

SO₂紫外相机的实时自定标方法研究张子豪¹, 郭建军¹, 张会亮¹, 熊远辉², 李娟³, 武魁军¹, 何微微^{1*}¹烟台大学物理与电子信息学院, 山东 烟台 264005;²中国科学院精密测量科学与技术创新研究院, 湖北 武汉 430071;³中国科学院西安光学精密机械研究所, 陕西 西安 710119

摘要 基于紫外 SO₂ 相机成像探测技术的工作机理, 结合紫外辐射传输理论提出了 SO₂ 相机的自定标理论。简要介绍了目前常用的 3 种定标 (标准泡定标、DOAS 定标和光谱定标) 方法, 并通过分析传统定标方法的局限性, 阐述了自定标方法相对于传统定标方法的优势。实验结果表明, 自定标法拟合的定标曲线斜率较传统方法所得定标曲线斜率相差约 1.4%, 平均相对误差约 6%, 满足测量精度要求。自定标方法具有准确、简便、实用的技术优点, 在移动污染源的紫外成像遥感监测中具有良好的应用前景。

关键词 遥感; SO₂ 相机; 紫外光谱; 自定标; 成像遥感

中图分类号 O433 **文献标志码** A

DOI: 10.3788/AOS221512

1 引言

伴随着经济全球化的浪潮和共同建设 21 世纪“海上丝绸之路”倡议的提出, 航运凭借其运货量大、运费低等特点获得迅速发展, 成为世界贸易中最重要的运输方式。但航运业导致的船舶尾气污染问题也日益加剧。研究表明, 一艘燃油含硫量 (含硫的质量分数) 为 3.5% 的中大型集装箱船, 以七成功率负荷航行 24 小时所排放的污染物相当于 21 万辆国四排放标准的重货车行驶一天所排放的污染物^[1]。在船舶尾气的诸多污染物之中, 对环境破坏最为严重的污染气体是 SO₂。SO₂ 排入大气会被氧化成硫酸雾或硫酸盐气溶胶, 是环境酸化重要前驱物。因此, 监测 SO₂ 气体的排放情况对保障人民健康安全和环境质量有着重要意义。

为监测 SO₂ 气体排放情况, 国内外顶级科研机构相继提出了多种遥感技术, 例如拉曼散射激光雷达^[2]、差分吸收激光雷达 (DIAL)^[3]、傅里叶变换红外吸收光谱仪 (FTIR)^[4]、差分吸收光谱仪 (DOAS)^[5]、成像光谱仪^[6]。其中: 拉曼散射激光雷达和差分吸收激光雷达属于主动探测方式, 可实现污染物空间立体检测, 具有远距离分辨能力强的优点^[2-3], 但设备庞大, 机动性差, 不适用于移动污染源的遥感监测; FTIR、DOAS 等被动遥感监测技术的便携性相对较高, 且具有测量范围

宽、分析速度快、多组分同时分析等优点^[4-5], 但只能测量尾气烟羽中某点的污染物含量, 随机误差大; 成像光谱仪可以同时获取污染物一维光谱信息及二维空间信息^[6], 但结构较为复杂, 一般需要机械扫描获取图像信息, 时间分辨率通常较低。

近年来, 一种具有高时空分辨率的紫外 SO₂ 相机成像探测技术得到迅速发展^[7]。由于 SO₂ 排放速率是火山活动最重要的指标之一, 因此这种新型气体成像技术最初应用于火山灾害监测。2006 年, Mori 等^[8]率先将相机用于火山喷发的遥感探测, 并成功获得了 SO₂ 浓度图像; 2011 年, Nadeau 等^[9]对 Fuego 火山的紧密相邻的两个喷气口 SO₂ 排放率进行了同步测量, 通过结合地震测量数据, 揭示了地震和脱气共用一个源过程, 从而对脱气和喷发动力学提供前所未有的见解; 2016 年, Pering 等^[10]利用 SO₂ 紫外相机记录了 Stromboli 火山的 200 多次喷气事件, 并通过高时间分辨率气体流量数据与管道气体流动的数值模拟相结合, 对火山脱气动力学进行了深入研究; 2020 年, Pering 等^[11]将多个紫外相机与同步航空测量相结合, 获得了 Stromboli 火山喷口特定的气体成分和通量, 从而对火山的浅层脱气过程和火山爆发的驱动因素有了更加深入的理解。随着紫外相机性能的提升以及滤光片透过率的提高, 从灵敏度和探测极限方面来看, 紫外

收稿日期: 2022-07-21; 修回日期: 2022-08-26; 录用日期: 2022-10-26; 网络首发日期: 2022-11-04

基金项目: 国家自然科学基金 (41975039, 61705253)、山东省自然科学基金 (ZR2021QD088)、山东省高等学校“青创科技支持计划” (2021KJ008)、国家重点研发计划“大气污染成因与控制技术研究”重点专项 (2017YFC0211900)、大学生创新创业训练计划项目 (202111066006)

通信作者: *heweiwei@ytu.edu.cn

成像技术已经完全可以应用于 SO_2 浓度更低的人为污染源监测。2015 年, Smekens 等^[12] 使用 SO_2 相机系统对燃煤发电厂的污染物排放情况进行了远程监测; 2017 年, Osorio 等^[13] 实现了在多云天气下对工厂烟囱尾气的外场测量; 2021 年, Cao 等^[14] 基于 SO_2 紫外相机, 利用卷积神经网络算法实现了对在航船舶燃油含硫量的精准预测。

尽管 SO_2 相机相较于传统遥感技术有很大的优势, 但其高灵敏性导致在应用时易受到环境的影响, 从而产生测量误差, 因此定标成为该技术反演精度的关键影响因素。当前 SO_2 相机系统有 3 种常用的定标方法, 分别是标准泡法^[15]、DOAS 定标法^[16] 和光谱定标法^[17]。使用标准泡法时需要将定标泡近距离放置于镜头前, 并频繁改变观察方向, 这使得该定标法不适用于监测移动污染源的 SO_2 排放情况; DOAS 定标法虽然可以远距离监测 SO_2 浓度, 但其视场小、匹配性差, 存在定标不准确的问题; 光谱定标法在定标的实时性及准确度方面相较于标准泡和 DOAS 定标法均有显著提高, 但由于需要额外配置高光谱分辨率的紫外光谱仪, 极大影响了 SO_2 相机系统的便携性, 而且增加了操作复杂性及设备成本。可见, 借助外置定标设备的传统定标方式具有很大的局限性, 使得目前的 SO_2 相机技术很难应用于移动污染源的实时监测。因此, 发展自定标方法是将 SO_2 紫外相机技术推广到船舶尾气监测领域的必要途径。

本文结合 SO_2 相机测量原理和紫外辐射传输理论, 提出一种自定标方法, 通过与三种定标法(标准泡法、DOAS 法和光谱法)对比, 以及上海港的外场实验, 验证了所提定标方法的准确性和可靠性, 为解决国际上 SO_2 相机难以应用于船舶尾气等移动污染源遥感监测的技术难题提供了一种新思路。

2 成像测量原理

SO_2 相机由紫外灵敏相机和两块中心波长相邻的紫外带通滤光片组成, 通过两通道内气体对太阳散射光吸收率的不同实现 SO_2 浓度的反演。污染源所排放的尾气烟羽中, 除了 SO_2 , 还有固体颗粒物, 固体颗粒物的消光效应会影响实际测量结果, 因此选择双滤光片来消除固体颗粒物对 SO_2 浓度反演的影响。 SO_2 气体在 240~320 nm 的紫外区表现出明显的光谱特征, 而短于 300 nm 的波长区域由于臭氧层的吸收作用, 无法用于 SO_2 的遥感探测^[18](图 1)。

在以 310 nm 为中心的窄带区域, 大气吸收相对较弱, SO_2 的吸收特性较强, 因此选择 310 nm 作为信号通道的中心波长(记为 A 通道)。为量化由固体颗粒物消光效应引起的光衰减量, 将 330 nm 为中心的 B 通道作为参考通道。利用 A 通道采集到的图像反演得到 SO_2 气体的吸收率和固体颗粒物的消光系数, 再扣除通过 B 通道得到的固体颗粒物的消光系数, 最终获得 SO_2

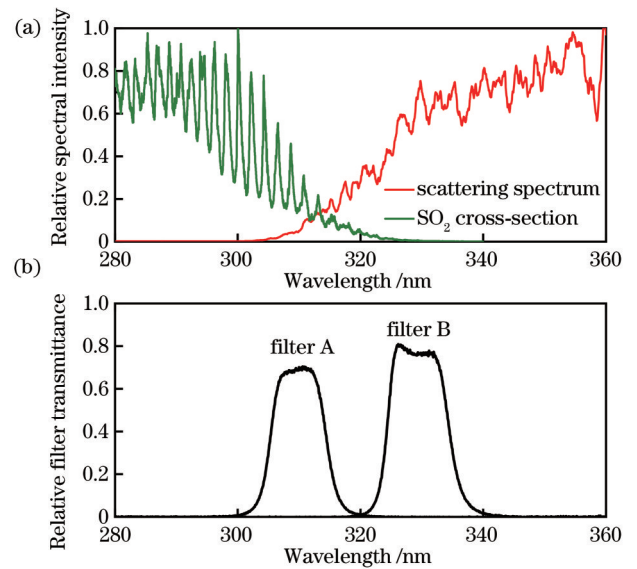


图 1 SO_2 相机成像机理。(a) 归一化 SO_2 吸收截面和太阳散射光谱; (b) 滤光片在 310 nm 和 330 nm 的透过率曲线

Fig. 1 Imaging mechanism of the SO_2 camera. (a) Normalized SO_2 absorption cross-section and solar scattering spectrum; (b) transmittance curves of filters at 310 nm and 330 nm

的测量图像。

A 通道接收到的太阳散射光受到 SO_2 吸收和固体颗粒物消光效应的双重影响^[19], 根据朗伯-比尔定律, 可表示为

$$I_A(\lambda) = I_{A0}(\lambda) \exp[-\sigma(\lambda)S(\lambda) - \tau_m], \quad (1)$$

式中: λ 为波长; $I_{A0}(\lambda)$ 和 $I_A(\lambda)$ 分别为穿过气团前、后的光强; $\sigma(\lambda)$ 为 SO_2 吸收截面; $S(\lambda)$ 为 SO_2 柱浓度; τ_m 为气溶胶光学厚度。

由于 SO_2 的吸收截面在 330 nm 处截止, 故 B 通道只受到固体颗粒物消光效应的影响, 可表示为

$$I_B(\lambda) = I_{B0}(\lambda) \exp(-\tau_m), \quad (2)$$

式中: $I_{B0}(\lambda)$ 和 $I_B(\lambda)$ 分别为穿过气团前、后的光强。

对滤光片通道光学厚度进行综合处理, 得到 SO_2 的光学厚度, 即

$$\tau_{\text{SO}_2} = -\ln \frac{I_A(\lambda)}{I_{A0}(\lambda)} + \ln \frac{I_B(\lambda)}{I_{B0}(\lambda)}, \quad (3)$$

式中: τ_{SO_2} 为 SO_2 光学厚度。

由式(3)可知, 通过 A、B 两通道的烟羽图像和背景图像, 可以计算 τ_{SO_2} 。而 τ_{SO_2} 的大小由烟羽中 SO_2 浓度决定。因此, 利用定标曲线, 即可反演得到 SO_2 的浓度图像。

3 传统定标方法

通过 SO_2 相机图像反演得到的 SO_2 光学厚度与 SO_2 浓度大致成正比, 但比例系数会随光照条件、探测距离, 以及大气能见度的不同而变化。通过光学厚度与浓度之间的函数关系确定定标曲线, 是精确反演

SO₂浓度的关键步骤。标准泡定标、DOAS定标和光谱定标是3种传统定标方法,其在物理原理、操作方法、定标精度,以及适用场景上,各有优缺点。

3.1 标准泡定标法

标准泡定标是最基本的定标方法,其原理是在多个标准泡中注入不同含量的SO₂,用紫外相机测量其对应的SO₂光学厚度,通过拟合定标曲线得到两者相应的数值关系。如图2所示,随机选取4组不同气体在单位面积内的排放量(以下简称“排放量”)的标准泡,并将SO₂排放量设为参数 X ,SO₂光学厚度设为参数 Y ,4组数据统计后拟合,得到的定标曲线可以用函数 $Y=0.111X$ 表示。经计算,定标曲线的拟合度为0.99,体现了SO₂光学厚度与SO₂排放量间的线性关系。在标定过程中,标准泡放置于相机镜头前,气室内没有气溶胶和颗粒,所以它只适用于近距离校准;并且在应用时,需频繁改变观测方向,导致很难估计和预测定标的不确定度,无法保障实时性。

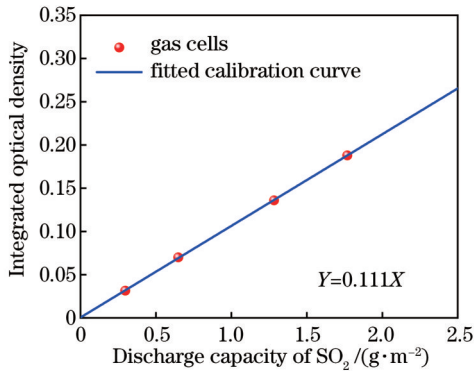


图2 标准泡定标法获得的定标曲线

Fig. 2 Calibration curve obtained by the calibration cell

3.2 DOAS定标法

DOAS的基本原理是基于气体分子的窄带吸收特性来识别气体成分,并根据吸收强度来推断气体浓度^[20]。由于仪器自身视场有限,通过测量相机视场中与光谱仪视场对应的某个点的烟羽信息获得SO₂排放量,利用SO₂相机图像反演获取SO₂光学厚度;随着时间的推移,可连续测得两个物理量之间的多个对应数据组。然后,通过拟合它们的主函数关系进而确定DOAS的定标曲线。利用光谱仪连续测量后描点,得到多组数据,找到其最佳拟合曲线即DOAS法定标曲线,如图3所示。拟合后的定标曲线为 $Y=0.114X$,拟合度为0.91。然而DOAS法在实际应用时受人为操作、现场环境等因素影响,难以保障光谱仪数据与SO₂相机图像信息在空间关系上准确对应,无法获得SO₂排放量与其光学厚度之间的最佳相关性,这导致了测量值与真实值之间存在不可忽视的误差。此外,SO₂相机应用于远距离测量时,随着相机与目标间距离的增大,相机视场边缘的像元受太阳光光程影响较

大,导致其信号强度与相机视场中心的像元光强存在差异。因此,将通过特定点确定的定标曲线应用于整个图像反演显然是不合适的。

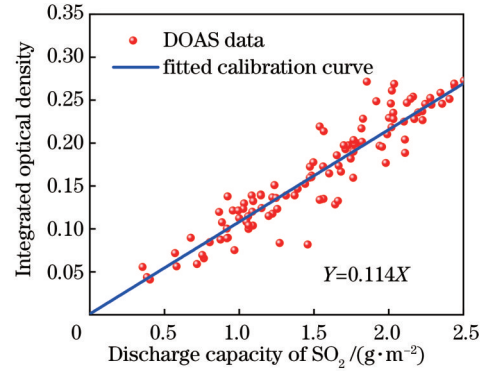


图3 DOAS定标法获得的定标曲线

Fig. 3 Calibration curve obtained by DOAS

3.3 光谱定标法

光谱定标法在定标时,光谱仪视场选择与烟羽相邻的天空背景,获得其太阳散射光强。根据相机成像原理(见第2节)及式(1)和式(3),太阳散射光强与A通道滤光片透过率曲线卷积得到A通道的光学厚度曲线,同理可得B通道光学厚度曲线,将A通道光学厚度曲线减去B通道光学厚度曲线即可获得光谱法定标曲线 $Y=0.122X$ (图4)。光谱法在定标时结合光谱仪与SO₂相机,充分利用了测量数据,同时改善了DOAS法只用单一光谱仪测量目标源时存在的视场不匹配问题,有效提高了定标准确性。然而,仪器内置的高分辨率光谱仪增加了设备复杂性及成本,影响了仪器的便携性。

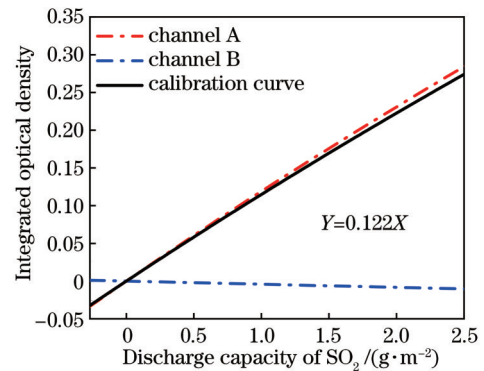


图4 光谱定标法获得的定标曲线

Fig. 4 Calibration curves obtained by spectral calibration method

4 自定标方法

如前所述,现有定标法有着各自不同的物理机理及实施方式,但均需要外置定标设备,导致SO₂紫外相机技术不能很好地适用于移动污染源的实时遥感监

测。自定标方法就是不借助除 SO₂ 紫外相机以外的任何辅助设备,只利用 SO₂ 紫外相机的测量结果实现自主定标,因此在船舶尾气遥感监测领域有着更加显著的技术优势。

4.1 基本原理

对于 300~340 nm 探测波段,SO₂ 及 O₃ 均具有特征吸收光谱。相较于污染源烟羽中的 SO₂ 含量,大气中 SO₂ 含量非常低^[21],因此可以忽略 SO₂ 引起的消光作用,在探测波段内 O₃ 的吸收作用占主导地位,两个通道记录的天空背景图像仅受 O₃ 含量变化的影响。太阳高度角(θ_{SZA})大时,穿过臭氧层的平均光程比高度角小时长得多。图 5 显示了 4 种不同 θ_{SZA} (0°、20°、40° 和 60°) 随波长变化的太阳散射光强。由于 O₃ 的吸收截面向深紫外波长显著增加,且 A 通道受臭氧光程长度变化影响较大,B 通道受臭氧吸收的影响相对较小。这种差异是 SO₂ 相机自定标基本原理的来源。

两个通道的强度比 R 可表示为

$$R = \log \left[\frac{\int_0^\infty L_0(\lambda) \cdot T_A(\lambda) \cdot Q(\lambda) d\lambda}{\int_0^\infty L_0(\lambda) \cdot T_B(\lambda) \cdot Q(\lambda) d\lambda} \right], \quad (4)$$

式中: $L_0(\lambda)$ 为太阳散射辐射; $Q(\lambda)$ 为相机的量子效率; $T_A(\lambda)$ 为 A 通道的滤光片透过率; $T_B(\lambda)$ 为 B 通道的滤光片透过率。

SO₂ 相机系统的标定系数可以从 τ_{SO_2} 和 S_{SO_2} 之间的数值关系中线性拟合获得。在实际操作中,如果给出了太阳散射辐射 L 、两块滤光片的透过率 T 和相机的量

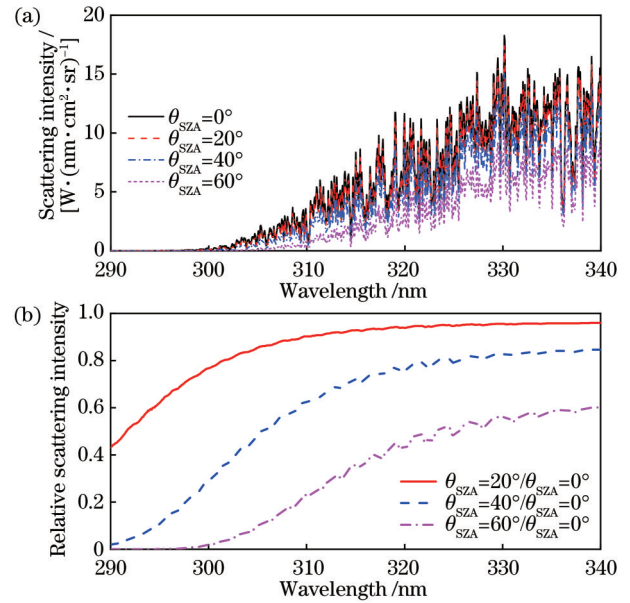


图 5 自定标方法的散射强度曲线。(a) 不同 θ_{SZA} 时太阳散射光谱强度随波长的变化;(b) 不同 θ_{SZA} 下相对散射强度曲线

Fig. 5 Scattering intensity curves of self-calibration method. (a) Variation of solar scattering spectral intensity with wavelength at different θ_{SZA} ; (b) relative scattering intensity curves at different θ_{SZA}

子效率 Q , SO₂ 相机的标定曲线也可以直接计算得出。

SO₂ 光学厚度和 SO₂ 柱浓度之间的物理关系取决于 θ_{SZA} 、总 O₃ 浓度、滤光片透过率 T 和相机的量子效率 Q 。可以依据第 2 节中提供的理论进行计算:

$$\tau_{SO_2} = \log \left\{ \frac{\int_0^\infty L_0(\lambda) \cdot \exp\{-[\sigma_{SO_2}(\lambda) \cdot S_{SO_2}]\} \cdot T_A(\lambda) \cdot Q(\lambda) d\lambda}{\int_0^\infty L_0(\lambda) \cdot T_A(\lambda) \cdot Q(\lambda) d\lambda} \right\} - \log \left\{ \frac{\int_0^\infty L_0(\lambda) \cdot \exp\{-[\sigma_{SO_2}(\lambda) \cdot S_{SO_2}]\} \cdot T_B(\lambda) \cdot Q(\lambda) d\lambda}{\int_0^\infty L_0(\lambda) \cdot T_B(\lambda) \cdot Q(\lambda) d\lambda} \right\}. \quad (5)$$

图 6 显示了在不同大气条件(大气能见度或云的存在)下,两个通道的强度比随 θ_{SZA} 的变化情况。可以看出,随着 θ_{SZA} 的增加,逐渐增加的光程使得更多的太阳散射光被 O₃ 吸收,严重影响 A 通道的光谱强度,导致两通道强度比呈下降趋势,并逐渐趋于一致。

图 7 显示了定标系数 κ 在不同大气条件下与两个通道的强度比对数的函数关系,定标系数随强度比 R 的对数单调上升。

综上所述可以得到以下两个结论:1)两个通道的强度比均是 θ_{SZA} 的单调函数,且随 θ_{SZA} 的增加明显降低,并且随着强度比对数值的增加,定标系数显著增加;2)定标系数近似为强度比对数的单调函数,它们之

间的关系受云层、气溶胶、能见度等大气条件的影响很小。因此,如果已知两个通道的背景图像的比值,即可确定 SO₂ 相机的定标曲线。

4.2 验证性实验

任何新的技术或方法,都需要从理论分析或模拟开始。本文通过搭建一套烟囱尾气模拟装置用于验证自定标方法的可行性。实验中将 SO₂ 相机视场对准模拟烟囱尾气,拍摄的原始图像如图 8 所示,其中图 8(a)所示为 310 nm 处的原始图像,图 8(b)所示为 330 nm 处的原始图像。根据 Osorio 等^[13]的理论,可以用 2-IM 法直接从原始图像中获得两个通道的天空背景图像。在人工背景生成前,原始图像需先按照 Kantzas 等^[22]

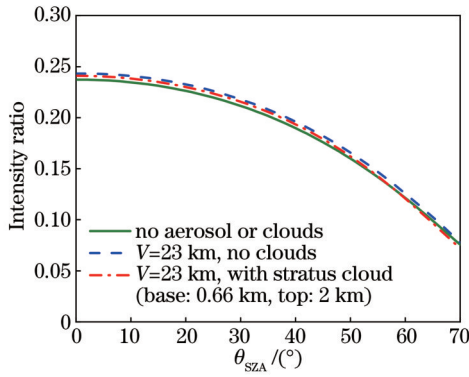


图 6 两个通道强度比在不同大气条件下随 θ_{SZA} 的变化
Fig. 6 Intensity ratio of the two channels varying with θ_{SZA} at different atmospheric conditions

概述的理论进行处理,特别是对暗噪声的处理,并通过平移和旋转操作优化图像相关性以获得最佳匹配度。利用 2-IM 法获得的人工背景如图 8(c)、(d)所示。

图 9 所示为自定标法与传统定标法获得的定标曲

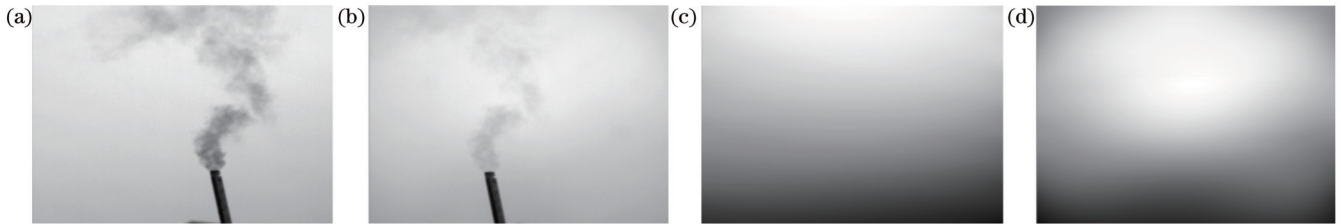


图 8 紫外相机拍摄的原始图像及人工生成的背景图像。(a) 310 nm 通道的原始图像;(b) 330 nm 通道的原始图像;(c) 310 nm 通道的背景图像;(d) 330 nm 通道的背景图像

Fig. 8 Original images taken by the UV camera and artificial background images. (a) Original image of 310 nm channel; (b) original image of 330 nm channel; (c) background image of 310 nm channel; (d) background image of 330 nm channel

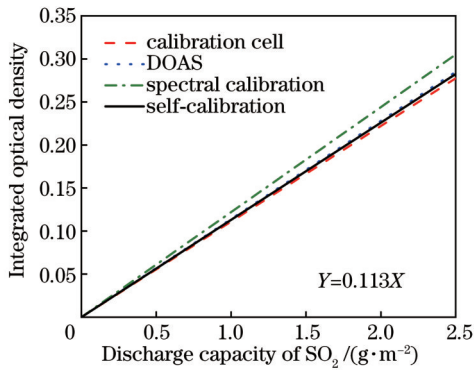


图 9 验证性实验定标曲线

Fig. 9 Calibration curve in the validation experiment

5 成像遥感实验及数据处理

根据理论分析和验证性实验结果,在 2019 年 4 月 11 日对上海港来往船舶的 SO_2 排放情况进行了遥感监测(图 10)。实验结果采用自定标方法对测量数据进行定标,获得其排放量反演图像。本实验使用的 SO_2 相机系统由一对具有 $1200 \text{ pixel} \times 1200 \text{ pixel}$ 的紫外

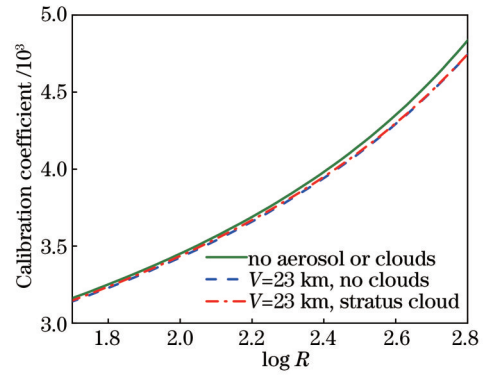


图 7 定标系数随两个通道的强度比对数的变化关系
Fig. 7 Calculated calibration coefficients varying with logarithm of intensity ratio of the two channels

线对比。由自定标法确定的定标曲线为 $Y = 0.113X$, 该定标曲线与传统定标法拟合的定标曲线的斜率相差 1.4%, 在测量误差范围内。经验证性实验,证明了自定标法的可行性。

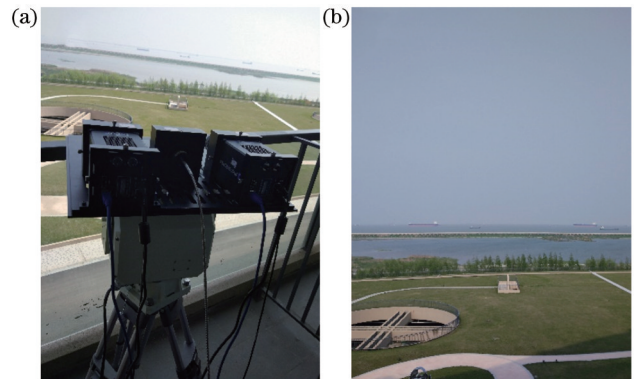


图 10 上海港实验现场。(a) SO_2 相机、DOAS 和相关组件的设置;(b) 目标船舶

Fig. 10 Experimental site in Shanghai Port. (a) Set-up of SO_2 camera, DOAS, and associated components; (b) target ship

CMOS 相机 (Photometrics Prime95B)、 F 值为 4.0 的 C 接口石英镜头 (Universe Kogaku UV1054B) 和两组中心波长分别为 310 nm 和 330 nm、带宽均为 10 nm 的紫外带通滤光片组成。该相机的主要优点是采样频率大 (优于 40 Hz) 和信噪比良好 (相机的量子效率在

310 nm 和 330 nm 处为 50%~55%), 可以满足监测船舶的条件(快速移动和低 SO_2 排放量)。为对比验证, 在两相机间安装了紫外光谱仪(DOAS)。DOAS 系统由一台分辨率为 0.035 nm 的 Ocean Optics USB2000+ 光谱仪、一根 400 μm 长的石英光纤和一个与相机系统相同的镜头组成。DOAS 与相机系统相连, 测量相机成像中心的 SO_2 柱浓度。该成像系统的实验装置及实验测量现场如图 11 所示, SO_2 相机和 DOAS 连接在移动

平台上, 移动平台由软件控制以跟踪船舶。

本实验中, 两相机同时捕获相同视场中的船舶烟羽。图 11(a)、(b) 所示分别为 310 nm 和 330 nm 通道捕获的原始图像。为便于处理, 对原始图像海面部分进行裁剪, 仅保留船舶及其天空背景图像。通过 2-IM 法分别获得两个通道的人工背景图像, 相应背景强度的平均值作为自定标方法的输入参数。综合处理后两个通道的背景图像的比值如图 11(c) 所示。



图 11 船舶烟羽原始图像。(a) 310 nm 通道捕获的原始图像; (b) 330 nm 通道捕获的原始图像; (c) 两个通道的人工背景图像的数量比

Fig. 11 Original images of ship plume. (a) Original image obtained from 310 nm channel; (b) original image obtained from 330 nm channel; (c) intensity ratio of artificial background images of two channels

根据标定系数与两幅图像强度比的对数关系, 即可确定相机标定曲线。图 12 为通过自定标法反演得到的船舶尾气 SO_2 排放量。由海面以及船舶本身的反射导致的背景光对比度的变化可能会影响 SO_2 排放量的反演结果。由图 12 可知, 船舶尾气 SO_2 烟羽的湍流结构清晰, 图像均匀, 展现了自定标方法良好的定标特性以及 SO_2 紫外相机优越的二维成像能力。

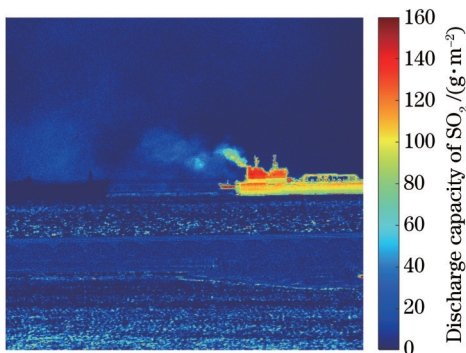


图 12 从紫外相机获得的船舶尾气 SO_2 排放量

Fig. 12 SO_2 discharge capacity of ship exhaust obtained from UV camera

为验证自定标方法的精确性, 将其测量数据与光谱仪采集数据作对比, 得到两种方法测量值相对误差的时间序列(图 13)。可以看出, 两种方法的定标结果具有相对较好的一致性, 误差约为 6%, 其中在 25~30 s 和 90 s 后的差值突变可能是跟踪船舶时移动平台

的快速旋转引起的。然而, 与验证实验中得出的定标误差相比, 外场实验中通过自定标法获取的排放量数值与传统定标法的测量值存在的差异较大, 这不符预期, 其原因可能是自定标法在远距离遥测时受海面气溶胶的光稀释效应影响较为严重, 最终导致测量误差增大。

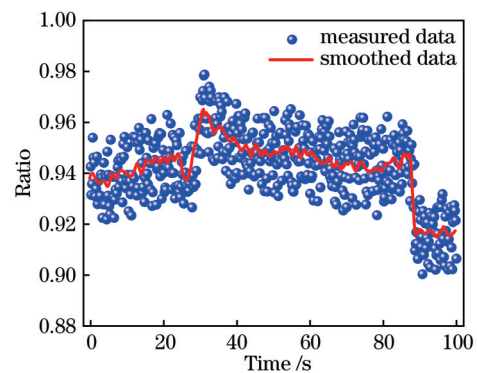


图 13 自定标法和 DOAS 法测量相对误差的时间序列

Fig. 13 Time series of relative errors obtained from DOAS approach and self-calibration method

6 结 论

针对移动污染源的高精度监测需求, 提出一种 SO_2 相机实时自定标方法。首先从 SO_2 相机工作机理着手, 讲述了相机获取 SO_2 排放量图像原理。随后分别介绍 3 种现有定标法, 讨论了不同方法在实际应用

时面临的问题。针对传统定标方法的不足,详细给出了与自定标相关的理论基础,包括大气紫外辐射传输、SO₂光学厚度、SO₂柱浓度和天空背景图像强度之间的物理关系。其次,基于SO₂柱浓度与SO₂光学厚度的比值与310 nm和330 nm背景天空图像强度比的一一对应关系,从理论上证明了这种关系的参数几乎不受大气条件影响,为SO₂相机的自定标提供了理论参考。为了验证该方法的有效性,通过实验将其与传统定标法进行误差比较,经滤光片透过率修正后,定标误差降低到1.4%。最后,在上海港附近进行了现场试验,利用自定标法反演获得船舶尾气SO₂排放量并与光谱仪测量结果进行对比,通过比较两种方法在时间序列上的测量差值验证自定标方法的精确性。

与传统定标方法相比,所提方法更加方便实用,但其精确性受光稀释影响较大,在未来的工作中将重点解决这一问题,使自定标法能克服距离因素并适应海上复杂环境,使其更好地适用于移动污染源的监测。该技术极大地提高了SO₂相机系统的性能,并在不久的将来可能成为紫外成像遥感监测的标准定标方法。

参 考 文 献

- [1] Li M J, Li Y, Cheng J X, et al. Current situation and prospect of air pollutant emission standards for ships[J]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2019, 631(4): 042014.
- [2] 刘文清. “双碳”目标下大气环境光学监测技术发展机遇[J]. 光学学报, 2022, 42(6): 0600001.
Liu W Q. Opportunities and challenges for development of atmospheric environmental optics monitoring technique under “double carbon” goal[J]. Acta Optica Sinica, 2022, 42(6): 0600001.
- [3] 贾鹏程, 曹念文, 范广强, 等. 重污染过程的差分吸收激光雷达监测[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(9): 0901002.
Jia P C, Cao N W, Fan G Q, et al. Differential absorption lidar monitoring of heavy pollution process[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58(9): 0901002.
- [4] Wiacek A, Li L, Tobin K, et al. Characterization of trace gas emissions at an intermediate port[J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2018, 18(19): 13787-13812.
- [5] 张豹, 高潮, 郭永彩, 等. 基于DOAS及统计量的低浓度SO₂测量方法(英文)[J]. 光子学报, 2018, 47(2): 0230001.
Zhang B, Gao C, Guo Y C, et al. Measurement method for low-concentration SO₂ based on statistics and DOAS[J]. Acta Photonica Sinica, 2018, 47(2): 0230001.
- [6] 刘进, 司福祺, 周海金, 等. 基于成像差分吸收光谱技术测量电厂SO₂排放方法研究[J]. 光学学报, 2015, 35(6): 0630003.
Liu J, Si F Q, Zhou H J, et al. Estimation of sulfur dioxide emission from power plant using imaging differential optical absorption spectroscopy technique[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(6): 0630003.
- [7] Campion R, Delgado-Granados H, Mori T. Image-based correction of the light dilution effect for SO₂ camera measurements[J]. Journal of Volcanology and Geothermal Research, 2015, 300: 48-57.
- [8] Mori T, Burton M. The SO₂ camera: a simple, fast and cheap method for ground-based imaging of SO₂ in volcanic plumes[J]. Geophysical Research Letters, 2006, 33(24): L24804.
- [9] Nadeau P A, Palma J L, Waite G P. Linking volcanic tremor, degassing, and eruption dynamics via SO₂ imaging[J]. Geophysical Research Letters, 2011, 38(1): L01304.
- [10] Pering T D, McGonigle A J S, James M R, et al. Conduit dynamics and post explosion degassing on Stromboli: a combined UV camera and numerical modeling treatment[J]. Geophysical Research Letters, 2016, 43(10): 5009-5016.
- [11] Pering T D, Liu E J, Wood K, et al. Combined ground and aerial measurements resolve vent-specific gas fluxes from a multi-vent volcano[J]. Nature Communications, 2020, 11: 3039.
- [12] Smekens J F, Burton M R, Clarke A B. Validation of the SO₂ camera for high temporal and spatial resolution monitoring of SO₂ emissions[J]. Journal of Volcanology and Geothermal Research, 2015, 300: 37-47.
- [13] Osorio M, Casaballe N, Belsterli G, et al. Plume segmentation from UV camera images for SO₂ emission rate quantification on cloud days[J]. Remote Sensing, 2017, 9(6): 517.
- [14] Cao K, Zhang Z D, Li Y, et al. Ship fuel sulfur content prediction based on convolutional neural network and ultraviolet camera images[J]. Environmental Pollution, 2021, 273: 116501.
- [15] Varnam M, Burton M, Esse B, et al. Two independent light dilution corrections for the SO₂ camera retrieve comparable emission rates at Masaya Volcano, Nicaragua[J]. Remote Sensing, 2021, 13(5): 935.
- [16] Kern C, Deutschmann T, Werner C, et al. Improving the accuracy of SO₂ column densities and emission rates obtained from upward-looking UV-spectroscopic measurements of volcanic plumes by taking realistic radiative transfer into account [J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2012, 117 (D20): D20302.
- [17] Wu K J, Feng Y T, Xiong Y H, et al. Real-time continuous calibration method for UV camera[J]. Optics Letters, 2020, 45 (24): 6851-6854.
- [18] 赵忆睿, 曹念文, 贾鹏程, 等. 紫外多波长激光雷达的臭氧和气溶胶同步观测研究[J]. 激光与光电子学进展, 2022, 59(16): 1601001.
Zhao Y R, Cao N W, Jia P C, et al. Simultaneous observation of ozone and aerosol via ultraviolet multi-wavelength lidar[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2022, 59(16): 1601001.
- [19] Kern C, Kick F, Lübcke P, et al. Theoretical description of functionality, applications, and limitations of SO₂ cameras for the remote sensing of volcanic plumes[J]. Atmospheric Measurement Techniques, 2010, 3(3): 733-749.
- [20] Lübcke P, Bobrowski N, Illing S, et al. On the absolute calibration of SO₂ cameras[J]. Atmospheric Measurement Techniques, 2013, 6(3): 677-696.
- [21] Bluth G J S, Shannon J M, Watson I M, et al. Development of an ultra-violet digital camera for volcanic SO₂ imaging[J]. Journal of Volcanology and Geothermal Research, 2007, 161(1/2): 47-56.
- [22] Kantzas E P, McGonigle A J S, Tamburello G, et al. Protocols for UV camera volcanic SO₂ measurements[J]. Journal of Volcanology and Geothermal Research, 2010, 194(1/2/3): 55-60.

Real-Time Self-Calibration Method for SO₂ Ultraviolet Cameras

Zhang Zihao¹, Guo Jianjun¹, Zhang Huiliang¹, Xiong Yuanhui², Li Juan³, Wu Kuijun¹,
He Weiwei^{1*}

¹*School of Physics and Electronic Information, Yantai University, Yantai 264005, Shandong, China;*

²*Innovation Academy for Precision Measurement Science and Technology, Chinese Academy of Sciences, Wuhan
430071, Hubei, China;*

³*Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710119, Shaanxi, China*

Abstract

Objective The booming shipping industry leads to ever increasing emissions of ship exhaust pollutants. Sulfur dioxide (SO₂), the main component of pollutants in ship exhaust, causes the most serious air pollution. Effective monitoring of its emissions is the key to controlling ship exhaust pollution. In recent years, the imaging detection technology of SO₂ ultraviolet (UV) cameras has been developed rapidly due to its strong practicability and high reliability and has been applied in ship exhaust monitoring. However, calibration is still the main factor that limits its measurement accuracy and application. There are three calibration methods (calibration cells, DOAS, and spectral calibration) for SO₂ UV cameras. The calibration cell method is simple and most employed early in calibration. However, the frequent switching of calibration cells exerts adverse effects on the real-time detection of SO₂ UV cameras. Although DOAS is suitable for long-distance monitoring, it has the disadvantages of small field of view (FOV) and poor matching. The accuracy of spectral calibration is significantly improved compared with the first two methods, but the complexity and cost of the camera system are rising with the adoption of an outlay UV spectrometer. With a focus on the self-calibration method, this paper carries out research based on the working mechanism of the SO₂ UV camera imaging detection technology, the UV radiation transfer theory, and the simulation of the entire system. Comparison between the advantages of the self-calibration method and the three traditional calibrations proves that the self-calibration method not only has accurate, simple, and practical technical advantages but also shows its great application prospect in the UV imaging remote sensing monitoring of mobile pollution sources.

Methods The signal channel (filter A) is greatly affected by the changing ozone optical path length, but the reference channel (filter B) is relatively less affected. This difference is the source of the basic principle of self-calibration. The theoretical analysis shows that the calibration coefficient is approximately a monotone function of the logarithm of the intensity ratio, and the relationship between them is hardly affected by atmospheric conditions. The inversion process is as follows. First, the signal images of the two channels are obtained through UV cameras. Second, two channels of artificial background images are obtained by the 2-IM method. Before artificial background generation, the dark noise should be deducted from the raw image, and image correlation must be optimized through translation and rotation operations for the best match. Third, the average of the corresponding background intensities of the two channels is employed as the input parameter for self-calibration. The calibration curve of UV cameras can be determined by the logarithmic relationship between the calibration coefficients and the intensity ratio of the two-channel images. The feasibility of the self-calibration method is assessed by the validation experiment. In addition, an outfield experiment is conducted to characterize its accuracy.

Results and Discussions The principle for self-calibration is the fact that the two channels of sky background images are affected differently by changes in ozone concentration and the solar zenith angle. The average optical path of solar scattered light through the ozone layer increases with the rising solar zenith angle, which makes the ozone absorption worsen the incident light intensity which reaches the cameras system (Fig. 5). As the absorption cross-section of ozone increases significantly towards deep UV wavelength, the signal channel is particularly influenced by variations in ozone optical path length, which is greater than that of the reference channel. Therefore, the functional relationship between the two channels of sky background image intensity ratio and the calibration coefficient can be confirmed (Fig. 7). The validation experiments show that the slope of the calibration curve fitted by the self-calibration method is similar to that obtained by the conventional calibration method with a little difference of about 1.4% (Fig. 9). In addition, the colormap of the SO₂ image of the ship plume retrieved from the UV cameras (Fig. 12) is compared with the data collected by the spectrometer. The results show that the error of the two calibration methods is about 6% (Fig. 13), which demonstrates the feasibility of

adopting the self-calibration method to invert the exhaust concentration of movable and low SO₂ concentration pollution sources.

Conclusions This paper proposes a real-time self-calibration method for UV cameras, with full consideration of the imaging mechanism of UV cameras and UV radiation transfer theory. Regarding the shortcomings of three traditional calibration methods in practical applications, the theoretical basis of the self-calibration method is proposed. The new method can determine calibration curves for retrieving SO₂ concentration by employing the intensity ratios of two channels obtained directly from UV cameras. The self-calibration method is compared with the conventional calibration method, and the error is reduced to 1.4% after filter transmittance correction. To verify the accuracy of the proposed theory, this paper measures the SO₂ emission concentration of the ship at Shanghai Port and compares the measurement difference between the self-calibration method and DOAS approach on time series. The error of the two methods is about 6%, which shows good consistency. This study proves that the self-calibration method can overcome the distance limit and adapt to complex environments, with widespread applications in mobile pollution sources.

Key words remote sensing; SO₂ camera; ultraviolet spectrum; self-calibration; imaging remote sensing