

文章编号: 1672-8785(2006)02-0006-05

# 一种移动背景下的污染气体遥感探测算法

熊 伟, 方勇华, 黄 烨, 董大明, 李大成, 叶 松

(中国科学院安徽光学精密机械研究所, 安徽合肥 230031)

**摘 要:** 作为一种有效的大气污染气体遥感探测识别手段, 傅里叶变换红外光谱仪已经得到越来越广泛的应用。当污染气体与背景存在温差时, 红外光谱就能反映出污染气体的吸收或发射特征。利用布鲁克公司的 OPAG 22 型光谱仪采样得到 2048 点的干涉图, 当采用合适的信号处理算法时, 可以在不需要预先测量背景的前提下直接分析干涉图得到污染气体的特征信号。本文介绍的快速背景扣除算法在污染气体的特征峰是单峰、多峰等情况下都能快速有效地扣除掉低频背景信号, 检出目标特征。这一方法为快速移动背景下的污染气体探测识别研究提供了一个快速简便的方法。

**关键词:** 红外; 傅里叶变换红外光谱仪; 背景扣除; 污染气体; 遥感

**中图分类号:** O646 **文献标识码:** A

## An Algorithm for Remote Sensing Gaseous Pollutants against Mutative Background

XIONG Wei, FANG Yong-hua, HUANG Ye, DONG Da-ming, LI Da-cheng, YE Song  
(Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China)

**Abstract:** Environmental monitoring with Fourier Transform Infrared (FTIR) spectroscopy offers an effective method for the identification of hazardous gas pollutants. Infrared spectroscopy can reveal the spectral signatures of a pollutant when there is a temperature difference between the pollutant and the background radiation, resulting in the emission or absorption by the pollutant. Appropriate signal processing techniques enable real-time detection and can neglect the need for background radiation references. An algorithm has been developed for the detection of gaseous pollutants with single- or multiple-peak spectra. The algorithm has been successfully used for the detection of methanol with single-peak spectral signature, and ammonia as the representative of multiple-peak spectral signature pollutants.

**Key words:** infrared; FTIR; FBS background subtraction; gaseous pollutants; remote sensing

### 1 引言

近年来, 由于环境监测领域中污染气体监测的需要, 已经开发出了许多分析方法。傅里叶变换红外 (FT-IR) 遥感技术作为其中一种有效而便捷的手段, 已经越来越多地被应用于大气中痕量气体和污染气体的探测<sup>[1]</sup>。

当背景和污染气体存在温差时, 傅里叶变换红外光谱仪能够检测到低浓度污染气体的发射或吸收辐射信号。FT-IR 光谱仪可以进行主动和被动两种方式的遥感探测。相比主动方式而言, 被动遥感方式不需要额外的主动红外光源, 光谱仪直接接收进入光谱仪的红外辐射信号。这种方式的优点在于光谱仪能随时改变探

**收稿日期:** 2005-08-15

**作者简介:** 熊伟 (1975—), 男, 现为中科院安徽光机所博士研究生, 主要从事傅里叶变换红外遥感探测方面的研究。

测地点,而且探测距离可达到几公里。因此这样的探测方式就可应用于对工厂释放的污染气体的监测、机动车辆排放的尾气的监测、化工厂有害气体泄漏的监测等方面。

在这方面的研究中,现在已经发展出了多种傅里叶变换红外光谱的探测和识别方法。

当允许测量背景光谱时,可以对得到的差谱进行分析。利用能同时测量两个相邻视场的光谱的干涉仪可以得到所要求的差谱<sup>[2]</sup>。这种方法在视场为低平天空时有较好的效果,但是这种光谱仪的结构比较复杂。

另一种方法是美国的 Small 等人提出的通过模式识别算法直接对干涉图进行分析的方法<sup>[3,4]</sup>。该算法最大的优点在于不用对干涉图进行耗时的傅里叶变换。有关该算法的论文近年已在不同的杂志上发表。

另外还有人提出了统计分类的方法,但这一方法需要测量不同地域不同气象条件下的大量光谱数据,一般很难完成。

随着我国在污染气体监测方面的需要越来越迫切,发展一种快速、简便的实时光谱鉴别处理算法是具有重要意义的。本文提出的快速背景扣除算法在这一方面进行了探索。

## 2 数据获取

在试验中采用了 OPAG 22 红外光谱仪。该光谱仪采用了具有 RockSolid 专利技术的干涉仪和用斯特林制冷的碲镉汞探测器组件,无需液氮制冷,非常适合野外探测。利用该干涉仪采样获取一幅具有 2048 个数据点的典型干涉图。干涉仪以氦-氟激光( $\lambda = 0.6328\mu\text{m}$ )作为采样基准,每四个激光波长采样一次,得到一个数据点<sup>[5,6]</sup>。因此,每两个相邻点之间的间隔距离为  $D_s = 0.6328 \times 4 = 2.531\mu\text{m}$ 。那么,  $ND = 2.531 \times 2047 = 5180.957\mu\text{m} = 0.5181\text{cm}$ 。可得到的采样分辨率为  $V_0 = 1/ND = 1.93013\text{cm}^{-1} \approx 2\text{cm}^{-1}$ 。而且,由这样的干涉图变换得到的光谱图反映的波数范围为  $\Delta f = 2047 \times V_0/2 = 1975.49\text{cm}^{-1}$ 。

因此,当干涉仪每产生  $2.531\mu\text{m}$  的光程差时采样一次,这样可获得分辨率为  $1.93013\mu\text{m}$  的光

谱。随后探测器采样的模拟信号经 A-D 转换后得出的数字信号就是我们所需要的干涉图数据。这一段数据包括了  $700\text{cm}^{-1} \sim 1300\text{cm}^{-1}$  这一段的红外区间,而这一段正好是大气窗口,且大部分污染气体在这一波段都有明显的吸收或发射特征,就可利用这一段红外区间来进行污染气体的遥感探测分析。

## 3 快速背景扣除算法

### 3.1 遥感模型

为了更好地理解测量的光谱所含的信息,我们建立了一个遥感模型,如图 1 所示。当光谱仪对其视场中的目标云团进行探测时,光谱仪测得的辐射信号既包含了光谱仪视场中的背景信号,也有目标云团信号和大气的信号。在这里,我们利用一个简单的三层模型来对测量的过程进行简单介绍(图 1)。为简单起见,我们认为各层之间是均匀的。

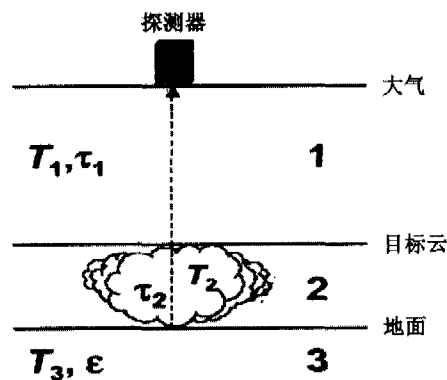


图 1 被动遥感探测模型

在这一模型中,入射到光谱仪的光谱辐射亮度  $L_1$  为

$$L_1 = (1 - \tau_1)B_1 + \tau_1[(1 - \tau_2)B_2 + \tau_2L_3] \quad (1)$$

式中,  $\tau_i$  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。

在这一模型中,我们忽略了散射的影响。当没有污染云团存在时,进入光谱仪的辐射亮度  $L_0$  为

$$L_0 = (1 - \tau_1)B_1 + \tau_1L_3 \quad (2)$$

那么在允许预先测量  $L_0$  的情况下,由(1)式

和(2)式计算出的进入探测器的污染云团的辐射亮度便为

$$\Delta L = L_1 - L_0 = \tau_1(1 - \tau_2)(B_2 - L_3) \quad (3)$$

由于目标云团与相邻的大气的热交换非常快,所以可以近似地认为第一层和第二层之间的温度是相等的,即  $B_1 = B_2$ 。那么(3)式可简化为

$$\Delta L = (1 - \tau_2)(B_1 - L_0) \quad (4)$$

在  $L_0$  可测的情况下,可以方便地得到反映目标云团的存在和类别的差谱。

如果地面大气的温度可以方便地测到,则由(4)式,根据朗伯-比尔定律可以计算出  $\tau_2$ ,那么云团的吸光度  $A$  便为

$$A = \alpha CL = -\ln \tau_2 \quad (5)$$

式中,  $\alpha$  为污染气体云团的吸收率,  $C$  为污染气体云团浓度,  $L$  为污染气体云团厚度。这样就可对云团进行半定量的分析了。

但是,在光谱仪正在运动或污染云团已经存在的情况下,我们就无法预先获得目标云团的参考背景光谱  $L_0$ ,因此,我们必须开发出一种新的不需要预先测量背景光谱的信号处理算法。

### 3.2 背景扣除

在对污染气体进行遥感探测时,目标的吸光度谱可以很好地反映目标信号的存在与否。那么如果有一条“纯净”的参考光谱,目标的吸光度谱可由公式  $A = -\ln(Y/X)$  得到。其中,  $A$  是吸光度谱,  $Y$  是目标光谱,  $X$  是“纯净”的参考光谱。然而由于上文提到的原因,在很多情况下无法获得参考光谱,那么就必须考虑从目标光谱本身扣除背景信息,事实证明这样是可行的。

一般来说,背景都是缓变的,所以背景信号相对于污染气体来说是低频信号,反映在干涉图上就是靠近中央主极大的部分。这一点也可以由 Small 等人的研究得到证明。正是有了这一特征,可以用我们称之为 FBS 算法的方法扣除掉背景低频信号。该方法的基本过程如图 2 所

示。

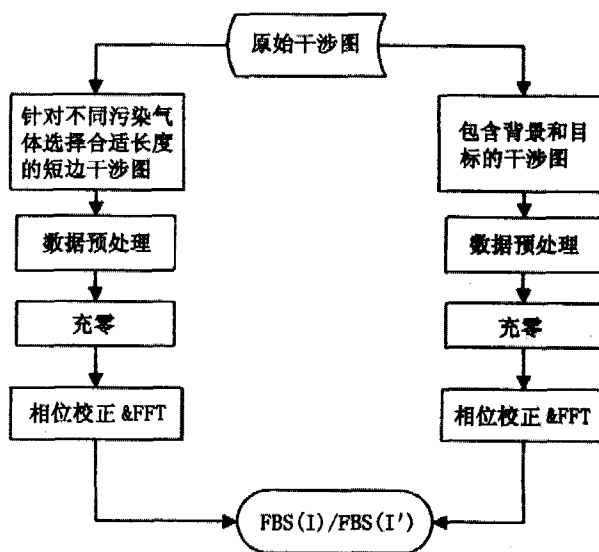


图 2 FBS 算法流程图

FBS 方法可以在以干涉图中央主极大为中心的一个较小的区间得到仅包含低频背景贡献的光谱,那么通过将既含有背景又含有目标的光谱除以合适的低频背景光谱就可以得到主要包含目标特征的光谱了。上述流程中的数据预处理、充零以及相位校正等步骤在参考文献 [5,8,9] 中有较详细的介绍,在此不再赘述。

在此要指出的是,仪器本身也具有一定的响应特征,如探测器和光路的响应,这些响应对整个信号的频率谱也有一定的影响,因此也必须扣除掉。

考虑以上因素后,结合吸光度的计算公式,那么计算含有污染气体特征的校正后的吸光度谱就可简单地表示为

$$A = -\ln \left[ \frac{FBS(I)/FBS(I')}{FBS(B)/FBS(B')} \right] \quad (6)$$

式中,  $I$  为既包含目标又包含背景的原始干涉图,  $I'$  为选取的短边干涉图,  $B$  为仪器的光谱响应,  $B'$  为选取的仪器响应的短边干涉图。

因此,根据重新得到的公式(6),可以快速计算出污染气体的吸光度谱。

## 4 讨论及结论

FBS 算法具有良好的目标适应性。常见污染气体在  $700\text{cm}^{-1} \sim 1300\text{cm}^{-1}$  大气窗口都具有

以下三种情况中的 1、2 或 1、3 两种特征, 有的仅具有 2、3 特征中的一种:

(1) 有许多污染气体, 在  $700\text{cm}^{-1} \sim 1300\text{cm}^{-1}$  大气窗口中有多个吸收峰;

(2) 污染气体在该大气窗口的特征峰较窄;

(3) 污染气体在该大气窗口的特征峰较宽。

对于这几种情况, FBS 算法都能很好地从干涉图中分离出目标信号。NH<sub>3</sub> 的特征符合前两种情况, 其结果如图 3 所示。由图 3 可以看出, 不仅 NH<sub>3</sub> 的两个主要特征峰 ( $930\text{cm}^{-1}$ ,  $966\text{cm}^{-1}$ ) 非常明显, 其他次级特征峰也较明显。

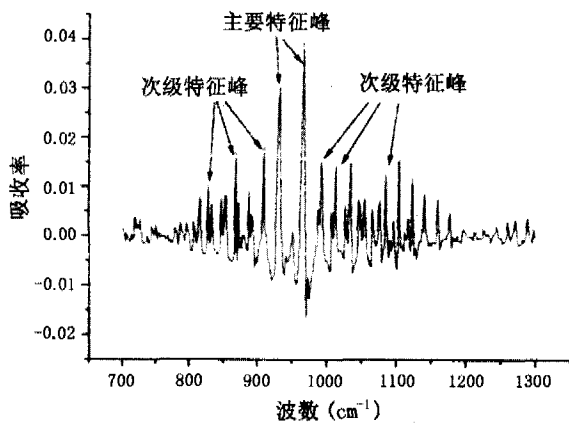


图 3 以砖墙为背景的氨气的吸光度谱

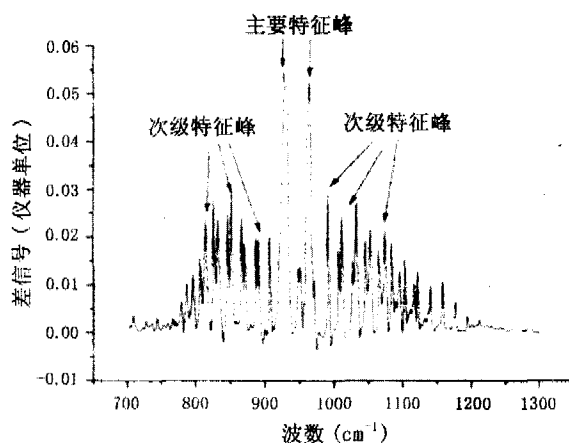


图 4 背景扣除后的氨气的差谱

图 5 显示的结果很好地解决了第三种情况的问题。甲醇在  $700\text{cm}^{-1} \sim 1300\text{cm}^{-1}$  波段具有较宽的特征峰 ( $980\text{cm}^{-1} \sim 1080\text{cm}^{-1}$ ), 通过选取合适长度的短边背景 (128 个数据点), 利用 FBS 算法同样很好地分离出了 100m 远处以砖墙为背景

的红外辐射信号。

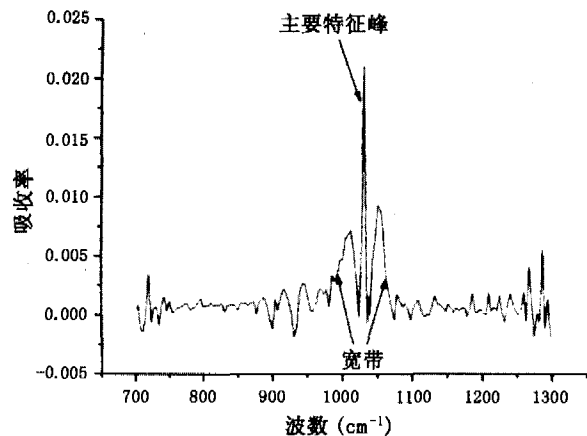


图 5 以砖墙为背景的甲醇的吸光度谱

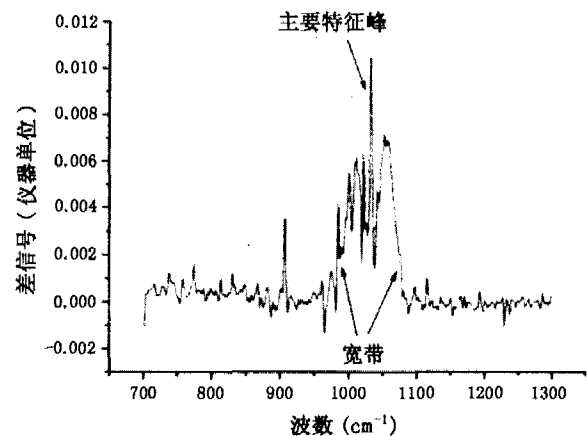


图 6 扣除背景后的甲醇的差谱

另外, 相比需要预先获得背景光谱来进行目标识别的传统差谱算法来说, 这种直接利用目标干涉图扣除背景信号的算法具有不需要预先测量背景光谱的显著优势。图 3、图 4 与图 5、图 6 分别显示了两种不同的污染气体利用 FBS 算法得到的结果和利用预先测量背景然后再扣除背景的传统差谱法得到的结果的比较, 从图示可以看出, 利用 FBS 算法得到的结果和差谱法得到的结果具有相同的效果, 完全可以用于下一步的识别工作。

因此, 这一算法大大加强了利用傅里叶变换红外光谱仪进行野外污染气体探测的可用性。而且, 该算法计算步骤简单, 非常适合于快速实时识别。

## 参考文献

- [1] Huang Zhonghua, Wang Junde. Remote Sensing Detection of Atmospheric Pollutants by Fourier Transform Infrared Spectrometry [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis. Vol.22, No.2, pp235-238, April, 2002. 黄中华, 王俊德. 傅里叶变换红外光谱在大气遥感监测中的应用 [J]. 光谱学与光谱分析, 2002 年 4 月, 第 22 卷, 第 2 期, 235-238.
- [2] J-M Thèriault, et al. Differential detection with a double-beam interferometer [J]. SPIE Vol.3082, 65-75.
- [3] G W Small, et al. Detection of Atmospheric Pollutants by Direct Analysis of Passive Fourier Transform Infrared Interferograms [J]. Anal. Chem. 1988, Vol.60, No.3, 264-269.
- [4] G W Small, et al. Design of Optimized Finite Impulse Response Digital Filters for Use with Passive Fourier Transform Infrared Interferograms [J]. Anal. Chem. Vol.62, No.17, September, 1990. 1768-1777.
- [5] Griffiths P R, de Haseth J A. Fourier Transform Infrared Spectrometry [M]. New York: Wiley Press, 1986. 350-400.
- [6] Wu Jingguang. The Technique and Application of Neoteric Fourier Transform Infrared Spectrum [M]. Beijing: Science Press, 1994. 吴谨光. 近代傅里叶变换红外光谱技术及应用 [M]. 北京: 科学出版社, 1994. 136-134.
- [7] Joanne M Bjerga, et al. Reconstruction of Gas Chromatograms from Digitally Filtered Fourier Transform Infrared Interferograms [J]. Anal. Chem. Vol.61, No.10, May, 1989.
- [8] Xiong Wei, Fang Yonghus, et al. Wavenumber Correction in the Information Processing for FTIR [J]. Chinese Journal of Quantum Electronics. Vol.22, No.2, Apr. 2005. 熊伟, 方勇华, 等. 傅里叶变换红外光谱信息处理中的波数校正 [J]. 量子电子学报, 2005, 22(2), 165-168.
- [9] Joel M Morris, Srinath Balasubramanian, Meijun Guo, Lalitha Sankaranarayanan, A Detection Algorithm for Gaseous Pollutants Using Signal Processing Techniques on FTIR interferograms [J]. SPIE Vol.2366/241-250.

## 国外专利介绍

### 实时红外光学传感器

美国专利 US6836329

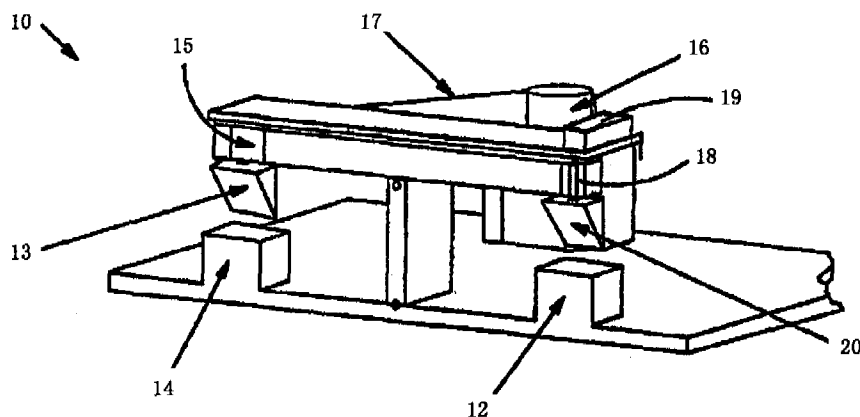
(2004 年 12 月 28 日授权)

采用不可见光光学传感器的自动传感装置正在被越来越多地结合到工业和制造设施中。本专利说明书图 1 所示的架空式红外传感运送装置就是一个典型的例子。这种运送装置装在一个自动净化室半导体晶片设施

中用于运送半导体晶片。每个运送装置中均装有能投射三维光束的红外传感器。这些传感器主要用于正在移动的运送装置的安全保护和导航。当红外光束中断时, 运送装置便会停止运动。因此, 需要经常对红外传感器进行校直。

本发明提供一种用可见光束如可见光发光二极管或 HeNe 激光器光束对红外传感器进行校直的装置和方法。该方法能在不影响制造流程正常运行的情况下对红外传感器进行现场或实时校直。

本专利说明书共 14 页, 其中有 8 张插图。



高编译