

〈系统与设计〉

非制冷快照式红外视频光谱成像仪及其数据处理

孔艳洁^{1,2}, 杨扬^{1,2}, 刘成玉¹, 王朋宇^{1,2}, 李春来¹

(1. 中国科学院上海技术物理研究所 中国科学院空间主动光电技术重点实验室, 上海 200083;
2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 随着现代社会的工业化进程和快速发展, 工业生产中的危险化学气体泄漏严重危及人身财产安全。如何有效检测污染气体的存在并获取气体的浓度和分布等信息, 成为气体泄漏检测的重要课题。非制冷快照式红外视频光谱成像仪 (Uncooled Snapshot Infrared Video Spectrometer, USIVS) 是一种理想的硬件方案, 能够直接从图像中感知危险化学气体的存在并获取危险化学气体的位置, 为紧急处置提供有力支持。但是, 商业化的轻量级被动式红外光谱成像仪的灵敏度和光谱分辨率相对受限, 已有的气体浓度反演方法难以准确检测污染气体的存在。本文介绍了一种基于非制冷快照式红外视频光谱成像仪及其适用的数据处理技术流程。利用气体浓度反演方法对不同温度和光程长度下的气体进行了模拟实验, 并得到了较为准确的反演结果, 平均误差分别为 2.88% 和 0.61%。在实验室和室外场景下进行了气体浓度反演方法的测量实验, 结果表明该算法具有较好的稳定性, 平均误差分别为 6.18% 和 7.47%。通过 USIVS 与数据处理技术流程的有效结合, 能够快速准确地检测污染气体的存在并给出图像中每个像素的气体浓度, 实现气云浓度反演的效果, 为后续该类技术的商业化及实用化提供了参考。

关键词: 红外辐射; 视频光谱成像; 气体浓度反演; 数据处理流程

中图分类号: TN216 文献标志码: A 文章编号: 1001-8891(2024)11-1192-09

Uncooled Snapshot Infrared Video Spectrometer and Its Data Processing

KONG Yanjie^{1,2}, YANG Yang^{1,2}, LIU Chengyu¹, WANG Pengyu^{1,2}, LI Chunlai¹

(1. Key Laboratory of Space Active Optical-Electro Technology, Shanghai Institute of Technical Physics,

Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Owing to industrialization and the rapid development of modern society, the leakage of dangerous chemical gases in industrial production seriously endangers the safety of human life and property. Effectively detecting the presence of contaminated gas and obtaining information on the gas concentration and distribution have become important topics in gas leakage detection. Uncooled Snapshot Infrared Video Spectrometer (USIVS) is an ideal hardware scheme that can directly perceive the existence of dangerous chemical gas from the image and obtain the position of dangerous chemical gas to provide strong support for emergency responses. However, the sensitivity and spectral resolution of commercial lightweight passive infrared spectral imagers are relatively limited, and it is difficult to accurately detect the presence of polluted gases using existing inversion methods. In this study, an infrared video spectral imager is introduced based on an uncooled snapshot and its applicable data-processing technology. The gas concentration inversion method is used to simulate gas at different temperatures and optical path lengths, and the inversion results are relatively accurate, with average errors of 2.88% and 0.61%, respectively. The gas concentration inversion method is tested in laboratory and outdoor settings. The results show that the algorithm has good stability with average errors of 6.18% and 7.47%. The effective combination of USIVS and data processing technology can quickly and accurately detect

收稿日期: 2023-04-07; 修订日期: 2023-05-09

作者简介: 孔艳洁(1998-), 女, 硕士研究生, 主要从事红外视频光谱成像技术方面的研究。E-mail: kongyanjie@mail.sitp.ac.cn。

通信作者: 李春来(1982-), 男, 研究员, 博士生导师, 主要研究方向为空间红外光谱成像技术等。E-mail: lichunlai@mail.sitp.ac.cn

基金项目: 中国科学院青年创新促进会优秀会员(Y2021071,Y202058); “十四五”国防预研基金。

the presence of polluted gas and provide the gas concentration of each pixel in the image. This in turn can realize gas cloud concentration inversion, providing a reference for the commercialization and practical application of this technology in the future.

Key words: infrared radiation, video spectral imaging, gas concentration inversion, data processing flow

0 引言

红外光谱成像气体检测技术是危险化学气体泄漏检测的有效方法之一, 广受关注。红外光谱成像气体检测主要原理是利用当观测背景温度与泄漏气体辐射亮温存在差异时, 红外光子的部分能量被气体分子吸收, 导致红外光携带的能量变小, 使得有气体路径与无气体路径在红外探测器的像元上接收到的能量不同, 可以通过能量差异计算出气体浓度。在波长范围为 7~14 μm 的红外波段中, 不同结构的气体分子的吸收光谱也不同, 因此可以通过红外视频成像来获取气体种类和浓度信息。红外光谱成像气体检测技术可分为主动式成像和被动式成像两类。主动式成像会受激光光源限制, 检测范围小、可检测气体种类少; 被动式成像方式可以实现远距离探测, 具有检测范围广泛、可检测气体种类多、结构简单、可商业化等优点, 目前被广泛应用。其中, 采用多孔径的快照式被动成像技术, 可在单次曝光周期内实时显示完整光谱数据立方体, 提高数据采集处理效率, 更适合实际场景应用^[1]。通常情况下, 考虑到成本以及实用性等因素, 商业化的被动型红外光谱气体检测仪器多采用的是非制冷型红外探测器, 相对于制冷型红外高光谱成像仪的数十纳米光谱分辨率^[2-3], 非制冷型红外光谱仪的光谱分辨率通常被设计为数百纳米^[4-5], 灵敏度较低。因此, 针对被动式非制冷型红外光谱气体探测设备, 气体浓度反演方法面临更大的挑战。

近年来, 国内外许多学者发展了一系列的气体浓度反演模型, 现在已经逐渐成熟且得到了广泛的应用^[6-7]。目前常用的气体浓度估算方法包括物理机理模型、经验统计模型、机器学习模型。Grajales 等^[8]使用了大气化学传输模型估算了哥伦比亚的气体浓度, 与校正后的地面观测数据相关系数最高为 0.91。Qin 等^[9]分别基于 OMI 对流层 NO₂ 柱浓度数据和北京大学臭氧监测仪器 NO₂ 数据产品利用随机森林模型和极限随机树模型对 2016 年中国东部地区近地面 NO₂ 浓度进行估算, 并利用十折交叉验证对比了两种

模型的性能, 基于两种数据的极端随机森林模型的 R^2 值分别为 0.70 和 0.72。然而, 已有的气体浓度反演方法对被动式红外光谱气体成像的物理机理研究不足, 也没有考虑到商业化非制冷红外光谱成像仪的低灵敏度、低光谱分辨率的问题。因此, 利用现有方法对非制冷快照式多孔径红外视频光谱成像仪获取的数据进行气体浓度反演, 将会导致反演的精度和分辨率受到限制。

多光谱、低成本、网络化是当前非制冷红外光谱成像气体检测技术的发展趋势。本文介绍了一款新型非制冷快照式红外视频光谱成像仪(uncooled snapshot infrared video spectrometer, USIVS), 并给出了适用于该类型设备的数据处理技术流程, 实现从所获取数据中提取危险化学气体种类、轮廓和浓度信息。并在此基础上通过模拟实验以及实验室环境和外场环境下分别进行了测量实验, 验证了所提出的气体浓度数据处理技术流程的有效性。

1 USIVS 技术指标

图 1 展示了非制冷快照式红外视频光谱成像仪的实物图和内部示意图。该仪器能够采集视频流的光谱数据, 包括 9 个通道的一维光谱信息和二维空间信息, 主要技术指标详见表 1。由于不同气体在红外波段有独特的吸收特性, 因此在不同波段的图像中, 气体区域具有不同的光谱信息, 可以通过算法将其进一步转化为气体种类、轮廓和浓度的信息。

2 气体浓度反演方法数据处理流程

红外视频光谱成像数据处理的关键在于获取吸收波段的透过率, 以便反演气体浓度。处理流程如下所示: 首先, 对原始样本进行温度漂移校正。然后通过光电转换模型对数据进行辐射定标, 计算辐亮度。接着通过帧间差值法提取气体轮廓。之后通过差值法对辐亮度进行差分, 推导得出样本透过率。最终基于透过率可以反演出气体浓度。图 2 展示了数据处理流程的示意图。

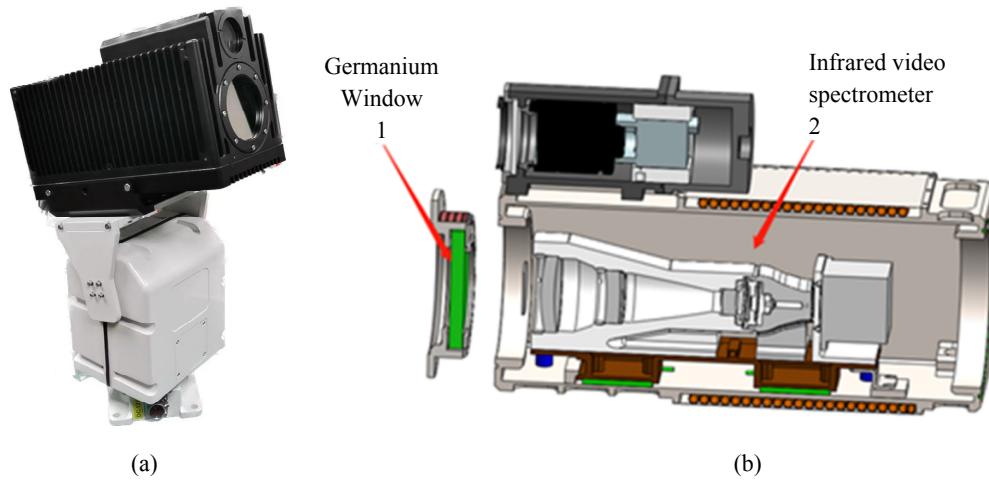


图1 非制冷快照式红外视频光谱成像仪实物图(a)和内部示意图(b)

Fig.1 Uncooled snapshot infrared video spectral imager physical photo(a) and interior diagram (b)

表1 USIVS 技术指标

Table 1 Specification of USIVS

Wavelength range/nm	Sensitivity NETD/mK	Field of view range	Frame rate	Spatial resolution
7320-8020	0.2169			
9830-10530	0.3262			
9130-9830	0.2015			
8350-9050	0.2219			
9460-10160	0.3221	12.0°×14.6°	≥2 Hz	0.55 mrad
8720-9420	0.2397			
10200-10900	0.3481			
7980-8680	0.2502			
7610-8310	0.2438			

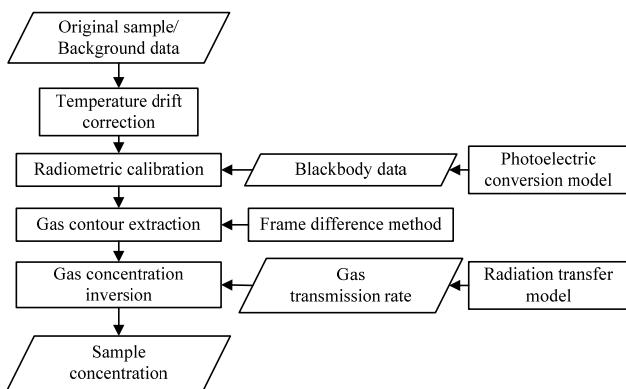


图2 气体浓度反演方法数据处理流程

Fig.2 Data processing flow chart of gas concentration inversion method

2.1 温度漂移校正

温度漂移是指在温度变化的影响下，测量系统的输出值产生偏差。在红外视频光谱成像仪气体浓度反演中，由于仪器各个光、电部件中的热膨胀系数和热

导率不同，导致测量结果出现漂移。尤其是非制冷探测器在不同帧间容易产生输出值的跳跃。因此，需要对温度进行校正，以消除温度漂移对测量结果的影响，提高反演结果的准确性和稳定性。如图3所示，经过两帧图像做差之后，探测器的成像区和非成像区相应值区别大幅度缩小，达到目视无差别水平。这说明成像区和非成像区的像元输出值跳变存在一定的同步性。因此，本文建立非成像区像元跳变值与成像区像元跳变值的函数关系，采用非成像区像元的跳变值校正成像区像元值，校正结果如图4所示。

2.2 辐射定标

非制冷快照式红外视频光谱成像仪测量得到的数据 DN 值并不等价于入瞳辐射亮度 L ，而是需要经过一定的光电转换过程。因此我们需要进一步分析非制冷快照式红外视频光谱成像仪的光电转换模型，并得到测量数据 DN 值和入瞳辐射亮度 L 之间的关系。

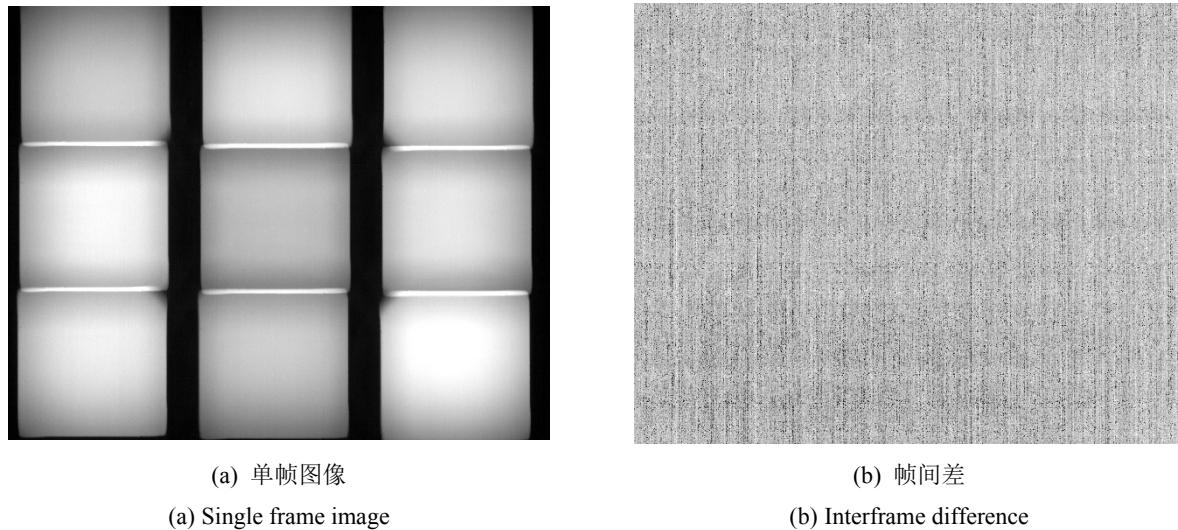


图3 单帧图像与帧间差图像

Fig.3 Single frame image and frame difference image

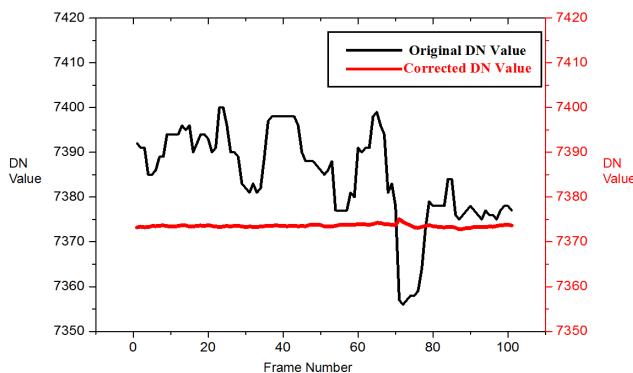


图4 温度漂移校正光谱曲线

Fig.4 Temperature drift correction spectrum

仪器内部信号传输转换过程主要是前置光学系统对入瞳辐射能量的收集汇聚、分光部件离散分光、探测器光电转换, 读出电路读出最终的信号值, 最终输出整型 DN (digital number) 值。

$$DN_i = Gain_i \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} srf_i(\lambda) L(\lambda) d\lambda + Bias_i \quad (1)$$

式中: DN_i 为仪器输出的 DN 值; $L(\lambda)$ 为入瞳辐射亮度; $Gain_i$ 称为仪器的增益, 与信号放大、像元尺寸、F 数等参数有关; $Bias_i$ 称为仪器的偏置, 与探测器暗电流、仪器各部件背景辐射、读出电路偏移等参数有关。 $srf_i(\lambda)$ 为归一化光谱响应函数, 与前置光学系统、滤波函数、探测器量子效率曲线有关。

通常, 即使已知所有仪器部件的参数值, 也难以高精度地描述入瞳辐射亮度和输出 DN 值之间的关系。但由公式(1)可知 DN 值和入瞳辐射亮度 $L(\lambda)$ 之间主要是线性关系, 因此现有手段主要是利用黑体提供已知的入瞳辐射亮度 $L(\lambda)$, 用被动式红外光谱成像仪获取对应的 DN 值, 从而求出 DN 值和入瞳辐射亮度

$L(\lambda)$ 之间的具体的线性关系。这一过程称为辐射定标。本文采用的辐射定标模型为线性函数:

$$L(\lambda_i) = a_i DN_i + b_i \quad (2)$$

式中: a_i 、 b_i 分别为辐射定标系数; $L(\lambda_i)$ 为波段 i 的入瞳辐射亮度。实际上式(2)也可以看做式(1)的改写。通过测量波段 i 的一组 $[DN_i, L_i(\lambda)]$, 采用最小二乘法就可以求出辐射定标系数 a_i 和 b_i 。表 2 展示出该仪器的辐射定标结果, 即 DN 值与辐亮度值之间的转换关系式。

表2 DN 值与辐亮度转换关系式

Table 2 Relationship between DN value and radiance conversion

Number of channels	The conversion relationship between DN value and radiance
1	$L = 1.039e-02 * DN - 67.8$
2	$L = 6.427e-03 * DN - 39.14$
3	$L = 7.853e-03 * DN - 48.38$
4	$L = 8.854e-03 * DN - 56.1$
5	$L = 9.571e-03 * DN - 60.51$
6	$L = 1.059e-02 * DN - 67.71$
7	$L = 6.116e-03 * DN - 37.35$
8	$L = 8.865e-03 * DN - 56.45$
9	$L = 7.813e-03 * DN - 49.57$

2.3 气体轮廓提取

气体轮廓检测是红外视频光谱成像气体探测中的一个重要步骤, 其目的是将运动的气体从静态的背景中分离出来。气体轮廓检测简单来说就是前景区从背景区提取出来的过程。本文使用帧间差值法进行气体轮廓提取, 帧间差值法通过时间差分原理提取出图像中的运动区域。假设相邻帧数分别为第 i 帧和第 $i+1$

1帧, 其帧图像分别为 $A_i(x,y)$ 和 $A_{i+1}(x,y)$, 差分图像二值化的阈值为 X , 差分图像用 $D(x,y)$ 表示, 公式为:

$$D(x,y) = \begin{cases} 1 \rightarrow |A_{i+1}(x,y) - A_i(x,y)| > X \\ 0 \rightarrow |A_{i+1}(x,y) - A_i(x,y)| \leq X \end{cases} \quad (3)$$

本文使用Yen算法自动选择图像阈值, Yen阈值算法是一种基于直方图的自适应阈值选择方法, 是由日本学者Yen提出的^[10]。Yen算法的基本思想是将图像的灰度级分成两个部分, 使得两部分之间的类间方差最大。该算法主要分为以下几个步骤: 首先对图像进行灰度级归一化, 并计算其灰度直方图; 然后遍历灰度直方图中的每一个灰度级别, 并计算该灰度级别为阈值时的类间方差; 接着将计算出的类间方差与已经计算的最大类间方差进行比较, 如果当前类间方差更大, 则将该阈值作为新的最佳阈值; 最终确定的最佳阈值就是具有最大类间方差的阈值。Yen算法的优

点是能够更准确地确定图像的阈值, 特别是在图像灰度分布不均匀或噪声较大的情况下, 其分割效果更佳。

帧间差值法简单易懂、易于实现, 且程序运算量小, 适合实时监控。此外, 该算法对光照不敏感, 适合户外环境, 能够排除目标阴影的干扰。

2.4 气体浓度反演

如图5所示, 探测链路信息传输主要包括大气辐射传输和仪器内部信号传输两个部分。其中, 大气辐射传输描述从背景至入瞳辐射的辐射传输过程, 对于被动红外成像系统, 典型的气云测量模型是三层辐射传输模型, 如图5所示, 辐射传输路径分为3个区域: ①前景层: 传感器与气云之间的区域; ②目标云层: 包含目标气体的区域; ③观测背景层: 目标气体与背景之间的区域^[11]。

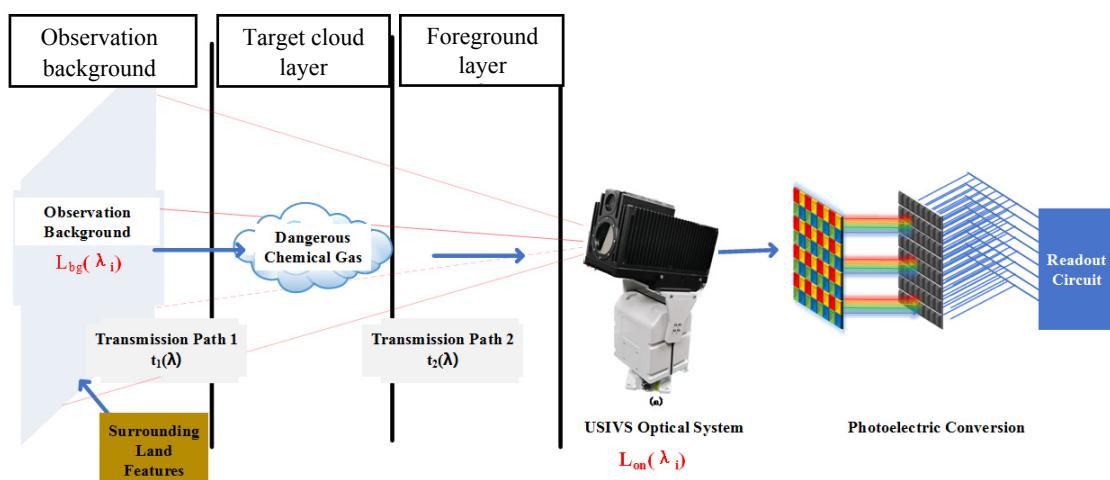


图5 非制冷快照式红外视频光谱成像仪气体探测全链路响应模型

Fig.5 Full-link response model of gas detection in uncooled snapshot infrared video spectrometer

为了解决背景辐射和大气程辐射的干扰, 这里使用了on-off模式, 即在没有污染气体的off模式和同时有污染气体、背景和太阳光的on模式分别进行一次测量, 并从两次测量的辐射数据中解出气体的浓度。

off模式下无危险化学气体层时, 传感器入瞳辐射亮度表达为:

$$L_{\text{off}}(\lambda_i) = L_{\text{bg}}(\lambda_i)t_1(\lambda_i)t_2(\lambda_i) + L_p(\lambda_i) \quad (4)$$

式中: $L_{\text{off}}(\lambda_i)$ 为无气体层时的入瞳辐射亮度; λ_i 为仪器某一波段的光谱响应峰值波长; $L_{\text{bg}}(\lambda_i)$ 为背景辐射亮度; $t_1(\lambda_i)$ 为背景层的大气透过率; $t_2(\lambda_i)$ 为气体层与前景层的大气透过率; $L_p(\lambda_i)$ 为大气程辐射。

on模式下存在危险化学气体层时, 传感器入瞳辐射亮度表达为:

$$L_{\text{on}}(\lambda_i) = L_{\text{bg}}(\lambda_i)t_1(\lambda_i)t_2(\lambda_i)t_{\text{gas}}(\lambda_i) +$$

$$B(\lambda_i, T_{\text{gas}})(1 - t_{\text{gas}}(\lambda_i))t_2(\lambda_i) + L_p(\lambda_i) \quad (5)$$

式中: $L_{\text{on}}(\lambda_i)$ 为无气体层时的入瞳辐射亮度; $t_{\text{gas}}(\lambda_i)$ 为气体层的透过率; $B(\lambda_i, T_{\text{gas}})$ 为普朗克函数; T_{gas} 为气体的温度。

本文采用差值法反演气体浓度。由公式(4)减去公式(5)可以得到:

$$t_{\text{gas}}(\lambda_i) = 1 - \frac{1}{t_2(\lambda_i)} \frac{L_{\text{off}}(\lambda_i) - L_{\text{on}}(\lambda_i)}{L_{\text{bg}}(\lambda_i)t_1(\lambda_i) - B(\lambda_i, T_{\text{gas}})} \quad (6)$$

根据朗伯比尔定律:

$$t_{\text{gas}}(\lambda) = e^{-a_{\text{gas}}(\lambda)c_{\text{gas}}D_{\text{gas}}} \quad (7)$$

式中: $a_{\text{gas}}(\lambda)$ 为一定大气条件下气体的吸收系数, 可以通过 HITRAN 数据库计算得到; c_{gas} 为气体浓度; D_{gas} 为气体光程长度, 单位为 m。 $c_{\text{gas}}D_{\text{gas}}$ 也被称为柱浓度, 单位为 ppm·m。从(7)式可以看出, 当波段响应较宽时, 直接对 $t_{\text{gas}}(\lambda_i)$ 求对数计算浓度会有较大的误差。本文事先建立 $t_{\text{gas}}(\lambda)$ 与浓度查查找表, 在求出 $t_{\text{gas}}(\lambda)$ 后, 通过查找表可确定浓度 c_{gas} 。

要定量反演污染气体的含量, 还需要知道背景大气透过率和污染气体温度。对于大气透过率, 本文主要借助于辐射传输模型结合大气主要气体吸收系数计算得出。污染气体温度和气体浓度耦合, 单通道不可能有定解。本文利用 USIVS 波段多的优势, 选择全通道和气体吸收通道对其进行解耦, 通过双波段迭代方式求出气体温度和浓度。

3 实验验证

3.1 模拟实验

基于气体浓度反演方法的设计与推导, 本节基于 MATLAB 软件常温常压环境下进行六氟化硫 (SF_6) 气体的浓度反演仿真模拟, 研究分析了在常压环境下, 不同气体温度以及不同光程长度条件下的六氟化硫气体的浓度反演的相对误差结果, 为相关实验提供了理论基础。

3.1.1 不同温度模拟实验

本研究基于气体浓度反演方法, 在 MATLAB 平台编写程序进行仿真。在仿真过程中, 背景温度为 50°C, 大气压为 1 个标准大气压, 光程为 100 cm, 这些参数保持不变。设置 SF_6 气体的浓度为 100 ppm, 气体温度分别为 15°C、20°C、25°C、30°C、35°C。针对不同气体温度下的 SF_6 气体进行浓度反演模拟实验。

3.1.2 不同光程长度模拟实验

根据第二章的分析, 在 MATLAB 平台上编写程序, 对气体浓度反演方法进行了模拟实验。针对浓度为 100 ppm 的 SF_6 气体, 本文对不同光程长度下的算法进行了测试。共设置了 5 个不同的光程长度, 分别为 20 cm、40 cm、60 cm、80 cm 和 100 cm。实验中, 保持背景黑体温度为 50°C, SF_6 气体温度为 20°C, 且大气压维持在标准大气压 (101 kPa) 不变。

3.2 测量实验

在实验室场景下, 如图 6 所示, 环境温度为 23.1°C, 背景温度设定为 50°C。在背景成像阶段, 向气体池内充入氮气 (N_2), 然后使用非制冷快照式红外视频光谱成像仪对气体池进行成像, 获取背景 DN 值数据。在气体成像阶段, 向气体池内充入不同浓度

的 SF_6 气体, 并使用非制冷快照式红外视频光谱成像仪对气体池进行成像, 得到不同浓度气体的 DN 值数据。每次更换浓度不同的六氟化硫气体时, 需用氮气将气体池内残留气体冲干净。需要注意的是, 由于气体池中包含两片窗口锗玻璃, 其透过率系数不可忽略, 因此在计算前需先标定确定气体池的窗口锗玻璃透过率, 并代入计算过程中。最后, 根据非制冷快照式红外视频光谱成像仪气体浓度反演方法进行反演计算, 得出气体浓度。

在外场试验中, 如图 7 所示, 环境温度为 20°C, 空气相对湿度为 41%, 气体罐内为六氟化硫气体, 气体罐与探测器之间的距离约为 5 m, 背景为室外天空。在实验中, 没有使用气体池, 而是直接对气体进行成像, 因此透过率与反射率近似为 1.0, 背景数据为不释放气体时的成像数据。气体成像数据采集时由开启气体罐阀门至关闭气体罐阀门的整个过程。

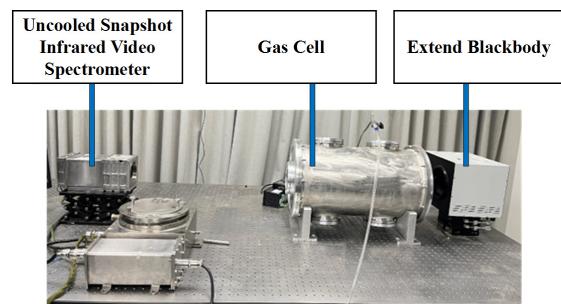


图 6 实验室场景

Fig.6 Laboratory scene diagram

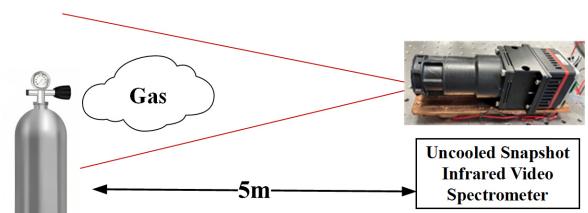


图 7 外场试验方案

Fig.7 Field test scheme

4 结果与分析

4.1 模拟实验结果

根据表 3 的实验数据, 可看出气体温度的变化并未对气体浓度的反演结果产生明显的影响。实验结果表明, 相对误差平均值为 2.88%。综合分析数据, 可以得出结论, 该气体浓度反演方法对气体温度的影响较小, 且具有较好的稳定性, 因此在常温下误差不会很大。

这一结论对于气体浓度反演技术的实际应用具有重要意义。由于大气中气体浓度和温度变化的不确定性,确保测量结果的精度和稳定性是非常关键的。因此,该气体浓度反演方法具有很大的潜在应用价值,可以为气体浓度反演技术的进一步研究和开发提供有力支撑。

表3 不同温度下100 ppm SF₆气体的浓度反演仿真

Table 3 Inversion simulation of 100 ppm sulfur hexafluoride gas concentration at different temperatures

Gas temperature/°C	Set concentration/ppm	Simulated concentration/ppm	Relative error/%
15	100	101.40	1.40
20	100	96.21	3.79
25	100	97.05	2.95
30	100	101.58	1.58
35	100	104.70	4.70
Average error		2.88	

根据表4的数据分析,可以明显观察到,无论光程长度为20 cm、40 cm、60 cm、80 cm还是100 cm,未出现明显的变化,相对误差为0.61%。实验结果表明,该算法对光程长度的变化较为稳健,光程长度的变化不会对该算法的测量精度产生明显的影响。综合分析数据可以得出结论:该算法在不同光程长度下均具有较好的稳定性和精度,可用于实际场景的气体浓度反演测量。

表4 不同光程长度下100 ppm六氟化硫气体的浓度反演仿真

Table 4 Inversion simulation of 100 ppm sulfur hexafluoride gas concentration under different optical path length

Optical path length/cm	Set concentration /ppm	Simulated concentration/ppm	Relative error/%
20	100	100.17	0.17
40	100	100.25	0.25
60	100	100.56	0.56
80	100	99.46	0.54
100	100	101.52	1.52
120	100	100.62	0.62
Average error		0.61	

4.2 测量实验结果

图8为背景差分法得到的图像。分析图8可以发现在第2通道(中心波长为10.18 μm)、第7通道(中心波长为10.55 μm)中, DN值明显增加,第5通道(中心波长为9.81 μm) DN值略微增加,而其他通道

的DN值基本保持不变,这证明了气体池中释放的气体为六氟化硫气体(中心波长为10.55 μm),并且在这个特定的光谱范围内,六氟化硫气体对红外光的吸收较强。同时,这也说明了在使用非制冷快照式红外视频光谱成像仪进行气体检测时,选择合适的滤光片通道可以提高检测的准确性和精度。根据需要检测的气体的光谱特性,选择相应的滤光片通道可以最大程度地提高检测信号的信噪比,从而提高检测结果的可靠性和准确性。

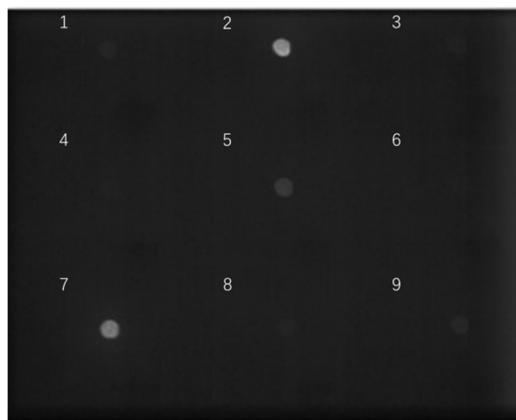


图8 气体池成像效果

Fig.8 Gas pool imaging effect

根据表5,在相同光程和环境温度下,对不同浓度的SF₆气体进行了实验室气体池场景下的气体浓度反演,并记录了相应的反演误差情况。结果表明,该算法的平均反演误差为6.18%,并且随着浓度的增加,反演误差并没有出现明显的比例关系,误差保持相对稳定。总体来看,在较大浓度范围内,该算法的反演精度较高。

表5 气体池浓度反演结果

Table 5 Inversion results of gas pool concentration

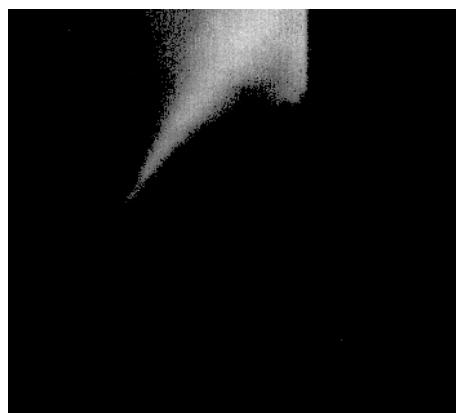
True concentration/ppm	Invert concentration/ppm	Relative error/%
5000	4677	6.46
15000	13802	7.99
25000	26564	6.26
35000	32940	5.89
50000	52155	4.31
Average relative error		6.18

图9展示了在室外天空背景下进行30000 ppm六氟化硫气体成像的9通道图像效果。在这些通道中,选择第7通道用于计算六氟化硫气体的浓度。通过Yen算法进行自动阈值选择,确定DN差值图像的阈值为39,使用此阈值将气体的轮廓与背景分离并提取出气体区域,从而得到气体轮廓图,如图10(a)所示。

通过对气体浓度进行计算并进行伪彩显示,得到伪彩图,如图10(b)所示。

在相同光程和环境温度条件下,表6展示了不同浓度的SF₆气体在室外场景中的反演误差情况。结果显示,平均误差为7.47%,且随着浓度的增加,误差没有明显比例关系,几乎保持不变。总体来看,该算法在很大的浓度范围内表现出较高的反演精度。此外,与实验室场景下的反演误差相比,室外场景的反演精度无明显降低,因此该算法在工厂等室外应用场景下具有较好的抗噪声性能。

在该室外场景下,由于气体的光程长度无法被准确测量,因此该场景下反演浓度值可能会存在一定程度的误差。尽管该算法具有较好的抗噪声性能,但仍需要在实际应用中对这一误差进行充分考虑,并采取相应措施进行补偿,以确保反演结果的准确性和可靠性。



(a)

图10 30000 ppm SF₆气体轮廓图(a)和气体浓度伪彩图(b)

Fig.10 Gas profile diagram (a) of 30000 ppm sulfur hexafluoride, pseudo-color diagram (b) of 30000 ppm sulfur hexafluoride gas concentration

表6 外场浓度反演结果

Table 6 Inversion results of outfield concentration

True concentration/ppm	Invert concentration/ppm	Relative error/%
10000	10590	5.90
20000	17760	11.2
30000	28410	5.30
Average relative error		7.47

5 结论

以提高大气化学污染气体的智能化监测水平为宗旨,本文介绍了一种新型非制冷快照式红外视频光谱成像仪及其适用的数据处理技术流程。为了验证仪器的检测效果和数据处理技术流程的有效性,本文分别设计了相应的仿真试验和测量试验。通过使用气体

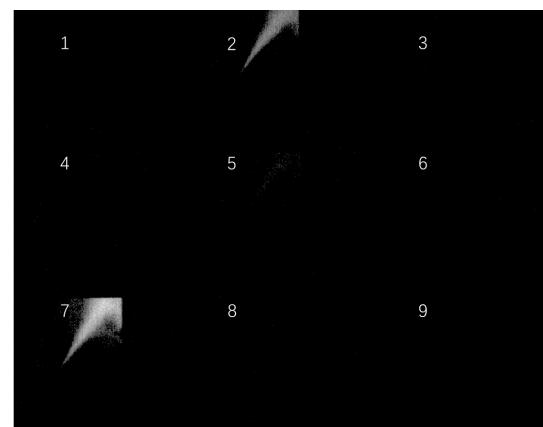
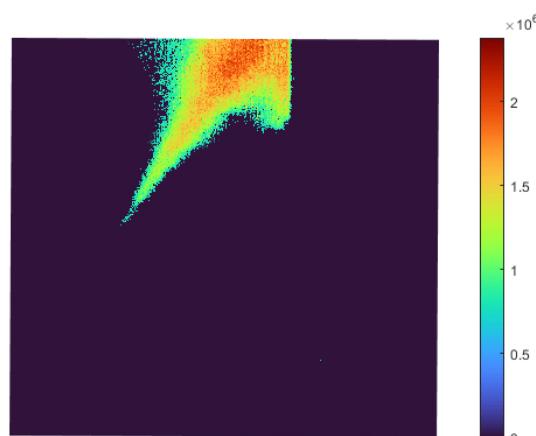


图9 九通道30000 ppm SF₆气体成像效果图(室外天空背景)

Fig.9 Imaging effect of nine channel 30000 ppm sulfur hexafluoride gas (outdoor sky background)



(b)

浓度反演方法对不同温度和光程长度下的气体进行了模拟实验,并得到了较为准确的反演结果,平均误差分别为2.88%和0.61%。在实验室和室外场景下开展了测量试验,结果表明该设备具有较好的稳定性,气体浓度检测平均误差分别为6.18%和7.47%。实验验证表明,本文所提出的数据处理的方法可以较为准确地从设备所获取的原始数据中反演出气体的浓度。此外,本文所提出的数据处理技术流程不仅适用于USIVS,同样适用于类似设计的气体检测设备。

参考文献:

- [1] 高泽东,高洪兴,朱院院,等.快照式光谱成像技术综述[J].光学精密工程,2020,28(6):1323-1343.
GAO Zedong, GAO Hongxing, ZHU Yuanyuan, et al. Review of snapshot spectral imaging technologies[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2020, 28(6): 1323-1343.

- [2] 李春来, 刘成玉, 金健, 等. 热红外高光谱成像仪(ATHIS)对矿物和气体的实验室光谱测量[J]. 红外与毫米波学报, 2020, **39**(6): 767-777.
LI Chunlai, LIU Chenyu, JIN Jian, et al. Spectral measurement of minerals and gases based on airborne thermal-infrared hyperspectral imaging system(ATHIS)[J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2020, **39**(6): 767-777.
- [3] 李春来, 吕刚, 袁立银, 等. 机载热红外高光谱成像仪的光谱性能测试与初步应用[J]. 红外与激光工程, 2020, **49**(5): 158-164.
LI Chunlai, LV Gang, YUAN Liyin, et al. Laboratory calibration and application of the airborne thermal infrared hyperspectral imager (ATHIS) [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2020, **49**(5): 158-164.
- [4] 张旭, 金伟其, 李力, 等. 天然气泄漏被动式红外成像检测技术及系统性能评价研究进展[J]. 红外与激光工程, 2019, **48**(S2): 53-65.
ZHANG Xu, JIN Weiqi, LI Li, et al. Research progress on passive infrared imaging detection technology and system performance evaluation of natural gas leakage[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2019, **48**(S2): 53-65.
- [5] 谭雨婷, 李家琨, 金伟其, 等. 气体泄漏的单点探测器与红外成像检测的灵敏度模拟分析[J]. 红外与激光工程, 2014, **43**(8): 2489-2495.
TAN Yuting, LI Jiakun, JIN Weiqi, et al. Model analysis of the sensitivity of single-point sensor and IRFPA detectors used in gas leakage detection[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, **43**(8): 2489-2495.
- [6] 陈良富, 顾坚斌, 王甜甜, 等. 近地面 NO₂ 浓度卫星遥感估算问题[J]. 环境监控与预警, 2016, **8**(3): 1-5.
CHEN Liangfu, GU Jianbing, WANG Tiantian, et al. Scientific problems for ground NO₂ concentration estimation using DOAS method from satellite observation[J]. *Environmental Monitoring and Forewarning*, 2016, **8**(3): 1-5.
- [7] 游介文, 邹滨, 赵秀阁, 等. 基于随机森林模型的中国近地面 NO₂ 浓度估算[J]. 中国环境科学, 2019, **39**(3): 969-979.
YOU Jiewen, ZOU Bin, ZHAO Xiuge, et al. Estimating ground-level NO₂ concentrations across China's mainland using random forests regression modeling[J]. *China Environmental Science*, 2019, **39**(3): 969-979.
- [8] John Freddy Grajales, Astrid Baquero-Bernal. Inference of surface concentrations of nitrogen dioxide (NO₂) in Colombia from tropospheric columns of the ozone measurement instrument (OMI)[J]. *Atmosfera*, 2014, **27**: 193-214.
- [9] QIN Kai, HAN Xu, LI Donghui, et al. Satellite-based estimation of surface NO₂ concentrations over east-central China: A comparison of POMINO and OMNO2d data[J]. *Atmospheric Environment*, 2020, **224**: 117322.
- [10] YEN JY. Finding the k shortest loopless paths in a network[J]. *Management Science*. 1971, **17**(11): 712-716.
- [11] Nathan Hagen, Robert T Kester, Chanda Walker. Real-time quantitative hydrocarbon gas imaging with the gas cloud imager (GCI)[C]//SPIE Proceedings, 2012, **8358**: 1-2.