

# 微脉冲相干差分吸收 CO<sub>2</sub> 廓线探测激光雷达性能研究

刘雅琦<sup>1</sup>, 李飞<sup>1</sup>, 曹恩达<sup>1</sup>, 李祚涵<sup>1</sup>, 魏祥通<sup>1</sup>, 潘伟<sup>1</sup>, 李静<sup>1</sup>, 赵一鸣<sup>2</sup>

(1 北京遥测技术研究所 北京 100076;

2 北京理工大学 北京 100081)

**摘要:** 当前, 全球温室气体含量逐年升高, 气候变暖问题日益严重。基于差分吸收相干探测原理的激光雷达能实现对温室气体浓度的廓线监测, 这对大气环境研究具有重要意义。针对当前地基 CO<sub>2</sub> 探测激光雷达在同时实现高集成度、高精度、高距离分辨率与长期稳定性方面存在的技术问题, 本研究基于差分吸收相干探测原理, 研制了采用全光纤集成架构的 1.57 μm 波段微脉冲 CO<sub>2</sub> 廓线探测激光雷达, 采用注入锁频光纤激光器与离轴反射式望远镜的收发同轴光路设计, 实现了紧凑型系统架构 (0.93 m×0.34 m×0.34 m) 与亚皮米级波长稳定精度 (10 °C~40 °C 变温条件下优于 0.6 pm)。本研究对该系统开展水平探测实验和连续观测实验。在水平探测实验中, 两波长回波功率的比值对数与探测距离呈显著的线性关系 ( $R^2=0.998$ ), 证明了系统具备良好的精密性; 同时通过连续观测实验, 验证了系统的稳定性。

**关键词:** 差分吸收; 相干探测; CO<sub>2</sub>; 激光雷达

中图分类号: TN958.98

文献标志码: A

文章编号: 2095-1000(2025)04-0132-08

DOI: 10.12347/j.ycyk.20241220001

CSTR: 32406.14.ycyk.20241220001

引用格式: 刘雅琦, 李飞, 曹恩达, 等. 微脉冲相干差分吸收 CO<sub>2</sub> 廓线探测激光雷达性能研究[J]. 遥测遥控, 2025, 46(4): 132-139.

## Research on Micro-Pulse CO<sub>2</sub> Detection LIDAR Based on Differential Absorption Coherent Detection

LIU Yaqi<sup>1</sup>, LI Fei<sup>1</sup>, CAO Enda<sup>1</sup>, LI Zuohan<sup>1</sup>, WEI Xiangtong<sup>1</sup>, PAN Wei<sup>1</sup>, LI Jing<sup>1</sup>, ZHAO Yiming<sup>2</sup>

(1. Beijing Research Institute of Telemetry, Beijing 100076, China;

2. Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

**Abstract:** With the continuous increase of global greenhouse gas concentrations and the escalating issue of climate warming, lidar based on the differential absorption coherent detection principle has become crucial for vertical profiles of greenhouse gas concentrations. To address the technical challenges in current ground-based CO<sub>2</sub> detection lidar systems of simultaneously achieving high integration, high precision, high range resolution, and long-term stability, this study developed a micro-pulse CO<sub>2</sub> profiling lidar operating at 1.57 μm with an all-fiber-integrated architecture. The system combines an injection-locked fiber laser and an off-axis reflective telescope in a coaxial transceiver design, realizing a compact system architecture (0.93 m × 0.34 m × 0.34 m) and sub-picometer wavelength stability (<0.6 pm under 10°C~40°C thermal variations). Horizontal detection experiments as well as continuous observation experiments were conducted. Experiments for horizontal detection revealed a significant linear relationship ( $R^2=0.998$ ) between the logarithmic ratio of dual-wavelength echo power and the detection range, confirming system precision; and the stability of the lidar system was verified by a continuous observation experiment.

**Keywords:** Differential absorption; Coherent detection; CO<sub>2</sub>; LIDAR

**Citation:** LIU Yaqi, LI Fei, CAO Enda, et al. Research on Micro-Pulse CO<sub>2</sub> Detection LIDAR Based on Differential Absorption Coherent Detection[J]. Journal of Telemetry, Tracking and Command, 2025, 46(4): 132-139.

## 0 引言

由温室气体带来的气候变化和全球变暖已成为学界关注的全球性环境科学问题,同时也是与人民生活息息相关的问题<sup>[1]</sup>。对火山爆发等自然活动的碳排放监测对气候预测具有重要作用,而对人类工业及生活产生的碳排放的监测可为碳减排政策的制定和实施提供有力的帮助。

为减少碳监测过程中时空分布的不确定性,CO<sub>2</sub>柱浓度观测和廓线观测是十分必要的<sup>[2,3]</sup>。差分吸收激光雷达(Differential Absorption Lidar, DIAL)是目前应用于CO<sub>2</sub>气体遥感监测最成熟的激光雷达技术<sup>[4,5]</sup>。差分吸收激光雷达依赖待测气体的吸收光谱,要求选择特定的激光波长,且对波长的稳定性要求高,发射系统较复杂,但是灵敏度相对较高。CO<sub>2</sub>差分吸收激光雷达可以分为硬目标DIAL即路径积分差分吸收激光雷达(Integration Path Differential Absorption Lidar, IPDA)和气溶胶差分吸收激光雷达<sup>[6]</sup>,二者可实现不同的CO<sub>2</sub>浓度探测目的,分别为柱浓度探测和具有距离分辨率的廓线浓度探测。其中前者在星载激光雷达系统应用广泛<sup>[7,8]</sup>,可获取全球覆盖的CO<sub>2</sub>柱浓度观测,而后者可取得单个观测点上带有距离分辨率的CO<sub>2</sub>浓度测量值,即CO<sub>2</sub>浓度廓线。与传统原位点测量技术比较,差分吸收激光雷达技术具有高精度、低干扰和可实现三维探测、廓线探测等特点。因此,差分吸收激光雷达技术已经成为CO<sub>2</sub>等温室气体检测技术发展的主流方向。

2004年,美国NASA兰利研究中心的科学家研制了地基相干差分吸收雷达<sup>[9]</sup>,用于大气CO<sub>2</sub>垂直浓度廓线与风廓线的探测,其工作波长为2.05 μm。探测器为InGaAs材料的双平衡光电探测器,1σ标准方差的精度为1%~2%,探测高度范围在1.2 km~2.8 km,其白天的探测精度受大气折射率湍流影响,测量误差是夜晚的1.5倍。同时文中还提到增加脉冲重频或减小两个波长脉冲的时间间隔,有利于提高其湍流情况下的精度。2009年,日本科学家Sakaizawa采用1.6 μm CO<sub>2</sub>差分吸收激光雷达测量垂直CO<sub>2</sub>浓度廓线<sup>[10]</sup>,发射光源为种子注入的光参量振荡器激光器,以光子计数模式的短波红外光电倍增管作为探测端,实际工作波长选择在水汽干扰小和温度敏感性小的1.572 μm吸收线,

最大输出能力达10 mJ,脉冲重复频率为200 Hz,雷达精度在2%左右,探测高度最高至5.2 km。2017年,日本科学家Shibata等人以1.6 μm(光学参量产生器/光学参量放大器)激光器作为光源,采用直接探测方式测量了CO<sub>2</sub>浓度廓线<sup>[11]</sup>,其距离分辨率可调,高度小于6.3 km时垂直分辨率为500 m,高度小于3.8 km时垂直分辨率为100 m,雷达与被动传感器测量的平均差为-0.06 E-6,精度达到1.0%。2013年,上海光机所的刘继桥等人设计并研制了探测全球大气CO<sub>2</sub>的星载路径积分差分吸收激光雷达<sup>[12]</sup>。2017年,上海光机所启动大气探测激光雷达(Aerosol and Carbon dioxide Detection Lidar, ACDL)的研制,并在2022年随大气环境监测卫星成功发射<sup>[13]</sup>,实现了国际首次星载激光雷达测量全球CO<sub>2</sub>浓度,目前已在轨连续稳定工作两年,实现了高精度CO<sub>2</sub>和气溶胶遥感数据反演,同全球碳柱总量观测网站点对比,ACDL激光雷达验证CO<sub>2</sub>柱浓度观测精度优于1E-6。

微脉冲激光雷达激光能量小、频率高,具有体积小、可靠性高、分辨率高的特点<sup>[14]</sup>,目前国内关于微脉冲相干差分吸收的CO<sub>2</sub>雷达的相关研究较少。为了实现高集成度、高距离分辨率、长期稳定运行的CO<sub>2</sub>雷达系统,本课题组利用1.57 μm波段的低能量、高重频注入锁频光纤激光器作为发射光源,采用两台单纵模种子激光器作为主激光器,输出波长on/off交替变化的单频激光脉冲,同时采用离轴反射式望远镜实现收发光路,平衡探测器作为接收端,构建了一台紧凑型地基CO<sub>2</sub>廓线探测激光雷达系统。该系统通过交替发射双波长激光脉冲,并接收气溶胶后向散射的回波信号,实现距离分辨的CO<sub>2</sub>浓度探测。

## 1 探测原理

差分吸收激光雷达的探测原理是:通过向大气交替发射两束不同波长的激光,通过望远镜接收并探测大气后向散射两波长激光回波信号的强度差异,以获取探测气体浓度值<sup>[15,16]</sup>。其中一束激光的波长位于CO<sub>2</sub>的吸收峰处,记为on-line激光(峰尖波长 $\lambda_{on}$ ),另一束激光的波长处在吸收峰两端的外侧,记为off-line激光(峰外波长 $\lambda_{off}$ )。其两束不同波长激光对应的距离分辨激光雷达方程为:

$$P_{\text{on}}(R) = P_0(\lambda_{\text{on}})(c\tau_L/2)\beta(R)A/R^2 \exp\left\{-2\int_0^R N_g(r)\sigma_g(\lambda_{\text{on}}) + \alpha(\lambda_{\text{on}}, r)dr\right\} \quad (1)$$

$$P_{\text{off}}(R) = P_0(\lambda_{\text{off}})(c\tau_L/2)\beta(R)A/R^2 \exp\left\{-2\int_0^R N_g(r)\sigma_g(\lambda_{\text{off}}) + \alpha(\lambda_{\text{off}}, r)dr\right\} \quad (2)$$

其中,  $P_i(R)$  ( $i = \text{on}, \text{off}$ ) 为回波功率;  $\tau_L$  为发射激光的脉宽;  $P_0(\lambda_i)$  为发射激光束的功率;  $\beta(R)$  为大气气溶胶和分子的后向散射系数;  $A$  为接收望远镜的有效面积;  $R$  为探测距离;  $N_g(r)\sigma_g(\lambda_{\text{on}}) + \alpha(\lambda_{\text{on}}, r)$  为激光束在来回行程中的消光系数, 包括大气光散射衰减和光吸收衰减,  $N_g(r)$  为大气 CO<sub>2</sub> 浓度,  $\sigma_g(\lambda_i)$  为 CO<sub>2</sub> 的吸收截面,  $\alpha(\lambda_{\text{on}}, r)$  为除 CO<sub>2</sub> 吸收之外的消光系数。如果  $\lambda_{\text{on}}$  与  $\lambda_{\text{off}}$  相近, 则近似认为:

$$\alpha(\lambda_{\text{on}}, r) = \alpha(\lambda_{\text{off}}, r) \quad (3)$$

由式(1)~式(3)可计算得到距离分辨 CO<sub>2</sub> 探测激光雷达探测 CO<sub>2</sub> 气体浓度表达式如下:

$$N(R_1, R_2) = \frac{1}{2[\sigma_g(\lambda_{\text{on}}) - \sigma_g(\lambda_{\text{off}})](R_2 - R_1)} \times \ln\left[\frac{P_{\text{off}}(R_2)P_{\text{on}}(R_1)}{P_{\text{off}}(R_1)P_{\text{on}}(R_2)}\right] \quad (4)$$

其中,  $R_1$ 、 $R_2$  分别为探测距离门的起点和终点与雷达发射端的距离, 右侧对数项为差分吸收光学厚度(Differential absorption optical depth, DAOD), 即 on/off 波长回波信号之比的差分, 用来表示 CO<sub>2</sub> 吸收所导致的两波长激光回波信号的差异, 表征 CO<sub>2</sub> 分子对两波长不同的吸收效果<sup>[17]</sup>。因此, CO<sub>2</sub> 探测激光雷达可以通过测量不同距离处的 on/off 激光回波信号强度实现 CO<sub>2</sub> 浓度探测。

相干探测的探测过程是将本振光和信号光进行拍频得到信号光相对于本振光的差频信号(即多普勒频移信号<sup>[18,19]</sup>)。激光在大气中传输的回波信号与系统本振光信号通过光探测器产生差频信号, 当本振光信号的频率与发射激光的频率具有一定差值时, 差频信号大小即与回波信号的强度正相关, 通过测量差频信号强度即可计算出回波信号的强度。本系统相干探测采用平衡探测器进行探测, 假设本振光投射到探测器表面上的信号为  $E_L(t)$ , 回波光信号为  $E_s(t)$ , 二者光场分别表示为:

$$\begin{cases} E_s(t) = E_s \cos(\omega_s t + \varphi_s) \\ E_L(t) = E_L \cos(\omega_L t + \varphi_L) \end{cases} \quad (5)$$

其中,  $E_s$  和  $E_L$  分别为回波信号光和本振光的振幅,  $\omega_s$  和  $\omega_L$  分别为信号光和本振光的角频率,  $\varphi_s$  和  $\varphi_L$  分别为信号光和本振光的初始相位,  $t$  为时间。

两信号经过 2×2 分束器后, 经平衡探测器接收并输出光电流, 由于分束器分束比为 0.5, 其输出光电流可表示为<sup>[18,19]</sup>:

$$i_M = 2\alpha E_s E_L \cos[(\omega_s - \omega_L)t + (\varphi_s - \varphi_L)] + n(t) \quad (6)$$

上式中,  $\alpha$  为探测器的响应度,  $n(t)$  为噪声电流。从上式可以看出, 相干探测中激光器本振光  $E_L$  对探测器输出光电流具有放大作用, 可实现微弱回波信号的探测, 可有效提高 CO<sub>2</sub> 廓线探测雷达探测信噪比。

## 2 系统组成

### 2.1 系统架构

雷达样机的总体架构如图 1 所示, 可分为四个部分: 光纤激光器、望远镜收发子系统、相干探测子系统和信号采集处理与控制子系统。激光器分时发射 on/off 波长的光, 经环形器后由离轴反射望远镜射向待测路径, 经路径空气中的 CO<sub>2</sub> 分子吸收, 同时被气溶胶散射, 再由望远镜接收气溶胶的后向散射信号, 经过环形器后与种子激光器分出的单频连续参考光进行拍频, 由平衡探测器接收经 AD 采样后得到回波信号强度, 通过数据处理反演得到 CO<sub>2</sub> 浓度-距离曲线, 即 CO<sub>2</sub> 廓线。

为解决传统系统体积庞大、光路稳定性差的问题, 本系统采用全光纤集成的系统架构, 结构紧凑, 雷达主体结构长为 0.34 m、宽为 0.34 m、高为 0.93 m。其中, 两台单纵模种子激光器作为主激光器, 通过磁光开关分时注入到同一台 EDFA(掺铒光纤放大器)激光器中, 利用激光放大技术实现单频激光输出, 同时向相干探测子系统输出约 2.5 mW 连续种子光, 作为与回波信号拍频所需要的参考光。离轴反射式望远镜采用收发同置设计, 对激光脉冲进行扩束并发射, 同时接收回波。由于系统发射激光是通过种子光经声光调制器(Acousto-Optic Modulator, AOM)移频后产生的, 因此系统发射激光与大气回波均与本振参考光具有一个固定频移量。回波与参考光经过平衡探测器

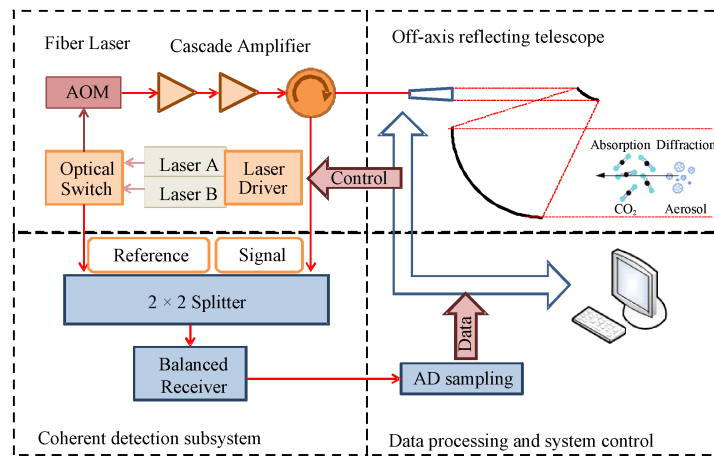


图1 雷达系统框图

Fig. 1 Diagram of the Lidar system

拍频后，差频信号的频谱将在该频移量处有一个峰值，根据式(6)可知该峰值强度与回波强度有关，因此可根据 on/off 两路信号回波差频信号频谱在频移量处的峰值反演 CO<sub>2</sub> 浓度。

2.2 波长选择与波长控制

选择 On-line 和 off-line 的激光波长时首先需要避开水汽吸收峰。off-line 波长应选择在 CO<sub>2</sub> 吸收尽可能弱的地方，on-line 激光波长需要选择在 CO<sub>2</sub> 吸收较强的地方，这样可以获得足够的 on/off 信号强度差异。然而如果选择的 on-line 波长 CO<sub>2</sub> 吸收过强，on-line 激光在远距离处的回波信号将会很弱，导致 on-line 波长的信噪比过低，同样会影响探测精度。同时 on-line 和 off-line 激光波长需要尽可能靠近，以减小系统因波长差异带来的误差，例如光学效率以及公式(3)中除 CO<sub>2</sub> 吸收外的消光系数等二者的误差。

CO<sub>2</sub> 探测激光雷达的探测光源主要有 1.57 μm 和 2 μm 两个波段。1.57 μm 波段与 2 μm 波段相比，对于 CO<sub>2</sub> 探测激光雷达系统的探测功能是完全相同的，但是由于 1.57 μm 波段激光器采用光纤激光器体制，激光器输出功率低，可以采用风冷散热，相比 2 μm 激光器来说对高低温环境适应性更好，可以实现更稳定的激光能量输出，更适合地面使用以提升系统长期运行的稳定性和可靠性，因此选用 1.57 μm 波段的差分吸收来用于 CO<sub>2</sub> 的浓度测量研究。

CO<sub>2</sub> 的吸收谱线细而窄，对于处在吸收峰处的 on-line 波长，其波长漂移导致的回波能量波动将对反演结果造成非常大的影响，因此波长定标和

稳定的误差须控制在 75 MHz 之内<sup>[20]</sup>。因此，探测光源波长的频率稳定性对于系统探测能力来说是非常重要的。在本系统中，波长控制是通过锁频模块采集种子激光器中分出的弱光信号，如图 2 所示，利用法布里-珀罗腔产生的窄带透射谱作为标准具，利用透过的光功率值作为判断依据，传输给激光器控制系统，控制系统根据光功率变化调整种子激光器的驱动参数，使激光器的波长稳定在一固定值上，达到频率锁定的目的。实测 2 h 内激光器能量稳定性(RMS)为 2.4%，同时进行了变温波长漂移测试，如图 3 所示，在 10 °C~40 °C 变温条件下，波长变化小于 0.6 pm，对应频率误差约为 72.8 MHz，满足文献[20]中对波长稳定的要求。根据文献[17]，波长漂移引入的 CO<sub>2</sub> 浓度反演相对误差可表示为：

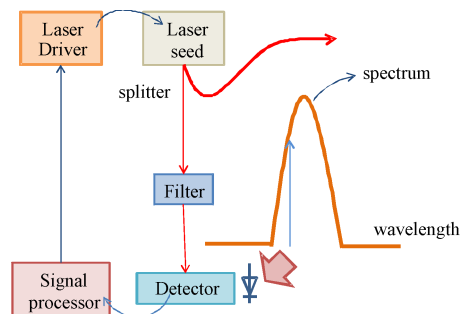


图2 频率锁定

Fig. 2 Frequency locking

$$E_{RS} = \frac{\delta N_{CO_2}}{N_{CO_2}} = \frac{1}{\sigma_g(\lambda_{on}) - \sigma_w(\lambda_{off})} \cdot \frac{\partial \Delta\sigma(\lambda)}{\partial \lambda} \delta\lambda \quad (7)$$

其中，Δσ(λ)表示由于 on-line 波长漂移导致两波长

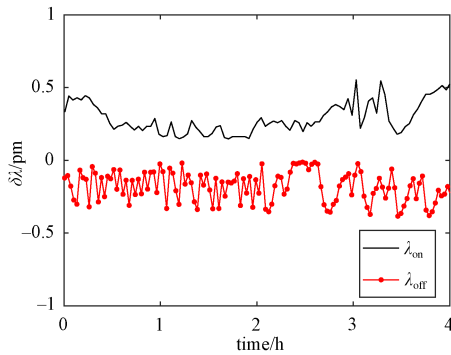


图3 10 °C~40 °C变温条件下波长稳定性测试结果

Fig. 3 Wavelength stability test results under varying temperature conditions (10 °C~40 °C)

吸收截面差的变化。计算得到本系统激光器0.6 pm 波长漂移对 CO<sub>2</sub> 浓度测量带来的相对误差约 0.015%。

### 2.3 数据处理

图4是雷达系统反演数据处理流程图。将参考光与具有 CO<sub>2</sub> 浓度信息的回波信号光耦合进2×2 光纤耦合器进行拍频，平衡探测器对拍频信号进行外差探测，转化为电信号经数据采集后送入数据处理系统，经过距离门划分，将回波信号分段进行FFT(快速傅里叶变换)，得到回波拍频信号频谱图。由于发射光与参考光具有一定频移，根据式(6)，回波信号频谱将在二者频率差的位置出现信号峰，该信号峰的强度与回波信号强度相关，即可通过该信号峰强度反演 CO<sub>2</sub> 浓度。分别对 on/off 脉冲进行频谱图积累，提高信噪比；并对一定光谱范围的信号进行积分，得到 on/off 脉冲在不同距离门的信号强度，并利用公式(1)~公式(4)反演得

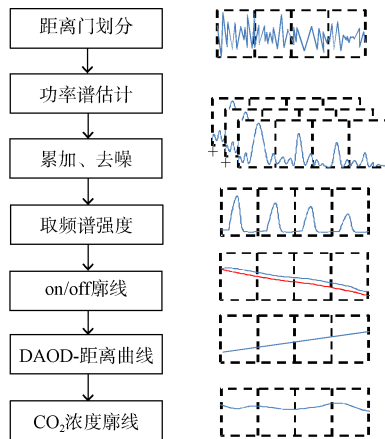


图4 数据处理流程图

Fig. 4 Flow chart of data processing

到 CO<sub>2</sub> 浓度廓线。

### 2.4 性能仿真

对于相干差分吸收雷达系统，本振光的散粒噪声占主导，因此系统信噪比可表示为<sup>[17,19]</sup>

$$SNR = \frac{(2\alpha \sqrt{P_s P_L})^2}{2B[ae(P_s + P_L + P_D) + 2k_B T/R]} \sqrt{M} \quad (8)$$

其中 P<sub>s</sub>、P<sub>L</sub> 和 P<sub>D</sub> 分别为回波信号光、本振光和背景噪声的功率，α 为探测器的响应度，e 为电子电量，B 为探测器带宽，k<sub>B</sub> 是玻尔兹曼常数，T 为温度，R 为输出阻抗，M 为脉冲累计数。根据表 1 中系统参数及式(1)~式(2)，对雷达探测信噪比进行仿真分析。经过 1 分钟时间累计，本系统探测信噪比与距离的关系如图 5 所示，系统在 3 km 处信噪比约为 10 dB，雷达理论探测高度约为 3 km。

表 1 雷达总体指标

Table 1 Main parameters of the Lidar

参数	指标	参数	指标
激光波长	1 572.018 nm / 1 572.480 nm	望远镜口径	150 mm
激光能量	60 μJ	望远镜视场角	1 mrad
激光重复频率	10 kHz	系统光学常数	0.65
激光切换频率	5 Hz	探测器响应度	0.95 A/W
本振光功率	2.5 mW	探测器带宽	200 MHz
激光脉宽	200 ns	输入阻抗	50 Ω
移频量	80 MHz	盲区	300 m

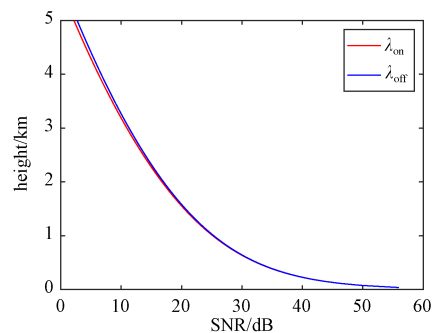


图5 系统信噪比与探测高度的关系

Fig. 5 Variation of SNR with height

### 3 实验结果

由于低空处气溶胶浓度较大，雷达回波强，系统信噪比高，利于评估系统探测能力。因此为检验系统性能，采用水平廓线探测评估系统的能力。CO<sub>2</sub> 浓度通常在水平方向数千米内保持恒定，

因此根据式(4), 如果可以测量到 DAOD 随探测距离变化基本保持不变, 即两个波长回波功率的比值对数  $\ln[P_{\text{off}}(R)/P_{\text{on}}(R)]$  与探测距离有显著线性关系, 则可说明系统具备良好的精密性<sup>[17,21]</sup>。

### 3.1 水平大气测量

图6展示了2024年6月14日白天采集信号所得到两波长回波功率的比值对数与探测距离的关系曲线, 其累计时间为1 h, 可从0.3 km探测到约3 km范围, 距离分辨率为38.4 m, 经线性拟合  $R^2$  达到0.998, 表明该系统具备良好的精密性。同时可以通过两波长回波强度反演得到  $\text{CO}_2$  浓度廓线, 如图7所示是2024年6月16日的  $\text{CO}_2$  浓度廓线,  $\text{CO}_2$  浓度在约0.3 km~2.8 km探测距离范围内较为均匀, 符合  $\text{CO}_2$  的水平分布规律, 其平均浓度约为  $399\text{E}-6$ 。

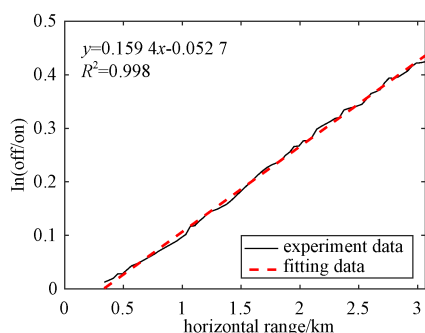


图6 水平大气测量  $\text{CO}_2$  两波长回波功率的比值对数实验结果

Fig. 6 The experiment result of log ratio ( $\ln[P_{\text{off}}(R)/P_{\text{on}}(R)]$ ) in horizontal  $\text{CO}_2$  detection

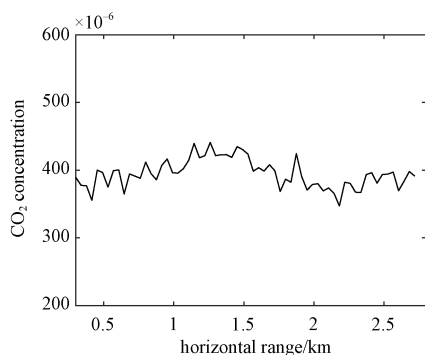


图7 水平大气测量  $\text{CO}_2$  浓度廓线实验结果

Fig. 7 The experiment result of  $\text{CO}_2$  concentration profile in horizontal detection

### 3.2 连续观测实验

水平测试实验结果证明了该雷达系统具备良

好的精密性和精度, 下面通过连续观测实验验证雷达系统的稳定性。图8为2024年6月16日连续测试2 h, 共获取964条  $\text{CO}_2$  廓线的情况。可以看出在测试的2 h内,  $\text{CO}_2$  廓线线型基本保持不变, 在0.3 km~2.8 km的测量距离内, 浓度保持在  $3.8\text{E}-4$  ~  $4.1\text{E}-4$  之间, 符合  $\text{CO}_2$  的水平分布规律, 证明了雷达系统的稳定性。

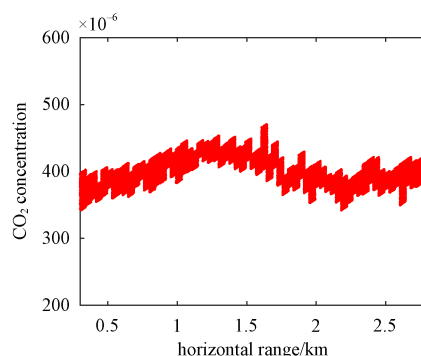


图8  $\text{CO}_2$  浓度廓线随时间累计

Fig. 8  $\text{CO}_2$  concentration profiles accumulated by time

## 4 结束语

本文设计了一台基于相干差分吸收原理的  $\text{CO}_2$  廓线探测激光雷达。该雷达采用全光纤集成的  $1.57 \mu\text{m}$  注入锁频激光器, 在  $10^\circ\text{C}$ ~ $40^\circ\text{C}$  变温条件下波长漂移小于  $0.6 \text{ pm}$ , 提高了雷达系统的稳定性、可靠性, 通过离轴反射望远镜与光纤激光器的协同设计, 实现紧凑结构的激光雷达主机 ( $0.34 \text{ m} \times 0.34 \text{ m} \times 0.93 \text{ m}$ )。系统可获得具有距离分辨率的  $\text{CO}_2$  廓线, 水平探测距离达到3 km (盲区300 m), 并通过水平探测实验证明两波长回波功率的比值对数与探测距离呈显著的线性关系 ( $R^2=0.998$ ), 验证了雷达系统的精密性, 同时通过连续观测实验证明系统反演  $\text{CO}_2$  廓线在2 h内线型基本保持不变且符合  $\text{CO}_2$  的水平分布规律, 验证了雷达系统稳定性。

## 参考文献

- [1] LEE H, CALVIN K, DASGUPTA D, et al. IPCC, 2023: Climate change 2023: Synthesis report[R/OL]. (2023-3-19) [2024-11-04]. [http://www.ipcc.ch/report/ar6/syr/downloads/report/IPCC\\_AR6\\_SYR\\_FullVolume.pdf](http://www.ipcc.ch/report/ar6/syr/downloads/report/IPCC_AR6_SYR_FullVolume.pdf).
- [2] STEPHENS B B, GURNEY K R, TANS P P, et al. Weak northern and strong tropical land carbon uptake from vertical profiles of atmospheric  $\text{CO}_2$ [J]. Science, 2007, 316

- (5832): 1732-1735.
- [3] GATTI L V, MILLER J B, D'AMELIO M T S, et al. Vertical profiles of CO<sub>2</sub> above eastern Amazonia suggest a net carbon flux to the atmosphere and balanced biosphere between 2000 and 2009[J]. *Tellus B: Chemical and Physical Meteorology*, 2010, 62(5): 581-594.
- [4] AMEDIEK A, EHRET G, FIX A, et al. CHARM-F—a new airborne integrated-path differential-absorption lidar for carbon dioxide and methane observations: measurement performance and quantification of strong point source emissions[J]. *Applied Optics*, 2017, 56(18): 5182-5197.
- [5] EHRET G, KIEMLE C, WIRTH M, et al. Space-borne remote sensing of CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, and N<sub>2</sub>O by integrated path differential absorption lidar: A sensitivity analysis[J]. *Applied Physics B*, 2008, 90(3-4): 593-608.
- [6] 余赛芬, 章振, 夏海云. 温室气体空间遥感方法综述[J]. *空间遥感系统与技术*, 2022, 2(1): 45-57.  
YU Saifen, ZHANG Zhen, XIA Haiyun. Overview of space remote sensing methods for greenhouse gases[J]. *Space Remote Sensing System and Technology*, 2022, 2(1): 45-57.
- [7] KAWA S R, ABSHIRE J B, BAKER D F, et al. Active sensing of CO<sub>2</sub> emissions over nights, days, and seasons (ASCENDS): Final report of the ascends ad hoc science definition team[J]. *Goddard Space Flight Center*, 2018, 219034.
- [8] EHRET G, BOUSQUET P, PIERANGELO C, et al. MERLIN: A French-German space lidar mission dedicated to atmospheric methane[J]. *Remote sensing*, 2017, 9(10): 1-29.
- [9] KOCH G J, BARNES B W, PETROS M, et al. Coherent differential absorption lidar measurements of CO<sub>2</sub>[J]. *Applied Optics*, 2004, 43(26): 5092-5099.
- [10] SAKAIZAWA D, NAGASAWA C, NAGAI T, et al. Development of a 1.6 μm differential absorption lidar with a quasi-phase-matching optical parametric oscillator and photon-counting detector for the vertical CO<sub>2</sub> profile[J]. *Applied Optics*, 2009, 48(4): 748-757.
- [11] SHIBATA Y, NAGASAWA C, ABO M. Development of 1.6 μm DIAL using an OPG/OPA transmitter for measuring atmospheric CO<sub>2</sub> concentration profiles[J]. *Applied Optics*, 2017, 56(4): 1194-1201.
- [12] 刘继桥, 谢杨易, 李世光, 等. 用于全球大气温室气体探测的星载激光雷达研究[J]. *红外*, 2013, 34(2): 22-34.  
LIU Jiqiao, XIE Yangyi, LI Shiguang, et al. Research on spaceborne lidar for global atmospheric greenhouse gases detection[J]. *Infrared*, 2013, 34(2): 22-34.
- [13] 陈卫标, 刘继桥, 竹孝鹏, 等. 星载激光雷达遥感技术进步与发展趋势(特邀)[J]. *中国激光*, 2024, 51(11): 1101011.  
CHEN Weibiao, LIU Jiqiao, ZHU Xiaopeng, et al. Spaceborne lidar remote sensing progress and developments(Invited)[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2024, 51(11): 1101011.
- [14] 蔡晓春, 胡以华, 陶小红, 等. 微脉冲差分吸收激光雷达 CO<sub>2</sub> 探测性能研究[J]. *激光技术*, 2007, 31(5): 515-517.  
CAI Xiaochun, HU Yihua, TAO Xiaohong, et al. Simulation research on detection thickness of CO<sub>2</sub> by micro pulse DIAL[J]. *Laser Technology*, 2007, 31(5): 515-517.
- [15] WIRTH M, FIX A, MAHNKE P, et al. The airborne multi-wavelength water vapor differential absorption lidar WALES: System design and performance[J]. *Applied Physics B*, 2009, 96(1): 201-213.
- [16] RIRIS H, NUMATA K, LI S, et al. Airborne measurements of atmospheric methane column abundance using a pulsed integrated-path differential absorption lidar[J]. *Applied Physics B*, 2012, 51(34): 8296-8305.
- [17] 李因营, 陈相成, 于翠荣, 等. 相干差分吸收二氧化碳激光雷达仿真与误差分析[J]. *光学学报*, 2024, 44(6): 0601012.  
LI Yinying, CHEN Xiangcheng, YU Cuirong, et al. Simulation and error analysis of coherent differential absorption carbon dioxide lidar[J]. *Acta Optica Sinica*, 2024, 44(6): 0601012.
- [18] 陶小红, 胡以华, 赵楠翔, 等. 大气 CO<sub>2</sub> 相干探测激光雷达系统性能分析[J]. *量子电子学报*, 2008, 25(2): 230-234.  
TAO Xiaohong, HU Yihua, ZHAO Nanxiang, et al. Analysis of coherent lidar system for measurements of atmospheric CO<sub>2</sub>[J]. *Chinese Journal of Quantum Electronics*, 2008, 25(2): 230-234.
- [19] 杨彦玲, 李彦超, 高龙, 等. 相干激光雷达平衡外差探测方法的数值仿真[J]. *红外与激光工程*, 2011, 40(10): 1918-1922.  
YANG Yanling, LI Yanchao, GAO Long, et al. Numerical simulation of balanced heterodyne detection for coherent lidar[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40(10): 1918-1922.
- [20] AMEDIEK A, FIX A, WIRTH M, et al. Development of an OPO system at 1.57 μm for integrated path DIAL measurement of atmospheric carbon dioxide[J]. *Applied Physics B*, 2008, 92(2): 295-302.
- [21] 韩舸, 龚威, 马昕, 等. 地基 CO<sub>2</sub> 廓线探测差分吸收激光雷达[J]. *物理学报*, 2015, 64(24): 244206.

HAN Ge, GONG Wei, MA Xin, et al. A ground based differential absorption lidar for atmospheric vertical CO<sub>2</sub> profiling[J]. Acta Physica Sinica, 2015, 64(24): 244206.

曹恩达 1994年生, 硕士, 工程师。  
李祚涵 1990年生, 博士, 高级工程师。  
魏祥通 1992年生, 硕士, 工程师。  
潘伟 1994年生, 硕士, 工程师。  
李静 1985年生, 博士, 研究员。  
赵一鸣 1983年生, 博士, 研究员。

#### [作者简介]

刘雅琦 1993年生, 博士, 工程师。  
李飞 1991年生, 硕士, 工程师。

(本文编辑: 潘三英)

## 《遥测遥控》“低空经济背景下通导监技术”专刊征稿启事

近年来, 随着无人机技术、城市空中交通和低空物流等新兴业态的快速发展, 低空经济正成为全球经济增长的新引擎。据国际权威机构预测, 到2030年, 全球低空经济市场规模将突破万亿美元。在这一背景下, 构建安全、高效、智能的低空交通体系成为各国竞相布局的战略方向。然而, 低空环境的复杂性、动态性和高密度特性, 对通信、导航、监视(CNS)技术提出了前所未有的挑战。如何突破现有技术瓶颈, 实现低空飞行器的可靠通信、精准导航和智能监视, 已成为学术界和产业界共同关注的焦点问题。

当前, 低空CNS技术正处于快速演进的关键阶段。在通信技术方面, 5G/6G网络为低空通信提供了新机遇, 但高速移动、高密度节点带来的频谱资源紧张、干扰抑制等问题尚未完全解决; 在导航技术领域, 多源融合导航虽取得一定进展, 但在复杂城市峡谷、室内外过渡区等场景下的连续性、可靠性仍需提升; 监视技术虽已实现从单一雷达向多传感器协同的转变, 但对低空小目标的识别精度、实时态势感知能力仍有不足。与此同时, 量子导航、通感一体化、分布式智能等新兴技术的涌现, 为低空CNS技术的发展注入了新动能。

为促进低空经济背景下CNS技术创新与发展, 同时也为庆祝《遥测遥控》创刊五十周年, 《遥测遥控》编辑部计划于2026年第1期出版“低空经济背景下通导监技术”专刊, 我们诚挚邀请国内外专家学者踊跃投稿。

### 一 征稿范围 (包括但不限于):

- 低空通信网络架构 (5G/6G、卫星通信、自组网、频谱动态分配等)。
- 低空导航增强技术 (北斗/GNSS、视觉/激光定位、多源融合定位等)。
- 智能监视与空域管理 (AI驱动的态势感知、数字孪生、多传感器协同等)。
- CNS一体化系统设计与效能验证。
- 低空网络安全 (抗干扰、数据加密、量子通信应用等)。
- 复杂场景适应性 (城市峡谷、电磁干扰、气象影响等)。

### 二 征稿要求:

1、综述类论文应在反映国内外行业最新现状的基础上提出自己的见解, 如对未来的发展趋势、研究重点、新技术研发方向的判断、预测等, 须具有一定的广度和深度, 切忌写成科普论文; 学术科研类论文应具有一定的创新性和实用性, 务求论点鲜明、论据充分、主题突出、数据可靠、图表清晰、逻辑严谨、文字简练、语句通顺。

2、论文的写作和格式要求详见本刊官网 (ycyk.brit.com.cn)。

3、请登录本刊官网进行投稿。投稿时, 需提供按照本刊官网最新论文模板撰写的Word版文档。科研单位投稿, 须附单位保密审查证明; 在校硕士生、博士生投稿, 只需附导师签署的意见书 (可参考官网模板)。投稿栏目选择: “低空经济背景下通导监技术”专题。

4、获国家、省、部科技进步奖、发明奖课题的论文, 自然科学基金、各级攻关项目课题论文, 需提供项目的编号。

5、专刊稿件一经录用, 将在知网进行网络首发。

6、本刊暂不收取版面费。稿件刊出后按稿件质量发放稿酬, 并赠送当期《遥测遥控》2册。

### 三 时间计划:

截至日期: 2025年10月31日

预计出版: 2026年1月

### 四 联系方式:

《遥测遥控》编辑部电话: 010-68382327; 电子信箱: bjb@ycyk.org.cn

《遥测遥控》编辑部