

基于多帧背景的泄漏气体自适应匹配滤波检测

胡运优^{1,2}, 徐亮^{1*}, 徐寒杨¹, 沈先春¹, 孙永丰¹, 徐皖珪^{1,2}, 邓亚颂^{1,2}, 刘建国¹, 刘文清¹

1. 中国科学院合肥物质科学研究院, 安徽光学精密机械研究所, 环境光学与技术重点实验室, 安徽 合肥 230031
2. 中国科学技术大学, 安徽 合肥 230026

摘要 被动傅里叶变换红外(FTIR)扫描遥测成像系统采集的红外高光谱图像具有空间、光谱等维度信息, 可被用于大气环境中有毒有害气体的识别、定量及可视化。该系统具有光谱分辨率高、非接触式及远距离探测等优点, 然而其单帧图像的像元数量少且部分存在气体吸收或发射特征, 无法直接用于红外高光谱图像的目标检测。提出了基于多帧背景的泄漏气体自适应匹配滤波(AMF)检测方法, 以短时间内、同一区域的多帧红外高光谱图像为基础, 筛选出无目标气体特征的背景光谱并计算探测区域的背景最大似然估计, 应用于后续帧的目标气体泄漏检测。红外高光谱图像来自于 SF₆ 气体的遥测实验, 共扫描四帧(120 像元/帧), 去除前三帧内含有目标气体特征的像元光谱, 剩余背景光谱被用于计算背景的最大似然估计, 第四帧红外高光谱图像逐像元对 SF₆ 气体进行的 AMF 检测, 并与非线性最小二乘法反演的 SF₆ 柱浓度图像比对, 结果表明 AMF 检测高值与柱浓度高值有较强的相关性。为验证多帧背景在不同空间检测方法下的性能, 分别对该帧数据进行了基于正交子空间的自适应子空间检测(ASD)、基于混合空间的自适应余弦检测(ACE)及基于斜子空间的最大似然比检测(OGRLT), 并分别与 SF₆ 柱浓度图像比对, 结果表明多帧背景适用于不同空间的检测方法。此外, 为验证存在目标气体吸收特征的非背景光谱对背景空间的影响, 向背景空间中加入多条含有 SF₆ 气体吸收特征的光谱, 通过 ROC 曲线检验, 结果表明背景空间中混入目标气体特征会降低 AMF 方法的检测性能。AMF 检测值的假彩色图像也能应用于被动 FTIR 扫描遥测成像系统, 相较于柱浓度假彩色图像, 泄漏源及扩散趋势更为明显。基于红外高光谱图像的检测方法依赖于整体背景的统计特性, 相较于单像元光谱波段的反演算法, 极大地降低了背景的依赖性。多帧背景下的 AMF 泄漏气体检测方法能很好地应用于被动 FTIR 扫描遥测成像系统上并满足在线监测要求。

关键词 傅里叶变换红外光谱技术; 扫描遥测; 气体泄漏; 自适应检测

中图分类号: TP722.5 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3964/j.issn.1000-0593(2022)10-3307-07

引言

化工用品在生产、存储、运输及使用等过程中突发性事故时有发生, 特征气体泄漏监测及预警则是预防危害事故发生的有效手段之一。传统点探测仪器与普通红外热像仪已经无法满足常态化监测的需求, 而傅里叶变换红外光谱技术^[1-3]具有非接触式远距离测量、响应速度快、灵敏度和光谱分辨率高等优点, 被动 FTIR 遥测系统与二维扫描系统相结合^[4-6], 可对监测区域进行阵列扫描, 获取到具有空间分辨率和光谱高分辨率的数据立方体, 该数据立方体存在空

间、温度和光谱三重信息, 为气体泄漏监测提供预警信息。

在波段 8~14 μm 之间, 大气对红外能量的吸收作用较弱, 是大气红外窗口, 也是绝大多数气体的指纹区。实际工程应用中, 各种算法^[2, 7]被研究出来抑制红外背景信息, 以提取泄漏气体的光谱特征, 从而进行有效的定性或定量分析, 这是泄漏气体红外遥测技术应用的关键。然而这类方法对测量光谱的分析过度依赖于像元相对应的背景光谱, 各个测量光谱之间的分析是近乎独立的。为了降低对背景特征的过度依赖性, 诸多对红外高光谱数据立方体的目标检测算法被提出并被用于气体泄漏检测。

假设待测的泄漏气体光谱特征是已知的, 上述的泄漏气

收稿日期: 2021-08-31, 修订日期: 2021-12-28

基金项目: 国家自然科学基金专项项目(41941011), 中国科学院前沿科学重点研究项目(QYZDY-SSW-DQC016)和国家重点研发计划项目(2016YFC0803001)资助

作者简介: 胡运优, 1995 年生, 中国科学院合肥物质科学研究院博士研究生 e-mail: yyhu@aiofm.ac.cn

* 通讯作者 e-mail: xuliang@aiofm.ac.cn

体识别或定量问题转化为目标气体信号的检测问题。Manolakis 等研究了自适应检测算法在红外高光谱图像中的应用^[8-11], 提出了基于 MF 和 ACE 的自动化检测化学战剂的理论框架和评估方案^[10], 降低了对背景的依赖性, 对移动和固定平台的探测提供了灵活性支持, 并被应用于 Telops FIRST 高光谱仪。这些检测方法的理论基础是假设实测光谱数据服从多维高斯分布。Thompson 等采用 AMF 对存在泄漏甲烷的高光谱数据进行检测并增强显示^[12]。Foote 等应用稀疏性和反照率校正及其 MF 检测对 AVIRIS-NG 数据检索甲烷浓度并局部增强显示^[13]。崔方晓等提出了基于正交子空间投影的污染气体自适应探测方法并将其应用于扫描成像傅里叶变换红外光谱仪^[14], 同时对氨气挥发进行检测, 取得了相较于 SAM 算法更好的目标区分能力。虽然被动 FTIR 扫描遥测成像系统具有优异的光谱维探测性能, 但是每次完成一帧扫描得到像元数量远低于红外面阵高光谱仪一帧的像元数量, 存在背景空间不完备的缺点。另一方面, 部分像元的光谱存在气体特征, 如果不加区分的将其应用到高光谱检测算法的背景估计中, 会降低检测算法的性能。

本文结合目标气体特征与环境背景的线性叠加模型及 AMF 检测方法, 提出了基于临近时序的多帧红外高光谱图像筛选背景特征的方法来完善背景协方差矩阵的最大似然估计, 用于后续帧的泄漏目标检测。首先以 SF₆ 为示踪气体, 使用被动 FTIR 扫描遥测成像系统扫描得到多帧红外高光谱图像, 并将该特征气体的 AMF^[15] 检测值与其反演的柱浓度结果相比对。其次为验证多帧背景在不同空间检测方法的性能, 分别对该数据进行了基于正交子空间的 ASD^[14, 16] 检测、基于混合空间的 ACE 检测及基于斜子空间的 OGLRT 检测^[17], 并与柱浓度值作对比。最后向背景空间中加入不同数量含有目标气体特征的光谱作为干扰, 以 ROC 曲线作为评价标准判定目标特征数据对背景估计的影响。

1 原理

1.1 辐射信号模型

根据红外辐射传输理论^[18], 在简单的三层辐射传输模型中有气体云团目标存在时, FTIR 光谱仪的入瞳辐射亮度 $L(\nu)$ 为

$$L(\nu) = [1 - \tau_a(\nu)]B_a(\nu, T_a) + \tau_a(\nu) \cdot [(1 - \tau_g(\nu))B_g(\nu, T_g) + \tau_g(\nu)L_b(\nu)] \quad (1)$$

式(1)中, ν 为波数, $\tau_a(\nu)$ 为大气透过率, $\tau_g(\nu)$ 为气体云团的透过率, $B_a(\nu, T_a)$ 是大气温度为 T_a 时的黑体辐射亮度, $B_g(\nu, T_g)$ 是气体层温度为 T_g 时的黑体辐射亮度, $L_b(\nu)$ 为背景辐射亮度。无气体云团目标存在时, 红外探测器的入瞳辐射亮度为

$$L_0(\nu) = (1 - \tau_a(\nu))B_a(\nu, T_a) + \tau_a(\nu)L_b(\nu) \quad (2)$$

式(1)对式(2)进行差分得

$$L(\nu) - L_0(\nu) = \tau_a(\nu)[1 - \tau_g(\nu)][B_g(\nu, T_g) - L_b(\nu)] \quad (3)$$

在一般气候条件下, 地基近距离红外被动遥测过程中可近似认为大气层的透过率为 1。假设气体云团为单种气体的稀薄

云团, 气体的吸收截面与浓度程长积的乘积远小于 1, 因此气体层的透过率经泰勒展开后近似表达为

$$\tau_g(\nu) = e^{-\alpha(\nu)cL} \approx 1 - \alpha(\nu)cL \quad (4)$$

式(4)中, $\alpha(\nu)$ 为分子吸收截面, cL 为浓度程长积。假定热平衡状态下, 气体层温度与大气温度近似, 背景辐射亮度也可以近似由背景温度对应的黑体辐射亮度代替。式(5)可以由泰勒展开并近似推导出

$$B_g(\nu, T_g) - L_b(\nu) \approx \Delta T_{g,b} \frac{\partial B(\nu, T)}{\partial T} \Big|_{T_g} \quad (5)$$

式(5)中, $\Delta T_{g,b}$ 为气体云团与背景之间的温差, 泄漏气体与背景之间的温度相差不多, 在长波红外(8~14 μm)区间近似线性。将式(4)和式(5)代入式(3), 可得

$$L(\nu) \approx L_0(\nu) + \alpha(\nu)cL\Delta T_{g,b} \frac{\partial B(\nu, T)}{\partial T} \Big|_{T_g} = L_0(\nu) + as(\nu) \quad (6)$$

式(6)中, $a = cL\Delta T_{g,b}$, $s(\nu) = \alpha(\nu) \frac{\partial B(\nu, T)}{\partial T} \Big|_{T_g}$ 。假设红外系统测量的光谱维度大小为 K 并将加性噪声包含在背景中, 将式(6)写成矢量形式

$$X = B + as \quad (7)$$

式(7)中, X, B, s 为 K 维向量, a 为标量。

1.2 信号检测原理

由式(7)可知, $a=0$ 时, 目标不存在; $a \neq 0$ 时, 目标存在。因此气体目标检测问题转化为如下问题

$$H_0: X = B \\ H_1: X = \delta B + as \quad (8)$$

式(8)中, 常量 δ 是用于衡量背景方差的任意变化, 在 H_0 中 $X \sim N(u_B, \Sigma_B)$, 在 H_1 中 $X \sim N(as + u_B, \delta^2 \Sigma_B)$ 。在 H_0 和 H_1 中有相同的方差结构但有着不同的方差。假设获取到一组纯净的背景光谱 $X_i (i=1, 2, \dots, N)$ 且符合独立同分布, 可计算得到 $\hat{u}_B, \hat{\Sigma}_B$, 结合待测气体的光谱特征 s , 形成如下广义似然比检测(GLRT)^[12]

$$D_{\text{GLRT}}(X) = \frac{[s^T \hat{\Sigma}_B^{-1} (X - \hat{u}_B)]^2}{(s^T \hat{\Sigma}_B^{-1} s) [m_1 + m_2 X^T \hat{\Sigma}_B^{-1} (X - \hat{u}_B)]} \underset{H_0}{\overset{H_1}{>}} \eta \quad (9)$$

式(9)中, η 为判别门限, m_1 和 m_2 为常系数, $\hat{u}_B = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N X_i$, $\hat{\Sigma}_B$ 为对协方差矩阵 Σ_B 的最大似然估计

$$\hat{\Sigma}_B = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (X_i - \hat{u}_B)(X_i - \hat{u}_B)^T \quad (10)$$

若式(9)中 $m_1=1, m_2=0$, 则广义似然比检测变成自适应匹配滤波器(AMF), 其检测函数为

$$D_{\text{AMF}}(X) = \frac{[s^T \hat{\Sigma}_B^{-1} (X - \hat{u}_B)]^2}{(s^T \hat{\Sigma}_B^{-1} s)} \underset{H_0}{\overset{H_1}{>}} \eta \quad (11)$$

AMF 检测器的虚警概率可以表示为

$$P_{\text{FA}} = \int_0^1 \frac{f(\rho)}{(\eta\rho + 1)^L} d\rho \quad (12)$$

式(12)中, $L=N+1-K$, ρ 为信噪比损失因子, 其概率密度

服从 β 分布

$$f(\rho) = \frac{N!}{L!(K-2)!} (1-\rho)^{K-2} \rho^L \quad (13)$$

N 是背景光谱数量, 当设定虚警概率大小时, 通过式(12)反求积分即可得到 AMF 的检测门限 η 。

1.3 多帧背景

为提高气体特征信号的检测能力, 在估计背景协方差矩阵的最大似然时不应该包含目标特征, 而且被动 FTIR 扫描遥测成像系统测量的每帧红外高光谱图像, 空间分辨率低, 像元数量少, 因此需要从同一实测场景、临近时序的多帧数据中筛选背景。根据式(3)可得到辐射亮度差谱

$$\Delta L(\nu) = L(\nu) - L_0(\nu) \quad (14)$$

在长波红外大气窗口, 若存在气体分子红外吸收或发射, ΔL 会存在明显的波动, 可以对差谱进行滑动标准差计算, 得到差谱的滑动标准差谱

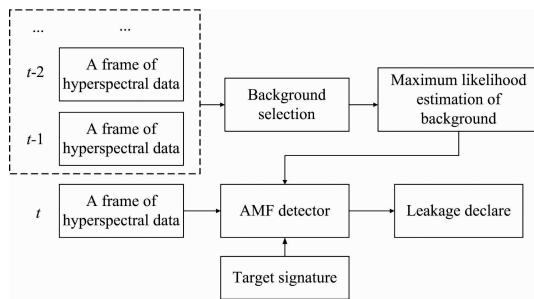


图 1 多帧背景下的泄漏气体 AMF 检测示意图

Fig. 1 Schematic diagram of leaking gas AMF detection based on multi-frame background

$$\sigma(\nu_i) = \sqrt{\frac{1}{M-1} \sum_{j=i-M/2}^{i+M/2} |\Delta L(\nu_j) - u_M|^2}$$

$$u_M = \frac{1}{M} \sum_{j=i-M/2}^{i+M/2} \Delta L(\nu_j) \quad (15)$$

式(15)中, M 为滑动窗口大小。对标准差谱 $\sigma(\nu)$ 进行判断, 若标准差谱的最大值 $\max\{\sigma(\nu)\}$ 与标准差谱的平均值 $E\{\sigma(\nu)\}$ 的比值小于 M_1 (人为设定) 倍, 则认为该条光谱 L 为背景光谱。 M_1 越小, 所包含的吸收特征越少, 背景光谱越纯净。图 1 为多帧背景下 AMF 检测原理图。

2 实验部分

2.1 装置

实验系统如图 2(a) 所示, 被动 FTIR 扫描遥测成像系统由傅里叶变换红外光谱仪, 反射式望远镜, 工业相机, 二维扫描系统和数据采集处理系统等核心部分组成。图 2(b) 为 2-DOF 云台的扫描示意图, 云台按用户配置的监测视场和探测模式划分阵列并规划路径, 配合红外光谱仪对泄漏气云完成二维扫描。图 2(c) 为无组织泄漏遥测成像软件, 软件的中心区域是可见光背景图像与气体柱浓度假彩色图像的叠加显示区域, 其主要任务是人机交互: 选择监测区域、控制系统运行、气云显示和泄漏预警。系统工作中, 扫描系统按用户预设的采样阵列配合红外光谱仪对泄漏气体扫描探测, 每个像素的辐亮度光谱由数据采集处理系统得到, 并传输到 PC 上完成定量分析并显示, 同时将扫描镜指向下一个像素, 最后得到带有气体柱浓度信息的假彩色值与可见光背景图像叠加的气云图像。此外, 假彩色值所在图层显示的不仅可以是气体柱浓度, 也可以是统计检测值、信噪比、亮温及检测限等。

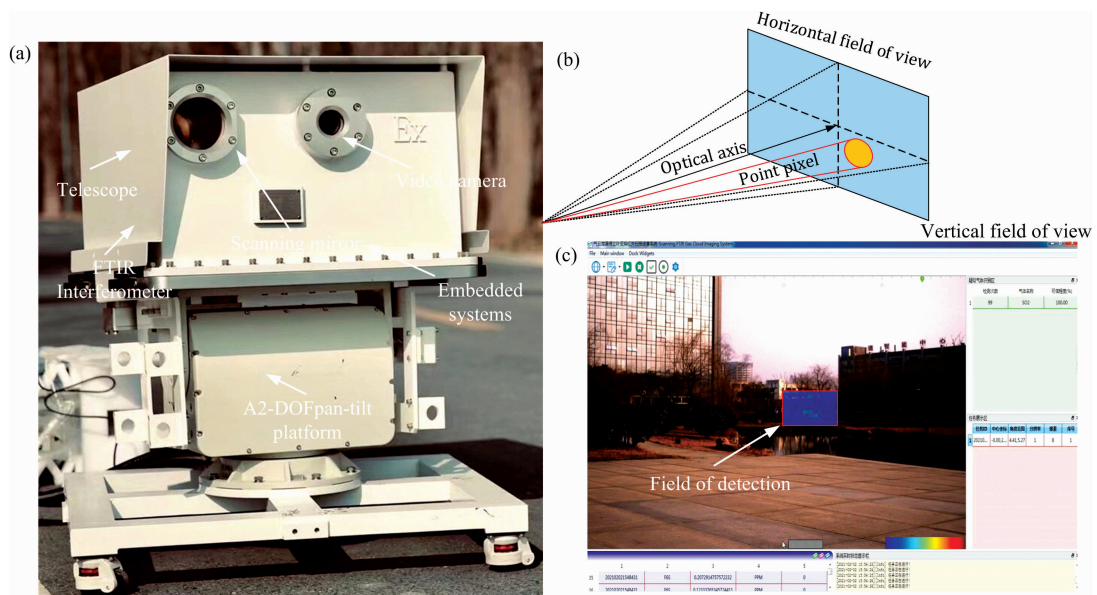


图 2 被动 FTIR 扫描遥测成像系统

(a): 实验设备; (b): 二维扫描示意图; (c): 无组织泄漏遥测成像软件

Fig. 2 Passive FTIR scanning remote sensing imaging system

(a): Experimental setup; (b): Schematic diagram of 2D scanning; (c): Remote sensing imaging software for unorganized leakage

2.2 方法

该实验在 2021 年 11 月 06 日实施于山东省滕州市。探测背景包含草地、建筑物和低平天空，目标气体为压力容器释放的 SF₆。实验前，光谱仪选用的光谱分辨率为 4 cm⁻¹，在实验室内对被动 FTIR 扫描遥测成像系统进行黑体辐射定标，定标温度为 30 和 60 °C，扣除水汽和 CO₂ 吸收后通过两点定标方法获取定标系数。

实验过程中，重复对探测区域进行扫描，测量过程包含释放气体前、释放气体中。具体测量细节为：设定探测器区域的像素阵列为 8×15，每采集完目标空间内一个像素区域的干涉图，系统并行计算得到相应的 SF₆ 透过率谱，并利用非线性最小二乘法^[3]反演像素点的 SF₆ 的柱浓度值，其中反演波段为 912~968 cm⁻¹，同时驱动扫描镜指向目标区域的下一个像素位置并测量。图 3 为实测得到的部分 SF₆ 透过率谱，吸收峰的位置为 947 cm⁻¹，不同谱的吸收峰高和吸收面积不同，然而从透过率谱吸收峰值位置可知，部分谱吸收饱和。

图 4 为气体释放过程中扫描得到的一帧 SF₆ 柱浓度图像，其中假彩色图像表示气体柱浓度信息，右侧假彩色条与柱浓度值相对照，特别说明一个假彩色像素大小是背景图片单像素的 16 倍。从扫描得到的 SF₆ 柱浓度图像中，可以获悉目标气体的大致分布及扩散态势。

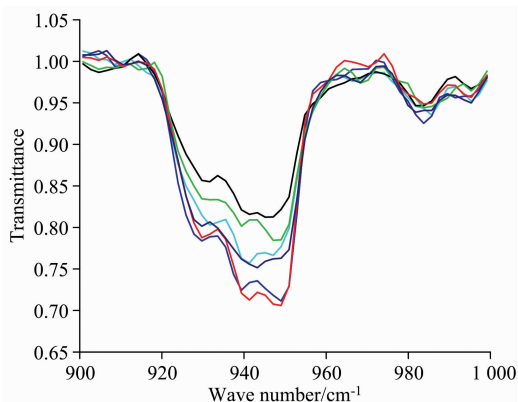


图 3 实测的 SF₆ 透过率谱

Fig. 3 Measured SF₆ transmittance spectrum



图 4 实测的 SF₆ 柱浓度图像

Fig. 4 Measured SF₆ column concentration image

3 结果与讨论

在 2.2 部分实验获取的红外高光谱图像，空间大小为 8 行 15 列扫描像素，光谱范围为 800~1 200 cm⁻¹，光谱分辨率为 4 cm⁻¹，光谱维数为 208。我们取其中的 4 帧数据(120 条/帧)，第 1、2 帧为放气前实测数据，第 3、4 帧是气体释放过程中实测数据，其中第 3 帧数据需要经过背景筛选。图 4 所对应的第 4 帧红外高光谱图像被用于 AMF, ACE, ASD 和 OGLRT 检测。首先对前 3 帧红外高光谱图像进行逐像素点背景判别，在 800~1 200 cm⁻¹ 波段大气窗口是近似透明的，测量光谱的背景辐射光谱可近似为一条稳定的基线，该基线[如图 5(a)所示]是采用最小二乘法将若干个亮温所对应的黑体辐射亮度曲线线性叠加并拟合出来的。将背景对测量光谱作差谱，再对差谱计算滑动标准差谱[式(13)]，最后将滑动标准差谱与滑动标准差谱的平均值的比值[图 5(b)]作为判别背景的依据，实验中取最大比值低于 2.0 的测量谱作为背景光谱，得到 285 条背景谱，用于不含目标特征的背景协方差矩阵的最大似然估计。

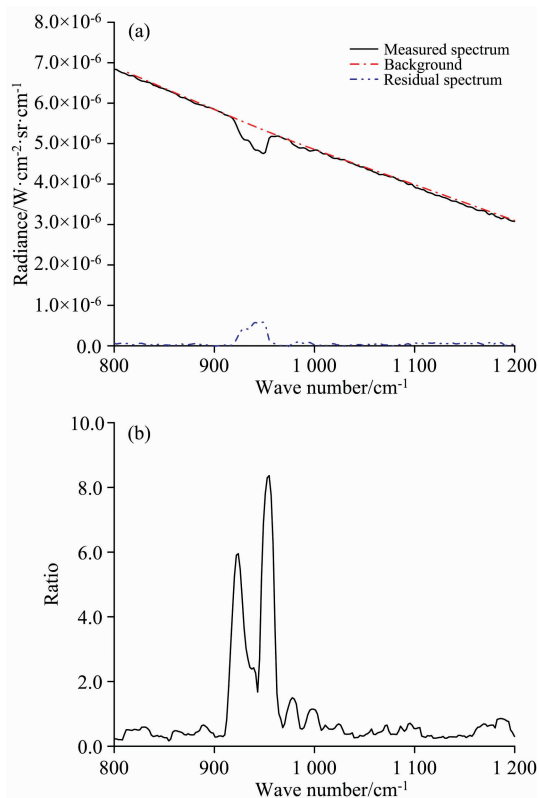


图 5 (a) 测量谱、背景谱与残差谱；(b) 差谱的滑动标准差谱与其均值的比

Fig. 5 (a) The measured spectrum, the background spectrum and the residual spectrum; (b) The ratio of the sliding standard deviation spectrum of the difference spectrum to its mean value

图 6(a)~(d) 分别是利用 AMF 检测器、ACE 检测器、

ASD 检测器和 OGLRT 检测器对图 4 所对应的一帧红外高光谱图像进行 SF₆ 气体检测的实验结果，并将每一种方法的检测结果分别与其光谱反演的 SF₆ 柱浓度值比对。

从表 1 和图 6 的对比结果来看，四种方法均能较好的检测 SF₆ 高柱浓度值所对应的吸收峰，如 4 号像元、5 号像元、26 号像元、28 号像元、29 号像元、32 号像元、33 号像元、60 号像元和 86 号像元。在 1—50 号像元段内所对应的吸收峰检测，四种方法均能较好的检测出其中的高值：AMF 方法对于 1 号、22—26 号像元检测值偏低，其余像元 AMF 检

测强度与柱浓度大小具有较强的相关性；ACE 方法对于 10、13 和 16 像元号检测值偏高，其余像元均能检测出来但是其强度变化不明显；ASD 方法对 31、32 号像元检测强度存在偏差，其余均能检出；OGLRT 方法对于 5 号、32 号像元检出强度偏低。在 51—120 号像元段内，OGLRT 检测值与柱浓度值具有很强的相关性，而 ACE 方法与 ASD 方法的检测效果不佳，AMF 检测弱吸收峰的能力强于 ACE 方法与 ASD 方法。

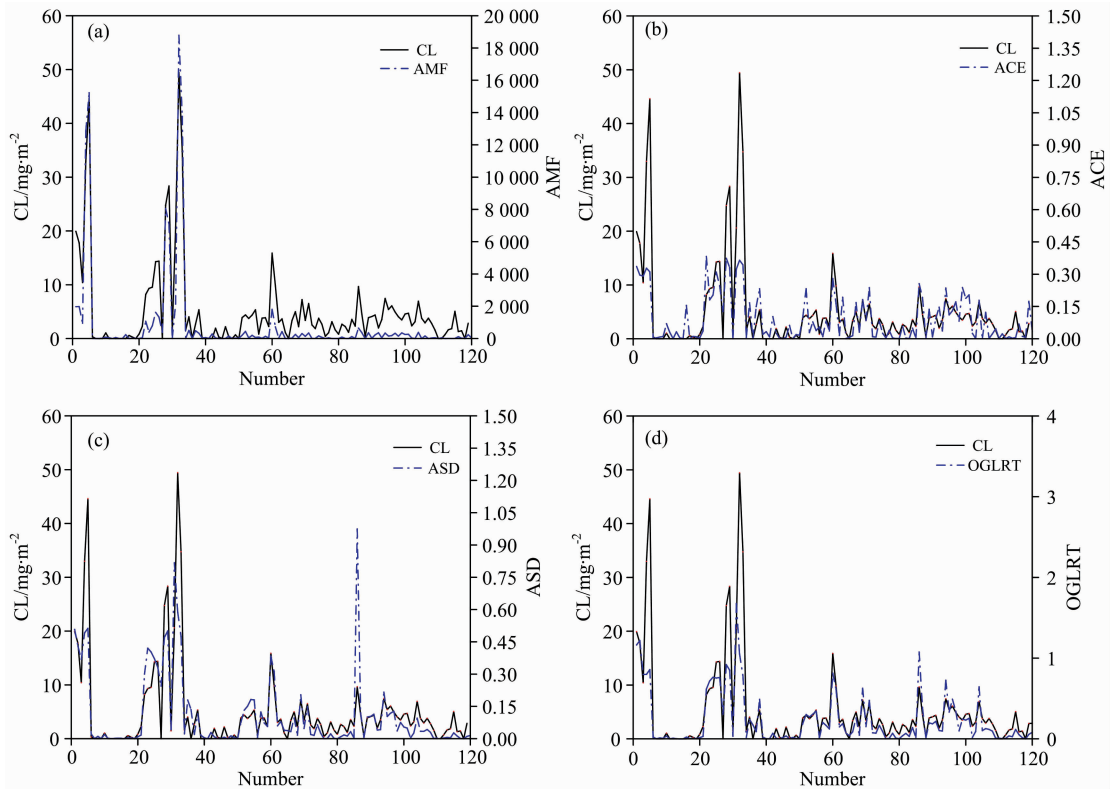


图 6 (a)AMF 检测值与柱浓度值的比较；(b)ACE 检测值与柱浓度值的比较；(c)ASD 检测值与柱浓度值的比较；(d)OGLRT 检测值与柱浓度值的比较

Fig. 6 (a) Comparison of AMF detection value and column concentration; (b) Comparison of ACE detection value and column concentration; (c) Comparison of ASD detection value and column concentration; (d) Comparison of OGLRT detection value and column concentration

表 1 图 6 中柱浓度曲线与检测值曲线的相关性

Table 1 The correlation between the column concentration curve and the detection value curve in Figure 6

像元段	AMF	ACE	ASD	OGLRT
全段	0.925	0.764	0.787	0.789
1—50	0.938	0.825	0.855	0.802
51—120	0.834	0.707	0.718	0.892

观察各高柱浓度值像素点所对应的检测值，AMF 相比较于 ACE，ASD 和 OGLRT 能较好的反应强度变化，将 AMF 检测值转化为假彩色并叠加到可见光背景图像上，得到图 7 所示结果，其中最大检测值为 18 790.9，最小检测值为 0.028，设定检测虚警概率为 5%，背景光谱数量为 285，



图 7 带有 AMF 检测信息的假彩色图像

Fig. 7 False color image with AMF detection information

光谱维数 208，代入式(12)得到检测门限为 370.52，大于该门限值可被认为对应像元存在被检测目标。图 7 的 AMF 检

测值假彩色图像与图 4 的柱浓度假彩色图像相比,其值分布趋势一致,且其强度变化更明显,便于分析泄漏源,因而 AMF 检测值假彩色图也可用于泄漏气体扩散趋势分析。

图 8(a)为 AMF, ACE, ASD 和 OGLRT 四种检测方法对 SF₆ 检测的 ROC 曲线。将四种算法的检测值量化成多个等级,分别按照每个等级设置门限值 η 序列,得到该门限值 η 序列下的虚警概率 P_{FA} 和检出概率 P_D 组成的 ROC 曲线。

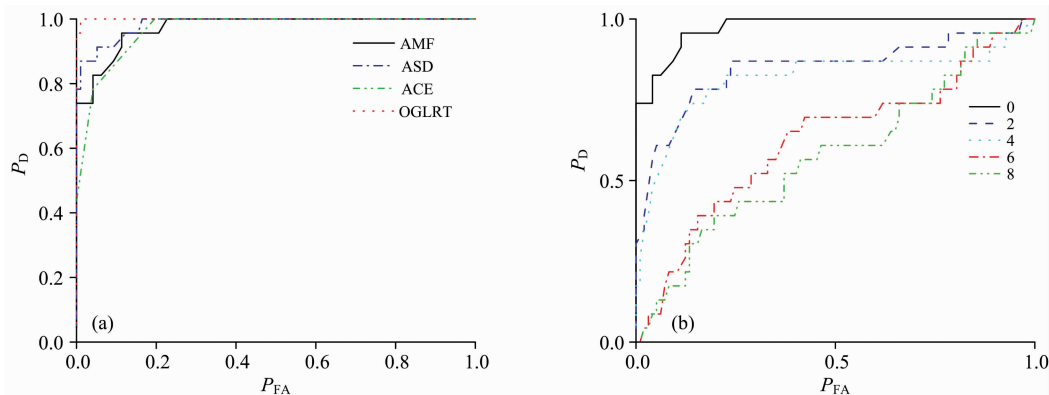


图 8 (a)四种算法 ROC 曲线; (b)添加不同数量目标光谱到背景空间中 AMF 检测的 ROC 曲线
Fig. 8 (a) ROC curve of four detection methods; (b) the ROC curve of AMF detection with different number of target spectra added to the background space

4 结 论

研究了多帧背景下的 AMF 泄漏气体自适应检测方法,将其应用到被动 FTIR 扫描遥测成像系统上,并以 SF₆ 为示踪气体进行了遥测实验。将 AMF 方法、ASD 方法、ACE 方法和 OGLRT 方法检出结果分别与非线性最小二乘法反演的柱浓度比对发现,采用同一区域、临近时序的多帧红外高光谱图像作背景,适用于不同空间的检测方法。数量过多的特

征光谱混入背景光谱库中,会降低 AMF 算法的检测性能。AMF 检测值的假彩色图像也能很好的应用于被动 FTIR 扫描遥测成像系统,相比较于柱浓度假彩色图像更容易发现泄漏位置。基于红外高光谱图像的检测方法依赖于整体背景统计特性,相较于单像元光谱波段的反演算法,降低了背景的依赖性。多帧背景下的泄漏气体自适应匹配滤波检测方法能很好的应用于被动 FTIR 扫描遥测成像系统上,并且满足在线监测要求。

References

- [1] Harig R. Applied Optics, 2004, 43(23): 4603.
- [2] Kim S. Remote Sensing, 2020, 12(11): 1860.
- [3] LIU Zhi-ming, LIU Wen-qing, GAO Min-guang, et al(刘志明, 刘文清, 高闽光, 等). Acta Physica Sinica(物理学报), 2010, 59(8): 5397.
- [4] Xu Liang, Gao Minguang, Liu Jianguo, et al. Proceedings of the SPIE, 2012, 8534: 85340M.
- [5] JIAO Yang, XU Liang, GAO Min-guang, et al(焦洋, 徐亮, 高闽光, 等). Laser and Infrared(激光与红外), 2013, 43(9): 1021.
- [6] JIAO Yang, XU Liang, GAO Min-guang, et al(焦洋, 徐亮, 高闽光, 等). Spectroscopy and Spectral Analysis(光谱学与光谱分析), 2012, 32(7): 1754.
- [7] JIAO Yang, XU Liang, GAO Min-guang, et al(焦洋, 徐亮, 高闽光, 等). Acta Physica Sinica(物理学报), 2013, 62(14): 140705.
- [8] Manolakis D, D'Amico F M. Chemical and Biological Sensing VI, 2005, 5795: 125.
- [9] Manolakis D. IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing, 2008. 1857.
- [10] Manolakis D, Jairarn L G, Zhang D, et al. Proceedings of the SPIE, 2007, 6565: 656525.
- [11] Manolakis D G, Golowich S E, DiPietro R S. IEEE Signal Processing Magazine, 2014, 31(4): 120.
- [12] Thompson D R, Thorpe A K, Frankenberg C, et al. Geophysical Research Letters, 2016, 43(12): 6571.
- [13] Foote M D, Dennison P E, Thorpe A K, et al. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2020, 58(9): 6480.
- [14] CUI Fang-xiao, FANG Yong-hua(崔方晓, 方勇华). Acta Optica Sinica(光学学报), 2014, 34(7): 730002.
- [15] Nasrabadi N M. IEEE Signal Processing Magazine, 2014, 31(1): 34.

- [16] Foy B R, Theiler J, Fraser A M. *Optics Express*, 2009, 17(20): 17391.
- [17] Liu Xiang, Gao Lianru, Zhang Bing, et al. *Congress on Image and Signal Processing*. IEEE, 2008, 3: 479.
- [18] Goody R M, Yung Y L. *Atmospheric Radiation: Theoretical Basis* (Oxford University Press), 1995.

Adaptive Matched Filter Detection for Leakage Gas Based on Multi-Frame Background

HU Yun-you^{1,2}, XU Liang^{1*}, XU Han-yang¹, SHEN Xian-chun¹, SUN Yong-feng¹, XU Huan-yao^{1,2}, DENG Ya-song^{1,2}, LIU Jian-guo¹, LIU Wen-qing¹

1. Key Laboratory of Environmental Optics and Technology, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Hefei Institute of Physical Science, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China
2. University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China

Abstract The infrared hyperspectral image data collected by the passive Fourier transform infrared (FTIR) scanning remote sensing imaging system has spatial and spectral information and can be used to identify, quantify and visualize toxic and harmful gases in the atmospheric environment. The system has high spectral resolution and non-contact and long-distance detection advantages. However, the single-frame image has a small number of pixels, and some have gas absorption or emission, which cannot be directly used for target detection in infrared hyperspectral images. This paper proposes an adaptive matched filter (AMF) detection method for leaking gas based on multi-frame infrared hyperspectral image data in the same area in a short time. The background spectra without target gas feature are screened out and used for maximum likelihood estimation of the background in the detection area and then applied to target gas leak detection in subsequent frames. The infrared hyperspectral image collected by the remote sensing experiment of SF₆ has four frames (120 pixels/frame) scanned in total. The data containing the target gas feature in the first three frames are removed, and the remaining background spectrum is used to calculate the maximum likelihood estimation of the background. The AMF detection of SF₆ is implemented on the fourth frame of infrared hyperspectral data pixel by pixel, and the result is compared with the SF₆ column concentration image retrieved by the nonlinear least square method. To verify the performance of multi-frame background in different detection spaces, adaptive subspace detection (ASD) based on orthogonal subspace, adaptive cosine detection (ACE) based on hybrid space, and maximum likelihood ratio detection based on oblique subspace (OGLRT) detects the fourth frame data separately. Compared with the SF₆ column concentration image, the results show that the multi-frame background is suitable for detection methods in different spaces. In addition, to study the influence of the target absorption spectrum on the background space. Adding multiple spectra containing the absorption of SF₆ to the background space after ROC curve inspection, the results show that mixing target features in the background space will reduce the detection performance of the AMF method. The false color image of AMF detection value can also be applied to a passive FTIR scanning remote sensing imaging system. The leakage source and diffusion tendency are more obvious than the column density false color image. The detection method based on hyperspectral data relies on the statistical feature of the overall background. Compared with the inversion algorithm of a single-pixel spectral band, it greatly reduces the dependence of the background. The AMF leak gas detection method based on the multi-frame background can be well applied to the passive FTIR scanning remote sensing imaging system and meet the requirements of online monitoring.

Keywords FTIR; Scanning remote sensing; Gas leakage; Adaptive detection

(Received Aug. 31, 2021; accepted Dec. 28, 2021)

* Corresponding author