

无背景遥感 FT-IR 干涉图特征信息提取方法

兰天鸽, 方勇华, 熊伟

(中国科学院安徽光学精密机械研究所, 安徽 合肥 230031)

摘要:为改进环境监测方法, 结合遥感辐射传输模型, 介绍了被动遥感傅里叶变换红外干涉图特征信息提取方法。该算法可直接对污染气体的遥感傅里叶变换红外干涉图进行处理, 并利用数字带通滤波器压缩背景红外辐射及其他干扰物质。实现了目标特征信息的有效提取, 无需对原始干涉图做傅里叶变换即可获得光谱, 特别是无需使用背景光谱获得差谱或者比谱, 克服了必须测量干净背景谱的限制。实验结果表明, 经过特征信息提取的干涉图可用于模式识别和定量分析, 效果良好。

关键词:遥感辐射传输模型; 傅里叶变换红外; 干涉图; 带通滤波器

中图分类号: TP722.5 **文献标识码:** A **文章编号:** 1007-2276(2007)06-0945-04

Methods of characteristic information extracting of non-background remote sensing FT-IR interferograms

LAN Tian-ge, FANG Yong-hua, XIONG Wei

(Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China)

Abstract: To improve the method for environment monitoring, the algorithm of extracting characteristic information on non-background remote sensing Fourier transform infrared interferograms is proposed based on the remote sensing radiation transfer model. The algorithm processes remote sensing Fourier transform infrared interferograms directly, and makes use of the digital bandpass filter to suppress background infrared radiation and other interfered information. The characteristic information extraction of target is realized. The algorithm does not need to transform raw interferogram to spectrum; especially not to measure the clean background spectra for obtaining the difference spectra or ratio spectra. The filtered interferograms may be used in pattern recognition and quantitative analysis.

Key words: Remote sensing radiation transfer model; FTIR; Interferogram; Bandpass filter

0 引言

随着人类环保意识的不断增强, 对环境监测的手段也越来越多, 傅里叶变换红外光谱法就是其中重要的分析手段之一。与传统的色散型光谱仪相比, 傅里叶变换红外 (Fourier transform-infrared, FT-IR) 光谱仪因具有高通量、多频道、高信噪比等优点而被广泛应用。遥感 FT-IR 光谱仪可用于监测工厂释放的污染气体、机动车辆排放的尾气、化工厂泄漏的有害

气体等, 和传统的点接触式采样探测方法相比, 它具有以下优点:

- (1) 可对多组分混合物进行快速分析;
- (2) 可对要监测的目标进行实时远距离监测;
- (3) 可实现大范围采样, 并且不需要采样准备;
- (4) 在采样时传感器没有被污染的问题;
- (5) 操作维护简单。

传统上, 利用遥感 FT-IR 光谱仪对气体污染物进行定性识别和定量分析的方法都需要事先获得没有污

收稿日期: 2007-02-10; 修订日期: 2007-03-02

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (60678056)

作者简介: 兰天鸽 (1981-), 男, 河南平顶山人, 博士生, 主要从事红外遥感技术、光谱分析、数字信号处理的研究。Email: l3t2g1@163.com

导师简介: 方勇华 (1966-), 男, 安徽黄山人, 研究员, 博士生导师, 博士, 主要从事遥感光谱与图像分析及目标探测识别技术研究。

Email: yhfang@aiofm.ac.cn

染物出现时的背景光谱,与样品光谱相减或相除得到差谱或者比谱,从而得到定性识别污染气体以及量化分析的特征信息,这方面国内外已做过相当多的研究^[1-5]。然而,在很多监测环境下,如背景快速变化以及不可避免的环境温度变化,无法得到和实测光谱相匹配的背景光谱,也就无法提取目标特征信息;背景光谱问题很大程度上影响了遥感 FT-IR 在污染气体监测方面的广泛应用。干扰气体的出现也会影响目标污染气体的识别分类和量化分析。文中结合遥感辐射传输模型,阐述了被动遥感 FT-IR 干涉图特征信息提取方法。该算法直接对污染气体遥感 FT-IR 干涉图进行处理,并利用数字带通滤波器压缩背景红外辐射以及其他干扰。有效提取目标特征信息的同时,不需要对原始干涉图做傅里叶变换获得光谱,特别是不需要背景光谱用于获得差谱或者比谱,克服了必须测量干净背景谱的限制。经过特征信息提取的干涉图用于模式识别和定量分析^[6-9]取得了良好的效果。

1 遥感辐射传输模型

当光谱仪对其视场中的目标云团进行探测时,测得的辐射信号既包含了其视场中的背景信号,也有目标云团、目标云团与光谱仪之间的大气信号。在这里,利用一个简单的三层模型来对测量的过程进行描述,目标云团与光谱仪之间的大气为第一层,目标云团为第二层,背景为第三层,假设各层之间是均匀的,如图 1 所示。

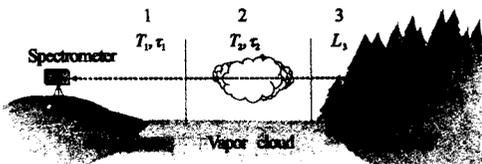


图 1 气体云团被动遥感测量

Fig.1 Measurement setup of passive remote sensing of vapor clouds

在这一模型中,忽略散射的影响,入射到光谱仪的光谱辐射亮度 L 为:

$$L=(1-\tau_1)B_1+\tau_1((1-\tau_2)B_2+\tau_2L_3) \quad (1)$$

式中: τ_i 为第 i 层的透过率; B_i 为第 i 层温度下的黑体辐射亮度; L_3 为背景的辐射亮度。

为便于分析,可以假设忽略第一层大气的影,即 $\tau_1=1$,那么公式(1)可以简化为:

$$L=(1-\tau_2)B_2+\tau_2L_3 \quad (2)$$

由公式(2)可以得到:

$$L=L_3+(1-\tau_2)B_2+\tau_2L_3-L_3=L_3+(1-\tau_2)(B_2-L_3) \quad (3)$$

除了入射到光谱仪的光谱辐射亮度外,还要考虑仪器自辐射和探测器的响应,最终的光谱为:

$$S=R(L+L_\infty) \quad (4)$$

式中: R 是仪器的响应函数,即对应不同频率探测器的增益; L_∞ 是仪器的自辐射函数,也称仪器偏置,是仪器内部各元器件热辐射和散射之和。

2 数据

所有遥感 FT-IR 干涉图都来自德国布鲁克公司的 OPAG 33 型遥感 FT-IR 光谱仪。液氮冷却 MCT 探测器,探测器响应范围为 8-14 μm 。光谱仪以氦氖激光($\lambda=0.6328 \mu\text{m}$)作为采样基准,每 4 个激光波长采样一次。实验气体为氨气(NH_3)。

3 分析与讨论

FT-IR 光谱仪输出的是干涉图,即探测器接收到的信号强度与光程差的关系 $I(x)$,可以简单地把干涉图表达式写为:

$$I(x)=\int_0^{\infty} 2S(\bar{\nu})\cos(2\pi\bar{\nu}x)d\bar{\nu} \quad (5)$$

式中: $\bar{\nu}$ 是波数; x 是光程差; $S(\bar{\nu})$ 是光谱强度。

假设光谱图为一偶函数,即 $S(\bar{\nu})=S(-\bar{\nu})$,而将光谱扩展到负波数区域,在理想干涉仪情况下,干涉图也是一个偶函数,则公式(5)可以改写为:

$$I(x)=\int_{-\infty}^{\infty} S(\bar{\nu})e^{i2\pi\bar{\nu}x}d\bar{\nu}=FT[S(\bar{\nu})] \quad (6)$$

所以,对干涉图做逆傅里叶变换就可以得到光谱图 S ^[10]:

$$S(\bar{\nu})=FT^{-1}[I(x)] \quad (7)$$

根据公式(3)和(4)得:

$$S=R(L_3+L_\infty)+R(1-\tau_2)(B_2-L_3) \quad (8)$$

所以 $I(x)=FT[S(\bar{\nu})]=FT[R(L_3+L_\infty)]+$

$$FT[R(1-\tau_2)(B_2-L_3)] \quad (9)$$

式中: $FT[R(L_3+L_\infty)]$ 是背景辐射谱与仪器自辐射谱和的傅里叶变换; $FT[R(1-\tau_2)(B_2-L_3)]$ 包含了目标污染气体的特征信息 τ_2 ,原始干涉图可以看作这两项的叠加。由

傅里叶变换的尺度变换特性^[11]可知,信号在时域中压缩等效于在频域中扩展;反之,信号在时域中扩展等效于在频域中压缩。所以,在频域中缓变的宽阔特征,可以看作扩展信号,在时域就会快速衰减;而频域中快变的窄峰,可以看作压缩信号,在时域衰减相对缓慢得多。公式(8)中的第一项,背景辐射谱和仪器自辐射谱表现为缓变的宽阔特征,如图 2 中虚线所示。公式(8)中的第二项可以看作包含目标气体的目标光谱和背景光谱之差,包含了目标污染气体的特征信息 τ_2 ,表现为快变的窄峰。图 2(a)示出背景光谱(虚线)和包含目标气体氨气的目标光谱(实线),图 2(b)是二者的差

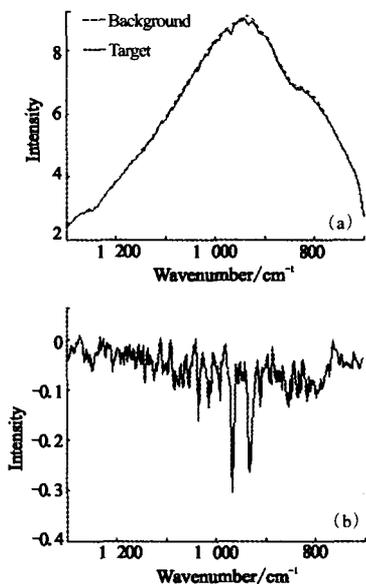


图 2 目标光谱和背景光谱

Fig.2 Target spectrum and background spectrum

谱。在差谱中可以明显看到氨气的两个主要特征峰。对应公式(9)中第一项,背景辐射谱和仪器自辐射谱的干涉图,从零光程差位置开始随着光程差的增大而快速衰减;公式(9)中的第二项则为图 2(b)所示差谱对应的干涉图,衰减得相对缓慢。图 3(a)是图 2(a)中背景光谱和目标光谱所对应的傅里叶变换干涉图在 101~300 的强度对比(以干涉图的极大值位置为 0 点)。从图中可以看出,相对于包含污染气体的目标干涉图,背景干涉图已经很小,即在该段干涉图中背景和仪器自辐射的影响已经很小。图 3(b)所示为图 2(b)中差谱所对应的傅里叶变换干涉图在 101~300 的强度对比。

由于背景信息和目标特征信息干涉图衰减速率

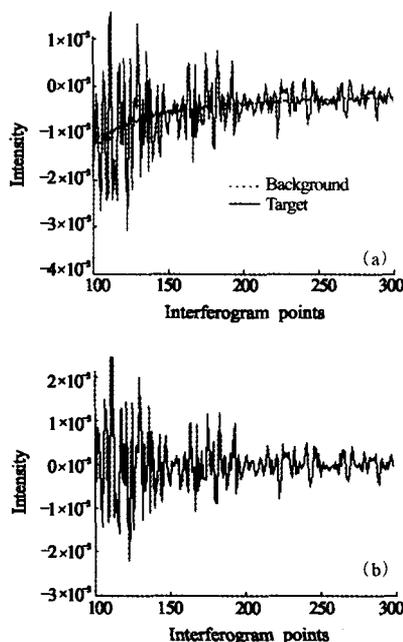


图 3 目标光谱和背景光谱所对应的傅里叶变换干涉图

Fig.3 Fourier transform interferograms of target and background spectrum

不同,选择偏离零光程差一段距离的干涉图,在此部分背景辐射和仪器自辐射的贡献之和与包含了目标污染气体特征信息部分相比,衰减已经可以忽略不计,这样就消除了背景辐射和仪器自辐射的影响,而不需要测量背景谱。

干涉图分析的一个关键步骤是带通滤波。污染气体云团中除了待测目标气体,往往还存在其他干扰气体,比如大气中的水汽、二氧化碳等。由于干扰物质在频域的特征信息和目标气体一样都表现为窄的特征峰,在干涉图上这些干扰信息和目标气体的特征信息有着相同的特征,同样衰减较慢。选择偏离零光程差一定距离的一段干涉图,虽然可以消除背景辐射和仪器自辐射的影响,但并不能从干扰信息中提取出目标气体信息。图 4 是有无干扰成分出现时 172~271 之间 100 点干涉图的对比,可以明显看出有干扰存在时与原始干涉图的差异明显。另外,频率域的尖峰噪声在干涉图上却是影响巨大的低频扰动,这种低频干扰有时甚至淹没有用的信息。这也是不能区分纯净背景和含有污染气体信息干涉图的原因,特征信息被低频扰动淹没了。如果可以区分干扰信息和目标气体特征峰的频带,则可以利用带通滤波器完成从干扰信号中提取目标气体特征信息的工作。设计数字带通滤波,使滤波器的通

带中心为目标气体特征峰的中心, 通带宽度为目标气体特征峰的宽度, 就可以滤掉干扰信号, 保留有用信息。图 5 是图 4 所示有干扰成分出现时的两幅干涉图经过带通滤波后的结果, 可以看出滤波后两条干涉图完全重合, 也就是说已经完全消除了干扰的影响。

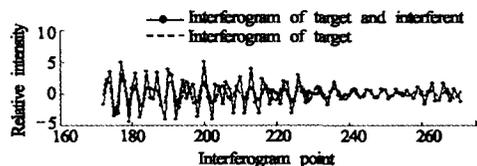


图 4 有无干扰物质存在时干涉图的对比

Fig.4 Relative intensity of the interferograms interfered or not

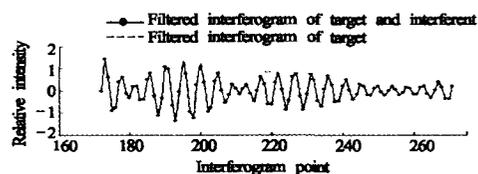


图 5 滤波以后对应两干涉图的对比

Fig.5 Relative intensity of the filtered interferograms

综合上述分析和讨论, 经过滤波的干涉图滤除干扰而保留了目标气体的特征信息。选择偏离零光程差的一段, 从而进一步消除背景辐射影响, 这样就可以用滤波干涉图做进一步的识别分类和定量分析。同时也要注意随着光程差的增大, 目标气体特征信号尺度和信噪比都减小, 选择偏离零光程差位置的一段干涉图既要保证背景信息衰减到足够小, 又要使有用信息有足够的尺度和信噪比。选择干涉图段的起始位置和长度是基于干涉图分析的关键, 这些参数的选取需要在应用中根据实验进行优化。

4 结论

结合遥感辐射传输模型和傅里叶变换红外干涉图与光谱图的变换对关系, 分析了红外背景和污染气体的光谱特征在干涉图中表现出的不同的衰减特性, 基于此介绍了一种被动遥感傅里叶变换红外干涉图特征信息提取的方法。数字带通滤波器的应用可以压缩背景红外辐射以及保证目标特征信息不受其他干扰影响。实验结果表明, 该方法可有效提取污染气体被动遥感傅里叶变换红外干涉图特征信息, 在识别分类和定量分析中取得了良好的效果。

参考文献:

- [1] FANG Yong-hua, XUN Yu-long. Passive infrared remote sensing of chemical cloud [J]. *Infrared and Laser Engineering* (方勇华, 荀毓龙. 化学云团远距离被动红外遥感. 红外与激光工程), 1996, 25(6): 42-46.
- [2] FANG Yong-hua, XUN Yu-long. Detection and identification of tiny spectral signal [J]. *Infrared Technology* (方勇华, 荀毓龙. 微弱光谱的探测与识别. 红外技术), 1997, 19(1): 21-25.
- [3] CHAFFIN C T, MARSHALL T L, CHAFFIN N C. Passive FTIR remote sensing of smokestack emissions [J]. *Field Analytical Chemistry and Technology*, 1999, 3(2): 111-115.
- [4] ZHANG Guo-sheng, HUANG Qi-bin, SUN Yu-feng. Application of neural network in discrimination of DMMP infrared spectra [J]. *Infrared and Laser Engineering* (张国胜, 黄启斌, 孙玉峰. 神经网络在 DMMP 红外光谱判别中的应用. 红外与激光工程), 2004, 33(4): 351-353.
- [5] ZHANG Guo-sheng, DAI Jie, FU Jia-qing. Advances in digitized signal processing algorithms for remote infrared chemical sensing [J]. *Infrared and Laser Engineering* (张国胜, 戴杰, 傅家卿. 红外化学遥感数字信号处理算法的研究进展. 红外与激光工程), 2002, 31(2): 125-128.
- [6] MATTU M J, SMALL G W, COMBS R J, et al. Quantitative analysis of sulfur dioxide with passive Fourier transform infrared remote sensing interferogram data [J]. *Applied Spectroscopy*, 2000, 54(3): 341-348.
- [7] SHAFFER R E, COMBS R J. Signal processing strategies for passive FT-IR sensor [C]// *Proceedings of SPIE, Electro-Optical Technology for Remote Chemical Detection and Identification III*, 1998, 3383: 92-103.
- [8] SHAFFER R E, POTYRAILO R A. Signal processing strategies for passive FT-IR remote sensing [C]// *Proceedings of SPIE, Internal Standardization and Calibration Architectures for Chemical Sensors*, 1999, 3856: 12-23.
- [9] WABORNBA M J, SMALL G W. Robust classifier for the automated detection of ammonia in heated plumes by passive Fourier transform infrared spectrometry [J]. *Analytical Chemistry*, 2003, 75(9): 2018-2026.
- [10] WU Jin-guang. *Modern Fourier Transform Infrared Spectroscopy Technology and Application, Volume one* [M]. Beijing: Science Technology Literature Press (吴瑾光. 近代傅里叶变换红外光谱技术及应用, 上卷. 北京: 科学技术文献出版社), 1994.
- [11] ZHENG Jun-li, YING Qi-hang, YANG Wei-li. *Signals and Systems, Volume one* [M]. 2nd ed. Beijing: Higher Education Press (郑君里, 应启珩, 杨为理. 信号与系统, 上册. 第 2 版. 北京: 高等教育出版社), 2000.