



红外光谱辐射计探测器高阶非线性响应校正方法

孙永丰 徐亮 沈先春 金岭 徐寒杨 成潇潇 王钰豪 刘文清 刘建国

High-order nonlinear response correction method for infrared radiation detector

Sun Yong-Feng Xu Liang Shen Xian-Chun Jin Ling Xu Han-Yang Cheng Xiao-Xiao Wang Yu-Hao
Liu Wen-Qing Liu Jian-Guo

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 70, 060701 (2021) DOI: 10.7498/aps.70.20201530

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.70.20201530>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

非线性薛定谔方程的高阶分裂改进光滑粒子动力学算法

Numerical study of nonlinear Schrödinger equation with high-order split-step corrected smoothed particle hydrodynamics method
物理学报. 2019, 68(9): 090203 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20190169>

基于窄带隙聚合物的高性能可见-近红外光伏探测器

High performance visible-near infrared photovoltaic detector based on narrow bandgap polymer
物理学报. 2017, 66(22): 228501 <https://doi.org/10.7498/aps.66.228501>

面阵探测下的污染云团红外光谱仿真

Simulation of pollutant-gas-cloud infrared spectra under plane-array detecting
物理学报. 2017, 66(11): 114203 <https://doi.org/10.7498/aps.66.114203>

具有变革性特征的红外光电探测器

Recent progress on advanced infrared photodetectors
物理学报. 2019, 68(12): 120701 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20190281>

基于地基观测的时序卫星红外光谱建模与分析

Modeling and analyzing of time-resolved satellite infrared spectrum based on ground-based detector
物理学报. 2019, 68(5): 059501 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20181933>

石墨烯等离子激元增强红外光谱

Graphene plasmon enhanced infrared spectroscopy
物理学报. 2019, 68(14): 148103 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20190903>

红外光谱辐射计探测器高阶非线性响应校正方法*

孙永丰¹⁾²⁾ 徐亮^{1)†} 沈先春¹⁾ 金岭¹⁾ 徐寒杨¹⁾
成潇潇¹⁾²⁾ 王钰豪¹⁾²⁾ 刘文清¹⁾ 刘建国¹⁾

1) (中国科学院合肥物质科学研究院安徽光学精密机械研究所, 合肥 230031)

2) (中国科学技术大学, 合肥 230026)

(2020年9月14日收到; 2020年11月13日收到修改稿)

针对傅里叶变换红外光谱辐射计辐射定标需要黑体辐射面充满仪器视场的技术特点, 分析了由于入射光子流较高导致红外探测器产生非线性响应误差的机理. 通过仿真包含非线性误差的黑体辐射数据, 研究了非线性误差对光谱产生的影响, 并根据卷积和交叉迭代两种校正方法, 提出了适合校正高阶非线性响应误差的迭代方法——梯度下降法. 利用傅里叶变换红外光谱辐射计进行辐射定标实验, 对比卷积、交叉迭代和梯度下降法三种校正方法的效果, 结果显示三种校正方法均可有效减小非线性误差, 分别使拟合优度提高了0.15%, 0.29%和0.39%, 梯度下降法校正后的光谱数据更为准确.

关键词: 遥感, 红外光谱辐射计, 高阶非线性响应, 梯度下降算法

PACS: 07.07.Df, 07.57.Ty, 42.30.Kq

DOI: 10.7498/aps.70.20201530

1 引言

傅里叶变换红外光谱辐射计采用干涉分光技术, 通过反演目标的红外辐射光谱, 可以定量获取被观测物体的温度、湿度和化学组分等物理特征, 在遥感和大气监测等领域有着广泛的应用^[1]. 由于红外光谱辐射计的探测器对不同波段的红外光响应不同, 在实际应用中需要通过标准黑体对仪器进行辐射定标, 确定仪器的响应函数^[2,3].

傅里叶变换红外光谱辐射计分为被动式和主动式^[4,5], 主动式辐射计具有独立的红外辐射源, 其光源信号能量强, 具有较高的灵敏度, 受到背景辐射的干扰比较小, 但是在光源与仪器距离较近时, 由于入射能量较强, 探测器会产生非线性响应. 被动式辐射计利用目标物体的自发辐射作为光源, 通

过观测目标的红外辐射来进行定性和定量分析, 具有更高的灵活性、可流动性和快速易操作等优点, 但是在仪器测量前需要通过黑体进行辐射定标, 而定标时高温黑体的辐射能量较强, 探测器容易产生非线性响应, 影响辐射定标精度^[6,7].

傅里叶变换红外光谱辐射计进行辐射定标或观测高温目标时, 需要考虑探测器及后续采样电路产生的非线性响应误差并进行校正. 国内外学者对探测器的非线性响应进行了大量研究, 提出的校正方法主要分为硬件和软件两大类, 其中硬件方法主要通过补偿电路来校正非线性响应^[8,9], 软件方法主要通过构建干涉数据的非线性响应模型, 获取非线性响应系数进而校正探测器产生的光谱畸变. 例如美国极轨气象卫星 (CrIS)^[10] 和我国风云四号气象卫星^[11], 以波数为 50—500 cm^{-1} 的低波数光谱均值为判断依据, 构建卷积方程获取二阶非线性响

* 中国科学院前沿科学重点研究项目 (批准号: QYZDY-SSW-DQC016)、安徽省重点研究和开发计划 (批准号: 1804d08020300)、国家自然科学基金 (批准号: 41941011) 和国家重点研发计划 (批准号: 2016YFC0201002, 2016YFC0803001-08) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: xuliang@aiofm.ac.cn

应系数, 校正光谱畸变. 欧洲气象局的机载大气测量 (FAAM) 中的红外干涉仪评价系统 (ARIES)^[12] 选择以波数为 50—500 cm^{-1} 和 2000—2500 cm^{-1} 两个特征区域为判断依据, 通过交叉迭代二阶和三阶非线性响应系数对光谱误差进行拟合, 校正光谱畸变. 随着计算机运算能力的提升, 可以通过更复杂的算法校正更高阶的非线性响应, 进一步减小探测器非线性响应在光谱复原中产生的误差.

本文将讨论被动式傅里叶变换红外光谱辐射计对黑体辐射的响应特性, 以及探测器非线性响应对光谱复原及辐射定标的影响. 通过对理想黑体辐射光谱及非线性响应误差的仿真, 阐述一种通过梯度下降算法校正探测器非线性响应的方法. 验证实验采用 HFY-300A 型标准黑体和红外光谱辐射计进行辐射定标实验, 分析探测器非线性响应引起的光谱失真, 并通过梯度下降法进行校正. 将校正后的光谱与黑体辐射光谱进行线性拟合, 考察非线性响应校正后辐射定标精度是否提高, 验证梯度下降法对非线性响应的校正精度.

2 探测器非线性响应原理及校正分析

2.1 红外探测器非线性响应原理

第三代红外探测器主要以碲镉汞 (MCT) 为代表, 广泛应用于气象遥感等领域, 其工作方式为准自由的带间跃迁. 此类探测器具有高吸收系数、高量子效率和高探测率等优点, 并且材料的禁带宽度可以根据应用需求灵活调整. 但是由于碲镉汞本身的特点, 在入射光子流较大时, 探测器会产生非线性响应. 美国极轨气象卫星 Suomi-NPP 上搭载的干涉型大气垂直探测仪 (CRIS)^[10], 采用 PV 型 MCT 探测器和 InSb 探测器, 其响应波段范围为 650—2250 cm^{-1} , 其中 MCT 探测器会产生非线性响应 (中波和长波波段). 国外学者 Felix 等^[13] 的研究指出, 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 存在如下关系:

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

探测器工作中, 测量干涉数据强度 I_m 与光生导带电子浓度成正比, 理想干涉数据强度 I_c 与入射辐射强度成正比, 两者满足如下关系:

$$I_c = I_m + a_2 I_m^2 + a_3 I_m^3 + a_4 I_m^4 + a_5 I_m^5 + \text{higher orders}, \quad (2)$$

式中 a_2, a_3, a_4, a_5 为不同阶非线性响应系数.

用于遥感测量的傅里叶变换红外光谱辐射计通常拥有较大的通光口径, 以保证遥感远处目标时的高光通量. 同时在仪器辐射定标过程中为了避免背景辐射的干扰, 要求光谱仪贴近黑体保证辐射源充满仪器整个视场. 随着黑体温度的升高, 仪器接收到的辐射功率会增大, 并且入射光的能量 90% 以上集中在干涉数据零光程差附近. 国外学者 Bartoli^[14] 对 MCT 红外探测器的研究指出, 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, MCT 探测器对光子会产生明显的非线性响应. 而红外光谱辐射计设计有大口径的窄视场镜头, 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述值, 红外辐射探测器采集到的干涉数据存在非线性效应.

根据 Planck 黑体辐射定律^[15] 和干涉原理可以仿真光谱仪采集到的理想黑体辐射数据, 根据公式可以仿真包含探测器非线性响应误差的干涉数据^[16]. 图 1 给出了理想和包含非线性误差的黑体辐射仿真结果, 其中黑体温度是 250 $^{\circ}\text{C}$, 光谱分辨率为 1 cm^{-1} , 有效波数范围 500—2000 cm^{-1} , 光谱响应函数为理想矩形窗. 图 1(a) 为归一化后的干涉数据仿真结果, 可以看到非线性响应误差主要集中在零光程差点 (ZPD) 位置附近, 误差数据比理想数据的响应更高. 图 1(b) 为傅里叶变换后得到的光谱数据, 经过归一化后可以看到, 由于非线性响应存在, 误差光谱比理想光谱的探测器响应更高, 并且探测器有效波数以外也产生了误差响应.

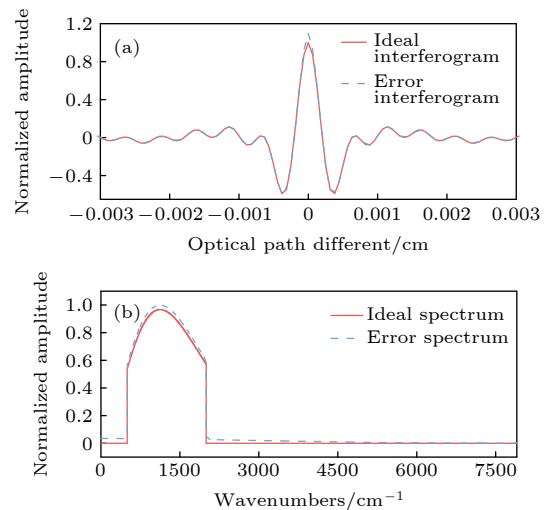


图 1 250 $^{\circ}\text{C}$ 理想黑体辐射干涉数据与非线性误差干涉数据仿真 (a) 及相应的复原光谱图 (b)

Fig. 1. Interferogram (a) and spectrogram (b) of simulation data and adding error data by 250 $^{\circ}\text{C}$ blackbody.

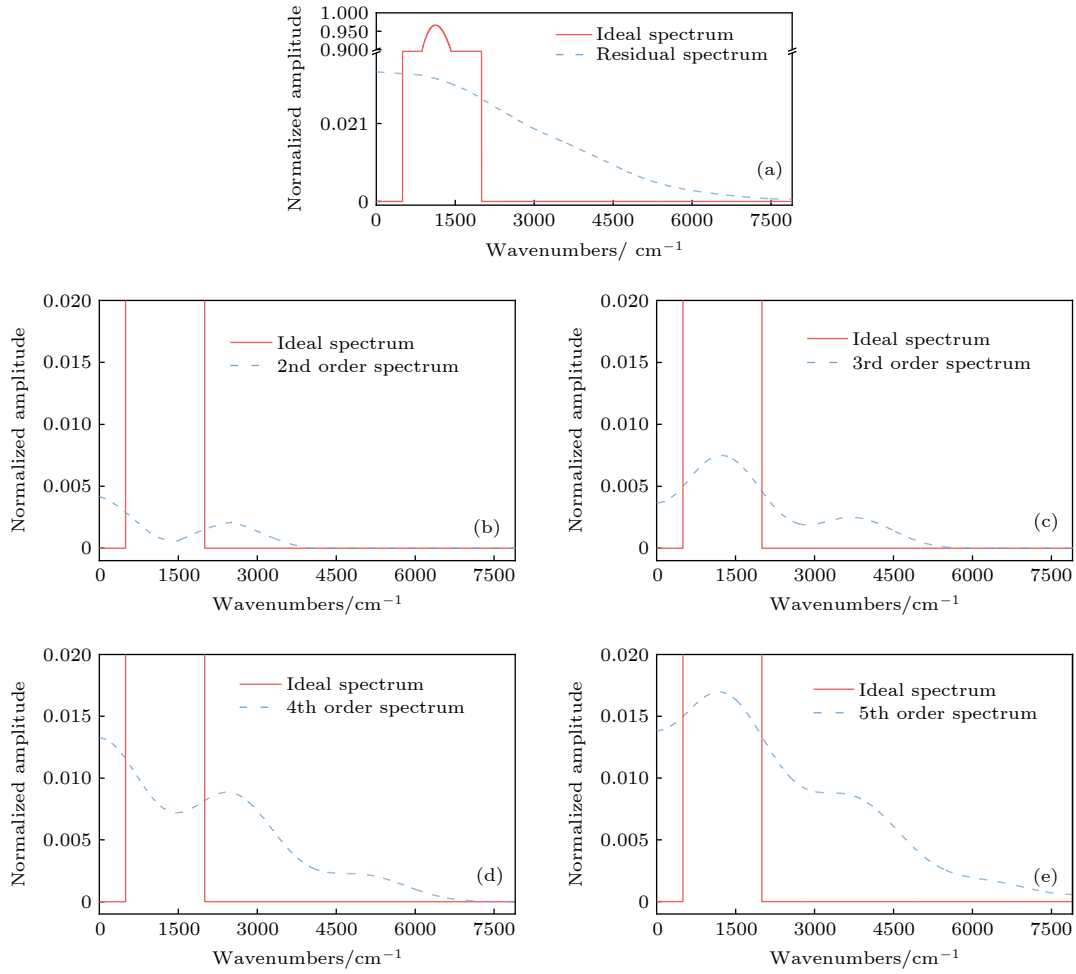


图 2 不同阶误差响应复原光谱

Fig. 2. Spectrogram of different order error response.

根据 (2) 式仿真不同阶非线性响应误差的光谱, 可以分析不同阶非线性响应误差对光谱误差的贡献, 结果如图 2 所示. 其中实线为理想黑体辐射响应, 虚线为光谱误差响应. 将理想光谱与误差光谱相减获得残差, 可以更好地观察光谱误差的影响, 如图 2(a) 所示, 这部分残差由不同阶的非线性响应组成. 可以看到不同阶非线性响应区域不同, 高阶非线性响应有更宽的光谱影响范围, 其中二阶 (图 2(b)) 和四阶 (图 2(d)) 非线性响应影响峰值在带外, 三阶 (图 2(c)) 和五阶 (图 2(e)) 非线性响应影响峰值在带内, 并且随着阶数的提高, 其产生的非线性响应误差也越大. 可以根据各阶非线性响应的特点, 对探测器的非线性响应误差进行校正.

2.2 红外探测器非线性响应校正原理

对于傅里叶变换红外光谱辐射计探测器的非线性响应校正, 主要有卷积校正和迭代校正两种方

法. 美国的极轨气象卫星 CrIS 和中国风云四号气象卫星采用卷积法, 以 50—500 cm^{-1} 的低波数带外为特征区域构建卷积方程, 获取二阶非线性系数, 校正光谱畸变. 具体算法如下:

(2) 式为存在非线性响应时的干涉光强表达式, 当假设误差干涉数据仅存在二阶非线性响应时, 式中的高阶项被省略, 仅保留一阶和二阶响应, 获取到的干涉光强为

$$I_{\text{CONV}} = (I_m + V_m) + a_2(I_m + V_m)^2, \quad (3)$$

式中 I_{CONV} 为包含一阶和二阶响应的干涉数据强度. 在采样电路中, 一般会加入滤波电路滤除直流信号, 用以提高采集到的干涉数据信噪比. 因此对 (3) 式进行化简, 去除其中直流项, 则干涉光强为

$$I_{\text{CONV}} = (1 + 2a_2V_m) \cdot I_m + a_2 \cdot I_m^2. \quad (4)$$

对 (4) 式进行傅里叶变换, 可以得到包含二阶非线性响应的光谱数据 S_{conv} :

$$S_{\text{CONV}} = (1 + 2a_2V_m) \cdot S_m + a_2 \cdot S_m \otimes S_m, \quad (5)$$

式中 S_m , S_{CONV} 分别为测量光谱和校正光谱; $S_m \otimes S_m$ 为测量光谱的卷积, 其在 $50\text{--}500\text{ cm}^{-1}$ 的光谱区域产生畸变. 理论上该区域响应为 0, 因此以该区域为二阶非线性响应的特征区域, 求解 (5) 式即可获得二阶非线性响应系数, 进而校正干涉数据非线性响应.

欧洲气象局的机载大气测量 (FAAM) 中的机载红外干涉仪评价系统 (ARIES) 选择 $50\text{--}500\text{ cm}^{-1}$ 和 $2000\text{--}2500\text{ cm}^{-1}$ 两个特征区域, 通过迭代校正二阶和三阶非线性响应, 其主要思路如下.

仅考虑二阶和三阶非线性响应, 根据 (2) 式获得的干涉强度为

$$I_{\text{ITR}} = (I_m + V_m) + a_2(I_m + V_m)^2 + a_3(I_m + V_m)^3, \quad (6)$$

其中 I_{ITR} 为考虑二阶和三阶非线性响应的干涉图光强. 由于滤波电路去除了干涉数据中直流信号, 对 (6) 式进行化简, 则干涉图光强为

$$I_{\text{ITR}} = a_1^{\text{ITR}} \cdot I_m + a_2^{\text{ITR}} \cdot I_m^2 + a_3^{\text{ITR}} \cdot I_m^3, \quad (7)$$

$$\begin{cases} a_3^{\text{ITR}} = a_3, \\ a_2^{\text{ITR}} = a_2 + 3a_3V_m, \\ a_1^{\text{ITR}} = 1 + a_2V_m + 3a_3V_m^2, \end{cases} \quad (8)$$

式中 a_1^{ITR} , a_2^{ITR} , a_3^{ITR} 为各阶非线性响应校正系数. 实际上校正探测器非线性响应, 只要求出非线性响应校正系数, 即可校正非线性响应. 迭代法校正非线性响应的校正思路为: 以低波数带外为特征区域, 认为三阶校正系数 a_3^{ITR} 为 0, 迭代二阶非线性响应系数 a_2^{ITR} 拟合特征区域光谱, 当拟合误差最小时找到第一次迭代的 a_2^{ITR} ; 以 a_2^{ITR} 为二阶非线性响应校正系数, 高波数带外为特征区域, 迭代三阶非线性响应系数 a_3^{ITR} 拟合特征区域光谱, 当拟合误差最小时找到第一次迭代的 a_3^{ITR} ; 重复上述步骤, 直到非线性响应校正系数不再变化, 此时的系数即为准确的二阶、三阶非线性响应校正系数, 再通过 (7) 式和 (8) 式进行探测器非线性响应校正.

2.3 梯度下降法校正非线性响应原理

根据图 2 对非线性误差的仿真可知, 高阶非线性响应的影响区域比低阶更广, 并且影响区域互相重叠, 很难区分不同非线性响应的特征区域. 根据 2.2 节分析, 无论卷积校正还是迭代校正, 均需要

针对不同阶非线性响应划分特征区域作为判断标准进行校正. 但是存在三阶以上非线性响应时, 由于特征区域重合很难单独进行划分, 并且每增加一个未定的高阶非线性响应系数, 迭代法都会使计算机的运算量成指数增长. 为了校正高阶非线性响应并提高运算效率, 本文提出了运用梯度下降法校正非线性响应.

梯度下降法常用于无约束多元函数最优化问题求解^[17]. 该方法通过已得迭代点的信息, 计算迭代变量的梯度 g_k , 根据 $|g_{k+1}| \leq |g_k|$ 的要求, 求解非线性方程组 $g_k = g_{k+1}$, 获取下一次未知变量的迭代值. 梯度下降法不需要对每个非线性变量进行一维搜索, 并且由于探测器非线性响应函数是连续可微的凸函数, 可以保证梯度下降法能搜索到全局最小值点. 根据 (2) 式可以构建 n 阶探测器非线性响应函数, 其中 n 为需要校正的非线性响应阶数, 可以根据实际误差对光谱影响的波数范围来确定.

$$I_{\text{GRAD}} = \sum a_n^{\text{GRAD}} \cdot I_m^n, \quad (9)$$

式中 a_n^{GRAD} 为第 n 阶非线性响应校正系数. 根据 2.1 节分析可知, 随着非线性响应阶数的提高, 特征区域很难单独进行划分, 所以选定所有受误差影响的带外光谱区域共同为特征区域. 然后应用梯度下降法获取各阶非线性响应的梯度, 对不同阶非线性响应同时进行迭代, 寻找特征区域拟合度最高的非线性响应系数. 具体算法步骤如下:

1) 设定非线性校正系数的初始值 a_0^n , 迭代步长 ΔL 和收敛阈值 ε . 将 a_0^n 代入 (9) 式计算特征区域光谱均值 S_0^{GRAD} ;

2) 获取非线性校正系数迭代的第 2, 3 个点 a_1^n , a_2^n , 并计算 S_1^{GRAD} , S_2^{GRAD} , 其中 $a_1^n = a_0^n + \Delta L$, $a_2^n = a_0^n + 2\Delta L$;

3) 构建线性方程组
$$\begin{pmatrix} a_0^n & \cdots & a_0^n \\ a_1^n & \ddots & a_1^n \\ a_2^n & \cdots & a_2^n \end{pmatrix} \begin{pmatrix} I_m^1 \\ \vdots \\ I_m^n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} S_0^{\text{GRAD}} \\ S_1^{\text{GRAD}} \\ S_2^{\text{GRAD}} \end{pmatrix}$$
, 获取各阶非线性校正系数的梯度 g^n ;

4) 根据梯度 g^n 获取第 k 次迭代的非线性校正系数 a_k^n , 其中 $a_k^n = g_{k-1}^n \cdot \Delta L$, 计算第 k 次迭代后的特征区域光谱均值 S_k^{GRAD} ;

5) 重复第 3) 和 4) 步, 直到 $S_k^{\text{GRAD}} \leq \varepsilon$, 此时 a_k^n 即为各阶非线性响应校正系数, 代入 (9) 式即可获得校正后的干涉数据.

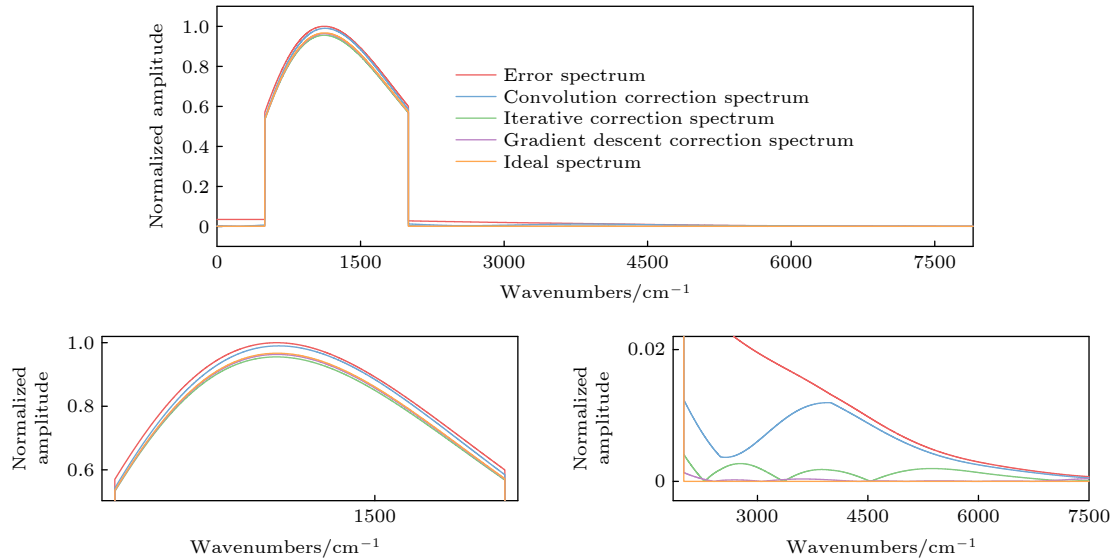


图 3 卷积、交叉迭代与梯度下降法校正非线性响应复原光谱

Fig. 3. Corrected spectrogram by convolution, cross iteration and gradient descent.

第 2.1 节中仿真了 250 °C 的理想黑体光谱和误差光谱, 分别使用卷积、迭代和梯度下降三种校正方法校正误差光谱, 校正结果如图 3 所示. 可以看到, 三种校正方法均降低了非线性误差. 对比三种校正方法的校正光谱与理想光谱的残差, 结果如图 4 所示, 可以看到误差光谱与理想光谱的残差为 0.0155, 卷积、迭代和梯度下降三种校正方法校正后的光谱与理想光谱残差分别为 0.0076, 0.0026, 0.0007. 梯度下降法校正后的光谱残差最小, 校正方法最好.

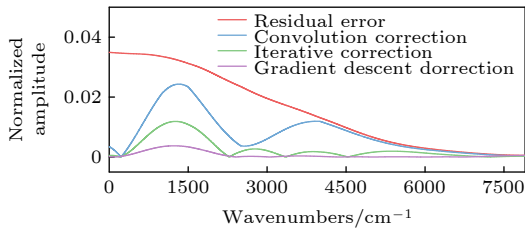


图 4 三种校正方法校正光谱与理想光谱的残差

Fig. 4. Residual of ideal spectrum and correction spectrum.

3 探测器非线性响应校正实验

采用傅里叶变换红外光谱辐射计^[18]进行黑体辐射定标实验, 验证梯度下降法校正非线性响应的可行性. 实验采用的傅里叶变换红外光谱辐射计是中国科学院合肥物质科学研究所安徽光学精密机械研究所自主研发的被动式遥感傅里叶变换红外光谱辐射计, 光谱范围 1.6—20 μm, 光谱分辨率

1 cm⁻¹, 光谱稳定度 0.004 cm⁻¹. 采用 MCT 型红外辐射探测器, 型号为 DET-2D, 有效光谱范围 1.6—20 μm, 像元尺寸 1 mm × 1 mm. 定标黑体选择中国科学院上海技术物理研究所研制的 HFY-300A 型标准黑体, 其温度范围为室温+5—400 °C, 温度精度为 0.01 °C, 温度稳定度为 0.01 °C/8 h. 实验方式采用红外光谱辐射计近距离贴近黑体辐射源, 使黑体辐射充满整个视场, 辐射计装配准直镜头, 使黑体辐射准直为平行光后进入干涉系统^[19]. 定标实验共采集 10 组不同温度的黑体辐射数据, 每组温度采集 64 条光谱进行叠加平均, 可以有效降低随机噪声对光谱数据的干扰. 图 5 显示了实测数据复原光谱, 由于辐射计和黑体放置在大气环境中, 所以测量光谱存在水汽、CO₂ 的吸收效应. 随着黑体温度的升高, 探测器非线性响应对光谱的影响也越明显, 体现在带外光谱产生畸变的区域更广, 畸变幅值也更大.

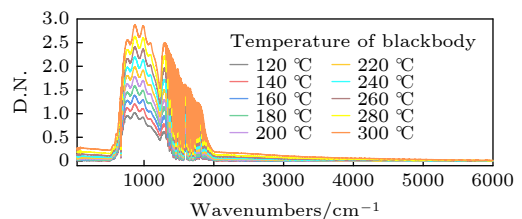


图 5 辐射定标不同温度黑体的复原光谱 (纵轴题 D.N. 表示无量纲的数字信号值)

Fig. 5. Spectrum of blackbody at different temperatures in radiometric calibration (D.N. represents digital number).

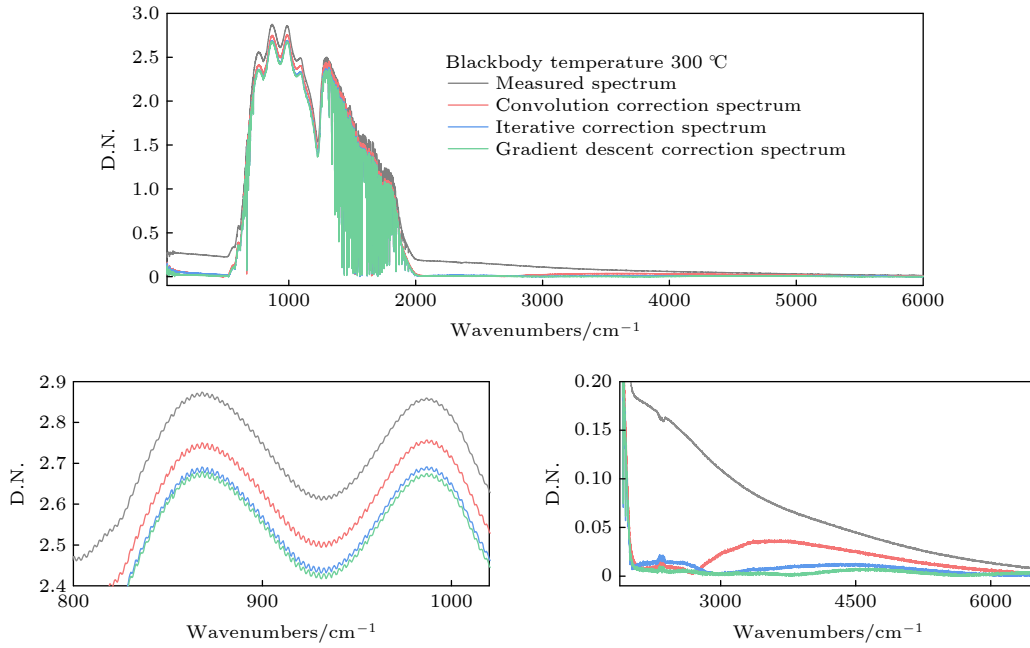


图 6 300 °C 黑体辐射光谱校正前后对比图
Fig. 6. Spectrum before and after correction at 300 °C blackbody.

利用傅里叶变换红外光谱辐射计在黑体温度为 300 °C 时采集光谱数据, 分别用卷积法、交叉迭代法和梯度下降法对光谱数据进行非线性校正, 其中梯度下降法选取 5 阶校正矩阵 ($n = 5$) 对实测数据进行校正, 结果如图 6 所示. 根据图 6 中结果可知, 三种校正方法对非线性响应均有抑制作用, 对比没有大气吸收的光谱区域和光谱的带外区域可以看出, 梯度下降法对探测器非线性响应的抑制效果最明显, 其带外光谱区域的响应最接近零. 梯度下降法校正后的数据依然有部分残留误差, 主要是非线性响应残留误差和仪器本身噪声. 随着校正矩阵阶数 n 的提高, 非线性响应抑制并没有明显增强, 所以选择合适的校正矩阵阶数可以减少运算时间.

根据辐射定标原理可知, 光谱仪探测器响应与标准黑体辐射存在线性关系, 而探测器非线性响应必然导致线性度的降低. 选取实际测量中没有大气吸收的波数为有效波数, 将有效波数的探测器响应与 Planck 黑体辐射进行曲线拟合, 拟合曲线的拟合优度可以用来评价非线性校正的精度. 选择没有大气吸收的波段作为有效光谱波段^[20], 图 7 显示了在波段为 775—785 cm^{-1} 的光谱均值、MCT 探测器响应与理想黑体辐射拟合的结果. 可以看到, 校正后的拟合曲线比实测数据的拟合曲线更接近直线, 并且梯度下降法拟合曲线最接近直线. 表 1

选取了 5 组没有大气吸收的有效波段, 以光谱均值为准, 对比不同校正方法拟合曲线的拟合优度.

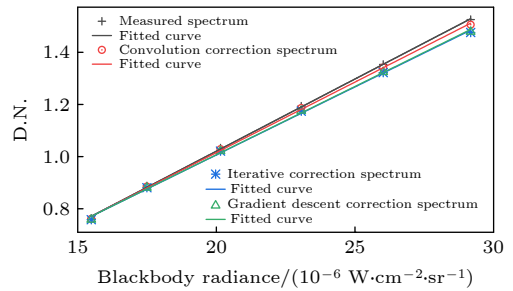


图 7 波数为 775—785 cm^{-1} 时探测器响应与理想黑体辐射的拟合曲线
Fig. 7. Fitting curves of blackbody spectrum and measured spectrum with wavenumber at 775—785 cm^{-1} .

表 1 无大气吸收波段三种校正方法拟合优度对比
Table 1. Comparison of R^2 of three methods at band without atmospheric absorption.

Wavenumber / cm^{-1}	R^2			
	Measured spectrum	Convolution correction spectrum	Iterative correction spectrum	Gradient correction spectrum
610—620	0.99403	0.99483	0.99829	0.99997
770—780	0.99401	0.99478	0.99826	0.99992
820—830	0.99263	0.99334	0.99671	0.99912
870—880	0.99335	0.99393	0.99672	0.99974
910—920	0.99374	0.99429	0.99782	0.99946

可以看到,卷积校正的拟合优度提高了 0.15%,迭代校正的拟合优度提高了 0.29%,梯度下降校正的拟合优度提高了 0.39%,说明非线性误差校正后的数据更为准确,并且梯度下降法校正非线性响应的效果最好.

4 结 论

本文主要研究了红外光谱辐射计探测器非线性响应形成机理,通过仿真分析了各阶非线性响应光谱数据的影响,提出了梯度下降法非线性响应,并进行了仿真计算验证和辐射定标实测验证.在仿真验证中,对包含非线性误差的仿真干涉数据进行校正,并对比卷积校正、交叉迭代校正和梯度下降迭代校正三种校正方法,校正后残差分别为 0.0076, 0.0026, 0.0007, 梯度下降法校正效果最好.在辐射定标实验验证中,采集 10 组不同温度黑体辐射数据进行校正,将光谱数据与观测黑体辐射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,且梯度下降校正优于卷积校正和交叉迭代校正,证明了梯度下降法校正后的干涉数据更为准确.

参考文献

- [1] Liu W Q, Chen Z R, Liu J G, Xie P H, Zhang T S, Kan R F, Xu L 2018 *Envir. Monitor. China* **34** 1 (in Chinese) [刘文清, 陈臻懿, 刘建国, 谢品华, 张天舒, 阚瑞峰, 徐亮 2018 *中国环境监测* **34** 1]
- [2] Feng M C, Xu L, Gao M G, Jiao Y, Li X X, Jin L, Cheng S Y, Dong J J, Wei X L, Li S 2012 *IR. Tech.* **34** 366 (in Chinese) [冯明春, 徐亮, 高闽光, 焦洋, 李相贤, 金岭, 程巳阳, 童晶晶, 魏秀丽, 李胜 2012 *红外技术* **34** 366]
- [3] Shen X C, Ye S B, Xu L, Hu R, Jin L, Xu H Y, Liu J G, Liu W Q 2018 *Appl. Opt.* **57** 5794
- [4] Jiao Y, Xu L, Gao M G, Feng M C, Jin L, Dong J J, Li S 2012 *Spectrosc. Spect. Anal.* **32** 1754 (in Chinese) [焦洋, 徐亮, 高闽光, 冯明春, 金岭, 童晶晶, 李胜 2012 *光谱学与光谱分析* **32** 1754]
- [5] Feng M C, Xu L, Liu W Q, Liu J G, Gao M G, Wei X L 2016 *Acta Phys. Sin.* **65** 014210 (in Chinese) [冯明春, 徐亮, 刘文清, 刘建国, 高闽光, 魏秀丽 2016 *物理学报* **65** 014210]
- [6] Shao L, Griffiths P R 2008 *Anal. Chem.* **80** 5219
- [7] Jin L, Xu L, Gao M G, Dong J J, Cheng S Y, Li X X 2013 *J. Atmosph. Environ. Opt.* **8** 416 (in Chinese) [金岭, 徐亮, 高闽光, 童晶晶, 程巳阳, 李相贤 2013 *大气与环境光学学报* **8** 416]
- [8] Clare J F 2002 *Meas. Sci. Technol.* **13** 38
- [9] Carter R O, Lindsay N E, Beduhn D 1990 *Appl. Spectrosc.* **44** 1147
- [10] Han Y, Revercomb H, Crompt M, Gu D, Johnson D, Mooney D, Scott D, Strow L, Bingham G, Borg L, Chen Y, DeSlover D, Esplin M, Hagan D, Jin X, Knuteson R, Motteler H, Predina J, Suwinski L, Taylor J, Tobin D, Tremblay D, Wang C, Wang L, Wang L, Zavyalov V 2013 *J. Geophys. Res. Atmos.* **118** 12734
- [11] Yang M Z, Zou Y F, Zhang L, Han C P 2017 *Infrared Laser Eng.* **44** 272 (in Chinese) [杨敏珠, 邹曜璞, 张磊, 韩昌佩 2017 *红外与激光工程* **44** 272]
- [12] Fiedler L, Newman S, Bakan S 2005 *Appl. Opt.* **44** 5332
- [13] Felix P, Moulin M, Munier B, Portmann J, Reboul J P 1980 *IEEE Trans. Electron Devices* **27** 175
- [14] Bartoli F 1974 *J. Appl. Phys.* **45** 2150
- [15] Bose 1924 *Z. Phys.* **26** 178
- [16] Griffiths P R 2007 *Fourier Transform Infrared Spectrometry* (2nd Ed.) (New York: Wiley-Interscience) p88–116
- [17] Vorontsov M A, Carhart G W, Ricklin J C 1997 *Opt. Lett.* **22** 907
- [18] Xu L, Wang J, Liu J G, Gao M G, Lu Y H, Liu W Q, Wei X L, Zhang T S, Chen H, Liu Z M 2007 *J. Atmosph. Environ. Opt.* **2** 218 (in Chinese) [徐亮, 王君, 刘建国, 高闽光, 陆亦怀, 刘文清, 魏秀丽, 张天舒, 陈华, 刘志明 2007 *大气与环境光学学报* **2** 218]
- [19] Revercomb H E, Buijs H, Howell H B, Laporte D D, Smith W L, Sromovsky L A 1988 *Appl. Opt.* **27** 3210
- [20] Xu L, Chen H, Liu J G, Gao M G, Lu Y H, Liu W Q, Zhang T S, Wei X L, Zhao X S, Zhu J 2007 *J. Atmosph. Environ. Opt.* **2** 60 (in Chinese) [徐亮, 陈华, 刘建国, 高闽光, 陆亦怀, 刘文清, 张天舒, 魏秀丽, 赵雪松, 朱军 2007 *大气与环境光学学报* **2** 60]

High-order nonlinear response correction method for infrared radiation detector*

Sun Yong-Feng¹⁾²⁾ Xu Liang^{1)†} Shen Xian-Chun¹⁾ Jin Ling¹⁾Xu Han-Yang¹⁾ Cheng Xiao-Xiao¹⁾²⁾ Wang Yu-Hao¹⁾²⁾Liu Wen-Qing¹⁾ Liu Jian-Guo¹⁾1) (*Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China*)2) (*University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China*)

(Received 14 September 2020; revised manuscript received 13 November 2020)

Abstract

The infrared detector can generate nonlinear response error when the Fourier transform infrared spectrometer is used for implementing the radiometric calibration or observing the high temperature targets. Based on the relationship between the incident radiation intensity and the electron concentration in the optical conduction band, the mechanism of the nonlinear response error caused by the high incident photon flow is analyzed. According to Planck radiation law and interference principle, the effect of nonlinear error on spectrum is studied by simulating blackbody radiation data with nonlinear error. It is found that the nonlinear response with a different order has a different influence region, and the higher-order nonlinear response has a wider influence range and generates a larger nonlinear response error. By the general nonlinear response correction method the nonlinear response coefficient is obtained through constructing the nonlinear response model of the interference data and then the spectral distortion produced by the detector is corrected. According to the convolution iteration method, the polar orbit meteorological satellite CrIS constructs the convolution equation to correct the second-order nonlinear response by taking the low-wave number band of 50–500 cm^{-1} as the characteristic region. The European Meteorological Agency's Airborne Infrared Interferometer Evaluation System (ARIES) selected two feature areas, 50–500 cm^{-1} and 2000–2500 cm^{-1} , and iteratively corrected the second-order and third-order nonlinear response. The gradient descent method is often used to solve the optimization problems of unconstrained multivariate functions. Based on the gradient descent algorithm, an iterative method suitable for correcting the high-order nonlinear response errors is proposed in this paper. In this method, the information about the iteration point is obtained by constructing the nonlinear response function of the high-order detector and setting the appropriate iteration initialization. According to the initial value of the iteration and the information about the known iteration point, the gradient of the iteration variable is calculated to determine the iteration value of the next unknown variable, thus quickly searching for the global minimum point and determining the nonlinear response coefficient. We use Fourier transform infrared spectrometer to carry out radiometric calibration experiment and compare the effects of three correction methods: convolution, cross iteration and gradient descent method. The results show that the three correction methods can effectively reduce the nonlinear error, and improve the fitting extent by 0.15%, 0.29% and 0.39% respectively. The spectral data corrected by gradient descent method are more accurate.

Keywords: remote sensing, infrared spectrometer, high-order nonlinearity response, gradient descent method

PACS: 07.07.Df, 07.57.Ty, 42.30.Kq

DOI: 10.7498/aps.70.20201530

* Project supported by the Key Research Program of Frontier Sciences of Chinese Academy of Sciences, China (Grant No. QYZDY-SSW-DQC016), the Key R&D Plan of Anhui Province, China (Grant No. 1804d08020300), the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 41941011), the National Key R&D Program of China (Grant Nos. 2016YFC0201002, 2016YFC0803001-08).

† Corresponding author. E-mail: xuliang@aiofm.ac.cn