

复杂背景下被动 FTIS 定量遥感污染云团光谱

张 骏 荀毓龙

(中国科学院安徽光学精密机械研究所 合肥 230031)

摘 要 本文提出复杂背景下定量遥感污染云团光谱的算法。利用被动傅里叶变换红外光谱仪 (FTIS) 遥测目标气体和背景光谱数据及最小平方误差拟合方法, 成功地解决了探测目标气体柱数密度和目标气体等效辐射温度。该处理方法不仅可用于特定污染云团的定量处理, 而且可用于多种污染地区如发电厂、机场、城市交叉路口、垃圾处理站等对 CO, CO₂, NO, NO₂, N₂O, NH₃, CH₄, SO₂, H₂O, HCl 和 HCHO 等气体浓度的监测。最后, 详细讨论了用该算法对模拟剂的处理结果。

关键词 污染云团, 模型, 傅里叶变换红外光谱仪, 柱数密度

1 引 言

对日趋严重的环境污染进行实时监测, 一直是研究人员所关注的问题^[1]。由于污染云团有特殊的光谱特征^[2], 为被动遥测红外光谱提供了一种鉴别手段。

本文提出对复杂背景下污染云团光谱的定量遥测算法。利用研制的被动傅里叶变化红外光谱仪 (FTIS) 遥测模拟剂的光谱数据和复杂背景的光谱数据, 确定了表征污染云团特征的两个参量: 气体的柱数密度 CL 和气体的等效辐射温度。该算法克服了计算中由于背景结构的非均匀分布所带来的困难。利用 FTIS 仪器和该算法, 可对多种污染区域如发电

厂的烟囱、机场、城市交叉路口、垃圾处理站等排放气体 CO, CO₂, NO, NO₂, N₂O, NH₃, CH₄, SO₂, H₂O, HCl 和 HCHO 的浓度进行远距离监测。

2 算法模型

对于水平或低仰角遥测污染云团, 可将进入 FTIS 仪器的辐射量以云团为界分两部分来处理, 第一部分为气体云团前方多种辐射源组成 L_{bk} 的贡献, 第二部分为仪器到云团间大气辐射 $B(T_{atm}, \nu)$ 的贡献 (图 1)。

假定云团在仪器的视场内 (充满视场), 且云团到仪器间的大气是均匀的, 故仪器接收到的光谱辐

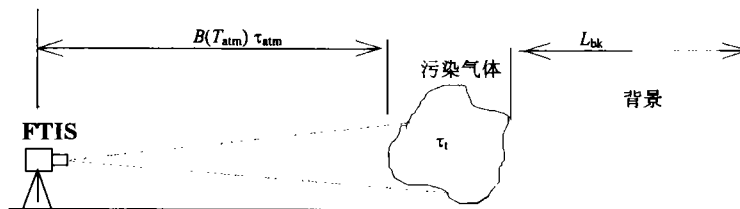


图1 遥测污染云团示意图

Fig.1 Illustration of the remote detection pollution gas experiment

射亮度 $L_{obs}(\nu)$ 由下列方程描述^[3]

$$L_{obs}(\nu) = L(T_{bk}, \nu) \cdot \tau_t \cdot \tau_{atm} + \tau_{atm} \cdot (1 - \tau_t) \cdot B(T_t, \nu) + (1 - \tau_{atm}) \cdot B(T_{atm}, \nu) \quad (1)$$

其中: $L(T_{bk}, \nu)$ 表示云团前方多种辐射源的贡献, 它可能包括山、树、天空、气溶胶和云等, 可用一等效温度 T_{bk} 的黑体辐射表示, 即 $L(T_{bk}, \nu) = B(T_{bk}, \nu)$ 。 $B(T_{atm}, \nu)$ 表示仪器到云团间大气温度为 T_{atm} 的黑体

辐射的贡献, $B(T_t, \nu)$ 表示云团温度 T_t 时的黑体辐射。以上的 $B(T_t, \nu)$ 均由 Planck 公式给出^[5]。 τ_{atm} 表示大气透过率。 τ_t 为云团的光谱透过率, ν 为波数。若考虑非均匀结构大气, 则背景辐射 $L(T_{bk}, \nu)$ 和环境大气辐射 $B(T_{atm}, \nu)$ 将表示为沿路径的积分量。

当仪器视场内无云团时, FTIS 接收到的光谱辐射亮度 $L_o(\nu)$ 可表示为

收稿日期: 1997-09-22; 收到修改稿日期: 1997-11-21

$$L_o(\nu) = L(T_{bk}, \nu) \cdot \tau_{atm} + (1 - \tau_{atm}) \cdot B(T_{atm}, \nu) \quad (2)$$

分析(1)式和(2)式,通常情况下,我们可以利用同一位置上有、无云团时的辐射信号之差,来扣除诸如大气和背景的辐射影响,即

$$\Delta L(\nu) = L_{obs}(\nu) - L_o(\nu) \quad (3)$$

然而根据辐射传输原理^[6],相邻近的层之间的辐射传输要产生相互影响,特别是对于非均匀结构的大气,(3)式的结果并不能完全消除前背景和后背景的辐射贡献。因此我们将(3)式的结果和无云团时的辐射亮度 $L_o(\nu)$ 一同考虑后,(3)式可表示为

$$\Delta L(\nu) = (1 - \tau_i) \cdot [B(T_i, \nu) \cdot \tau_{atm} + B(T_{atm}, \nu) \cdot (1 - \tau_{atm})] - (1 - \tau_i) \cdot L_o(\nu) \quad (4)$$

整理后可得到

$$\Delta L(\nu) = \frac{(1 - \tau_i) \cdot [B(T_i, \nu) \cdot \tau_{atm} + B(T_{atm}, \nu) \cdot (1 - \tau_{atm})]}{1 + (1 - \tau_i) \cdot \left[\frac{\Delta L(\nu)}{L_o(\nu)} \right]^{-1}} \quad (5)$$

(5)式为定量遥测污染云团光谱的一般表达式,通过迭代运算,可以得出云团光谱。但利用该式所面临的难题是:现有的大气模式和计算方法尽管能提供各种不同模式下的情况,但对于较为复杂的背景和非均匀结构的大气而言,模式所能提供的信息太有限,远远不能满足实际应用的要求。

为了找到解决这一问题的方法,在假定云团到仪器之间的大气为一均匀层的前提下,充分利用现有的 FTIS 仪器对各种复杂背景和云团遥测的数据资料,在相同的实验条件下,假定计算出的污染云团的辐射亮度 $L_{ig}^s(\nu)$ 与计算出的无云团的背景辐射亮度 $L_o^s(\nu)$ 之比等于实验所测有污染云团的辐射亮度 $L_{ig}^m(\nu)$ 与无云团的背景辐射亮度 $L_o^m(\nu)$ 之比,即

$$\frac{L_{ig}^s(\nu)}{L_o^s(\nu)} = \frac{L_{ig}^m(\nu)}{L_o^m(\nu)} \quad (6)$$

利用(6)式的假定,可以推得

$$\frac{\Delta L^s(\nu)}{L_o^s(\nu)} = \frac{\Delta L^m(\nu)}{L_o^m(\nu)} \quad (7)$$

(6)和(7)中上标“s”表示计算结果,“m”表示仪器 FTIS 测量结果。下标“ig”表示有污染云团时,而“o”表示空背景情况。将(7)式代入(5)式中,得

$$\Delta L^s(\nu) = \frac{(1 - \tau_i) \cdot [B(T_i, \nu) \cdot \tau_{atm} + B(T_{atm}, \nu) \cdot (1 - \tau_{atm})]}{1 + (1 - \tau_i) \cdot \left[\frac{\Delta L^m(\nu)}{L_o^m(\nu)} \right]^{-1}} \quad (8)$$

这就是对复杂背景下,利用 FTIS 实测结果,定量遥测污染云团光谱的算法。

比较(8)式和(5)式我们发现,尽管两式在形式上是相同的,但用(8)式比用(5)式计算优点在于:利用(8)式计算污染云团光谱,我们不必深究背景或大气的细节,特别是当背景很复杂时,要从(5)式中计算污染云团光谱,气溶胶、天空云的结构等诸多因素的影响,在计算时要考虑这些因素的确是相当困难的。即便现有的模式包括了这些内容,但都比较简单和理想化,离实用相差甚远。(8)式中我们用实测背景和云团的光谱数据 $\Delta L^m / L_o^m$ 做为计算的一个重要因子取代(5)式中要模拟的项 $\Delta L^s / L_o^s$, 不仅使计算简化,而且背景中气溶胶的分布特性、天空云的结构等众多因素的贡献和影响,都体现在 $\Delta L^m / L_o^m$ 项中,使仿真变得容易,并具有广泛的代表意义。

另外,通过计算和实验结果的迭代运算,解决了实际遥测中难以解决的两大困难:污染云团的柱数密度 CL 和云团温度 T_i , 这两个表征污染云团特征的参数。具体做法是,通过对计算和实测结果的最小均方误差拟合,利用 Beer 定律和 Plank 公式^[4,5],可得到气体的浓度程长积(又称为柱数密度 Column density)和云团温度。即

$$\tau_i(\nu) = \exp[-k(\nu) \cdot CL] \quad (9)$$

以及 Plank^[5]公式

$$B(T_i, \nu) = \frac{c_1 \cdot \nu^3}{[\exp(c_2 \cdot \nu / T_i) - 1]} \quad (10)$$

其中: $c_1 = hc^2 = 1.19104 \times 10^{-12} [W \cdot cm / (sr \cdot cm^{-1})]$, $c_2 = hc / k = 1.4388(cm \cdot K)$ 。 h 为 Plank 常数, c 为光速, k 为 Boltzman 常数, ν 为波数 (cm^{-1})。 τ_i 为气体云团的光谱透过率, CL 为该云团的柱数密度, $k(\nu)$ 为污染云团分子的吸收系数。

3 实验及结果讨论

背景和气体云团的测量实验,选取某试验场地进行。仪器采用自行研制的专用傅里叶变换红外光谱辐射仪(FTIS),主要技术指标为:工作波长 8—13 μm ,光谱分辨率 4 cm^{-1} ,扫描速度 3—5 次/s。它的噪声等效光谱辐射亮度 $NESR = 3.0 \times 10^{-9} W / (cm^2 \cdot sr \cdot cm^{-1})$,因此可探测到 0.02K 的微弱温度变化。

实验的气体采用某种模拟剂^[1],该气体在 810 cm^{-1} 、920 cm^{-1} 、1040 cm^{-1} 3 个带有特征峰,其光谱吸收系数如图 2 所示。由于不可能进行大面积、大规模

施放云团,故只能采用单点炸弹产生。这种方式产生的云团是非常有限的,加之仪器的视场角为 $1.5^{\circ} \times 1.5^{\circ}$,炸弹点距离仪器约为 1km 远,炸弹后产生和扩散的云团能否充满仪器的视场,对测量和仿真结果有一定的影响。另外,由于尘土对云团有较强的屏蔽作用¹⁾。实验中采用悬空炸弹方式,以减少尘土对目标云团的影响。实验时云团的背景有山和树,环境温度为 19℃。

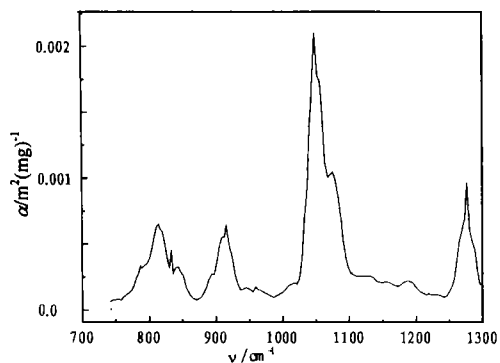


图2 模拟剂的光谱吸收系数

Fig.2 Absorptivity of simulant

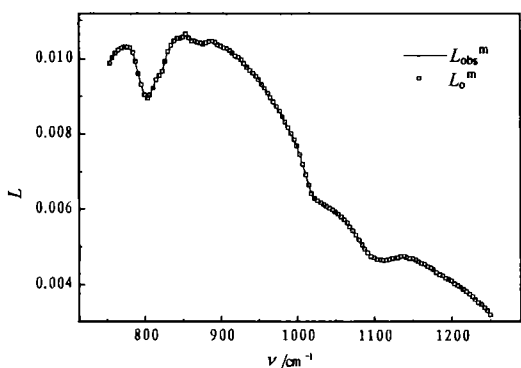


图 3 实测目标光谱 L_{obs}^m 和背景光谱 L_o^m

Fig.3. Experimental result for spectra of simulant and background

图 3 给出了 FTIS 遥测背景光谱和施放模拟剂后测量的云团的辐射光谱。图中的结果表明云团的特征叠加在背景上,其大小一般只有背景的 1%。图 4 所示为在 1 分钟之内,FTIS 遥测云团的 10 条光谱变化(指 $\Delta L^m(\nu)$)。云团从炸弹开始进入仪器 FTIS 的视场,到仪器所测辐射量最大,逐渐减小的演变过程(图中从左向右的顺序)。这是由于云团的扩散以及风作用所致。这组曲线清楚地表明:第一条曲线没有出现模拟剂的 3 个特征峰,说明炸弹初期模拟剂云团还未进入仪器视场,随着云团的扩散和漂移,模拟剂的 3 个特征峰出现,而且强度不断增大。随着

云团的漂移,在很短的时间内,3 个特征峰的大小在减小。这说明由于云团的漂移,有一部分云团已偏离仪器的视场,云团没有充满仪器的视场。

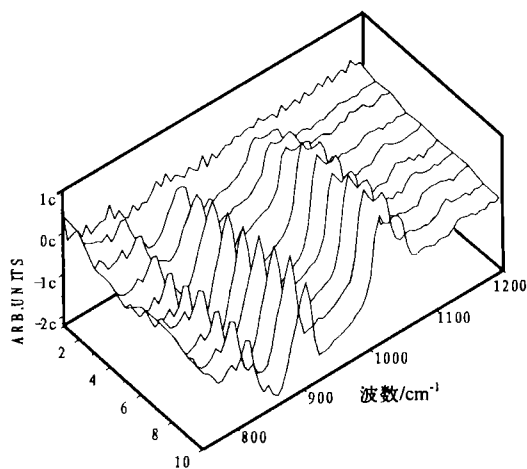


图4 实测模拟剂的光谱 $\Delta L(\nu)$

Fig.4 Experimental result for spectra of simulant

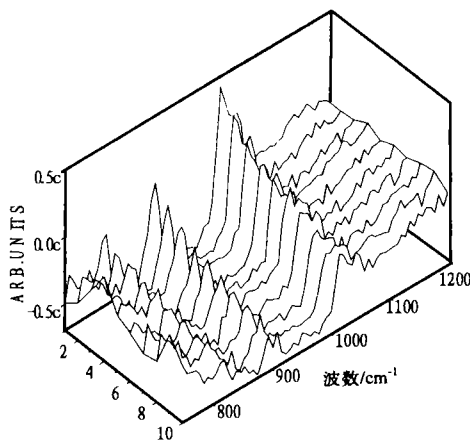


图5 实测模拟剂的光谱 $\Delta L(\nu)$

Fig.5 Experimental result for spectra of simulant

图 5 所示为几分钟之后,重新跟踪云团扩散方向后,仪器仍能捕获云团的特征光谱。由于当时的风速小于 1m/s,因此云团的扩散速度较慢,但云团的特征已明显衰减。从图中(从左到右)的变化可见,在 3 个特征峰大小下降的同时,干扰在不断加强,当云团扩散到仪器不能反映时(温差变化小于 0.02K),最终将淹没在干扰中。

图 6 和图 7 是选取了图 4 中第 3 条和第 8 条光谱数据为基础,仿真出的模拟剂的光谱。仿真和实测对比分析的结果表明:这种仿真模型由于采用实测数据做为仿真的基础,不仅考虑到仪器本身的工作

1) 张骏,荀毓龙. FTIR遥测污染云团及其干扰物的弱光谱. 红外与毫米波学报(待发表).

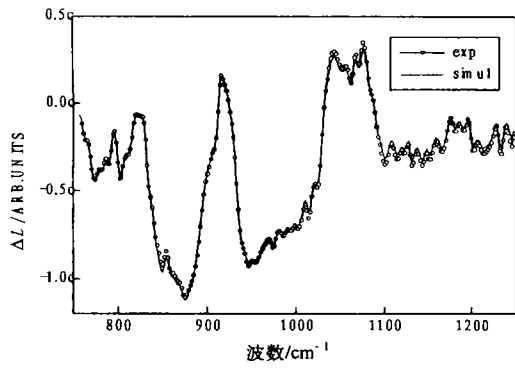


图6 实测结果与仿真结果比较(图4中第3条)
Fig.6 Comparison of simulated (solid curve) and measured (circle) simulant spectrum
(The third curve in Fig.4)

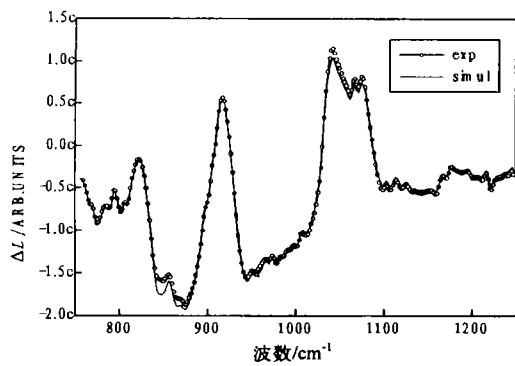


图7 实测结果与仿真结果比较(图4中第8条)
Fig.7 Comparison of simulated (solid curve) and measured (circle) simulant spectrum
(The eighth curve in Fig.4)

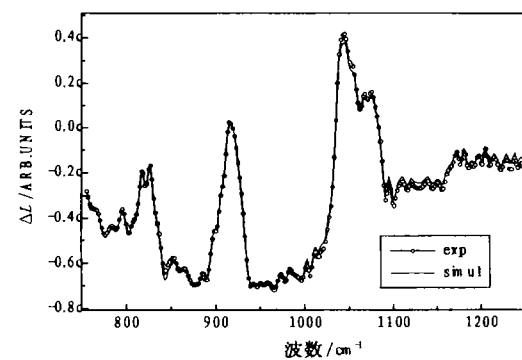


图8 实测结果与仿真结果比较(图5中第1条)
Fig.8 Comparison of simulated (solid curve) and measured (circle) simulant spectrum
(The first curve in Fig.5)

好,图6和图7中两条曲线的 RMS 误差分别为 0.0185 和 0.0187。仿真结果还表明两图中云团的气体柱数密度为 $CL = 1600\text{mg}/\text{m}^2$, 和用常规方法测量结果有相同的数量级, 而且此时云团的等效辐射温度为 305K。仿真中的大气特性均采用美国标准大气模式。

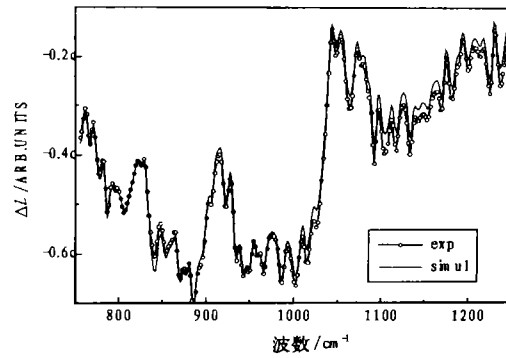


图9 实测结果与仿真结果比较(图5中第10条)
Fig.9 Comparison of simulated (solid curve) and measured (circle) simulant spectrum
(The tenth curve in Fig.5)

图8和图9是选取图5中第1条和第10条光谱数据仿真的结果。其中图8两条曲线的 RMS 误差为 0.0186, 而图9两条曲线的 RMS 误差为 0.0179。(为了进行比较, 图4、5中的 Z 轴以及图6、7、8和9中纵坐标上的“c”表示同一常数)。

4 结 论

仿真结果和实验结果比较表明: 该算法较好地解决了利用单端被动 FTIS, 定量遥测污染云团光谱的难题, 仿真的结果和实验结果有非常好的符合。仿真的同时还能提供气体的柱数密度和等效温度, 这两个表征气体云团的物理特征量。利用 FTIS 和该处理方法, 可对多种污染区域的多种气体进行快速实时监测, 具有广阔的应用前景。

参 考 文 献

- 1 D. F. Flanigan. Detection of organic vapors with active and passive sensors: a comparison. *Appl. Opt.* 1986, **25**(23): 4253—4260.
- 2 L. D. Hoffland, R. J. Piffath, J. B. Bouck. Spectral signatures of chemical agents and simulants. *Opt. Eng.* 1985, **24**(6):982—984.
- 3 张骏, 荀毓龙. 污染云团红外光谱识别的背景压缩. *量子电子学报*, 1997, **14**(2): 174—179.

- 4 P. R. Griffiths, J. A. de Haseth. Fourier Transform Infrared Spectrometry. A Wiley-Interscience Publication, John Wiley & Sons, New York, 1986, Chap. 10, 338.
- 5 陈衡编著. 红外物理学, 北京: 国防工业出版社, 1985年, 57—60.
- 6 周秀骥, 陶善昌, 姚克亚编著. 高等大气物理学, 北京: 气象出版社, 1991年第一版, Chap. 20, 821—830.

作者简介

张骏, 男, 32岁, 博士, 毕业于国防科技大学物理系。目前主要从事光学遥感、大气光学、模式识别领域的研究工作, 曾获中国科学院科技进步二等奖一次, 在国内、外发表论文20余篇。

Quantitatively Remote Sensing Detection of the Polluted Cloud Spectra the Complicated Environments by Passive Fourier Transform Infrared Spectrometer

Zhang Jun Xun Yulong

(Anhui Institute of Optics & Fine Mechanics, Academia Sinica, P. O. Box 1125, Hefei 230031)

Abstract A model of simulated spectra for pollution cloud in a complicated environment is proposed. Using large background and target-gas spectra which are measured by passive Fourier transform infrared spectrometer (FTIS) and least-squares fitting procedures, we have simulated successfully the spectra of pollution gas. Simultaneously, the feature parameters for pollution cloud, column density and effective radiative temperature of gas are given. The system can be operated in many different air pollution locations, e.g., industrial plants, airports, crossroads, garbage-disposal sites, to determine passively the gas molecules concentrations of CO, CO₂, NO, NO₂, N₂O, NH₃, CH₄, SO₂, H₂O, HCl and HCHO in plumes. Finally, we discuss in detail the simulated results for simulant.

Key words Pollution cloud, Model, Fourier-transform infrared spectroscopy, Column density.