

基于锁相放大的被动红外信号处理方法研究

王云云^{1,2}, 乔延利², 李杨裕^{2**}, 郭腾霄^{3*}, 崔方晓², 吴军², 李大成²¹中国科学技术大学环境科学与光电技术学院, 安徽 合肥 230026;²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通用光学定标与表征技术重点实验室, 安徽 合肥 230031;³国民核生化灾害防护国家重点实验室, 北京 102205

摘要 被动红外气体遥测系统具有成本低、体积小、便于扩展等优点。利用窄带滤光片进行被动红外气体探测时, 为抑制信号漂移和背景噪声干扰, 需要对信号进行调制、滤波和锁相处理。系统接收的测量信号受斩光器辐射的影响较大, 需要对测量过程进行辐射建模分析。本文研究了基于锁相放大的被动红外探测辐射模型, 提出了在锁相放大算法后添加相位判断的信号处理方法; 设计并搭建了被动式气体多光谱探测系统, 在实验室对系统进行定标, 并开展了不同温度黑体的测量实验。结果表明: 实际测量的各通道辐射值与所建模型的结果比较吻合。本研究为基于锁相放大的被动红外信号提供了模型基础和实验验证, 并为便携式近距离气体遥测系统的研制提供了参考。

关键词 测量; 被动红外; 辐射模型; 锁相放大; 相位判断

中图分类号 TP79

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202141.0712001

Research on Passive Infrared Signal Processing Method
Based on Lock-in AmplifierWang Yunyun^{1,2}, Qiao Yanli², Li Yangyu^{2**}, Guo Tengxiao^{3*}, Cui Fangxiao²,
Wu Jun², Li Dacheng²¹College of Environmental Science and Optoelectronic Technology, University of Science and Technology of China, Hefei, Anhui 230026, China;²Key Laboratory of Optical Calibration and Characterization, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Hefei Institutes of Physical Science, Chinese Academy of Sciences, Hefei, Anhui 230031, China;³State Key Laboratory of NBC Protection for Civilian, Beijing 102205, China

Abstract The passive infrared remote sensing system for gas detection has the advantages of low costs, small volume, and easy expansion. Due to signal drift and background noise interference in passive infrared gas detection based on narrow-band pass filters, it is necessary to modulate, filter and phase-lock the signal. In addition, the measurement signal received by the system is greatly by photochopper radiation, so we should establish a radiation model for the measurement process. In light of this, we investigated a radiation model for passive infrared detection based on a lock-in amplifier in this paper and proposed a signal processing method with phase judgment after the lock-in amplifier. Furthermore, we designed and built a passive multispectral system for gas detection, which was calibrated in the laboratory, and we also carried out blackbody measurements at different temperatures. The results show that the measured radiance on each channel is consistent with that from the established model. This study provides a model basis and experimental verification for passive infrared signals based on lock-in amplifiers, as well as a reference for the development of portable remote sensing systems for gas detection in a short range.

Key words measurement; passive infrared; radiation model; lock-in amplifier; phase judgment

OCIS codes 120.1880; 120.2440; 280.4991

收稿日期: 2020-10-09; 修回日期: 2020-10-29; 录用日期: 2020-11-24

基金项目: 中国科学院创新基金(CXJJ-19S002)

* E-mail: guotengxiao@sklnbpc.cn; ** E-mail: yyli@aiofm.ac.cn

1 引言

近年来,随着经济活动的蓬勃发展,我国环境保护的形势越来越严峻,突发性环境污染事故也呈现高发趋势。有毒有害气体泄漏不仅会污染环境,还可能会引发重大公共安全事件,造成极其恶劣的社会影响。因此,气体的快速识别与检测已成为国内外研究者迫切需要解决的重大问题^[1-4]。被动式气体红外光谱检测不需要配备光源,可检测的气体种类多,远距离探测能力强,操作简单安全,适用于现场快速检测和连续实时在线分析,已成为各国研究和应用的热点^[5]。现有的被动式红外气体光谱探测技术根据分光原理主要分为滤光片型、色散型和干涉型三种,其中,后两者的光谱分辨率较高,但仪器结构复杂而且成本高,而前者则具有结构简单、设备小型化和成本低的特点,可适用于现场应急处理和快速判断^[6]。

本文针对基于窄带滤光片的被动红外气体探测系统进行研究。被动探测利用自然物体作为辐射源,辐射强度较小,且易受背景噪声及信号漂移的影响,严重制约了测量系统的性能。锁相放大技术可以通过交流放大器和相敏检波器有效抑制信号漂移和背景噪声,提高系统的检测精度。国内不少学者利用锁相放大技术进行了气体检测研究,例如:范丛山^[7]利用数字锁相放大器提高了甲烷气体浓度检测的信噪比;张亮等^[8]利用锁相放大技术实现了甲烷气体的高精度测量;魏泽民等^[9]利用锁相放大技术

对变压汽油中溶解气体的成分进行了准确测量。上述这些研究都是利用激光光源进行主动式测量的,被动式检测目前还鲜有报道。

本文设计了被动式气体多光谱探测系统,利用锁相放大技术进行了被动红外气体探测。本文采用斩光器对入射光进行调制,采用窄带滤光片进行分光,采用交流放大器进行滤波,采用锁相放大算法提取信号的幅值。被动式探测辐射源的强度较小,且受背景环境温度的影响较大,除目标辐射外,斩光器辐射也会对测量信号产生较大影响,因此需要进行辐射传输建模和信号处理。本文研究了基于锁相放大的被动红外探测辐射模型,针对锁相放大方法在被动式测量中导致的信号幅值反转问题,提出了利用相位判断进行处理的方法;此外,本文搭建了被动式气体多光谱探测系统实验装置,通过实验室条件下的黑体定标和测量实验,验证了信号处理方法的有效性。

2 测量原理

2.1 气体测量原理

被动式污染气体探测可以用图 1 所示的三层辐射传输模型来实现。第一层是大气,第二层是污染气体云团,第三层是视场背景。进入系统的目标辐射为^[10]

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

其中: τ_i 为第 i 层的透过率, $i=1,2$; B_i 为第 i 层的黑体辐射亮度; L_3 为背景辐射亮度。

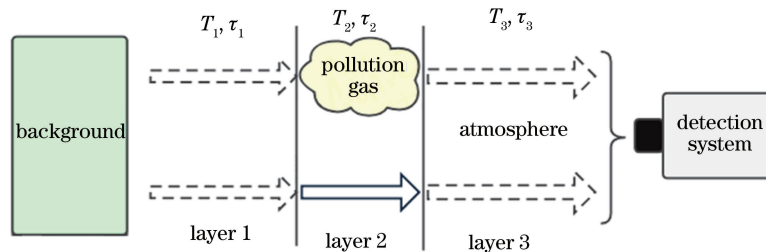


图 1 污染气体被动探测示意图

Fig. 1 Schematic of passive detection of pollution gases

如果视场中没有污染气体云团出现,即 τ_2 为 1,则入射到系统的背景辐射为

$$L_0 = (1 - \tau_1)B_1 + \tau_1L_3. \quad (2)$$

由(1)式和(2)式可以看出,只要背景温度与大气温度存在差异,入射到系统的辐射就会因视场中是否有污染云团而不同。如果能精确测量目标场景辐射,就可以利用相关算法识别污染气体,并在一定精度范围内计算出气体的浓度^[11]。

2.2 探测系统介绍

在光谱探测中,输入信号一般为直流信号,所以锁相放大器经常与光学斩光器配合使用,得到幅值与被测信号成正比的周期性交变信号,以适应锁相放大的条件^[12]。

该探测系统的基本组成有斩光器、滤光片轮、会聚透镜、红外探测器、交流(AC)滤波放大器、数据采集电路板、数据处理分析模块,如图 2 所示。

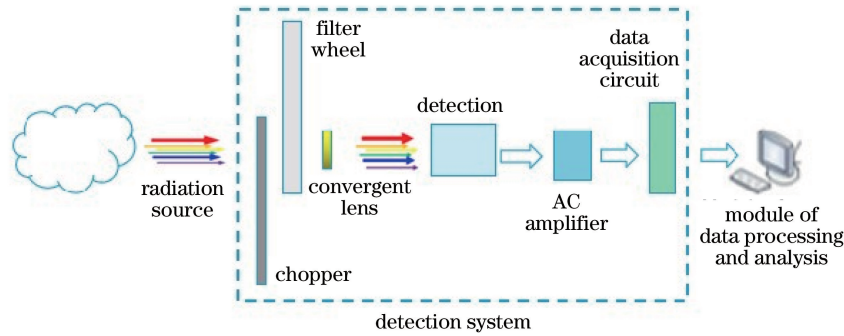


图 2 探测系统结构图

Fig. 2 Structure of detection system

目标辐射光进入探测系统后, 占空比为 50% 的斩光器不停地旋转, 测量光路会经历图 3 所示的周期性变化过程: 当斩光器完全不遮挡滤光片时, 测量光路全通 [如图 3(a)、(e) 所示], 探测器接收到目标辐射; 当斩光器完全遮挡滤光片时, 测量光路全不通 [如图 3(d) 所示], 探测器接收斩光器辐射; 当斩光器部分遮挡滤光片时, 测量光路部分光通 [如图 3(b)、(c) 所示], 探测器接收部分目标辐射与部分斩光器辐射的综合辐射。斩光器将连续光信号调制成

以目标辐射信号为波峰(波谷)、以斩光器辐射信号为波谷(波峰)的周期性交变光信号(测量信号), 同时斩光器自身产生一个同频率的方波信号(参考信号)。调制光信号经过滤光片后变成单色调制光, 再经过会聚透镜后被探测器接收。交流放大器滤除测量信号中的直流分量, 放大交流分量。数据采集电路板采集系统的测量信号和参考信号并传输给计算机进行锁相处理与分析, 得到目标辐射相关信息, 并将其转化为辐射亮度。

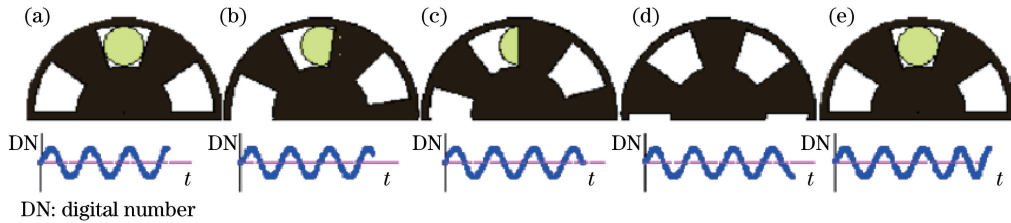


图 3 测量光路的周期性变化过程

Fig. 3 Periodic change process of measuring optical path

3 基于锁相放大的被动红外探测辐射模型及信号处理方法

3.1 基于锁相放大的被动红外探测辐射模型

本文利用斩光器调制目标辐射。经斩光器调制后的测量信号不再是传统的目标辐射直流信号, 而是以目标辐射信号为波峰(波谷)、以斩光器辐射信号为波谷(波峰)的周期性交变信号, 斩光器辐射对目标辐射测量具有一定影响。

斩光器辐射 L_c 为斩光器发射和反射的综合辐射, 其反射辐射与探测系统内部温度 T_r 有关, 而发射辐射与斩光器自身温度 T_1 有关, 并受系统内部温度的影响较大。探测系统运行一段时间后, 系统内部温度趋向稳定, 背景环境温度对斩光器辐射的影响较小, 斩光器辐射近似为定值, 即

$$L_c = K[B(T_1)e_c + B(T_r)r_c], \quad (3)$$

式中: K 为辐射修正系数; e_c 为斩光器的发射率; r_c 为斩光器的反射率; $B(T_1)$ 与 $B(T_r)$ 分别为温度 T_1 和 T_r 对应普朗克黑体的辐射亮度。

被动式探测辐射源的强度较小, 且受背景环境温度的影响较大。当背景环境温度较高时, 目标辐射大于斩光器的辐射(场景 1), 周期性交变测量信号上边沿为目标辐射信号, 下边沿为斩光器辐射信号; 当背景环境温度较低时, 目标辐射小于斩光器的辐射(场景 2), 周期性交变测量信号上边沿为斩光器辐射信号, 下边沿为目标辐射信号。红外探测器长时间工作后易受环境和自身辐射的影响而发生信号漂移。交流放大器滤除测量信号中的直流分量, 放大交流分量, 可以消除背景环境和其他原因造成的任何直流漂移。交流放大器前后的信号波形图如图 4 所示。从图 4 可以看出, 斩光器辐射对测量信号有较大影响。

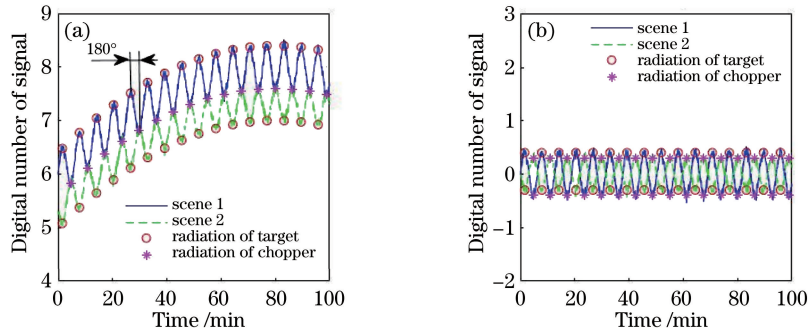


图 4 交流放大器前后的信号波形图。(a)交流放大器前;(b)交流放大器后

Fig. 4 Signal waveform before and after AC amplifier. (a) Before AC amplifier;(b) after AC filter amplifier

锁相放大算法可以提取测量信号的幅值。由图 4 可以看出,与测量信号幅值相关的辐射 L 为目标辐射 L_t 与斩光器辐射 L_c 差值绝对值的二分之一,即

$$L = |L_t - L_c|/2 = \begin{cases} (L_t - L_c)/2, & L_t > L_c \\ 0, & L_t = L_c \\ (L_c - L_t)/2, & L_t < L_c \end{cases} \quad (4)$$

变换(4)式可得目标辐射 L_t 为

$$L_t = \begin{cases} L_c + 2L, & L_t > L_c \\ L_c - 2L, & L_t \leq L_c \end{cases} \quad (5)$$

由图 4 和(4)式可以看出,锁相放大算法在被动式测量中会导致系统探测器接收的同一信号值可能对应两种不同的目标辐射,这会引发信号幅值反转问题及后续数据处理错误。

3.2 信号处理方法

正交锁相放大算法可以得到测量信号幅值及其与参考信号的相位差,同时忽略了相位差变化给测量结果带来的影响。本文采用正交锁相放大算法提取测量信号幅值 A 和相位差 θ ^[13]。

由(4)式可知,测量信号幅值 A 与目标辐射 L_t 和斩光器辐射 L_c 差值的绝对值相关,不能直接定标得到目标辐射。这里提出了一种在锁相放大算法后加相位判断的处理方法,以得到与目标辐射相关的信号。下面具体介绍相位判断原理。

假设测量信号中经交流放大器滤除的直流信号为 D ,系统采集的交流测量信号幅值为 A ,由(5)式可以得到目标辐射信号 D_t 为

$$D_t = \begin{cases} D + A, & L_t > L_c \\ D - A, & L_t \leq L_c \end{cases} \quad (6)$$

探测器信号幅值与接收的辐射亮度之间存在线性关系,由(6)式可得目标辐射为

$$L_t = kD_t + b_1 = \begin{cases} k(D + A) + b_1, & L_t > L_c \\ k(D - A) + b_1, & L_t \leq L_c \end{cases} \quad (7)$$

式中: k 为系统辐射响应系数; b_1 为系统辐射响应偏置。

从图 4 所示的交流放大器前后的信号波形图中可以看出,场景 1 和场景 2 的测量信号与参考信号的相位差 θ 不相同,且相差了 180° 。根据两种场景下相位差相差 180° 设置一个相位判断,即

$$A_1 = \begin{cases} A, & \tan \theta > 0 \\ -A, & \tan \theta \leq 0 \end{cases} \quad (8)$$

结合(7)式和(8)式可得

$$L_t = kD_t + b_1 = k(D + A_1) + b_1 = kA_1 + b, \quad (9)$$

式中: $b = kD + b_1$ 。

通过相位判断的信号处理方法得到了与目标辐射相关的信号值 A_1 ,根据 A_1 可以定标得到唯一正确的目标辐射。

4 分析与讨论

在实验室搭建了气体多光谱探测系统实验装置,如图 5 所示,各通道和探测器的光谱响应曲线如图 6 所示。实验装置各项目参数如表 1 所示,其中 λ_c 表示滤光片的中心波长, ω 表示滤光片的半带宽。

表 1 实验装置各项目参数

Table 1 Parameters of experimental device

Item	Parameter
Detector	Photoconductive HgCdTe
Chopper	Frequency $f = 100$ Hz
Filter 1	$\lambda_c = 7850$ nm, $\omega = 185$ nm
Filter 2	$\lambda_c = 9662$ nm, $\omega = 200$ nm
Filter 3	$\lambda_c = 10350$ nm, $\omega = 200$ nm
Filter 3	$\lambda_c = 11300$ nm, $\omega = 240$ nm

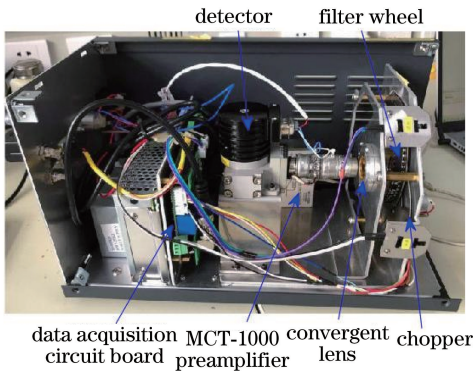


图 5 探测系统实验装置图

Fig. 5 Experimental device of detection system

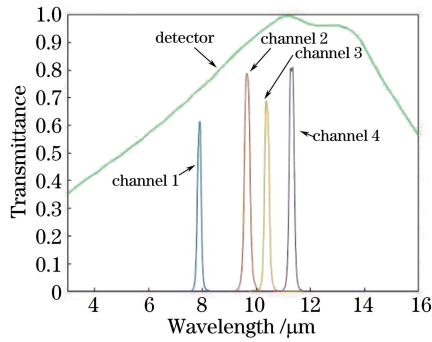


图 6 各通道和探测器的光谱响应曲线

Fig. 6 Spectral response curve of each channel and detector

在实验室内利用黑体标准源对该探测系统进行定标,求出电信号值转化目标辐射的响应系数和响应偏置。定标需要知道两组不同的测量信号值和对应的目标辐射,其中信号值可以通过该探测系统测

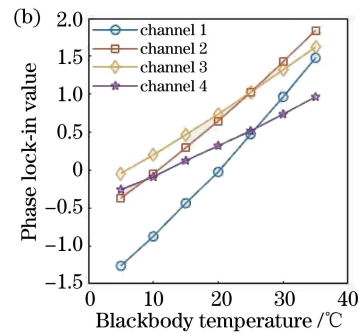
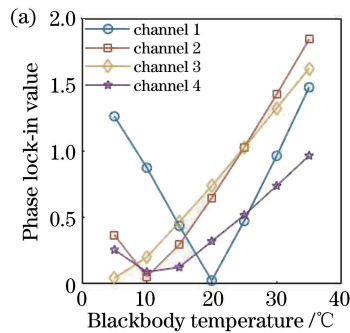


图 7 各通道测量信号的锁相值曲线图。(a)未加相位判断;(b)加入相位判断

Fig. 7 Phase lock-in value curve of each channel measurement signal. (a) Without phase judgment;

(b) adding phase judgment

得到各通道测量信号的锁相值后,就可由定标系数计算得到各通道的辐射值。相位判断前后不同背景黑体温度下黑体辐射亮度曲线和对应各通道的辐射值如图 8 所示,校正前后通道 1 的辐射值与模型理论值的对比如表 2 所示。从图 8 和表 2 可以看出,未加相位判断时,实际计算的各通道

量得到,而目标辐射根据背景黑体温度进行计算比较困难,可以利用各通道辐射进行定标。各通道辐射为各通道综合光谱响应与目标场景辐射归一化后的结果,其值为探测器接收的目标辐射扣除综合光谱响应后的值^[14],即

$$L_{Bi} = \frac{\int L_T(\lambda)R_i(\lambda)d\lambda}{\int R_i(\lambda)d\lambda}, i = 1, 2, 3, 4, \quad (10)$$

式中: i 表示对应的通道; $R_i(\lambda)$ 为滤光片、探测器等的综合光谱响应; T 为背景黑体的温度; $L_T(\lambda)$ 表示背景黑体温度为 T 时,波长 λ 处的目标场景辐射; λ 为波长。

4 个通道带宽都很窄,光谱响应函数关于中心波长近似对称,各通道辐射 L_{Bi} 近似等于各通道中心波长处的辐射亮度 $L_{\lambda i}$,因此根据背景黑体温度和普朗克公式可得各通道的辐射值。

定标时将黑体抵近对准探测系统,实验室温度为 28 °C 左右,设置黑体温度分别为 40 °C 和 30 °C 进行定标,得到定标系数。定标完成后,将黑体温度设置为 5~35 °C 范围内间隔 5 °C 的 7 个不同温度,用该探测系统分别对这 7 个不同温度的黑体进行测量。相位判断前后各通道测量信号锁相值曲线图如图 7 所示,可以看出,不加相位判断的锁相值出现了辐射模型理论中信号幅值反转的问题,导致同一信号幅值可能对应两种不同的目标辐射,而加入相位判断后则避免了这一问题。

辐射值会出现错误,而加入相位判断后,实际计算得到的各通道辐射值与模型理论值比较吻合。这验证了基于锁相放大的被动红外探测辐射模型理论的可行性以及相位判断信号处理方法的正确性,为基于锁相放大被动红外气体探测提供了模型基础。

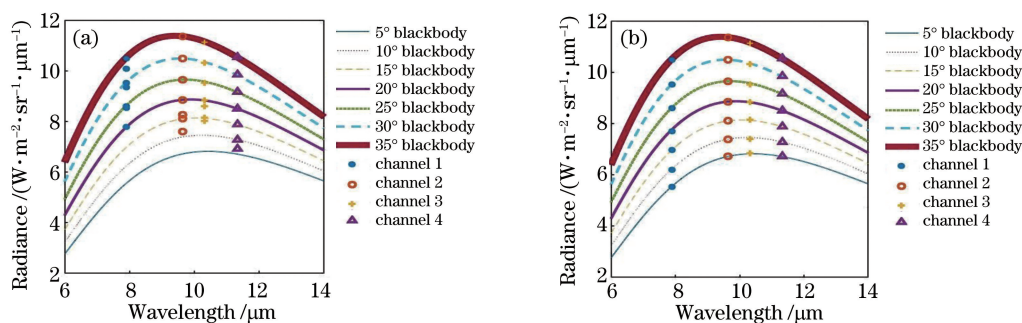


图 8 不同目标辐射场景下黑体辐射亮度曲线和对应各通道的辐射值。(a)未加相位判断;(b)加入相位判断后

Fig. 8 Radiance curve of blackbody and corresponding radiation values of each channel in different target radiation scenarios. (a) Without phase judgment; (b) adding phase judgment

表 2 校正前后通道 1 的辐射值与模型理论值的对比

Table 2 Comparison of radiation value of channel 1 before and after correction with theoretical value of model

Blackbody temperature /°C	Radiation of channel 1 / (W · m ⁻² · sr ⁻¹ · μm ⁻¹)		
	Before correction	After correction	Theoretical value
5	10.077	5.539	5.559
10	9.348	6.205	6.241
15	8.540	6.971	6.980
20	7.791	7.705	7.774
25	8.608	8.608	8.631
30	9.518	9.518	9.547
35	10.493	10.493	10.530

5 结 论

本文研究了基于锁相放大的被动红外探测辐射模型,设计搭建了被动式气体多光谱探测系统。针对锁相放大算法在被动式测量中导致的信号幅值反转问题,提出了在锁相放大算法后添加相位判断的信号处理方法,该方法解决了传统锁相算法出现的同一信号可能对应两种不同目标辐射的问题。在实验室中对系统进行定标,利用黑体标准源进行各通道辐射值的测量实验,结果表明,各通道辐射亮度的计算值与模型理论值相吻合。本文为基于锁相放大的被动红外气体探测提供了信号模型基础和实验验证,为便携式多光谱系统的研制提供了参考。

参 考 文 献

[1] Pelous G, Grenier L, Adam P. Passive standoff detection of gas clouds in open field by IR imagery [J]. Proceedings of SPIE, 1998, 3533: 86-92.

[2] Bernascolle P, Pelous G, Grenier L. Remote detection of natural gas clouds in open fields by IR imagery[J]. Proceedings of SPIE, 1999, 3700: 409-416.

[3] Zheng W J, Yu C C, Yang Z X, et al. Remote sense for environment pollution gases in wide infrared spectral range[J]. Infrared and Laser Engineering, 2019, 48(11): 1104002.

郑为建, 余春超, 杨智雄, 等. 宽谱段环境污染气体红外遥测技术研究[J]. 红外与激光工程, 2019, 48(11): 1104002.

[4] Zhang Q, Xie P H, Xu J, et al. Two-dimensional fast imaging of smoke plumes based on spectral telemetry[J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(9): 0930002.

张强, 谢品华, 徐晋, 等. 基于光谱遥测技术的烟羽二维分布快速成像[J]. 光学学报, 2020, 40(9): 0930002.

[5] Jin Y L. Research on gas monitoring technology based on infrared hyperspectral imaging[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2018.

金亚亮. 基于红外高光谱成像的气体监测技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2018.

[6] Liu J X, Yin X H, Han S H, et al. Review of portable near-infrared spectrometers [J]. Journal of Henan Agricultural University, 2019, 53(4): 662-670.

刘建学, 尹晓慧, 韩四海, 等. 便携式近红外光谱仪研究进展[J]. 河南农业大学学报, 2019, 53(4): 662-670.

[7] Fan C S. Design of methane gas detector based on digital lock-in amplifier [J]. Chinese Journal of

- Electron Devices, 2018, 41(6): 1577-1581.
- 范丛山. 基于数字锁相放大器的甲烷气体检测仪设计[J]. 电子器件, 2018, 41(6): 1577-1581.
- [8] Zhang L, Li X, Wang Z B, et al. Design of digital phase-locked circuit for TDLAS methane telemetry [J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2019, 38(1): 89-92, 96.
- 张亮, 李晓, 王志斌, 等. 基于 TDLAS 甲烷遥测的数字锁相电路设计[J]. 传感器与微系统, 2019, 38(1): 89-92, 96.
- [9] Wei Z M, Fan M, Zhou Y B, et al. Detection of dissolved gas in transformer oil based on laser absorption spectroscopy [J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2018, 37(3): 52-57.
- 魏泽民, 范明, 周咏槟, 等. 基于激光吸收光谱的变压器油中气体检测系统设计[J]. 国外电子测量技术, 2018, 37(3): 52-57.
- [10] Cui F X, Li D C, Wu J, et al. Adaptive feature extraction algorithm based on Lasso method for detecting polluted gas[J]. Acta Optica Sinica, 2019, 39(5): 0530003.
- 崔方晓, 李大成, 吴军, 等. 基于 Lasso 方法的污染气体自适应探测算法[J]. 光学学报, 2019, 39(5): 0530003.
- [11] Tao M Q, Liu J X, Wu Y, et al. Application of XGBoost in gas infrared spectral recognition[J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(7): 0730002.
- 陶孟琪, 刘家祥, 吴越, 等. XGBoost 在气体红外光谱识别中的应用[J]. 光学学报, 2020, 40(7): 0730002.
- [12] He L P, Chen B, Yang L, et al. *In situ* optic measuring technique based on virtual lock-in [J]. Optics and Precision Engineering, 2008, 16(9): 1677-1681.
- 何玲平, 陈波, 杨林, 等. 基于虚拟锁相的原位光学测量技术[J]. 光学精密工程, 2008, 16(9): 1677-1681.
- [13] Zurich Instruments. Principles of lock-in detection and the state of the art [EB/OL]. [2020-10-09]. <https://www.zhinst.com/others/cn/resources/principles-of-lock-in-detection>.
- [14] Liu L, Gu X F, Yu T, et al. HJ-1B thermal infrared band in-flight radiometric calibration [J]. Remote Sensing Information, 2012, 27(1): 37-41, 83.
- 刘李, 顾行发, 余涛, 等. HJ-1B 卫星热红外通道在轨绝对辐射定标[J]. 遥感信息, 2012, 27(1): 37-41, 83.