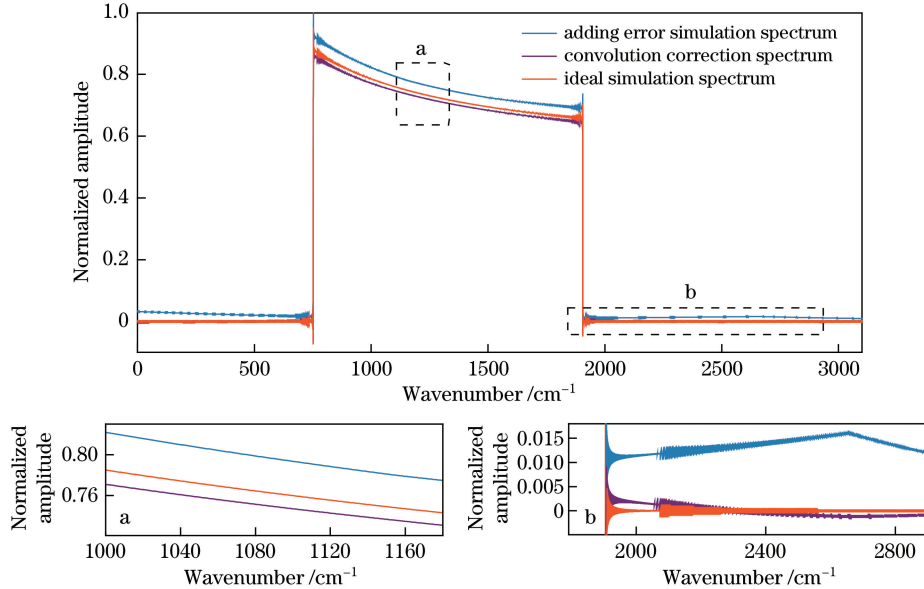


图2 传统方法校正非线性干涉数据的复原光谱

Fig. 2 Spectra recovered from nonlinear interferogram with traditional method

当用低波数带外光谱的卷积方程校正包含三阶非线性误差的干涉数据时,获取的二阶非线性响应系数为

$$a'_2 = a_2 + 3a_3V. \quad (8)$$

将 a'_2 代入二阶非线性响应校正公式,则获取的干涉数据强度为

$$I'_{c,2} = (1 + 2a'_2V)I_m + a'_2I_m^2 = (1 + 2a_2V + 6a_3V^2)I_m + (a_2 + 3a_3V)I_m^2. \quad (9)$$

此时校正后的干涉数据依然包含的残留误差为

$$I_{res} = 3a_3V^2I_m + a_3I_m^3. \quad (10)$$

从图2中可以看出,相对于误差数据,校正后光谱图带内非线性响应有所降低,带外响应与 x 轴近似平行。校正后光谱图与理想光谱图形状相似,但整体响应幅值有一定的差别,尤其是带内响应,主要原因为三阶系数对光谱一阶响应产生的贡献。

3.2 交叉迭代法校正探测器二、三阶非线性响应

根据第3.1节中的分析,三阶非线性响应主要对带内光谱数据产生影响,当仅校正干涉数据的二

阶非线性响应时,三阶非线性响应会对光谱产生残差 I_{res} 。对于包含三阶非线性响应的干涉数据,可以采用交叉迭代法获取非线性校正系数。根据第2节中的分析可知,二、三阶非线性响应影响区域并不相同,考虑到带外光谱响应理论值应为0,可以选择低波数带外区域为二阶非线性响应特征区域,高波数带外区域为三阶非线性响应特征区域,并对响应系数进行赋值迭代,寻找可以使带外光谱响应DN值最小的 a_2 和 a_3 ,即为二、三阶的非线性响应校正系数。

寻找二、三阶非线性响应校正系数的过程可分为3个步骤:1)认为三阶非线性响应校正系数为0,对二阶系数进行迭代,获取此时的校正系数 a_2 ;2)认为二阶非线性响应校正系数为 a_2 ,迭代三阶系数 a_3 ;3)二、三阶非线性响应校正系数全部迭代完成为一次交叉迭代校正,通过多次交叉迭代,当带外光谱数据小于一定阈值时,即可获得准确的二、三阶非线性响应校正系数。获取的二、三阶非线性校正

系数为 a_2^{itr} 、 a_3^{itr} ，此时非线性校正公式为

$$I_{ideal} = a_1^{itr} I_m + a_2^{itr} I_m^2 + a_3^{itr} I_m^3, \quad (11)$$

式中： a_1^{itr} 为二、三阶非线性响应对一阶产生的响应系数。对比(5)式与(7)式，则有

$$\begin{cases} a_3^{itr} = a_3 \\ a_2^{itr} = a_2 + 3a_3 V_m \\ a_1^{itr} = 1 + 2a_2 V_m + 3a_3 V_m^2 \end{cases}. \quad (12)$$

迭代方法可采用层次遍历法，将迭代区域进行树状划分，每层树杈进行 n 次迭代，共迭代 m 层，这样在 nm 次计算后，即完成了一般遍历的 n^m 次计算。层次遍历法极大地提高了迭代效率，同时保证了迭代精度。

通过交叉迭代法获取非线性系数后，结合探测

器直流电压 V_m 即可进行干涉数据校正。使用校正精度 η 来评价非线性校正结果，校正精度为

$$\eta = 1 - \frac{\langle S_{correction}^{in-band} - S_{ideal}^{in-band} \rangle}{\langle S_{measure}^{in-band} - S_{ideal}^{in-band} \rangle} 100\%, \quad (13)$$

式中： $S_{ideal}^{in-band}$ 、 $S_{measure}^{in-band}$ 、 $S_{correction}^{in-band}$ 分别为理想光谱、测量光谱和校正光谱带内数据的 DN 值； $\langle \rangle$ 为均值运算。图 3 所示为分别用卷积公式校正探测器二阶非线性响应和交叉迭代法校正探测器三阶非线性响应的结果对比。由图 3 可知，2 种方法均降低了非线性效应，分别使带内光谱数据与真值的残差由 0.0955 减小为 0.00775 和 0.000817，相对于卷积公式，交叉迭代法的校正精度约提高了 7.26%，校正后的数据更准确。

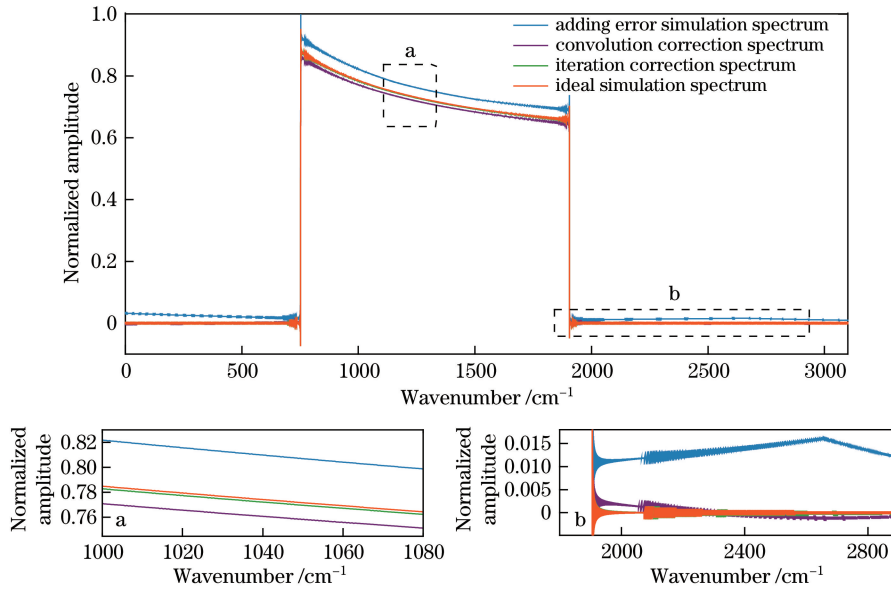


图 3 交叉迭代法校正非线性干涉数据复原光谱

Fig. 3 Spectra recovered from nonlinear interferogram corrected with cross-iteration method

3.3 直流分量对校正精度的影响

根据(3)式可知，影响探测器非线性响应校正的因素主要有 2 个，即校正系数和探测器直流分量 V 。第 3.1 节与第 3.2 节中已讨论了校正系数的影响和获取方法，本节分析探测器的直流分量对非线性校正精度的影响。

探测器直流分量由当前测量的光子通量和前置放大电路的直流电压组成^[13]，由于每次观测时入射辐射强度和仪器状态并不相同，因此每幅干涉图均需要重新计算非线性系数和直流分量。目前获取探测器直流分量的方法有 2 种：当采样电路中不包含直流滤波器时，测量到的干涉图包含直流电压，可以计算干涉图的 DN 均值，将其作为探测器的直流分量；当采样电路中采用直流滤波器滤除直流电压时，

可以通过获取仪器的增益系数和调制效率，并结合多幅测量干涉图光谱的均值，对直流分量进行估算。但是无论哪种方法，获取的直流分量均含有误差，会影响非线性校正的精度。

通过 $V_m = V_{ideal} + \delta V_{ideal}$ (V_{ideal} 为理想直流分量， δ 为偏差系数) 给直流分量增加一个偏差，理想直流分量 V 的修订值 V_m 增加了 δ 的误差。在通过交叉迭代法获取非线性校正系数后，根据(7)式代入校正系数和含有不同偏差的 V_m ，可以计算直流分量对非线性校正精度的影响。图 4 所示为直流电压偏差与非线性校正精度之间的关系。当直流电压不含偏差时，校正精度为 99.14%，随着直流电压偏差逐渐增加，校正精度降低，当直流电压误差大于 8% 时，校正精度下降到小于 90%。

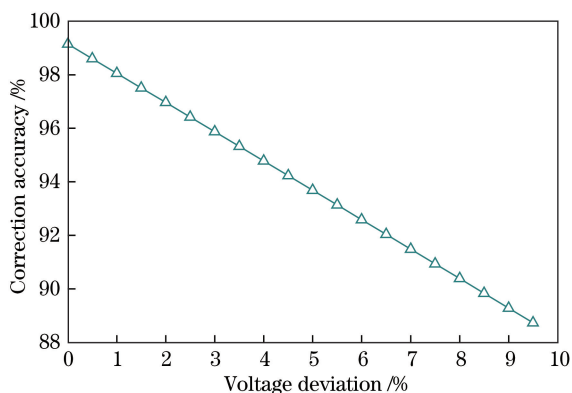


图 4 直流电压偏差对校正精度的影响
Fig. 4 Influence of direct current voltage deviation on correction accuracy

3.4 红外探测器高阶非线性校正实验

红外探测器非线性校正实验采用高温黑体作为

辐射源,其温度范围为 $1000 \sim 3000 \text{ }^\circ\text{C}$,温度精度为 $0.1 \text{ }^\circ\text{C}$,温度稳定度为 $0.1 \text{ }^\circ\text{C}/\text{h}$ 。通过平行光管对光源进行准直,采用红外超光谱干涉光谱仪样机采集不同温度下的干涉数据。样机采用 MCT 红外探测器采集干涉数据,其光谱范围为 $750 \sim 1900 \text{ cm}^{-1}$,光谱分辨率为 0.03 cm^{-1} ,样机采用的探测器型号为 FTIR-16-1.0SC,其响应波段为 $2.0 \sim 8.0 \text{ }\mu\text{m}$,像元尺寸为 $1 \text{ mm} \times 1 \text{ mm}$ 。图 5 所示为实验装置示意图。实验共采集 10 组不同辐射亮度等级的数据,每组数据采集 50 幅干涉图,对干涉图进行平均以降低随机噪声,同时采集每幅干涉图探测器响应的均值,用以获取相应的暗电流数据。图 6 所示为不同温度黑体干涉数据的复原光谱。由于黑体与样机之间存在空气,空气中的 H_2O 、 CO_2 等气体对红外光存在吸收效应,因此采集到的光谱数据存在吸收峰。

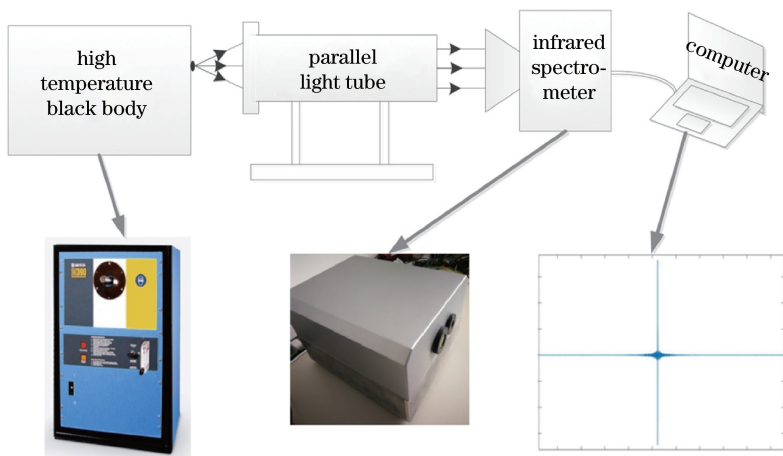


图 5 探测器非线性校正实验验证示意图
Fig. 5 Schematic of detector nonlinear correction experiment

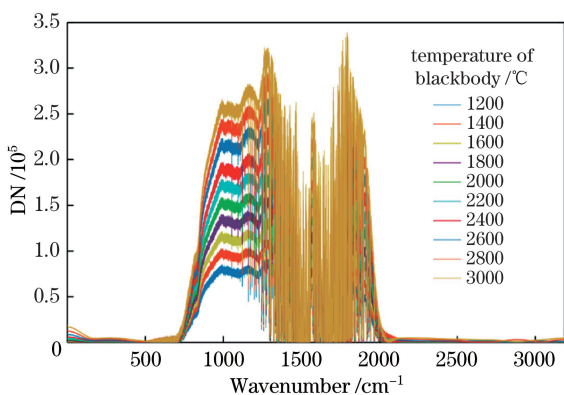


图 6 探测器观测到的不同温度黑体的复原光谱
Fig. 6 Spectra recovered from blackbody at different temperatures observed by detector

通过实验获取不同辐亮度黑体的干涉数据,用于复原光谱并进行非线性校正。图 7 所示为 $2200 \text{ }^\circ\text{C}$

时黑体采集到的干涉数据在非线性校正前后的对比。由图 7 可知,非线性校正对带外的光谱响应有明显的抑制作用。同时,在大气吸收区域,二、三阶校正获取的光谱响应有所区别。理论上光谱数据 DN 值与黑体辐亮度之间存在对应关系,但探测器的非线性响应必然会使线性度受到影响,可以用两者拟合曲线的拟合优度来评价非线性校正精度。图 8 所示为未被吸收的波数为 1237.9 cm^{-1} 时校正前后探测器响应 DN 值与黑体辐亮度的拟合曲线。由图 8 可知,相对于校正前,校正后的拟合曲线更接近直线,且三阶的拟合优度高于二阶的。选取 5 组未被吸收的波数,对比其校正前后的拟合优度,结果如表 1 所示。由表 1 可知,二、三阶校正拟合优度分别提高了约 3% 和 4%,说明校正后的数据更准确。

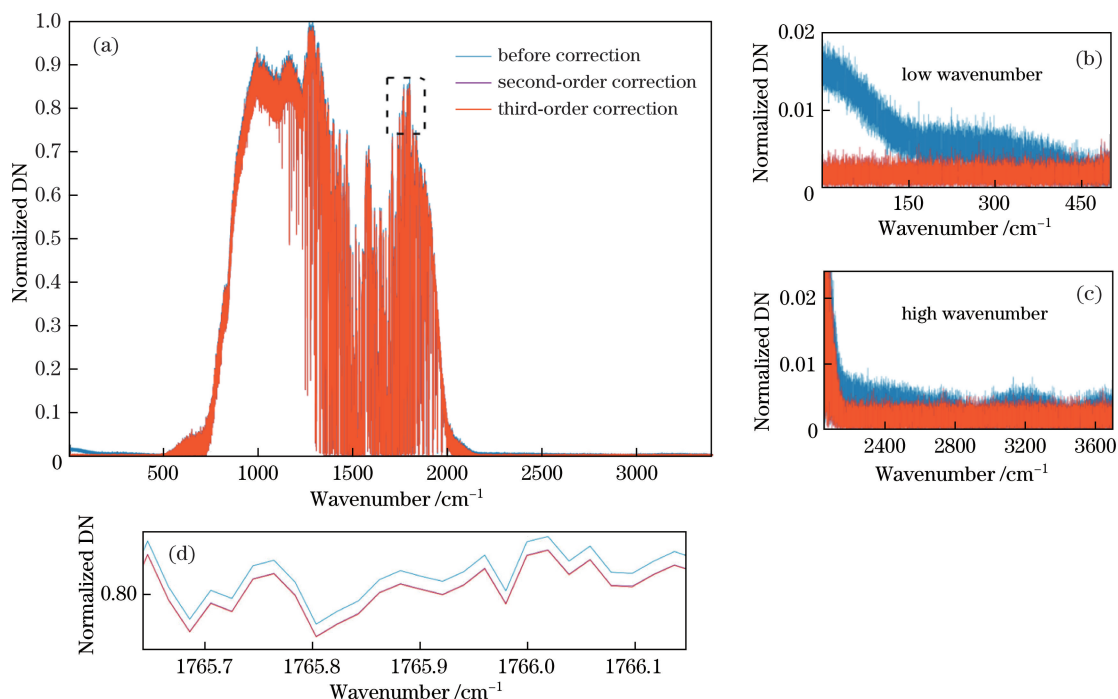


图 7 2200 °C 时校正前后黑体的辐射光谱。(a)完整光谱;(b)~(d)局部放大
Fig. 7 Radiation spectra of blackbody before and after correction at 2200 °C.

(a) Entire spectra; (b)-(d) partial enlarged details

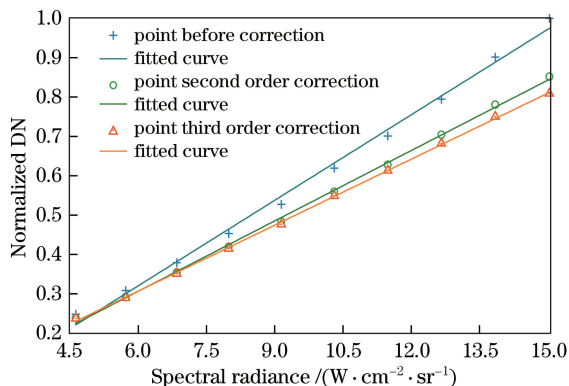


图 8 波数为 1237.9 cm⁻¹ 时校正前后的拟合曲线
Fig. 8 Fitted curves at wavenumber of 1237.9 cm⁻¹ before and after correction

表 1 校正前后未吸收波数的拟合优度 R²

Table 1 Corrected goodness R² of undisturbed wavenumbers before and after correction

Wavenumber / cm ⁻¹	R ²		
	Before correction	Second-order correction	Third-order correction
1237.9	0.9964	0.9991	0.9996
1253.2	0.9965	0.9988	0.9994
1266.1	0.9943	0.9989	0.9996
1280.1	0.9963	0.9987	0.9994
1293.1	0.9968	0.9989	0.9995

4 结 论

通过入射辐射强度 Q 与光生导带电子浓度 Δn 的关系式构建了理想干涉数据与测量干涉数据的关系,分析各阶非线性响应对光谱数据的影响,提出交叉迭代法校正三阶非线性响应,并进行了仿真计算验证和样机实测验证。在仿真验证中,对包含三阶误差的仿真干涉数据进行校正,交叉迭代法校正精度比二阶校正提高了约 7.26%。在实验验证中,采集 10 组黑体干涉数据进行校正,将光谱数据与观测黑体辐亮度数据进行线性拟合,校正后的数据拟合优度 R^2 比未校正数据更接近 1,且三阶校正优于二阶校正,证明了交叉迭代法校正后的干涉数据更准确。

参 考 文 献

- [1] Dong C H, Li J, Zhang P, *et al.* Principle and application of satellite hyperspectral infrared atmospheric remote sensing[M]. Beijing: Science Press, 2013. 董超华, 李俊, 张鹏, 等. 卫星高光谱红外大气遥感原理和应用[M]. 北京: 科学出版社, 2013.
- [2] Xiong W, Shi H L, Wang Y J, *et al.* Study on near-infrared spatial heterodyne spectrometer and detection of water vapor[J]. Acta Optica Sinica, 2010, 30(5): 1511-1515. 熊伟, 施海亮, 汪元钧, 等. 近红外空间外差光谱仪

- 及水汽探测研究[J]. 光学学报, 2010, 30(5): 1511-1515.
- [3] Rogalski A, Antoszewski J, Faraone L. Third-generation infrared photodetector arrays[J]. Journal of Applied Physics, 2009, 105(9): 091101.
- [4] Li Z W, Xiong W, Shi H L, *et al.* Correction of detector response error for hyperspectral spatial heterodyne interferometer[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(5): 0530001.
李志伟, 熊伟, 施海亮, 等. 超光谱空间外差干涉仪探测器响应误差校正[J]. 光学学报, 2014, 34(5): 0530001.
- [5] Tang X, Yi W N, Du L L, *et al.* Adjacency effect correction study of GF-1 satellite multi-spectral remote sensing images[J]. Acta Optica Sinica, 2016, 36(2): 0228003.
汤兴, 易维宁, 杜丽丽, 等. 高分一号卫星多光谱遥感图像邻近效应校正研究[J]. 光学学报, 2016(2), 36(2): 0228003.
- [6] Schindler R A. Correcting for nonlinearity circuit in a photodetector[R/OL]. (1986-05-01). <https://ntrs.nasa.gov/search.jsp?R=19860000106>.
- [7] Carter R O, Lindsay N E, Beduhn D. A solution to baseline uncertainty due to MCT detector nonlinearity in FY-IR[J]. Applied Spectroscopy, 1990, 44(7): 1147-1151.
- [8] 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(22): 12734-12748.
- [9] Gong H M, Shao X M, Li X Y, *et al.* Advanced technology and application of spaceborne infrared detectors[J]. Infrared and Laser Engineering, 2012, 41(12): 3129-3140.
龚海梅, 邵秀梅, 李向阳, 等. 航天先进红外探测器组件技术及应用[J]. 红外与激光工程, 2012, 41(12): 3129-3140.
- [10] Broudy R M, Reine M B. Advances in HgCdTe infrared focal plane technology[C]. SPIE, 1977, 0124: 62-68.
- [11] 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.
- [12] Zhao M J, Si F Q, Lu Y H, *et al.* Spectral image correction method for space-born differential optical absorption spectrometer[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(12): 1230002.
赵敏杰, 司福祺, 陆亦怀, 等. 星载大气痕量气体差分吸收光谱仪光谱图像校正方法研究[J]. 光学学报, 2015, 35(12): 1230002.
- [13] Nguyen T, Musca C A, Dell J M, *et al.* Dark currents in long wavelength infrared HgCdTe gated photodiodes[J]. Journal of Electronic Materials, 2004, 33(6): 621-629.