

## 甲醛气体探测的 DIAL 波长选择及探测性能

辛文辉, 毕元硕, 李仕春, 李耀飞, 华灯鑫

(西安理工大学机械与精密仪器工程学院, 陕西 西安 710048)

**摘要:** 为了对重化工污染区甲醛气体进行探测, 开展了差分吸收激光雷达甲醛气体浓度探测研究。基于差分吸收激光雷达原理, 针对甲醛气体在中红外波段有较强的吸收波段, 并考虑开放光程下大气干扰气体的影响, 选择了系统的探测波长 $\lambda_{\text{on}}$ 、 $\lambda_{\text{off}}$ ; 依据差分吸收激光雷达浓度反演方法, 结合系统参数, 对设计的 DIAL 系统的探测距离、气体浓度及干扰气体的可能影响进行了仿真研究。结果表明, 该系统有望对浓度为 0.017~1.5 ppm (1 ppm=10<sup>-6</sup>), 距离为 0.4~1.1 km 范围内的甲醛气体进行探测, 相对误差小于 5%, 可满足对重化工污染区甲醛气体浓度探测需求。文中的研究可为应用于化工重污染区域甲醛气体无组织排放监测的中红外差分吸收激光雷达系统的研制提供理论依据和技术基础。

**关键词:** 差分吸收激光雷达; 甲醛气体; 吸收截面; 浓度反演

**中图分类号:** TN995      **文献标志码:** A      **DOI:** 10.3788/IRLA20210925

## Wavelength selection and detection performance of DIAL for formaldehyde gas detection

Xin Wenhui, Bi Yuanshuo, Li Shichun, Li Yaofei, Hua Dengxin

(School of Mechanical and Precision Instrument Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

**Abstract:** In order to detect formaldehyde gas in severe chemical pollution area, the research of concentration detection for formaldehyde by differential absorption lidar (DIAL) is carried out in this paper. Based on the principle of differential absorption lidar and the strong absorption of formaldehyde gas in the mid infrared band, the detection wavelengths of  $\lambda_{\text{on}}$  and  $\lambda_{\text{off}}$  for the formaldehyde are selected in consideration of the influence of atmospheric interference gas under open optical path. According to the concentration inversion method of differential absorption lidar and combined with the system parameters, the effects of the detection distance, gas concentration and interfering gas on the system perform are studied. The results show that the system can detect formaldehyde concentration in the range of 0.017-1.5 ppm (1 ppm=10<sup>-6</sup>) and within the distance of 0.4-1.1 km, and the relative error is less than 5%, which can meet its demand for formaldehyde detection in severe chemical pollution area. This paper can provide a theoretical and technical basis for the development of mid infrared differential absorption lidar system for monitoring the unorganized emission of formaldehyde in severe chemical pollution area.

**Key words:** DIAL; formaldehyde gas; absorption cross section; concentration inversion

收稿日期:2021-12-21; 修订日期:2022-01-26

基金项目:国家自然科学基金(61875162, 42275151, 62175199); 陕西省自然科学基金项目(2020 JM-445); 陕西省教育厅科学研究计划重点研究项目(20 JY048)

作者简介:辛文辉,男,副教授,博士,主要从事激光雷达遥感探测、微弱信号检测方面的研究。

## 0 引言

甲醛(分子式:  $H_2CO$ )是一种应用广泛的化学溶剂,容易挥发到空气中以气体存在,在家具、印染、化工等领域应用广泛。甲醛对人体以及大气环境具有严重的危害,长期的吸入会引起慢性呼吸道疾病,并有致癌作用<sup>[1]</sup>;甲醛具有活跃的光化学特性,与其他挥发性有机物(VOCs)相互作用时,产生一系列光化学烟雾,导致大气污染<sup>[2-3]</sup>。家装、工业排放,特别是重化工污染区的无组织排放是甲醛的重要源头,随着我国进入高质量的发展阶段,对污染物的排放要求日趋严格,开展对重化工污染区甲醛浓度的探测具有十分重要的意义。

甲醛的传统检测方法有分光光度法、色谱法、荧光法、化学传感器法等,这些方法虽然具有一定的探测精度,但均是局部的、点式测量,无法实现较大区域的浓度探测<sup>[4]</sup>。光学光谱法是利用气体对光谱的选择吸收特性进行浓度探测,包括 DOAS、TDLAS、DIAL 等,具有非接触、探测精度高的优点<sup>[2,5-7]</sup>。其中,基于差分吸收探测理论的差分吸收激光雷达(differential absorption lidar, DIAL)具有较高的空间分辨率和探测灵敏度,可以实现较大区域的气体浓度探测,已广泛应用于  $H_2O$ 、 $CO_2$ 、 $SO_2$ 、 $NO_2$  及  $O_3$  等痕量气体的空间浓度遥感探测<sup>[8-13]</sup>。隆德大学的研究者最早开发了一种车载移动式紫外光 DIAL 系统<sup>[11,14]</sup>,该系统采用 Nd:YAG 泵浦染料激光器,实现了对附近工厂  $SO_2$  和  $O_3$  排放的自动探测。研究者 A.KRazdan 和 M.KJindal 研制了一款可调谐波长的中红外 DIAL 探测系统,实现了硫代二甘醇(TDG)蒸汽羽流的远程检测<sup>[10]</sup>,但系统结构复杂、维护困难。研究者 Gholamreza 设计了一套基于 Ti:蓝宝石激光器的单激光器交错输出的 DIAL 系统,该系统可工作在三个不同的近红外波段,能够对 1 km 范围内浓度小于 1 ppm(1 ppm=10<sup>-6</sup>)的水中溶解氧进行监测<sup>[15]</sup>。在国内,中国科学院上海技术物理研究所葛焯等研制了一套基于 935 nm 波段的探测系统,获得了上海地区对流边界层的  $H_2O$  浓度廓<sup>[16]</sup>。南京信息工程大学卜令兵等人研制了一套  $NO_2$  差分吸收激光雷达系统,结合多重自相关算法将 1 km 内模拟探测所得  $NO_2$  浓度反演结果误差降至 $\pm 0.1 \text{ mg/m}^3$ <sup>[17]</sup>;此外,该研究者还设计了一台高重复频率、波长范围

覆盖 2.5~4  $\mu\text{m}$  的可调谐中红外差分吸收激光雷达系统,用于开放光程下的  $NO_2$  和  $SO_2$  浓度观测,其灵敏度分别可达  $0.07 \text{ mg/m}^3$  和  $0.31 \text{ mg/m}^3$ ,表明该系统可用于大气污染气体的实时遥感探测<sup>[8]</sup>。以上研究表明,DIAL 具有较高的探测精度和空间分辨率,也是甲醛等污染气体浓度探测的发展方向之一,由于甲醛的强吸收光谱区域位于中红外波段,开展其空间浓度探测的激光器波段也应在中红外波段,而目前国内外尚未见基于中红外 DIAL 方法对甲醛浓度进行探测的报道。

文中开展了中红外波段 DIAL 甲醛气体浓度探测研究,基于 DIAL 原理,针对甲醛气体在中红外波段有较强的吸收波段,并考虑开放光程下大气干扰气体的影响,选择了探测波长;依据差分吸收激光雷达浓度反演方法,结合系统参数,对设计系统的探测距离、浓度及干扰气体可能的影响进行了研究,为实际系统的搭建及探测性能提供前期基础。

## 1 DIAL 原理及系统结构

光谱吸收理论表明,不同气体由于其分子结构、能级的不同,对不同的光波吸收具有一定的选择吸收性——即“指纹”特性,利于此特性,可以对气体进行质和量的探测分析。

DIAL 系统在工作时,向大气发射两束波长间隔很近的激光,一束光的波长位于甲醛的光谱吸收尖峰上,能够被气体强烈地吸收,称之为 $\lambda_{\text{on}}$ 光;另一束光的波长位于甲醛吸收峰的外侧,基本不被其吸收或吸收较弱,称之为 $\lambda_{\text{off}}$ 。根据激光雷达原理,两束波长分别为 $\lambda_{\text{on}}$ 和 $\lambda_{\text{off}}$ 、发射激光峰值功率为 $P_0$ 、脉冲宽度为 $\tau$ 的光脉冲在大气中传输时,在距离 $R$ 处的后向散射信号 $P_{(\text{on,off})}(R)$ 可表示为:

$$P_{(\text{on,off})}(R) = P_0 \eta \left( \frac{A}{R^2} \right) \left( \frac{c\tau}{2} \right) \beta_{(\text{on,off})}(R) \exp \cdot \left[ -2 \int_0^R [\alpha_{(\text{on,off})}(r) + N(r)\sigma_{(\text{on,off})}] dr \right] \quad (1)$$

式中: $c$ 为光速; $A$ 为望远镜有效接收面积; $\eta$ 为接收系统效率; $\beta(R)$ 为后向散射系数; $\alpha(r)$ 为由大气散射导致的消光系数,由气体吸收导致的消光系数可表示为气体浓度 $N(r)$ 与吸收截面 $\sigma$ 的乘积。由于 $\lambda_{\text{on}}$ 和

$\lambda_{\text{off}}$  十分接近, 可以认为大气中其他气体以及发射和接收系统对两束激光的散射影响基本一致, 其后向散射系数  $\beta(\lambda, R)$  和散射导致的消光系数  $\alpha(\lambda, r)$  在  $\lambda_{\text{on}}$  和  $\lambda_{\text{off}}$  处也是相等的, 由  $\lambda_{\text{on}}$ 、 $\lambda_{\text{off}}$  的后向散射光信号相比, 可得到气体的浓度为:

$$N(R) = -\frac{1}{2(\sigma(\lambda_{\text{on}}) - \sigma(\lambda_{\text{off}}))} \frac{d}{dR} \ln\left(\frac{P_{\text{on}}(R)}{P_{\text{off}}(R)}\right) \quad (2)$$

上式表明: 通过测量不同高度处  $\lambda_{\text{on}}$  和  $\lambda_{\text{off}}$  光波的后向散射光强度, 已知被探测气体在这两个波段上的吸收截面情况下, 就可以获得被测气体的浓度廓线。需要说明的是, 气体分子的差分吸收截面会对浓度探测产生一定的影响, 定义吸收截面差分:  $\Delta\sigma = \sigma(\lambda_{\text{on}}) - \sigma(\lambda_{\text{off}})$ , 当  $\Delta\sigma$  较大时, 若气体浓度较大, 则吸收加剧, 会导致探测距离受限; 当  $\Delta\sigma$  较小时, 若气体浓度较小, 则吸收减弱, 会导致探测灵敏度较低。因此, 选择合理的探测波长、获得合适的  $\Delta\sigma$  对于开放光程下甲

醛浓度探测十分重要。

根据 DIAL 原理, 设计的甲醛浓度探测系统结构如图 1 所示: 主要由激光发射系统、接收系统、数据采集以及处理系统组成。其中, 两个量子级联激光器依次发出红外激光脉冲, 经分色镜汇合后再与可见光波段的准直激光耦合, 经准直、扩束后射入大气, 在传输过程中与被探测甲醛、大气等相互作用, 产生的回波信号经光学系统接收, 由探测器进行光电转换, 经滤波、反演处理后, 得到浓度廓线。对于差分吸收激光雷达探测系统, 通过控制量子级联激光器的注入电流及工作温度, 将其输出的探测光分别调谐到被探测甲醛的特征吸收线。  $\lambda_{\text{on}}$  和  $\lambda_{\text{off}}$  能否精确锁定甲醛的吸收线尖峰、吸收谷将直接影响探测性能, 故为其配置锁频控制模块。此外, 为了监控激光器的输出光能, 将其一小部分通过探测器反馈回激光控制器, 实现稳定的光能输出。

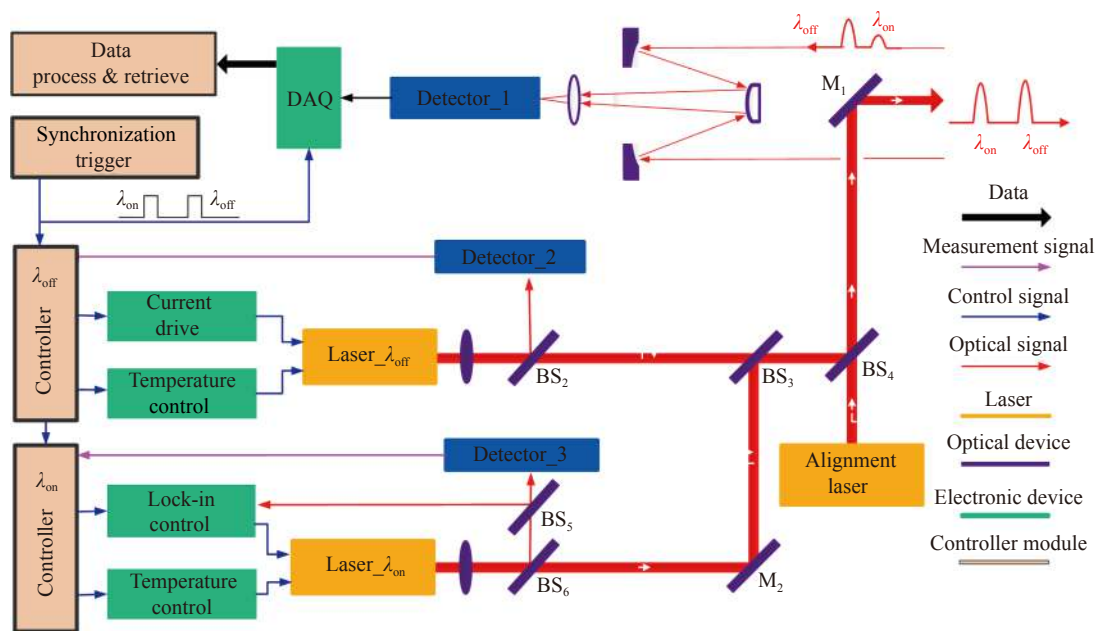


图 1 应用甲醛气体浓度探测的差分吸收激光雷达系统结构

Fig.1 System structure of DIAL for formaldehyde gas concentration detection

## 2 探测波长选择

HITRAN 数据库是一个汇编了众多气体分子吸收光谱学参数的数据库, 根据 HITRAN2012 数据库, 甲醛的强吸收谱线主要位于中、远红外波段。由于气体分子的复杂性, 其吸收谱线包含多个吸收谱带, 在选择探测波长时, 除了考虑激光器探测波长的可获得

性, 还要考虑干扰气体、大气窗口特性等因素。相比于远红外波段, 甲醛在中红外波段有多个吸收峰谷, 因此, 选择  $2600\sim 3100\text{ cm}^{-1}$  之间波段作为探测激光的初始筛选波段。

甲醛为痕量气体, 其在大气中的含量为 ppt( $10^{-13}$ ) 量级, 即使在重污染区, 其浓度一般也仅为 ppm 量级

(体积浓度为 1 ppm 的甲醛对应的质量浓度为 1.34 mg/m<sup>3</sup>, 以某市为例, 2019 年环保监测站点醛类浓度为 44.7 μg/m<sup>3</sup>, 相当于 33 ppt, 而化工重污染区其浓度为其百倍左右)<sup>[18]</sup>。而标准大气中 N<sub>2</sub>、O<sub>2</sub>、CO<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub> 以及 H<sub>2</sub>O 的浓度相对于甲醛高出很多, 因此, 在选择探测波长时, 还需进一步考虑干扰气体的影响。根据后续探测需求, 文中先设定探测甲醛的浓度为 0.1~5 ppm, 探测光程为 1 500 m, 温度为 300 K, 压强为 1 atm(1 atm=1.013×10<sup>5</sup>), 根据大气中上述干扰气体的平均浓度, 进一步选择甲醛的探测波长。在选择探测波长时要充分考虑气体吸收谱线的展宽特性并依据下列原则进行选择: 合适的λ<sub>on</sub>的吸收截面, 以满足激光雷达最大探测范围的要求; 足够大的λ<sub>on</sub>与λ<sub>off</sub>差分截面, 以满足距离分辨率的要求。

吸光度是描述气体对不同波长光束的吸收程度。据朗伯-比尔定律, 当入射光强为 I<sub>0</sub>(λ)、波长为 λ 的光束通过光程为 L、浓度为 c 的气室后, 若出射光强为 I(λ), 则吸光度 α(λ) 可表示为:

$$\alpha(\lambda) = -\ln \frac{I(\lambda)}{I_0(\lambda)} = \sigma(\lambda)cL \quad (3)$$

式中: σ(λ) 为气体在波长 λ 处的吸收截面, 单位为 cm<sup>2</sup>/molecule, 该量是一个与吸收线强、吸收线型 (与温度、压力相关) 相关的量。

图 2 所示为求解得到的标准大气中不同组分气体的吸光度曲线。计算时, σ(λ) 可查阅 HITRAN2012

数据库, 大气组分气体的浓度参照美国标准大气的浓度参数 (N<sub>2</sub> 浓度: 77.026%; O<sub>2</sub> 浓度: 20.0% 等), 甲醛浓度人为设定为 1 ppm; 光程设定为 1 500 m, 吸收线型选择 Voigt 线型函数 (温度为 300 K, 压强为 1 atm)。

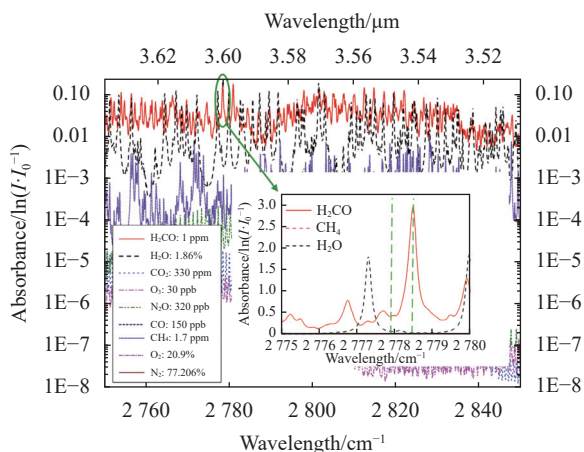


图 2 甲醛及大气组分气体的吸光度

Fig.2 Absorbance of formaldehyde and interference gases

根据波长选择原则, 文中选择探测的 λ<sub>on</sub> 和 λ<sub>off</sub> 分别为 2 778.48 cm<sup>-1</sup> 和 2 777.82 cm<sup>-1</sup>。同时, 从图 2 可以看出, 在大气中 H<sub>2</sub>O 和 CH<sub>4</sub> 对于甲醛的影响较大, 因此, 文中在研究激光雷达系统对于甲醛的探测能力时, 选择 H<sub>2</sub>O 和 CH<sub>4</sub> 作为主要干扰气体。查阅 HITRAN 2012 数据库, 可得到上述三种气体在温度为 300 K、压强为 1 atm 时在选定波长处的吸收截面值如表 1 所示。

表 1 甲醛、水汽和甲烷气体的吸收截面

Tab.1 Absorption cross section of formaldehyde, vapor and methane

Absorption cross section/cm <sup>2</sup> ·molecule <sup>-1</sup>	Formaldehyde	Vapor	Methane
σ <sub>on</sub>	2.907 190 05 × 10 <sup>-19</sup>	1.401 362 6 × 10 <sup>-26</sup>	4.958 401 5 × 10 <sup>-22</sup>
σ <sub>off</sub>	1.551 551 58 × 10 <sup>-19</sup>	9.131 776 4 × 10 <sup>-27</sup>	7.142 580 7 × 10 <sup>-22</sup>

### 3 系统探测能力

激光雷达回波信号是进行气体浓度反演的基础, 其功率的大小决定了系统的探测距离, 根据选择的探测波长, 可对 DIAL 的探测性能进行研究。研究时, DIAL 的系统参数如表 2 所示; 此外, 根据标准大气组份比例, 设定 H<sub>2</sub>O 的浓度为 1.86%, CH<sub>4</sub> 的浓度为 1.7 ppm。

由于被探测甲醛的浓度很低, 导致后向散射光由吸收引起的光强变化非常微弱, 能否实现有效探测的关键是探测器的探测灵敏度, 研究选择波兰 VIGO 公司的 HgCdTe 型探测器, 其参数如表 3 所示。

根据光电探测理论, 结合以上参数, 由归一化探测率 D\* 可得探测率 D:

$$D = \frac{D^*}{(A_d \Delta f)^{1/2}} = \frac{6.0 \times 10^{11}}{22.360 6} = 2.683 \times 10^{10} \text{ W}^{-1} \quad (4)$$

表 2 差分吸收激光雷达系统参数

Tab.2 System parameters of DIAL

Parameter	Value
Laser wavelength/cm <sup>-1</sup>	$\lambda_{on}$ : 2 778.48 $\lambda_{off}$ : 2 777.51
Pulse energy/mJ	1
Detector bandwidth/MHz	5
Detect active area/mm <sup>2</sup>	1×1
Pulse width/ns	25
Pulse repetition frequency/Hz	250
Laser divergence angle/mrad	<1
Detector type	VIGO-PVI-4 TE-4
Detector sensitivity/A·W <sup>-1</sup>	≥1
Receiving area diameter	300
Telescope type	MEADE-LX600-ACF12
Occlusion ratio	16.86%

表 3 VIGO-PVI-4 TE-4 探测器性能参数

Tab.3 Performance parameters of VIGO-PVI-4 TE-4

Parameter	Detector: VIGO-PVI-4 TE-4
Material	HgCdTe
Optium wavelength $\lambda_{opt}/\mu\text{m}$	2.2-4.2
Detectivity $D^*/\text{cm} \cdot \text{Hz}^{1/2} \cdot \text{W}^{-1}$	≥ 6.0 × 10 <sup>11</sup>
Current responsivity $Ri/\text{A} \cdot \text{W}^{-1}$	≥ 1.0
Time constant $t/\text{ns}$	≤ 100
Resistance-optical area product $R \cdot A/\Omega \cdot \text{cm}^{-2}$	≥ 800
Optical area $A/\text{mm}^2$	1

而噪声等效功率NEP为:

$$NEP = \frac{1}{D} = 3.727 \times 10^{-11} \text{ W} \quad (5)$$

NEP 是描述探测器探测微弱信号的能力, 大于此值, 表示信号能被探测器探测到。

### 3.1 回波信号功率

回波信号的功率主要由雷达方程的消光项和雷达硬件参数决定, 消光项包括甲醛吸收引起的消光和大气气溶胶、气体分子的消光。大气气溶胶、其他气体分子的消光可以根据美国标准大气模型获得。考虑到实际应用, 重化工污染区域的污染气体的分布高度主要在 1 km 以内, 所以探测区域选择在 1.5 km 以下的区域进行分析; 为了模拟重化工污染区甲醛的分

布, 设定在整个探测路径有浓度为 0.5 ppm 的甲醛分布, 另设定在 0.6~0.8 km 距离处, 有一个最大浓度为 1 ppm、浓度变化曲线为半波正弦的高浓度甲醛分布带。

图 3 所示为依据上述参数模拟获得的激光雷达回波信号功率随高度的分布图。由图可以看出, 由于甲醛的吸收, 在整个探测区域,  $\lambda_{on}$  的回波功率衰减比  $\lambda_{off}$  大; 在 0.6~0.8 km 处的高浓度甲醛分部区域,  $\lambda_{on}$  出现了较明显的下降; 图中, 紫色的点划线为探测器的噪声等效功率, 对应的  $\lambda_{on}$  距离为 1.1 km 左右, 这说明系统可以实现 1 km 以内的浓度探测。

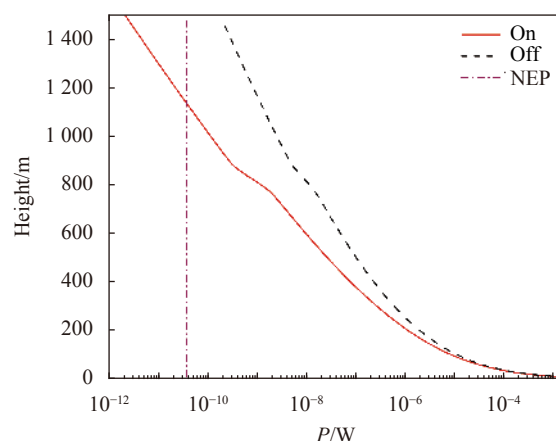


图 3 激光雷达回波信号功率

Fig.3 Echo signal power of the lidar system

系统信噪比 SNR 是反映系统探测性能的一项关键指标, 其值越大, 表示信号的质量越佳。SNR 的计算有模拟法和光子计数法, 文中采用的是光子计数法<sup>[7]</sup>, 图 4 所示为求解得到的 SNR 随高度的变化图, 从图

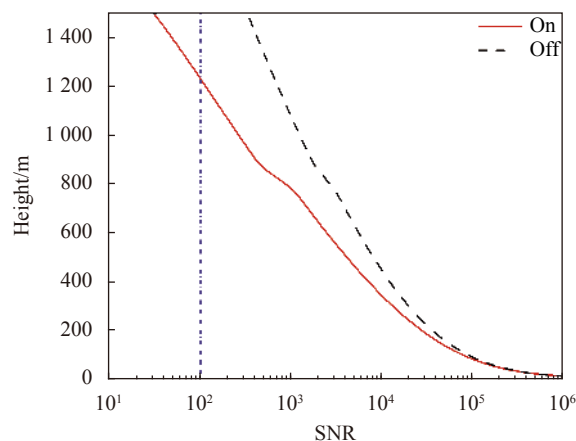


图 4 激光雷达系统信噪比

Fig.4 Signal-to-noise of lidar system

中可以看出,随着系统探测距离的增加,SNR 呈现出逐步减小的趋势,但在 1.20 km 以下,SNR 大于 100,表示系统可以探测幅值变化 1% 的信号,说明探测系统的 SNR 较高,能实现微弱的甲醛浓度的探测<sup>[19]</sup>。

通常,甲醛在重化工污染区域的分布是极其不规

律、不稳定的,文中设定了不同高度、不同浓度的甲醛分布,并依据表 1~3 中探测系统的参数进行了模拟探测,结果如图 5 所示。从图中可以看出,由于甲醛气体的吸收,导致回波信号的信噪比降低,但在 1 km 范围内,反演结果与设定值有较好的一致性。

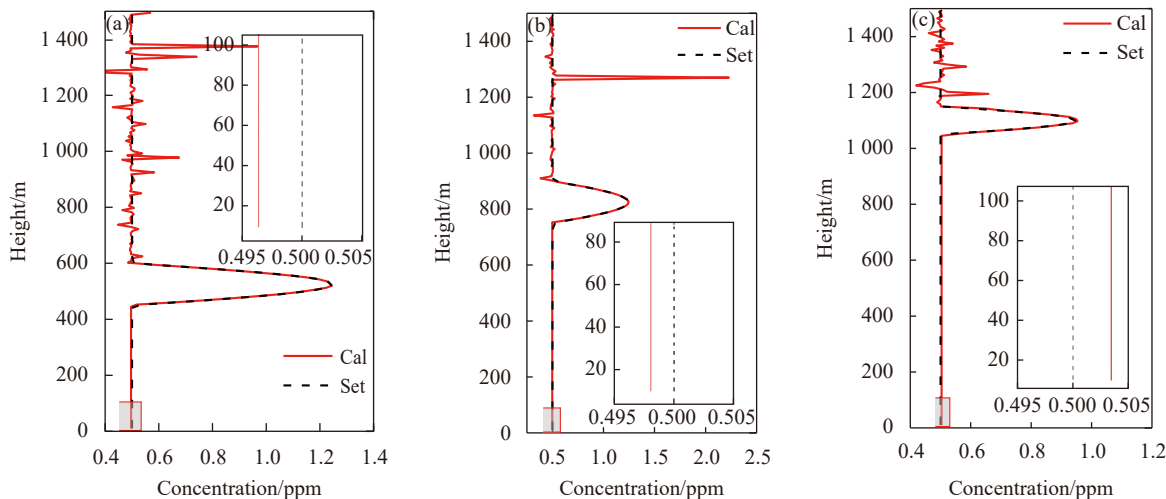


图 5 不同高度、浓度的甲醛模拟探测结果

Fig.5 Simulated detection results of formaldehyde at different heights and concentrations

### 3.2 气体浓度变化

重化工污染区域污染气体无组织排放的不确定性会造成目标气体浓度发生变化,为此,需要研究目标气体浓度变化对系统探测能力的影响。由图 6(a)可以看出,当甲醛在整个探测光程内的平均浓度为 3 ppm 时,由于吸收强烈,其最大探测距离仅为 0.35 km 左右,而当平均浓度小于 1 ppm 时,其探测距离为 1.1 km;图 6(b)所示为不同甲醛浓度对应的最远探测

距离的拟合变化曲线。考虑到激光雷达探测的盲区影响,选取 0.4 km 以上的区间,这时,探测区域的甲醛平均浓度小于 2.02 ppm。

图 7 所示为不同甲醛浓度对应的反演误差,其中图 7(a)为不同甲醛浓度对应的反演误差,从图中可以看出,在该研究范围内,随着甲醛浓度的增加,模拟反演的浓度误差逐渐减小;图 7(b)为不同甲醛浓度对应的平均浓度反演误差,从图中可以看出,浓度反演误

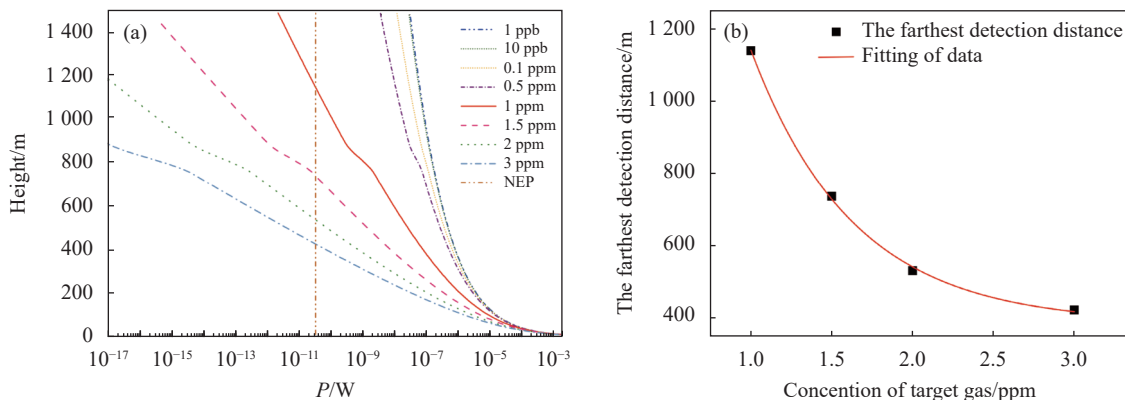


图 6 不同甲醛浓度对回波信号功率及探测距离的影响

Fig.6 Effects of different formaldehyde concentrations on echo signal power and detection distance

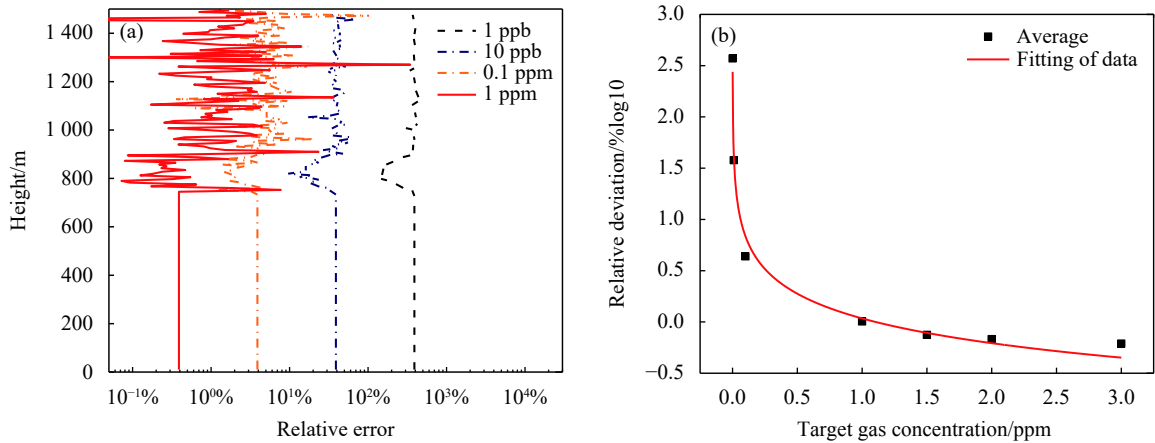


图 7 不同甲醛浓度的模拟反演误差

Fig.7 Simulation inversion errors corresponding to different formaldehyde concentrations

差小于 10% 的部分为大于 0.017 ppm。

### 3.3 干扰气体影响

在开放光程下的进行甲醛浓度探测时, 干扰气体会对探测结果造成一定的影响, 选择探测波段内影响最大的两种气体—— $H_2O$  和  $CH_4$ , 作为干扰气体, 研究其浓度变化对甲醛探测的影响。图 8 所示是以大气中  $H_2O$  的平均浓度 1.86% 为单位浓度,  $H_2O$  浓度分别为标准浓度的 0.25、0.5、1、2、6、8、10 倍时,  $\lambda_{on}$  的回波信号功率。图 8(a) 中, 随着  $H_2O$  浓度的升高, 激光雷达回波信号功率并没有产生明显的变化, 这是因为在文中选择的探测波长处,  $H_2O$  的吸收截面相对于  $CH_4$  气体要小 7 个数量级。图 8(b) 为不同  $H_2O$  浓度对应的反演误差的拟合曲线, 由图可以看出,  $H_2O$  浓

度在在标准  $H_2O$  浓度的 0.25~10 倍范围内变化时, 引起的最大反演误差小于 1.12%。

同理, 以大气中  $CH_4$  的平均浓度 1.7 ppm 为单位浓度, 将  $CH_4$  的浓度设定为标准浓度的 0.25、0.5、1、2、6、8、10 倍时, 得到不同浓度的  $CH_4$  对  $\lambda_{on}$  回波信号功率的影响, 如图 9 所示。从图 9(a) 可以看出, 随着  $CH_4$  浓度的升高, 激光雷达回波信号功率变化比  $H_2O$  浓度变化引起的变化要大, 这是因为与  $H_2O$  相比,  $CH_4$  的吸收截面相对于待测气体甲醛进小 3 个数量级。图 9(b) 为不同  $CH_4$  浓度对应的反演误差的拟合曲线, 由图可以看出,  $CH_4$  浓度在在标准  $CH_4$  浓度的 0.25~10 倍范围内变化时, 引起的最大反演误差小于 5%。

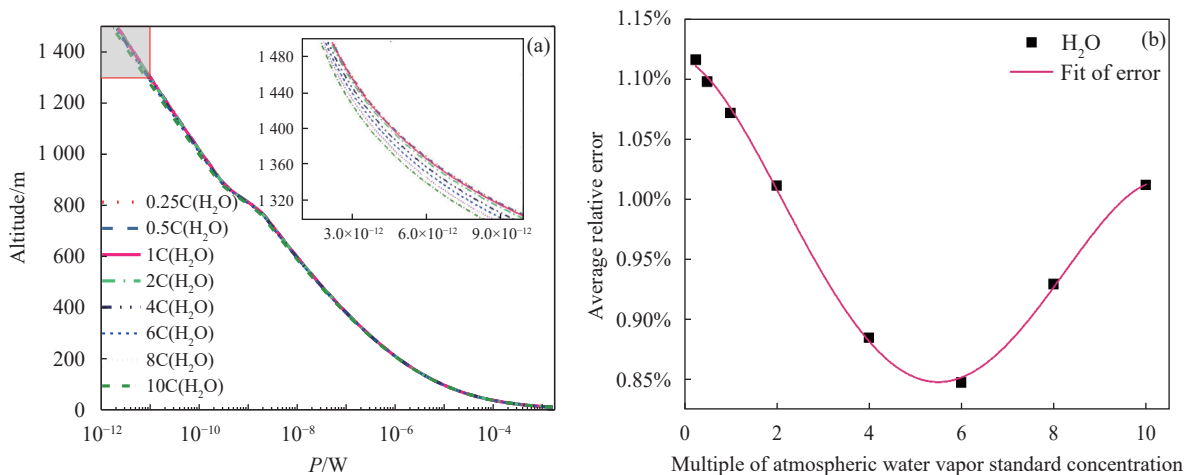


图 8  $H_2O$  浓度对探测性能的影响

Fig.8 Influence of  $H_2O$  concentration on detection performance

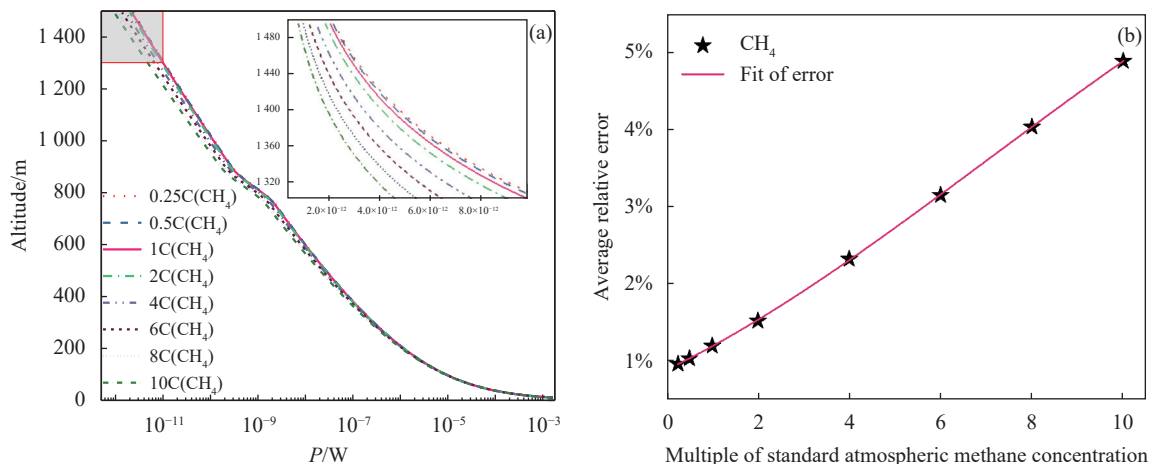


图 9 CH<sub>4</sub> 浓度对探测性能的影响

Fig.9 Influence of methane concentration on detection

综合探测距离及探测极限, 当前选择的系统参数能对浓度为 0.017~1.5 ppm 范围内、距离为 0.45~1.1 km 范围内的甲醛进行探测, H<sub>2</sub>O 及 CH<sub>4</sub> 对甲醛探测引入的误差分别在 1.12% 和 5% 之内。

#### 4 结 论

为了开展重化工污染区甲醛气体的浓度探测, 基于 DIAL 理论, 选择中红外波段的  $2\ 778.48\ \text{cm}^{-1}$  和  $2\ 777.82\ \text{cm}^{-1}$  作为  $\lambda_{\text{on}}$ 、 $\lambda_{\text{off}}$  探测波长, 并得出了 H<sub>2</sub>O 及 CH<sub>4</sub> 是两种最大的干扰气体; 根据设计的激光雷达系统参数, 分析了系统的可探测距离及可探测的浓度范围, 以及干扰气体引入的误差, 结果表明: 文中选定的系统探测波长和系统参数能够对浓度为 0.017~1.5 ppm 范围内, 距离为 0.45~1.1 km 范围内的甲醛进行探测, 相对误差约为小于 5%。文中的研究对应用于化工重污染区域甲醛无组织排放监测的中红外差分吸收激光雷达系统研制提供参考。

需要说明的是, 文中开展的工作仅仅是在理论分析和模拟仿真层面进行的, 后续实验的开展将严重依赖于高能量、窄线宽的量子级联激光器, 以及可实现中红外波段探测的低热噪声、高灵敏度的探测器, 原因在于当探测波长在 3~4  $\mu\text{m}$  时, 激光波长远大于大气分子直径, 与激光波长相当的气溶胶粒子也很少, 由此导致激光回波信号非常微弱, 回波信号的信噪比很低, 由甲醛吸收引起的回波信号有可能湮没在噪声中, 所以, 后续实验将对系统方案进行部分修正。

#### 参考文献:

- [1] Golden R. Identifying an indoor air exposure limit for formaldehyde considering both irritation and cancer hazards [J]. *Critical Reviews in Toxicology*, 2011, 41(8): 671-721.
- [2] Liu Wenqing, Cheng Zhenyi, Liu Jianguo, et al. Stereoscopic monitoring technology and applications for the atmospheric environment in China [J]. *Chin Sci Bull*, 2016, 61(30): 3196.
- [3] Di Huige, Hua Dengxin. Research status and progress of Lidar for atmosphere in China [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2021, 50(3): 20210032. (in Chinese)
- [4] Chen Yuqin, Tan Wenyuan, Fu Dayou, et al. Research progress of formaldehyde detection [J]. *Applied Chemical Industry*, 2018, 47(6): 1258-1262.
- [5] Xu Fei, Zhou Xiaobin, Liu Zhengbo, et al. Near-infrared optical-feedback linear cavity-enhanced absorption spectroscopy [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2021, 29(5): 933-939. (in Chinese)
- [6] Liu Qiuwu, Wang Xiaobin, Chen Yafeng, et al. Detection of atmospheric NO<sub>2</sub> concentration by differential absorption lidar based on dye laser [J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 37(4): 0428004. (in Chinese)
- [7] Shao Jiangfeng, Hua Dengxin, Wang Li, et al. Development of ultraviolet dual-wavelength lidar and analysis of its signal-to-noise ratio [J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(12): 1201004. (in Chinese)
- [8] Gong Yu, Bu Lingbing, Yang Bin, et al. High repetition rate mid-infrared differential absorption lidar for atmospheric pollution detection [J]. *Sensors*, 2020, 20(8): 2211.
- [9] Qi Zhong, Zhang Teng, Han Ge, et al. A nonlinear merging



- method of analog and photon signals for CO<sub>2</sub> detection in lower altitudes using differential absorption lidar [J]. *Optics Communications*, 2017, 388: 68-76.
- [10] Veerabuthiran S, Razdan A K, Jindal M K, et al. Open field testing of mid IR DIAL for remote detection of thiodiglycol vapor plumes in the topographic target configuration [J]. *Sens Actuator B-Chem*, 2019, 298: 7.
- [11] Weibring P, Edner H, Svanberg S. Versatile mobile lidar system for environmental monitoring [J]. *Appl Opt*, 2003, 42(18): 3583-3594.
- [12] Hong Guanglie, Li Jiatang, Kong Wei, et al. 935 nm differential absorption lidar system and water vapor profiles in convective boundary layer [J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 37(2): 0201003. (in Chinese)
- [13] Zhang Yang, Huang Weidong, Dong Changzhe, et al. Research on the development of the detection satellite technology in oceanographic lidar [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2020, 49(11): 20201045. (in Chinese)
- [14] Edner H, Fredriksson K, Sunesson A, et al. Mobile remote sensing system for atmospheric monitoring [J]. *Appl Opt*, 1987, 26(19): 4330.
- [15] Gholamreza Shayeganrad. Single laser-based differential absorption lidar (DIAL) for remote profiling atmospheric oxygen [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2018, 111: 80-85.
- [16] Ge Ye, Shu Rong, Hu Yihua, et al. System design and performance simulation of ground-based differential absorption lidar for water-vapor measurements [J]. *Acta Phys Sin*, 2014, 63(20): 204301. (in Chinese)
- [17] Xu Ling, Bu Lingbing, Cai Haoze, et al. Wavelength selection and detection capability simulation of the midinfrared DIAL for NO<sub>2</sub> detection [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2018, 47(10): 1030002. (in Chinese)
- [18] Yao Yizhou, Zhang Xianbao. Analysis of pollution characteristics and sources of volatile organic compounds in Zhenjiang [J]. *The Administration and Technique of Environmental Monitoring*, 2021, 33(5): 60-63.
- [19] Mei Liang. Applications of laser spectroscopy in environmental monitoring[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2013. (in Chinese)