

连续波差分吸收激光雷达探测路径大气 CO₂ 平均浓度

洪光烈¹, 梁新栋^{1,2}, 刘 豪^{1*}, 章桦萍^{1,2}, 舒 嵘^{1,2}

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

摘 要 大气二氧化碳作为最重要的温室气体之一, 它的变化和分布备受关注, 差分吸收激光雷达(DIAL)系统是探测大气二氧化碳浓度的重要手段, 对于研究温室气体的源和汇具有重要意义。主要研究正弦调制连续波差分吸收激光雷达在水平路径上探测 CO₂ 平均浓度, 利用 HITRAN 数据库中 CO₂ 及 H₂O 的吸收光谱, 综合考虑 CO₂ 的吸收截面及 H₂O 的干扰, 选择差分吸收激光雷达的工作波长 On-line: 1 572. 335 nm, Off-line: 1 572. 180 nm; 声光调制器取代电光调制器对连续波激光强度进行正弦波调制, 两路调制信号频率有细微差别, 其中 On-line 调制频率为 101. 833 kHz, Off-line 调制频率为 99. 733 kHz; On-line 光源激光器通过光谱调制技术将激光频率锁定在气体池吸收峰 1 572. 335 nm 处, 并采用在相位调制器上施加直流偏置反馈电压来消除相位调制器的残余幅度调制(RAM), 使波长锁定精度大幅提高, 激光频率锁定系统实现 On-line 光源激光器在 12 小时输出波长均方根误差为 0. 05 pm; 在 CPU 中实现快速傅立叶变换获取回波光信号和发射监视端激光强度的功率谱, 并选择窗函数和频谱校正算法来提高计算精度; 通过调制连续波激光强度的正弦波相位鉴别获取路径的长度; 系统光路为光纤光路, 使其结构紧凑; 对系统进行外场实验和对比实验; 获取上海市区 1. 3 km 路径上二氧化碳平均浓度, 实验数据显示系统观测精度为 4 ppm(百万分之一), 且探测到的 CO₂ 日变化趋势与二氧化碳点探测器 LI-7500A 探测到的日变化趋势相吻合。

关键词 路径积分差分吸收激光雷达 IPDA; CO₂ 柱浓度(混合比); 声光强度调制; 激光频率锁定; 激光相位测距

中图分类号: O433. 5+1 **文献标识码:** A **DOI:** 10. 3964/j. issn. 1000-0593(2020)12-3653-06

引 言

差分吸收激光雷达(DIAL)探测大气二氧化碳浓度, 这一课题比较早受到科学家们的重视, 尤其在 NASA Langley Research Center 的 Koch G J, Barnes B W, Petros M 等科学家发明了 Ho : Tm : YLF 全固态激光器和 InGaAsSb 光电二极管之后, 在国际上形成了 2. 05 μm 差分吸收激光雷达探测对流层二氧化碳廓线的研究热点^[1]; 然而, 研究表明大气在 2. 05 μm 波段的后向散射截面较小, 具有距离分辨的廓线探测是十分困难的^[2], 在 1. 57 μm 波段, 也存在大气后向散射信号较弱、光子计数噪声大、信噪比低等问题^[3-4]。因此, 有些科学家转向以硬目标反射光作为回波的路径积分式差分吸收激光雷达(IPDA)探测对流层二氧化碳的柱浓度的研究^[5-8], 如 NASA Goddard Space Flight Center 的科学家

James B Abshire, Haris Riris 等, 为 ASCENDS (Active Sensing of CO₂ Emission over Nights, Days and Seasons) 计划进行了以高重频激光脉冲、机载路径积分差分吸收激光雷达探测垂直二氧化碳柱浓度的实验^[9-11]; 2015 年, 德国 A. Amediek 等在 CHARM-F (CO₂ and CH₄ Remote Monitoring Flugzeug) 计划支持下, 研制了基于种子注入光参量振荡器(OPO)的 1. 57 和 1. 645 μm 脉冲路径积分差分吸收激光雷达系统^[12], 并且实现了机载垂直方向大气二氧化碳和甲烷柱浓度的测量。Amediek 等提出利用 Nd : YAG 激光器泵浦的种子注入式 KTP-OPO 作为发射机, 其中探测波长的种子光利用 36 m 的(CO₂/20 hPa, CH₄/6 hPa)气体池进行稳频。通过高速光开关轮流把探测波长 on-line 和参考波长 off-line 的种子光切换至 OPO 谐振腔内, 经过 OPO 变换后的 1. 57 μm/1. 645 μm 激光脉冲(10 mJ/50 Hz)垂直发射到地面, 利用 PIN 探测器和 APD 探测器接收反射光信号来测量大气甲

收稿日期: 2019-09-18, 修订日期: 2020-02-15

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFB0504000)资助

作者简介: 洪光烈, 1966 年生, 中国科学院上海技术物理研究所研究员 e-mail: glhong@mail. sitp. ac. cn

* 通讯联系人 e-mail: 06272071@bitu. edu. cn

烷和二氧化碳柱浓度, 测量结果表明其测量精度在 1% 以下; 以 Shumpei Kameyama, Masaharu Imaki, Yoshihito Hirano, Shinichi Ueno, Shuji Kawakami, and Masakatsu Nakajima 等日本科学家为代表, 2008 年报道了他们的 1.6 μm 连续波调制地基差分吸收激光雷达系统。日本学者提出的正弦波强度调制的连续波差分吸收激光雷达系统原理框架: 两个 DFB 半导体激光器的工作波长分别通过二氧化碳吸收池和偏频锁相环 PLL 锁定在 1 572.992 和 1 573.137 nm, 且激光强度通过铌酸铯波导电光强度调制器(EOM)以 f_{m1} 和 f_{m2} 的频率正弦调制, 被调制的连续激光在同一根单模光纤合束, 再被掺铒光纤放大器放大。放大后的光功率大部分发射到大气中, 小部分功率被取样用于监测, 被发射的光穿过空气柱打在硬目标上, 由硬目标反射回来的光沿原路径返回到接收望远镜被探测器转换成电信号, 将回波信号和监视端信号做快速傅立叶变换(FFT), 就可以把频率 f_{m1} 功率谱和频率 f_{m2} 功率谱分离出来, 它们分别代表着往返空气柱中的 1 572.992 nm 探测光分量和 1 573.137 nm 参考光分量的强度。根据 on-line/offline 两波长的光束在发射机与硬目标之间来回的光吸收差异来获取自发射机到硬目标这段距离内的水平空气柱二氧化碳平均浓度, 外场测量评价激光雷达水平和垂直 CO₂ 混合比精度分别为 0.49% 和 1.7%。水平积分路径 2.1 km 和垂直积分路径到达云底表面 3 km, 对应信号累积时间 25 min。沿观测路径用多点在线传感器互补测量, 表明激光雷达水平 CO₂ 密度误差在 2.8 ppm 之内^[12-14]。

为探测火星大气的密度做前期的准备, 我们也进行了地基连续波调制路径积分差分吸收激光雷达探测地球边界层大气二氧化碳柱浓度的研究^[15-16]。鉴于光电调制器的偏置电压易发生变化、不稳定等因素造成强度调制度的变化, 产生系统误差, 因此, 我们采用声光调制器代替铌酸铯的波导电光调制器。采用调制光谱技术以及对残余幅度调制的抑制实现 On-line 光源激光波长的精确锁定。此外, 连续波差分吸收激光雷达同时采用相位测距方法获得路径长度, 使得系统更为紧凑。介绍路径积分差分吸收激光雷达的探测原理, 差分吸收激光雷达的组成及 On-line 光源激光频率锁定单元和实验

测量结果。

1 路径积分差分吸收激光雷达(IPDA)的探测原理

路径积分差分吸收激光雷达的光束照射硬目标表面的足印千变万化, 可以是草原、沙地、海面、墙壁等, 其反射系数不同, 回波光信号随不同反射系数变化不定; 以相同的路径, 同时发射探测光束(On-line)和参考光束(Off-line), 可以认为它们照射硬目标的足印相同。式(1)和式(2)分别为 On-line 和 Off-line 回波强度。

$$S_{\text{on}}(R) = \frac{P_{\text{on}} A_R}{R^2} \eta \eta_r \exp \left\{ -2 \int_0^R [\alpha(r) + n(r) \sigma_{\text{on}}] dr \right\} (r_{\text{sur}} / \Omega_{\text{sur}}) \quad (1)$$

$$S_{\text{off}}(R) = \frac{P_{\text{off}} A_R}{R^2} \eta \eta_r \exp \left\{ -2 \int_0^R [\alpha(r) + n(r) \sigma_{\text{off}}] dr \right\} (r_{\text{sur}} / \Omega_{\text{sur}}) \quad (2)$$

$$q_{\text{CO}_2} = \frac{1}{2 N_{\text{air}} R \Delta \sigma} \ln \left(\frac{S_{\text{off}, i} / E_{\text{off}, i}}{S_{\text{on}, i} / E_{\text{on}, i}} \right) \quad (3)$$

式中 S_{on} 为 On-line 波长硬目标回波强度; S_{off} 为 Off-line 波长硬目标回波强度; P 为发射功率。双波长吸收截面差 $\Delta \sigma$ 和空气分子密度 N_{air} 都与大气压强和温度参数有关, 大气压强和温度可通过 HITRAN 数据库和气体状态方程求得; 距离 R 可用相位测距方法获得; i 表示累加后求对数; q_{CO_2} 的单位是相对混合比 ppm。

在大气二氧化碳吸收谱当中, 1 568~1 590 nm 波段与 1 598~1 620 nm 波段二氧化碳吸收系数非常近似, 而且 1 568~1 575 和 1 598~1 605 nm 波段的二氧化碳吸收谱比较窄, 此时吸收峰的波长和吸收峰边上的吸收谷波长非常接近, 即 On-line 和 Off-line 的波长差很小, 有利于减小系统因波长差异带来的误差。InGaAs/InP PIN 光电探测器在 1.3~1.6 μm 波长范围内具有更高的探测效率, 因此选取 1 568~1 575 nm 波段作为探测波段; 该波段另一个主要优势是水汽影响明显较小, 从图 1 可以看出, 1 572.335 nm 是该波段二氧化碳吸收系数最大的吸收峰, 并且此时水汽的吸收系数较

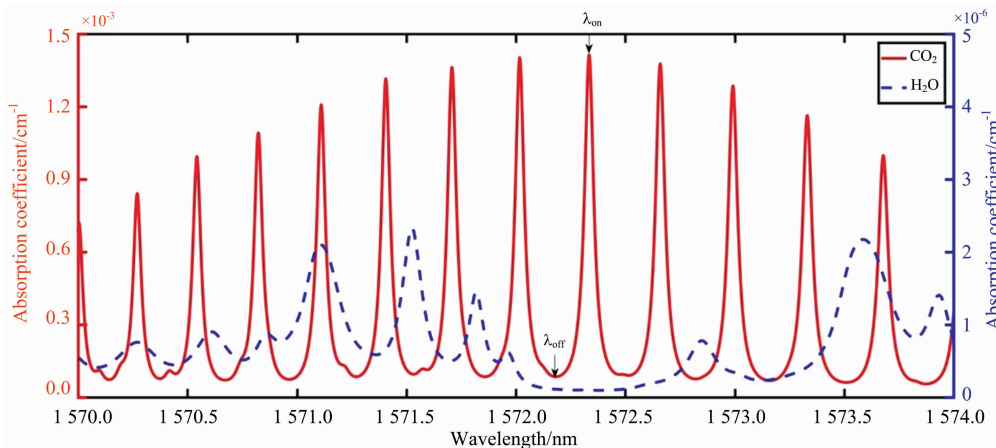


图 1 水汽和二氧化碳在 1 570~1 574 nm 的吸收系数对比图

Fig. 1 Comparison of absorption coefficients of H₂O and CO₂ at 1 570~1 574 nm

小，而旁边的吸收谷 1 572.180 nm 处的水汽吸收系数和 1 572.335 nm 处相当，这样差分吸收系统可以抵消水汽吸收对系统的影响，所以选取 On-line 波长为 1 572.335 nm 和 Off-line 波长为 1 572.180 nm；此外，二氧化碳谱线的选择还

需要考虑温度和压强的影响，1 572.335 nm 具有很小的温度系数^[17]。图 2 为更为精细的 1 572.335 nm 附近的水汽和二氧化碳吸收系数对比图。

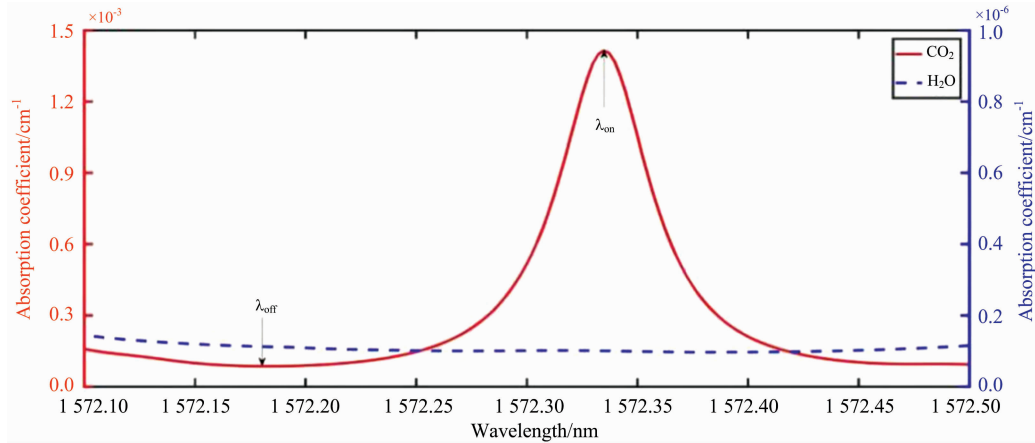


图 2 水汽和二氧化碳在 1 572.335 nm 附近的吸收系数对比图

Fig. 2 Comparison of absorption coefficients of H₂O and CO₂ at 1 572.335 nm

2 路径积分差分吸收激光雷达(IPDA)系统

如图 3 所示为系统组成框图，表 1 为系统主要参数。On-line 和 off-line 两路激光首先要经过正弦信号的调制，两路调制信号频率有细微差别。正弦调制方法的参数需要精心选择：既要考虑测距精度的需求，也要考虑系统带宽要求；同时调制频率间的差距应该尽量小，以消除调制频率差异带来其他的系统误差。综合以上因素考虑，选择 On-line 光源强度调制频率为 101.8 kHz，Off-line 光源强度调制频率为 99.7 kHz，调制波由直接数字频率合成器 DDS(direct digital synthesis)生成，调制后的 On-line 和 Off-line 激光通过光纤

耦合器耦合为一路光，耦合后的光经过掺铒光纤放大器(EDFA)放大。经过分光光路，其中 99% 的激光被发射出去打在硬目标上，另外 1% 的激光作为监视信号。硬目标反射的光由牛顿式反射望远镜接收并被光电探测器探测，双通道采集卡采集回波信号和监视端信号，将采集所得到的数据传递到计算机(PC)中进行 FFT 变换，通过调制信号的功率谱得到幅频信息和相频信息，通过相位测距原理和差分激光雷达方程(3)就可以反演出光路路径上的二氧化碳平均浓度。利用 C++ 软件开发上位机系统，能实时完成数据处理以及显示和存储，具有时间轴显示、数据采集饱和和预警的功能，对参数修改后，该软件也能适用于探测其他气体浓度的连续波差分吸收激光雷达系统。

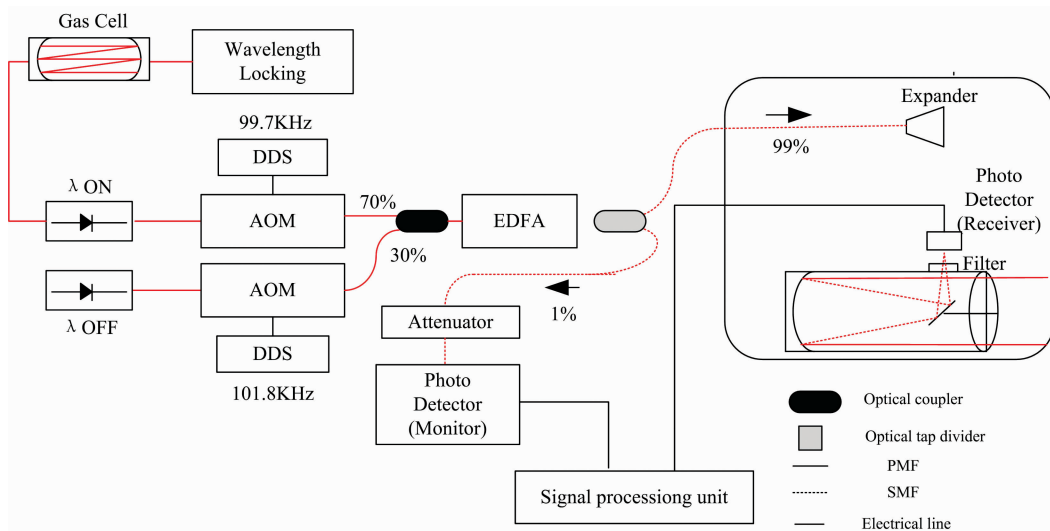


图 3 连续波差分吸收激光雷达系统框图

Fig. 3 Continuous-wave modulation hard-target differential absorption lidar system

模组, 波长控制精度达到 0.4 pm ; 电光强度调制器(EOM)的直流偏置电压不稳, 并且电光调制器对温度更加敏感, 因此用 1550 nm 波段的保偏 AOM 取代 EOM 进行强度调制。DDS 信号发生器为自行研制直接数字频率合成器, 能产生可调制的具有一定直流偏置的正弦信号来驱动 AOM; 保偏合束器为 $30:70$ 的单模保偏光纤耦合器; 掺铒光纤放大器的型号是 EDFA-BA-33-B-1573, 最大输出功率为 5 W ; 准直器

是 THORLABS 公司生产的 1550 nm 单模尾纤 GRIN 光纤准直镜, 发散角为 0.57 mrad ; 光电探测器是带宽模尾纤 GRIN 光纤准直镜, 发散角为 0.57 mrad ; 光电探测器是带宽 1 MHz 、具有 $500 \text{ mV} \cdot \text{W}^{-1}$ 探测率的 InGaAs 探测器; 采集卡是自行研制的采样率 15 MHz , 分辨率 16 bit 的双通道 AD 采集卡; 分束片式耦合器分束比为 $1:99$, 对偏振不敏感。

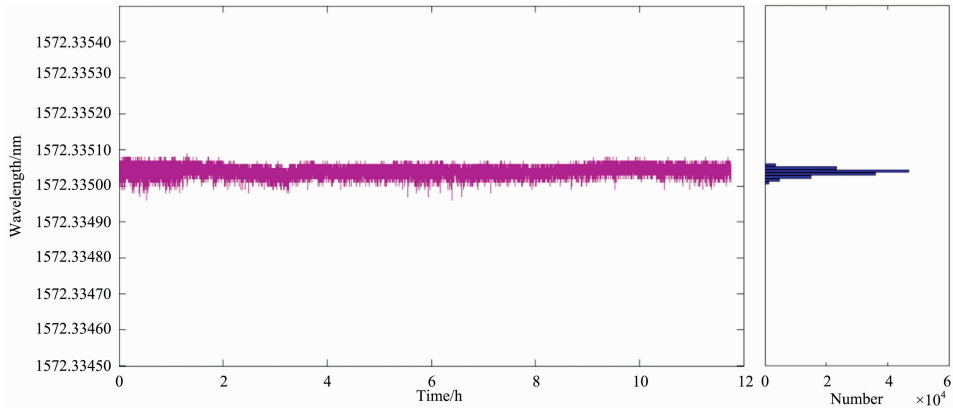


图 5 On-line 光源激光器频率稳定测量结果

Fig. 5 Measured On-line laser frequency stability

3 路径积分差分吸收激光雷达(IPDA)系统的实验测量

北京时间 2019 年 11 月 6 日 14 时到 2019 年 11 月 7 日 14 时, 利用路径积分差分吸收激光雷达系统在上海虹口区进行了 24 h 对外探测二氧化碳实验, 图 6 中红色箭头直线为探测路径, 反射目标为距离激光雷达 1369 m 处的高楼外墙表面, 取测量平均时间为 30 s 。与此同时, 我们在激光雷达探测路径上使用 LI-7500A 二氧化碳点探测器观测作为对比数据。图 7 为差分吸收激光雷达数据与点探测器 LI-7500A 的数据对比, 发现激光雷达观测的数据在一天内二氧化碳浓度的变化范围为 $420 \sim 480 \text{ ppm}$, 短时间内的测量波动在 4 ppm (rms) 左右, 一天中二氧化碳浓度最高值出现在凌晨一点前后, 最低值在午后两点左右, 符合二氧化碳日变化的规律。



图 6 2019 年 11 月 6 日—7 日激光雷达探测路径, 路径包括公园, 居民区以及一条交通干道

Fig. 6 The path of detection from Nov. 6 to Nov. 7, 2019, including Park, residential area and a main road

激光雷达与 LI-7500A 点探测器的观测数据在日变化趋势上趋于一致。

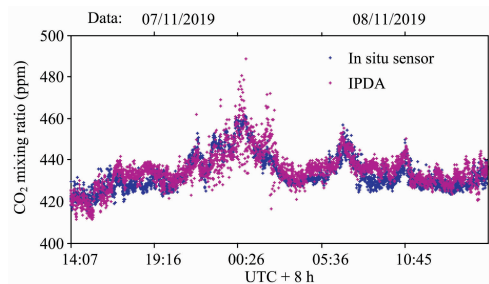


图 7 2019 年 11 月 6 日—7 日激光雷达与点探测器探测的二氧化碳水平柱浓度

Fig. 7 CO_2 column concentration by the DIAL system and that measured by the in situ sensor LI-7500 at Nov. 6, 2019 to Nov. 7, 2019

4 结论

研制了正弦调制连续波差分吸收激光雷达系统, 该系统采用了声光器件代替电光器件对连续波光发射强度进行调制, 并且复合了光强调制波的相位测距仪的功能。基于光谱调制技术实现 On-line 激光频率精确锁定在 CO_2 吸收峰上, 提高了系统测量精度。系统可以用于连续稳定的监测大气二氧化碳柱浓度, 同时可以测量硬目标的距离。实验获得了上海地区水平方向上连续的二氧化碳柱浓度日观测结果, 短时间测量精度达到 4 ppm , 日变化趋势与点探测器 LI-7500 的同期测量的数据相吻合。之后将展开连续多日的强化观测, 同时更为细致的研究系统的信噪比以及散斑等因素对测量精度的影响。

References

- [1] Koch G J, Barnes B W, Petros M, et al. *Applied Optics*, 2004, 43(26): 5092.
- [2] Gibert F, Edouard D, Cénac C, et al. *Optics Letters*, 2015, 40(13): 3093.
- [3] Amediek A, Fix A, Wirth M, et al. *Applied Physics B*, 2008, 92(2): 295.
- [4] Yasukuni Shibata, Chikao Nagasawa, Makoto Abo. *Applied Optics*, 2017, 56(4): 1193.
- [5] Wagner G A, Plusquellic D F. *Applied Optics*, 2016, 55(23): 6292.
- [6] Refaat T F, Singh U N, Yu J R, et al. *Applied Optics*, 2016, 55(15): 4232.
- [7] Yu J, Petros M, Singh U N, et al. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2017, 34(2): 385.
- [8] Refaat T F, Singh U N, Yu J R, et al. *Applied Optics*, 2015, 54(6): 1387.
- [9] Abshire J B, Riris H, Allan G R, et al. *Tellus B*, 2010, 62(5): 770.
- [10] Abshire J B, Riris H, Weaver C J, et al. *Applied Optics*, 2013, 52(19): 4446.
- [11] Michalak A, Miller C, Browell E, et al. ASCENDS-Active Sensing of CO₂ Emissions Over Nights, Days and Seasons Mission, Technical Report, University of Michigan in Ann Arbor, Michigan, 2008.
- [12] Amediek A, Ehret G, Fix A, et al. *Applied Optics*, 2017, 56(18): 5182.
- [13] Shumpei Kameyama, Masaharu Imaki, Yoshihito Hirano, et al. *Proc. SPIE*, 2009, 7153: 71530L.
- [14] Ramanathan A K, Mao J P, Abshire J B, et al. *Geophysical Research Letters*, 2015, 42(6): 2055.
- [15] Daisuke Sakaizawa, Shuji Kawakami, Masakatsu Nakajima, et al. *Journal of Applied Remote Sensing*, 2010, 4: 043548.
- [16] Lin Bing, Ismail Syed, Harrison F Wallace, et al. *Applied Optics*, 2013, 5(29): 7062.
- [17] Liu Hao, Chen Tao, Shu Rong, et al. *Optics Express*, 2014, 22(22): 27675.
- [18] Li Zhixin, Zhao Longhui, Tan Wei, et al. *Sensors and Actuators B*, 2014, 196: 23.

Detection of CO₂ Average Concentration in Atmospheric Path by CW Modulated Differential Absorption Lidar

HONG Guang-lie¹, LIANG Xin-dong^{1, 2}, LIU Hao^{1*}, ZHANG Hua-ping^{1, 2}, SHU Rong^{1, 2}

1. Key Laboratory of Space Active Optoelectronic Technology, Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract As one of the most important greenhouse gases, CO₂ has attracted much attention for its change and distribution. The differential absorption laser radar (DIAL) system is an effective means to detect the concentration of CO₂, which is of great significance for studying the source and sink of greenhouse gas. This paper mainly studies the detection of CO₂ average concentration by sinusoidal modulated continuous wave (cw) DIAL on the horizontal path. Using the absorption spectrum of CO₂ and H₂O in HITRAN database, considering the absorption cross section of CO₂ and the interference of H₂O, the detection wavelength of DIAL is selected as: On-line is 1 572. 335 nm and Off-line is 1 572. 180 nm; Acousto-optic modulator replaces electro-optic modulator to transmit cw laser and the frequency of the two modulation signals is slightly different. The On-line modulation frequency is 101. 833 kHz, and the Off-line modulation frequency is 99. 733 kHz. On-line is locked at the frequency of absorption peak of the gas pool at 1 572. 335 nm by spectral modulation technology, and the residual amplitude modulation (RAM) of the phase modulator is eliminated by applying DC bias feedback voltage on the phase modulator in the research process. The system achieves a continuous output wavelength RMS error of 0. 05 pm at 12 hours. Fast Fourier transform (FFT) is used to acquire the power spectrum of the echo signal and the laser intensity at the monitor in the CPU. The ranging of the target is possible by utilizing the phase difference between the monitored and the received signals; The optical circuit is fiber based, and this makes the system compact and reliable. The field experiment and comparative experiment were carried out to obtain the average concentration of CO₂ on the 1. 3 km path in Shanghai. The experimental data showed that the system observation accuracy was 4 ppm(ppm is parts per million), and the detected daily variation trend coincides with the *in situ* CO₂ sensors (LI7500A).

Keywords Integral path differential absorption lidar IPDA; CO₂ column-averaged mixing ratios; Acoustic-optic intensity modulation; Laser frequency locking; Phased laser rangefinders

* Corresponding author

(Received Sep. 18, 2019; accepted Feb. 15, 2020)