

污染气体扫描成像红外被动遥测系统实时 数据处理研究*

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, 中国科学院环境光学与技术重点实验室, 合肥 230031)

(2012年12月14日收到; 2013年3月23日收到修改稿)

使用红外被动遥测技术可实现污染气体的远程监控和预警. 该技术应用过程中, 获取背景辐射是进行定量解析的关键, 在已有的应用中, 多采用同条件测量法和上风测量方法获取背景光谱和环境光谱, 但这些方法均需要提前或者同时测量无目标物的背景光谱, 难以在实际应用中满足快速响应的需求. 本文基于红外辐射传输模型分析, 通过研究在 $800\text{--}1200\text{ cm}^{-1}$ 波段内的实测光谱中同时包含目标、背景和环境辐射的基本原理, 采用了一种不需要事先测量背景的目标特征的背景光谱实时提取算法, 通过将该方法应用于自主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, 开展了遥测验证实验. 将获取的浓度数据与应用同条件测量法获取的数据进行了比较, 结果显示两者的相关系数平方值达到 0.99, 表明该方法切实可行, 可有效提高系统的响应速度和适用范围.

关键词: 傅里叶变换红外光谱, 被动遥测, 实时光谱提取算法

PACS: 07.88.+y, 42.30.Va, 07.07.Df, 42.88.+h

DOI: 10.7498/aps.62.140705

1 引言

傅里叶变换红外光谱 (FTIR) 遥测技术是近年来迅速发展起来的一种综合性探测技术, 因其无须采集样品、高灵敏度和高分辨率而广泛应用在污染气体远程定量探测中^[1], 该技术主要分为主动和被动两种方式^[2], 被动遥测不需人工红外光源, 因此其具有机动、快速和易操作等特点, 并且遥测距离更长. 傅里叶变换红外光谱被动遥测技术主要应用于地基太阳光谱 FTIR 测量^[3,4]、热烟羽和化学蒸气云团的 FTIR 被动测量^[5,6]、突发性气体污染事件^[7]. 应用傅里叶红外被动遥测方法时, 获取背景光谱是进行污染物特征提取和定量解析的前提. 但是被动遥感中探测的是目标气体自身以及周围环境背景的红外辐射, 其背景的扣除方法较为复杂, 目前有多种方法可供使用. Theriault 等^[8] 使用测量

同条件下无污染气体的背景光谱的方法, 该方法实现简单, 但是时效性较低, 无法达到需求中快速响应的目的; Dennis^[9] 和 Wayne 等^[10] 分别利用中分辨率大气辐射传输模式 (MODTRAN) 和逐线计算的大气传输软件 (FASCODE) 根据测量环境模拟生成了背景辐射光谱, 该方法虽然避免了对无污染背景的实测, 但仅能模拟低仰角下的天空背景, 适用范围较小. 高闽光等^[11] 采用测量热烟羽上风背景光谱的方法, 该方法需要背景测量具有和污染气体测量尽量接近的时间和区域. 本文采用了一种从测量光谱中实时提取光谱的算法, 可以从对污染气体的测量光谱中实时提取出背景光谱和目标区域大气辐射亮度光谱, 实现了对污染气体的实时被动遥测, 并将浓度反演结果与位置分布参数结合, 最终获得以伪彩色图像的方式实时直观显示的污染分布图, 拓展了遥测系统的适用范围.

* 中国科学院战略性先导科技专项 (B 类)(批准号: XDB05040500) 和国家自然科学基金 (批准号: 40905011) 资助的课题.

[†] 通讯作者. E-mail: xuliang@aiofm.ac.cn

2 原理及算法

2.1 基本测量原理

红外探测器视场内的大气,在视场的径向路径上可看做多层均质层,见图 1.

每一层在局部热力学平衡的条件下都接收到前一层的辐射并对下一层输出辐射,则第 i 层输出的光谱辐射亮度 L_i 可表示为^[12]

$$L_i = (1 - \tau_i)B_i + \tau_i L_{i+1}, \quad (1)$$

式中 τ_i 为第 i 层的大气透过率, B_i 为等于 i 层温度的黑体辐射亮度, L_{i+1} 为前一层输出的光谱辐射亮度,由 (1) 式可见每层的输出包含了自身的辐射和前一层的辐射贡献. 在使用 FTIR 方法对污染物进行被动遥测时,考虑到污染物与一般大气辐射特性的不同,可将多层模型简化为三层辐射模型,如图 2.

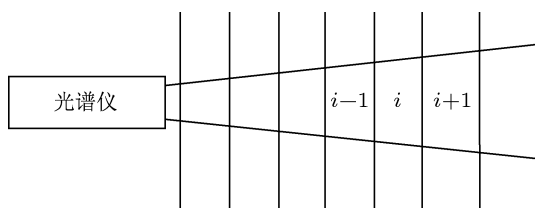


图 1 被动遥测多层模型

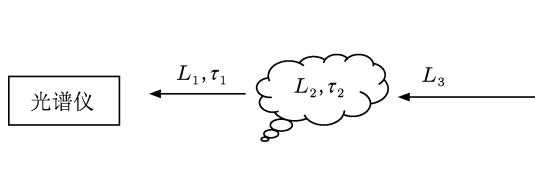


图 2 被动遥测三层模型

图 2 中第三层为远处背景(天空、大地、植被、建筑物)的辐射 L_3 , 第二层为目标区域污染层大气的辐射 L_2 , 第二层透过率为 τ_2 , 第一层为目标区域到探测器之间的大气辐射 L_1 , 第一层透过率为 τ_1 .

根据辐射原理, 如果用 L_3 表示作为背景的第三层辐射亮度, 则由 (1) 式可得第二层的辐射亮度为

$$L_2 = (1 - \tau_2)B_2 + \tau_2 L_3. \quad (2)$$

同理, 通过第一层大气传递给探测器的最终辐射亮度可表示为

$$L_1 = (1 - \tau_1)B_1 + \tau_1 L_2. \quad (3)$$

联立 (2), (3) 两式, 可推导出关键参数污染层大气的透过率 τ_2 的表达式为

$$\tau_2 = \frac{L_1 - \tau_1 B_2 - (1 - \tau_1)B_1}{\tau_1(L_3 - B_2)}. \quad (4)$$

在该模型中, 假设第二层中污染物为均匀分布, 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 $\tau_1 \approx 1$, 由以上两个条件 (4) 式可简化为

$$\tau_2 = \frac{L_1 - B}{L_3 - B}. \quad (5)$$

至此, 从 (5) 式中可看出要计算出透过率, 需要获得 L_1 , B 和 L_3 , 其中探测器最终接收到的辐射亮度 L_1 可由探测器测出相对辐射量后经定标修正后获得, 等于待测区域温度的黑体辐射亮度 B 和背景辐射亮度 L_3 的获得则有多种方法. 计算出透过率后即可通过浓度反演算法反演目标区域污染气体的柱浓度.

2.2 等于目标气体层温度的黑体辐射亮度 B 和背景辐射亮度 L_3 的获取

目前较为常用的一种方法是在假定热平衡的条件下, L_3 和 B 可分别由测量同条件下的背景辐射亮度和测量室温下的黑体辐射亮度获得, 对被动式 FTIR 测量而言, 只有当测量到的目标气体辐射的等效辐射温度与背景光谱等效辐射温度之差大于仪器的光谱噪声等效温差 ($NE\Delta T$) 时, 才能定性定量的遥测大气中的待测污染物. 等效辐射温度由普朗克公式给出:

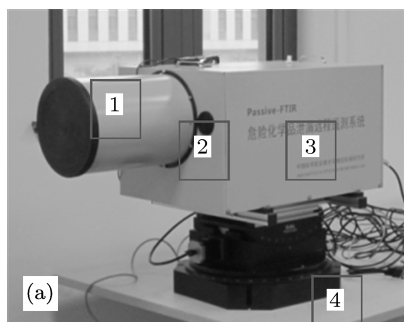
$$T(\nu) = hc\nu / \ln \left(\frac{L + 2hc^2\nu^3}{L} \right) k, \quad (6)$$

式中 h 为普朗克常数, c 为光速, k 为玻尔兹曼常数, ν 为波数表示的辐射频率. 这种方法的优势在于数据处理简单, 所需数据均通过实测获得. 在前期研究发表的文献 [13] 中正是基于此方法获得了较为满意的数据. 但是在实际应用中, 很多情况下没有条件单独测量背景辐射亮度和室温下的黑体辐射亮度, 这时就需要有一个不依赖前期辐射测量的数据处理方法.

本文采用的方法正是一种从测量光谱 L_1 中实时提取背景辐射亮度光谱和等于目标气体层温度的黑体辐射亮度光谱的算法. 在 $800\text{--}1200\text{ cm}^{-1}$ 波段大气透过率很高, 可看作透明. 同时很多自然背景例如建筑物外墙、森林植被等在该波段都具有一个较高且几乎不变的发射率, 所以背景在测量光谱的亮温谱中表现为一个恒定的基线, 由该基线所对应的辐射亮温即为背景温度, 因此可用与该温度相同的黑体辐射亮度光谱来模拟背景光谱 L_3 . 对于长度大于 100 m 的测量光程, 在 $650\text{--}690\text{ cm}^{-1}$ 波段附近由于 CO_2 的吸收累积效应, 大气可看作是不透明的, 因此在这个波段的光谱对应的亮温谱上的最低温度可认为仅由待测区域目标大气温度贡献, 同温度的黑体辐射亮度即为 B .

获得透过率光谱后, 可以使用 Beer-Lambert 定律对其进行反演获取污染气体的柱浓度 [14]. 反演的基本原理是通过多次迭代运算, 使得透过率光谱与通过标准数据库计算出的光谱之间有最小的均方差, 表达式为

$$\chi^2 = \sum_{\nu} (\tau'(\nu) - \tau(\nu))^2 = \min, \quad (7)$$



其中 $\tau'(\nu)$ 为多次迭代后计算出的透过率光谱, $\tau(\nu)$ 为根据测量结果计算出的透过率光谱. (7) 式成立时所采用的柱浓度参数即为反演结果.

3 实验装置

实验系统如图 3 所示, 扫描成像式红外被动遥测系统由 FTIR 光谱仪、卡塞格伦式望远镜、CCD 摄像头, 扫描系统和数据采集处理系统构成. 系统凝视视场由卡式望远镜确定, 望远镜口径 230 mm 视场角为 8 mrad ; FTIR 光谱仪光谱分辨率设置为 4 cm^{-1} , 采集波段设置为 $4000\text{--}600\text{ cm}^{-1}$, 探测器为液氮制冷型 MCT 探测器, 可见光背景图由 CCD 摄像头采集, 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; 数据采集处理系统软件控制扫描机构运转, 并连接光谱仪和摄像头实时采集光谱数据和可见光视场图像, 进行分析计算最终反演出视场范围内的目标气体浓度分布图.

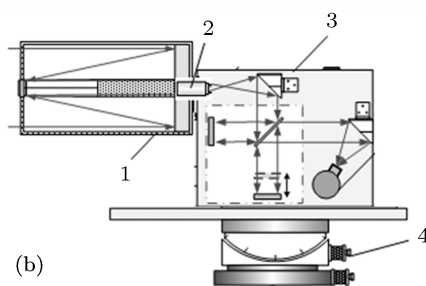


图 3 (a) 扫描成像式红外被动遥测系统 1, 卡塞格伦式望远镜; 2, CCD 摄像头; 3, FTIR 光谱仪; 4, 扫描机构; (b) 系统结构图

4 实验结果与讨论

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, 目标气体为压力容器中释放的六氟化硫气体, 扫描点数为 9×4 共 36 个. 首先在实验室中对仪器进行定标, 获取定标参数. 根据实测大气环境温度 $11.5\text{ }^\circ\text{C}$ 测量了该温度下的黑体辐射光谱, 目标气体释放前测量了背景辐射光谱. 目标气体在位于探测器 280 m 远处释放. 计算了目标区域六氟化硫气体的透过率谱, 最后利用非线性最小二乘法反演透过率谱获得目标区域六氟化硫气体

的柱浓度.

4.1 实验仪器定标

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 $5\text{ }^\circ\text{C}$, $15\text{ }^\circ\text{C}$ 测量了辐射谱, 并根据黑体辐射普朗克公式计算出上述温度的理论辐射谱, 以 $10\text{ }^\circ\text{C}$ 时测量的光谱为待校准光谱 $s(\nu)$, 根据两点定标法 [15] 对待校准光谱进行修正, 最后计算了理论谱线和修正后的校准谱线之间的残差, 结果见图 4.

由图 4 可知, 校准谱和理论谱符合得很好, 两

者的残差谱在长波和短波段都非常平稳,且远小于系统的噪声等效辐射亮度,说明该定标方法能较好地对待校准光谱进行定标,为下一步准确获得透过率谱提供了必要条件.

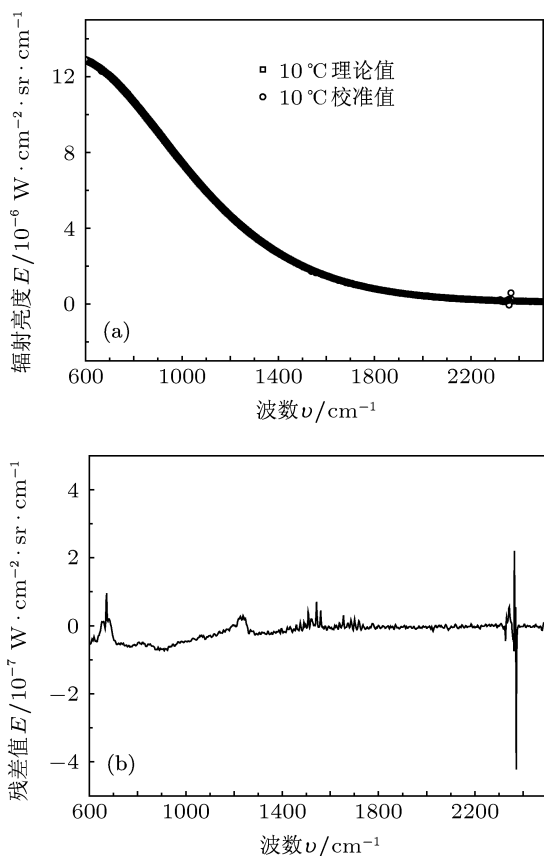


图4 (a) 使用两点法对 20 °C 定标的理论谱和校准谱; (b) (a) 图中理论谱和校准谱的残差谱

4.2 获取待测区域污染气体透过率谱并进行浓度反演

通过对实测光谱进行定标后,为了提取背景辐射亮度光谱和等于目标气体层温度的黑体辐射亮度,在 600—1200 cm^{-1} 波段对每一点通过普朗克辐射公式反推辐射亮温,式中 ν 的单位为 cm^{-1} :

$$T(\nu) = \frac{1.44\nu}{\ln\left(\frac{1.19 \cdot 10^{-12}(\nu^3 + 8.4 \cdot 10^{11}L(\nu))}{L(\nu)}\right)} \quad (8)$$

某扫描点测得光谱经定标后利用 (8) 式计算出的辐射亮温谱如图 5 所示,在 650—690 cm^{-1} 波段可见明显的 CO_2 吸收,该段最低辐射亮温为 284 K,在 800—1200 cm^{-1} 波段有最高辐射亮温 304.5 K,其中在 950 cm^{-1} 波段附近可见明显的六氟化硫特征吸收.因此分别取温度为 284 K 和 304.5 K 的黑

体辐射亮度曲线作为等于目标大气温度的黑体辐射亮度光谱和背景辐射亮度光谱,见图 6.

根据由 (4) 式简化获得的 (5) 式可计算出目标区域六氟化硫气体的透过率光谱,针对简化的两个前提条件需要说明的是: 1) 当目标气体与周围环境未达到热平衡时,文中实时提取等于目标气体层温度的黑体辐射亮度光谱算法不再适用,此时可通过分析目标气体分子转动振动光谱结构特征获取其温度值并反演出所需光谱,这部分研究将在后续工作中开展; 2) 使用 MODTRAN 计算了实验环境下的大气透过率谱,计算条件为高度 10 m,水平传输距离 285 m,温度 11 °C,计算结果表明在 800—1200 cm^{-1} 波段透过率非常均匀,浓度反演波段均值为 0.98,标准差为 0.027,根据比尔定律估算出此时取透过率近似为 1 对浓度反演结果影响小于 1%.

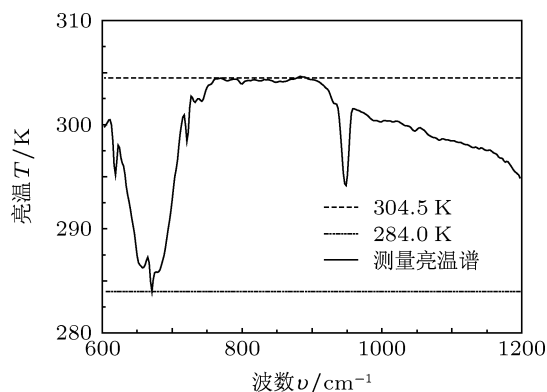


图5 测量光谱的亮温谱和相应最高和最低温度的黑体亮温谱

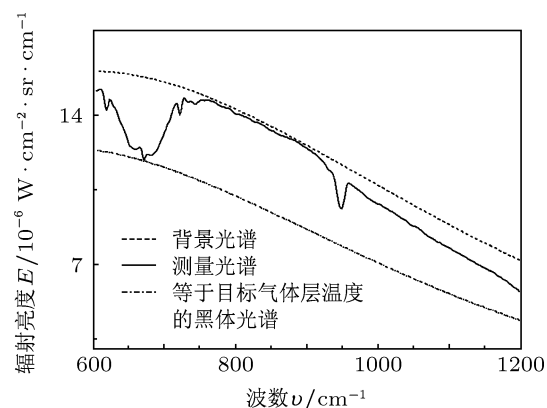


图6 测量的辐射亮度光谱,用最高和最低亮温黑体辐射亮度光谱生成的背景辐射亮度光谱和等于目标气体层温度的黑体辐射亮度光谱

在图 7 中 950 cm^{-1} 波段附近可见明显的六氟化硫特征吸收峰.使用非线性最小二乘法对该

透过率光谱在 $900\text{--}1000\text{ cm}^{-1}$ 波段内进行浓度反演计算, 经过 10 次迭代后获得拟合谱与实测光谱的最小均方差, 其值为 2.1%, 浓度反演结果为 10.2 ppm/m . 图 7 为透过率谱、反演后获得的拟合谱及残差谱, 如图所见残差值较小, 拟合结果与测量光谱吻合良好. 表 1 为行方向 9 个探元、点列方向 6 个探元形成共 36 个测量点, 根据测量结果反演后获得的浓度数据列表, 单位为 ppm/m .

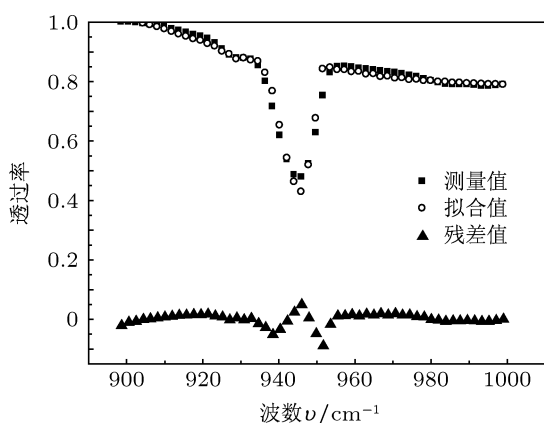


图 7 透过率谱、反演计算后的拟合谱和两者的残差谱

图 8 所示为红外被动扫描获得的原始浓度数据分布伪彩色图与背景图像的融合图, 以及对原始

数据进行 3 次双线性插值后做出的融合图. 从图 8(a) 和 (b) 的对比效果可见, 若探测器视场角不足够小的情况下, 对原始数据进行插值后再做出的伪彩色图可提高图中污染气体的分布态势可见性. 图中红色表示较高柱浓度, 蓝色表示较低柱浓度, 色度表见图右侧. 该融合图将柱浓度数据以可视化方式呈现在可见光背景图中, 能够非常清晰直观地获知目标气体浓度分布态势. 图中可见目标气体自视场左侧向右下侧扩散, 符合测试现场风向条件及目标气体密度大于空气的特征, 同时压力容器释放口可见较高目标气体柱浓度. 由此表明该系统应用于气态污染物分布态势遥测方面有良好的直观性.

为了验证该算法的有效性, 将使用该方法获取的数据与前期工作所得数据进行了比较. 在前期工作中采用了将同条件下的测量的背景辐射亮度和测量环境温度下的黑体辐射亮度光谱作为 L_3 和 B 的方法, 本文通过实时提取算法获得的气体层温度 284 K , 与当时实测环境温度 284.5 K 结果较为接近, 但稍偏低, 我们认为是由于系统误差导致. 图 9 为浓度反演波段实测的背景光谱与实时算法提取出的背景光谱, 两条光谱的线性相关系数平方值为 0.99, 说明在浓度反演波段实时提取背景光谱的算法可以有效取代对背景光谱的实测.

表 1 反演后获得的浓度数据表 (单位 ppm/m)

垂直	水平	1	2	3	4	5	6	7	8	9
	1	1.10	2.45	2.51	0.80	17.96	7.02	1.16	1.77	0.03
2	52.35	5.42	9.01	119.25	3.17	0.17	0.04	0.64	0.17	
3	10.20	7.38	89.09	57.18	74.39	54.75	17.86	0.44	17.13	
4	2.32	0.35	0.04	0.03	0.01	0.01	1.65	0.02	0.01	

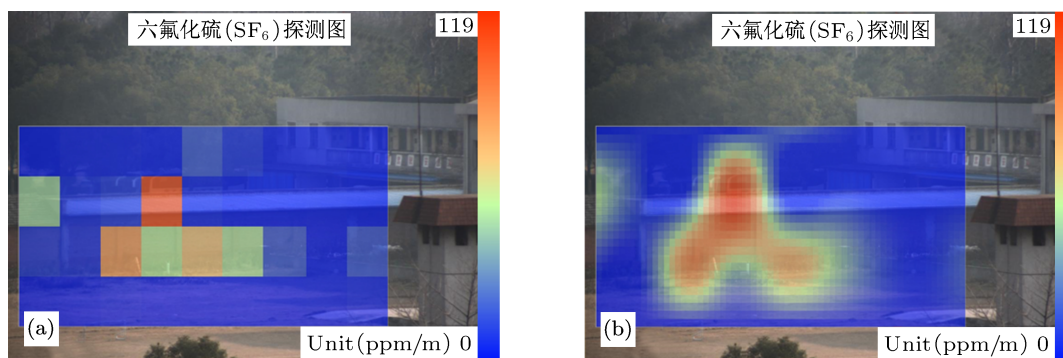


图 8 浓度分布伪彩色图与背景图像的融合图, 色度表值为 0.01 到 119.25 (a) 原始数据图; (b) 插值图

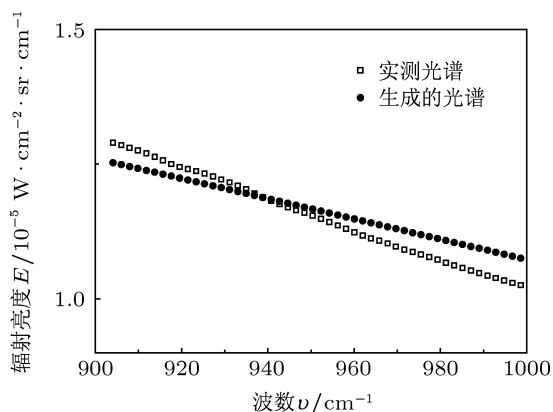


图9 实时光谱提取算法提取出的背景辐射亮度光谱和同条件下实测的背景辐射亮度光谱

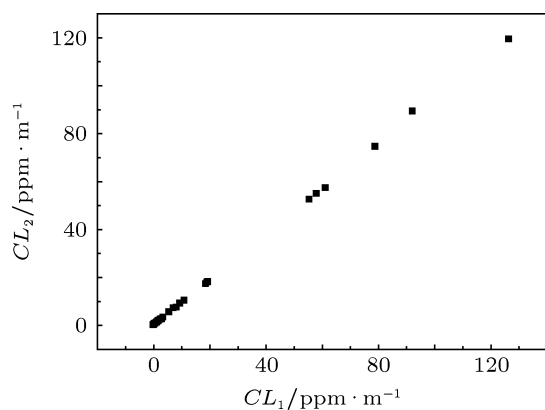


图10 使用实时提取光谱算法反演出的浓度值 CL_1 与使用实测背景光谱反演出的浓度值 CL_2 的线性比较图

将浓度反演算法获得的各扫描点柱浓度数据与前期工作所得柱浓度数据做逐点线性比较,如图10横坐标为使用实测光谱方法反演获得的各点柱浓度 CL_1 ,纵坐标为使用实时提取光谱算法获得的各点柱浓度 CL_2 ,两者线性相关系数平方值达到0.99.

5 结论

以上讨论表明,应用污染气体扫描成像红外遥测系统中的实时光谱提取算法可实时提取背景辐射亮度光谱和目标区域大气辐射亮度光谱,提取出的背景光谱与实测背景光谱在浓度反演波段相关系数平方值达到0.99,提取出的目标区域大气光谱的辐射亮温与实测温度差距小于1 K,最终浓度反演值数据列与实测光谱方法获取的数据列相关系数平方值达到0.99.这种方法不需要实时测量背景,在热平衡条件下,利用二层辐射传输假设,使得系统在测量中直接获取背景温度,从而提高了污染气体扫描成像红外被动遥测系统的响应速度和适用范围,在突发性气态污染事件快速应对方面有广泛应用前景.

- [1] Zander R, Roland G, Delbouille L, Sauval A, Farmer C B, Norton R H 1987 *J. Atmosph. Chem.* **5** 395
- [2] Flanigan D F 1986 *Appl. Opt.* **25** 4253
- [3] Liu X, Murcray F J, Murcray D G, Russell J M 1996 *J. Geophys. Res.* **101** 10175
- [4] Liu Z M, Liu W Q, Gao M G, Tong J J, Zhang T S, Xu L, Wei X L, Jin L, Wang Y P, Chen J 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 5397 (in Chinese) [刘志明, 刘文清, 高闽光, 童晶晶, 张天舒, 徐亮, 魏秀丽, 金岭, 王亚萍, 陈军 2010 物理学报 **59** 5397]
- [5] Herget W F, Brasher J D 1980 *Opt. Eng.* **19** 508
- [6] Heland J, Schäfer K 1997 *Appl. Opt.* **36** 4922
- [7] Worden H, Beer R, Rinsland C P 1997 *J. Geophys. Res.* **102** 1287
- [8] Theriault J, Puckrin E, Lavoie H, Turcotte C S, Bouffard F, Dube D 2004 *Proc. SPIE* **5584** 100
- [9] Flanigan D F 1996 *Appl. Opt.* **35** 6090
- [10] Wayne F, Evans J, Puckrin E, McMaster D 2002 *Proc. SPIE* **4574** 44
- [11] Gao M G, Liu W Q, Zhang T S 2006 *Spectrosc. Spec. Anal.* **26** 47 (in Chinese) [高闽光, 刘文清, 张天舒 2006 光谱学与光谱分析 **26** 47]
- [12] Cao T T, Luo S R, Zhao X Y, Liang H M, Wang H B, Yang J G 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 5554 (in Chinese) [曹婷婷, 罗时荣, 赵晓艳, 梁慧敏, 王宏波, 杨经国 2007 物理学报 **56** 5554]
- [13] Jiao Y, Xu L, Gao M G, Feng M C, Jin L, Tong J J, Li S 2012 *Spectrosc. Spec. 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]
- [14] Liu Z M, Liu W Q, Gao M G, Tong J J, Zhang T S, Xu L, Wei X L 2008 *Chin. Phys. B* **17** 4184
- [15] Feng M C, Xu L, Gao M G, Jiao Y, Li X X, Jin L, Cheng S Y, Tong J J, Wei X L, Li S 2012 *Infrared Technology* **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]

Real-time data processing of remote measurement of air pollution by infrared passive scanning imaging system*

Jiao Yang Xu Liang[†] Gao Min-Guang Jin Ling Tong Jing-Jing
Li Sheng Wei Xiu-Li

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

(Received 14 December 2012; revised manuscript received 23 March 2013)

Abstract

Infrared passive remote sensing allows remote monitoring and early warning of air pollution. The key to the quantitative resolution is to obtain the background radiation in application process. The existing methods (such as measuring the background and atmosphere radiance spectrum in the same condition or uptake) need in advance or at the same time to measure the background spectrum without target. So, they are difficult to satisfy the demand for rapid response in the practical application. According to the infrared radiation transmission model analysis and by studying the principle of measured spectrum in the 800–1200 cm^{-1} band containing the target, background and environmental radiation, we propose a real-time spectrum extraction algorithm that does not require to measure the background target feature. The method is applied to the developed polluting gas scanning imaging passive FTIR system. The remote sensing of SF_6 is done. Concentration data and the data obtained by the method at the same condition are compared, and the results show that the correlation coefficient squared value reaches 0.99, indicating that the method is feasible, which can effectively improve the response speed of the system and the scope of application.

Keywords: Fourier transform infrared spectroscopy, passive remote sensing, real-time spectrum extraction algorithm

PACS: 07.88.+y, 42.30.Va, 07.07.Df, 42.88.+h

DOI: 10.7498/aps.62.140705

* Project supported by the Strategic Priority Research Program(B) of the Chinese Academy of Sciences (Grant No. XDB05040500) and the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 40905011).

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