

污染气体扫描成像红外被动遥测系统的检测下限研究

焦洋, 徐亮*, 高闽光, 金岭, 童晶晶, 李胜, 魏秀丽

中国科学院安徽光学精密机械研究所, 环境光学中心中国科学院环境光学与技术重点实验室, 安徽合肥 230031

摘要 红外被动遥测系统应用于污染气体监测时, 其检测下限可用噪声等效柱浓度来衡量, 该参数是表征系统灵敏度的重要指标。在污染气体红外辐射大气传输模型基础上, 推导出了噪声等效柱浓度的理论表达式, 表明其与系统噪声等效辐射通量密度、背景及污染气团辐射亮温和目标气体的吸收系数相关。以六氟化硫为示踪气体进行了实验, 计算并分析了系统在不同背景和污染气团辐射亮温环境下的检测下限, 并给出了系统噪声等效柱浓度的伪彩色分布图。结果表明, 系统噪声等效柱浓度随背景和污染气团辐射亮温的温差增大而迅速减小, 温度差为 30 K 时检测下限降至 10^{-2} ppm·m 量级, 噪声等效柱浓度分布图的生成有助于判别系统在复杂背景下的检测下限变化范围。

关键词 FTIR; 被动遥测; 噪声等效柱浓度; 亮温

中图分类号: O657.3

文献标识码: A

DOI: 10.3964/j.issn.1000-0593(2013)10-2617-04

引言

在多种污染气体远程定量探测方法中, 傅里叶变换红外光谱被动遥测技术因其无需现场采集、高分辨率和高灵敏度而被广泛应用^[1,2]。在应用过程中, 系统的检测下限取决于系统可探测到的最小污染物柱浓度, 即噪声等效柱浓度 (NECL), 该参数是研制和定量评价污染气体遥测系统的重要标准。系统对气体的探测能力可用探测到的目标云团浓度 c 和云团长度 L 的乘积 cL 来描述。在实际应用中, 常用 cL 积表征探测目标气体云团的特征, 因此 cL 又称为气体的柱数密度。系统的所能探测到的气体云团的最小柱数密度 cL 称为噪声等效浓度程长积 NECL, NECL 表示该红外光谱仪的极限探测能力, 该参数与系统的噪声等效辐射通量密度 NESR、被测污染气体的吸收率、背景与污染气团温差关系密切, 是研制和定量评价污染气体遥测系统的重要标准。Flanigan 利用大气模型和已知探测器参数, 仿真研究了低仰角天空背景下几种成分的污染云团的探测下限^[3], Roland Harig 使用傅里叶被动红外遥测系统对泄露氨气进行了遥测, 并根据实测背景和污染气团温差计算了系统针对氨气的 NECL^[4]。由于六氟化硫在中红外波段具有极高的吸收系数、稳定的化学特性和极低的大气本底值, 因而广泛用作红外被动遥测的示踪气体^[5], 为此使用自行研制的污染气体扫描成

像红外被动遥测系统以六氟化硫为示踪气体进行了遥测, 并根据遥测结果计算了不同辐射亮温环境下 NECL 的二维分布, 分析了背景辐射亮温及污染气团辐射亮温对系统 NECL 的影响。

1 原理及算法

1.1 FTIR 被动遥测原理

为了获取被动遥测时的检测下限, 首先要建立辐射传输模型。在使用红外傅里叶变换光谱仪对污染物进行被动遥测时, 考虑到污染气团与一般大气辐射特性的不同, 可建立三层辐射模型, 如图 1。

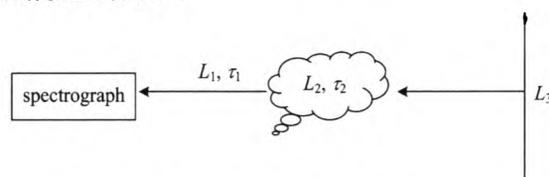


Fig. 1 Three layer model of passive remote sensing

第三层为远处背景(天空、大地、植被、建筑物)的辐射, 第二层为待测区域污染层大气的辐射, 第一层为待测区域到探测器之间的大气辐射。如果用 L 表示各层对下一层的辐射亮度贡献, 用 B 表示各层自身温度对应的黑体辐射亮度, τ

收稿日期: 2013-02-01, 修订日期: 2013-04-26

基金项目: 中国科学院战略性先导科技专项(XDB05040500), 国家自然科学基金项目(40905011, 41105022)资助

作者简介: 焦洋, 1977年生, 中国科学院安徽光学精密机械研究所博士研究生 e-mail: yjiao@aoifm.ac.cn

* 通讯联系人 e-mail: xuliang@aoifm.ac.cn

表示各层透过率, $\bar{\nu}$ 为对应的波数, 下标数字表示层数。则根据辐射传输原理, 可得第二层的辐射贡献为

$$L_2(\bar{\nu}) = (1 - \tau_2(\bar{\nu}))B_2(\bar{\nu}) + \tau_2(\bar{\nu})L_3(\bar{\nu}) \quad (1)$$

同理, 探测器通过第一层大气获取的总的辐射贡献可表示为

$$L_1(\bar{\nu}) = (1 - \tau_1(\bar{\nu}))B_1(\bar{\nu}) + \tau_1(\bar{\nu})L_2(\bar{\nu}) \quad (2)$$

在该模型中, 假设第二层中污染气团为均匀分布, 当第二层与周边环境处于热平衡时有 $B=B_1=B_2$, 实际测量时选取的波段内第一层大气的透过率 $\tau_1 \approx 1$, 将三层大气模型简化为两层模型, 由此联立(1)和(2)两式可得

$$L_1(\bar{\nu}) = (1 - \tau_2(\bar{\nu}))B(\bar{\nu}) + \tau_2(\bar{\nu})L_3(\bar{\nu}) \quad (3)$$

为了消去背景辐射对总辐射的贡献, 将式(3)左右两边同时减去 L_3 , 可得系统的有效辐射亮度为

$$\Delta L(\bar{\nu}) = (1 - \tau_2(\bar{\nu})) | (B(\bar{\nu}) - L_3(\bar{\nu})) | \quad (4)$$

其中绝对值号是为了适应背景辐射亮度大于污染气团辐射亮度的情况。

1.2 系统的 NECL

对气体的探测可用气体柱浓度来描述, 即气团浓度 c 和气团光程(厚度) L 的乘积 cL , 根据 Beer-Lambert 定律^[6]有

$$\tau(\bar{\nu}) = 10^{-\alpha(\bar{\nu})cL} \quad (5)$$

其中 α 为气体吸收系数。

系统的理论检测极限出现在 $SNR=1$ 时, 系统能够测得的气柱浓度即为 NECL, 此时式(5)可变形为

$$\tau(\bar{\nu}) = 10^{-\alpha(\bar{\nu})/NECL} \quad (6)$$

同时, 系统可测得的最小辐射亮度值即为噪声等效辐射亮度 NESR, 如下式

$$NESR = \Delta L(\bar{\nu}) \quad (7)$$

联立式(4), 式(6)和式(7), 获得了以 $SNR=1$ 为标准的系统检测下限 NECL 的表达式

$$NECL = - \frac{\lg\left(1 - \frac{NESR}{|B(\bar{\nu}) - L_3(\bar{\nu})|}\right)}{\alpha(\bar{\nu})} \quad (8)$$

对于不同的 $\bar{\nu}$, 气体的吸收系数是不同的, 为了获得理论检测下限, 式(8)中 $\alpha(\bar{\nu})$ 取峰值吸收系数, NESR 取气体浓度反演波段的标准差。式(8)的结果使用了环境温度与污染气体温度一致的近似, 所以该式的计算结果应限于在数量级上的准确度, 但这仍对衡量系统的检测下限是具有重要实用意义的。

2 实验及结果分析

实验系统如图 2 所示, 该系统由傅里叶变换红外光谱仪、卡塞格伦望远镜、CCD 摄像机、二维扫描系统和数据采集处理系统及主控计算机构成。系统单元视场由卡式望远镜确定, 望远镜口径 230 mm, 视场角为 8 mrad; 傅里叶变换红外光谱仪采集分辨率 4 cm^{-1} , 采集波段为 $4000 \sim 600 \text{ cm}^{-1}$, 探测器使用液氮制冷型 MCT 探测器; CCD 摄像机采集同方向可见光背景图, 摄像头采用 1/3 英寸 CCD 感光面, 15 倍光学变焦; 扫描系统由旋转台和俯仰台构成。

2.1 NESR 测定

使用 HFY-302B 型号黑体为黑体辐射源对 FTIR 光谱仪进行了定标, 在黑体温度为 5 和 15 °C 获取了测量谱, 并根据黑体辐射普朗克公式计算出上述温度的理论辐射亮度谱, 以 10 °C 时测量的光谱为待校准光谱, 使用两点定标法^[7]对待校准光谱进行校准。如图 3 为校准后的辐射亮度光谱与 10

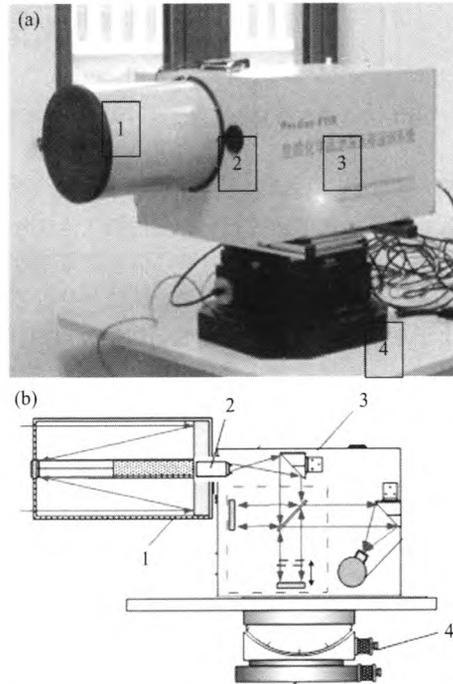


Fig. 2 (a) Scanning imaging passive remote sensing infrared system; (b) Block diagram of the system

- 1: Cassegrain telescope; 2: CCD camera;
- 3: Fourier transform infrared spectrometer; 4: Scan system

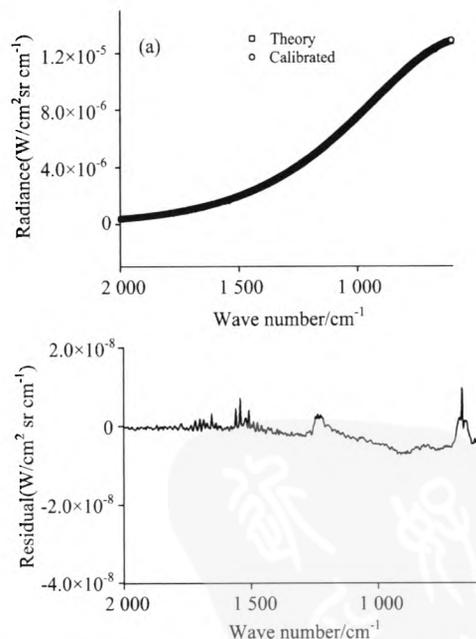


Fig. 3 (a) The theoretical spectral radiance and the calibrated spectra using two points calibration at 10°C; (b) The residual spectra

℃时的理论辐射亮度谱,在六氟化硫反演波段 900~1 000 cm^{-1} 的标准差即为所需的 NESR 值,经计算为 $5.3 \times 10^{-9} \text{ W} \cdot (\text{cm}^2 \cdot \text{Sr} \cdot \text{cm}^{-1})^{-1}$ 。

2.2 NESR 的测定

系统 NESR 确定后,根据式(8)还需确定 $|B(\bar{\nu}) - L_3(\bar{\nu})|$ 和 $\alpha(\bar{\nu})$ 。 $|B(\bar{\nu}) - L_3(\bar{\nu})|$ 通过从测量光谱 L_1 中实时提取背景辐射亮度光谱和污染气团辐射亮度光谱的算法获得。如图 4 所示为某点的测量光谱和生成的背景及污染气团光谱。这两条生成的辐射亮度光谱在六氟化硫吸收峰 947 cm^{-1} 处之差即为 $|B(\bar{\nu}) - L_3(\bar{\nu})|$ 。式中 $\alpha(\bar{\nu})$ 为反演波段的六氟化硫最大吸收系数(从商用标准谱获得,在浓度反演波段的最大值为 $0.0323 \text{ ppm}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$)。

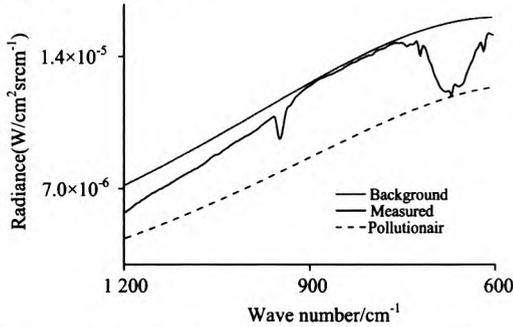


Fig. 4 The measured spectra and the generated background spectra and pollution air spectra

探测背景为 285 m 远处的环境背景,背景中包含建筑物和植被,使用压力容器释放的六氟化硫作为目标气体,扫描点数为 9×4 共 36 个。为了方便比较,使用更加直观的物理量辐射亮温来描述获取的数据。辐射亮温值可由校准后的辐射亮度光谱应用普朗克公式反函数获得。

图 5 显示了被测区域的背景辐射亮温分布,图像为可见光系统采集的背景区域,色块部分为红外系统扫描区域。图中最高背景辐射亮温为 300.61 K,位于背景中的红色砖墙处,分析应为太阳光照射升温所致。最低背景辐射亮温为 274.15 K,位于背景中的绿色植被区域,分析应为植被叶片较高的表面反射率所致。因为污染气团辐射亮温波动很小,检出值稳定在 283~284 K,所以背景辐射亮温和污染气团辐射亮温差值的分布与图 5 趋于一致。在获取了背景和污染气



Fig. 5 False color image of the brightness temperature distribution background with the color scale of the brightness temperature from 284 to 300 K

团辐射亮温的分布后,应用式(8)计算每一扫描点的 NECL,即可获得扫描区域上的 NECL 分布,图 6 显示了系统针对本次探测的 NECL 分布图,这对于扫描成像式的污染物被动遥测系统的性能衡量具有重要意义。从图 5 和图 6 中可发现在污染气团辐射亮温变化不大的情况下,背景辐射亮温越高,系统的探测下限值越小,即有效探测能力越高。NECL 的最大值和最小值相差 2 个数量级,说明背景温度与污染气团温度对系统检测下限的影响较大。



Fig. 6 False color image of NECL with the color scale of the NECL from 0.03 to 0.94 $\text{ppm} \cdot \text{m}$

2.3 NESR 随辐射亮温的变化

从式(8)可以看出,系统针对某种气体的理论检测下限由背景辐射亮度、污染气体辐射亮度和污染气体最大吸收系数决定。为了考察背景辐射亮温和污染气团亮温变化对 NECL 的影响,根据普朗克辐射公式使用辐射亮温作为自变量替代辐射亮度,将式(8)变型为

$$\text{NECL} = \frac{\lg\{1 - [2hc^2 \bar{\nu}^3 | (\exp(\frac{hc}{kT_2}) - 1)^{-1} - (\exp(\frac{hc}{kT_3}) - 1)^{-1} |]^{-1}\}}{\alpha(\bar{\nu})} \quad (9)$$

式中 T_2 为污染气团辐射亮温, T_3 为背景辐射亮温。考虑到探测环境温度一般在 $0 \sim 30 \text{ }^\circ\text{C}$,将式中 T_2 和 T_3 的取值范围确定为 $273 \sim 303 \text{ K}$,温度间隔取 1 K ,图 7 显示了针对这一温度区间,系统对六氟化硫探测时 NECL 的变化规律。从图中可看出,随着背景辐射亮温和污染气团辐射亮温的趋近,

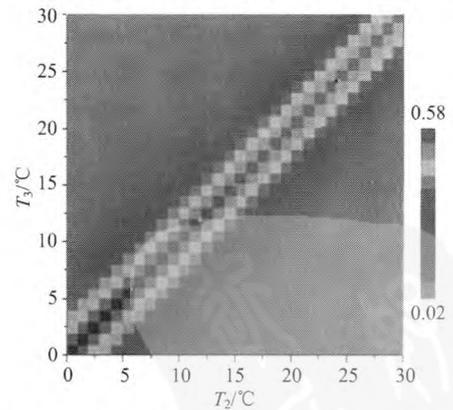


Fig. 7 The value of NECL under different backgrounds and pollution gas brightness temperature, with the color scale of NECL from 0.02 to 0.58 $\text{ppm} \cdot \text{m}$
NECL 值急剧上升。理论上,如果背景辐射亮温和污染气团

辐射亮温无穷接近, 则 NECL 值为无穷大, 符合傅里叶变换红外被动遥测的原则, 即必须存在污染气团和背景的温差才能实现有效探测。当温差为 1 K 时, 系统 NECL 为 $0.58 \text{ ppm} \cdot \text{m}$; 温差为 30 K 时, 系统 NECL 下降到 $10^{-2} \text{ ppm} \cdot \text{m}$ 量级。图中温度间隔取仅为 1 K, 以目前傅里叶变换红外光谱仪的最小温度分辨率在 10^{-2} K 数量级来计算, 若温差达到温度最小分辨率且由温差造成的计算辐射亮度差不小于 NESR 的情况下, NECL 值将达到 $10^2 \text{ ppm} \cdot \text{m}$ 量级, 这样的变化幅度在实际检测中必须注意。由于背景辐射亮温和污染气团辐射亮温可以根据测量值实时提取, 所以系统对每一个扫描点的 NECL 也可实时计算出来, 为检测系统的浓度反演值的置信区间下沿提供了实时参考值, 对降低系统的虚警概率具有实用价值。需要注意的是, 将公式中的吸收系数换成其他气体参数, 即可考察该系统对其他气体的检测下限。

References

- [1] Harig R, Keens A, Rusch P, et al. Proceedings of SPIE, 2010, 7695: 7695B-1.
- [2] Sabbah S, Ruscha P, Gerharda J-H. Proceedings of SPIE, 2010, 8186: 81860S-1.
- [3] Flanigan D F. Applied Optics, 1996, 35(30): 6090.
- [4] Roland H, Gerhard M. Analytical Chemistry and Technology, 2001, 5(1-2): 75.
- [5] George F, Collins, Frederiek E. Journal of the Air Pollution Control Association, 1965, 3: 15.
- [6] Casetellan G W. Physical Chemistry, 2nd ed, Mass: Addison-Welsey, 1971. 807.
- [7] FENG Ming-chuo, XU Liang, GAO Min-guang(冯明春, 徐亮, 高闽光). Infrared Technology(红外技术), 2012, 34: 366.

Investigation of the Limit of Detection of an Infrared Passive Remote Sensing and Scanning Imaging System for Pollution Gas

JIAO Yang, XU Liang*, GAO Min-guang, JIN Ling, TONG Jing-jing, LI Sheng, WEI Xiu-li

Key Lab of Environment Optics and Technology, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China

Abstract NECL could be used to estimate the limit of detection of the infrared passive remote sensing system. It was an important indicator of the sensitivity of the system. The theoretical equation of the NECL according to the atmospheric infrared radiation transfer model showed that NECL related to NESR, the brightness temperature of background and pollution gas, and the absorption coefficient of pollution gas. The remote sensing of SF₆ was done. The limit of detection of the system at the different brightness temperature of background and pollution gas could be calculated. False color image of NECL was given from the measured data. The results show that NECL decreases rapidly by increasing the difference in brightness temperature of the background and pollution gas, the value of NECL was down to 10^{-2} order of magnitude when the brightness temperature difference was equal to 30 K. False color image of NECL contributes to the discrimination of the limit of detection of the system in the complex background.

Keywords FTIR; Passive remote sensing; NECL; Brightness temperature

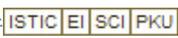
(Received Feb. 1, 2013; accepted Apr. 26, 2013)

* Corresponding author

污染气体扫描成像红外被动遥测系统的检测下限研究

作者: [焦洋](#), [徐亮](#), [高闽光](#), [金岭](#), [童晶晶](#), [李胜](#), [魏秀丽](#), [JIAO Yang](#), [XU Liang](#), [GAO Min-guang](#),
[JIN Ling](#), [TONG Jing-jing](#), [LI Sheng](#), [WEI Xiu-li](#)

作者单位: [中国科学院安徽光学精密机械研究所, 环境光学中心中国科学院环境光学与技术重点实验室, 安徽合肥 230031](#)

刊名: [光谱学与光谱分析](#) 

英文刊名: [Spectroscopy and Spectral Analysis](#)

年, 卷(期): 2013, 33(10)

本文链接: http://d.g.wanfangdata.com.cn/Periodical_gpxygpx201310006.aspx

