

连续波差分吸收激光雷达测量大气 CO₂*刘豪¹⁾ 舒嵘¹⁾ 洪光烈¹⁾ 郑龙¹⁾ 葛焱¹⁾ 胡以华^{1)2)†}

1) (中国科学院上海技术物理研究所, 中国科学院空间主动光电技术重点实验室, 上海 200083)

2) (解放军电子工程学院脉冲功率激光技术国家重点实验室, 合肥 230037)

(2013年11月21日收到; 2014年1月10日收到修改稿)

研制了一套接收硬目标回波的差分吸收激光雷达系统以用于全天候监测大气 CO₂ 浓度变化. 系统采用 10 和 12 kHz 正弦波分别对处在 CO₂ 吸收峰内和吸收峰外的波长进行强度调制, 利用单频检测技术提取回波信号. 提出了一种利用激光扫频推算系统精度的方法, 从而弥补了长期以来只能在理论上计算差分吸收激光雷达系统精度的不足, 给实际系统自定标问题提供了一种解决方案. 该系统采用全光纤结构, 结构可靠, 便于移动. 利用此系统获得了上海市多天 CO₂ 浓度变化曲线, 在 450 m 的积分路径长度上, 1 s 的积分时间取得了优于 3.39×10^{-6} 的测量精度.

关键词: 连续波调制, 差分吸收激光雷达, CO₂, 精度自标定

PACS: 42.62.Fi, 42.68.Ca, 42.68.Wt

DOI: 10.7498/aps.63.104214

1 引言

自进入工业化社会以来, 由于人类活动导致全球气候变暖, 这已经得到了人们的广泛关注, CO₂ 作为一种重要的温室气体, 其源汇变化对于研究气候变暖有重要意义. 差分吸收激光雷达已成为监测大气 CO₂ 变化的一种有效手段. 欧洲航天局在 2008 年发布了星载差分吸收激光雷达监测全球 CO₂ 计划^[1]. 德国 Amediek 等^[2] 在 2008 年研制了基于光学参量振荡 (OPO) 的脉冲差分吸收激光雷达, 但并未得到完整一天的数据, 也没有给出详细的系统精度计算方法. 日本 Daisuke 等^[3] 在 2009 年研制了基于 OPO 的脉冲激光雷达, 得到了 CO₂ 垂直分布廓线, 积分时间为 5 h 时, 获得了 2% 的统计精度 (大气总浓度的 2%). 日本 Shumpei 等^[4] 在 2009 年研制了正弦波强度调制差分吸收激光雷达, 得到了完整一天的数据, 系统精度为 4×10^{-6} (均方根值 (rms)), 但其精度仅仅是与仪器精度比较得出, 并未给出精度的数学计算方法. 2012 年, 文

献^[5] 对系统进行了改进, 但精度维持不变. 美国航天局 Gibert 等^[6] 在 2006 年公布了一种 2 μm 差分吸收激光雷达, 通过 5 min 的积分时间得到了优于 5×10^{-6} 的测量精度. 2012 年, 美国航天局 Sun 和 Abshire^[7] 比较了连续波和脉冲两种调制体制的差分吸收雷达的优缺点. Lin 等^[8] 对连续波差分吸收雷达系统进行了性能仿真. 2013 年, Abshire 等^[9] 研制了基于掺铒光纤放大器 (EDFA) 脉冲调制的机载差分吸收激光雷达, 获得了 CO₂ 的垂直分布廓线, 得到了优于 1×10^{-6} 的精度. 目前国内关于探测 CO₂ 的激光雷达系统的研究报道较少, 中国科学院安徽光学精密机械研究所张寅超小组、胡顺星小组已经开展了拉曼激光雷达测量大气 CO₂ 的工作, 并取得了很好的结果^[10,11], 但此系统不便于移动, 白天难以观察且精度有限, 从而限制了其发展. 因此, 国内有必要研制能够长期观测 CO₂ 的差分吸收雷达系统, 以观察大气 CO₂ 变化情况.

本文研究了一种基于正弦波强度调制、单频检测技术的连续波差分吸收激光雷达, 论述了系统构成、设计思路, 并分析了系统的有效精度. 利用此系

* 民用航天“十二五”预先研究计划 (批准号: MYHT-201104) 资助的课题.

† 通讯作者. E-mail: yh_hu@263.net

统得到了上海市多天的大气 CO₂ 变化曲线. 该系统为全光纤结构, 工作稳定, 能够实现长期连续观测, 所测数据对研究人类活动对大气 CO₂ 浓度的影响有着重要意义.

2 工作原理

向大气发射两束不同波长的激光, 其中一束激光的波长位于 CO₂ 的吸收峰处, 记为峰尖波长 λ_{on}, 另一束激光的波长处在吸收峰两端的外侧, 记为峰外波长 λ_{off}. 激光和大气进行相互作用, 通过硬目标反射回接收系统, 探测得到的回波方程为

$$P_{on}(R) = P_0(\lambda_{on})\beta\eta(A/R^2) \times \exp \left[-2 \int_0^R [N_w(z)\sigma_w(\lambda_{on}) + \alpha(\lambda_{on}, z)] dz \right], \quad (1)$$

$$P_{off}(R) = P_0(\lambda_{off})\beta\eta(A/R^2) \times \exp \left[-2 \int_0^R [N_w(z)\sigma_w(\lambda_{off}) + \alpha(\lambda_{off}, z)] dz \right], \quad (2)$$

其中, $P(R)$ 为回波功率; $P_0(\lambda)$ 为发射激光束的功率; β 为硬目标的反射率; η 为系统的接收效率 (包括探测器的转换效率); A 为接收望远镜的有效面积; R 为探测距离; $N_w(z)\sigma_w(\lambda, z) + \alpha(\lambda, z)$ 为探测光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, 其中, $N_w(z)$ 为大气 CO₂ 浓度, $\sigma_w(\lambda)$ 为 CO₂ 的吸收截面, $\alpha(\lambda, z)$ 为除 CO₂ 吸收之外的消光系数. 如果 λ_{on} 与 λ_{off} 相近, 则近似认为

$$\alpha(\lambda_{on}, z) = \alpha(\lambda_{off}, z). \quad (3)$$

将 (1) 和 (2) 式相除 (即排除大气变化的主要因素) 并两边取对数, 可得到下式:

$$N_w(R) = \frac{1}{2[\sigma_w(\lambda_{on}) - \sigma_w(\lambda_{off})]\Delta R} \times \ln \frac{P_{off}(R)P_0(\lambda_{on})}{P_{on}(R)P_0(\lambda_{off})}. \quad (4)$$

令

$$P_{off,n} = \frac{P_{off}(R)}{P_0(\lambda_{off})},$$

$$P_{on,n} = \frac{P_{on}(R)}{P_0(\lambda_{on})},$$

则 CO₂ 浓度正比于峰外波长激光和峰尖波长激光的归一化回波功率. 这里 $P_{off,n}$ 为峰外波长激光的

归一化回波功率, $P_{on,n}$ 为峰尖波长激光的归一化回波功率, $\frac{1}{2[\sigma_w(\lambda_{on}) - \sigma_w(\lambda_{off})]}$ 为常数. 根据上述原理, 只需要准确测量两个波长的归一化回波信号强度, 就能反演出大气 CO₂ 浓度.

3 系统设计

连续波差分吸收激光雷达系统结构如图 1 所示. 峰尖波长激光器和峰外波长激光器由各自的波长控制单元进行波长调控, 电光调制器对两束激光进行不同频率的强度调制. 输出光的一部分经过探测器做光电转换, 该信号用作调制器的偏压控制信号, 其余光耦合进入光放大器, 其出射光由反射镜反射一部分进行能量监视. 与文献 [4] 中的光纤分光不同, 这种方法能够避免 EDFA 出射光偏振不稳定带来的能量监视误差. 放大器出射光的其他部分进入大气. 望远镜接收硬目标回波, 聚焦到光纤后经过滤光片再由探测器接收. 模数转换 (AD) 采集卡采集发射能量监视信号和回波信号, 反演 CO₂ 浓度.

3.1 峰尖波长和峰外波长的激光光源

在推算 CO₂ 浓度时, 近似认为除 CO₂ 吸收之外的消光系数近似相同, 但实际上并不是这样, 这种差异会给系统带来误差, 其中主要考虑的是水汽、压力、温度对消光系数的影响. 国外学者对此问题进行了相关的讨论 [3,12], 但并没有形成统一的结论. 由于这部分影响有限, 而且可以通过合适的大气模型进行修正, 根据日本学者的分析 [3] 并结合本文的实际情况, 选择 1572.018 nm 作为峰尖激光波长, 在峰尖波长附近吸收最小的光波波长 1572.500 nm 作为峰外波长.

当峰尖波长激光的频率稳定性优于 0.1 pm(rms), 峰外波长激光的频率稳定性优于 0.4 pm(rms) 时, 即使测量精度达到 1×10^{-6} , 波长不稳定带来的影响也可以忽略 [3]. 因此采用偏频锁频法并结合相关检测技术对峰尖波长进行主动锁定, 频率锁定系统如图 2 所示. 峰外波长激光器则由自主研发的恒温横流控制器驱动. 在室温环境下, 峰尖波长激光器和峰外波长激光器的频率稳定性测试结果如图 3 所示, 峰尖波长激光器 4 h 的激光频率稳定性为 0.05 pm(rms), 峰外波长激光器 24 h 的激光频率稳定性为 0.25 pm(rms), 均满足测量要求.

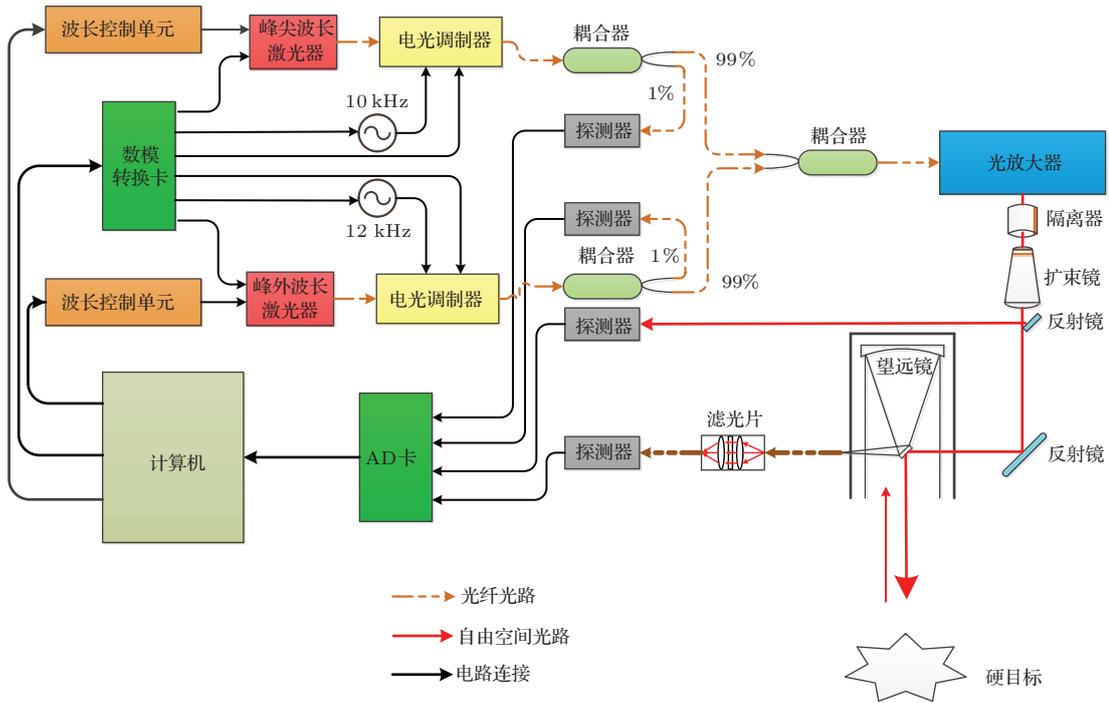


图1 (网刊彩色) 连续波差分吸收激光雷达系统结构示意图

3.2 频率调制和单频检测

系统中的噪声(如背景光噪声、电路固有噪声等)主要为低频噪声或者宽谱均匀分布的白噪声。由于回波探测器增益高,所以在时域上这些噪声幅度很大。采用单频检测技术可以避免分布在调制频率以外的噪声,相当于极窄带滤波器,可以有效地抑制带外噪声,提高信噪比。调制频率分别选择在10和12 kHz,这主要是考虑在10 kHz以下放大器的噪声谱密度较大,而10 kHz以上其稳定在一个极小值,另外还考虑到调制频率过高势必会增加放大器的设计难度。

3.3 电光调制器偏压控制

由于系统需要长时间工作,而电光调制器内部的晶体特性会随着时间的变化有所改变,从而使得调制产生正弦波的偏置电压发生改变,严重时波形会产生失真(如出现平顶或平底)。这会导致在频谱检测时出现误差,因此进行偏压控制十分必要。如果将输出正弦波最低点设置为零点,稍微控制不当就会使得波形失真,因此应把正弦波最低点控制在一个比较合适的值。图4所示为经过偏压控制后24 h内正弦波最低点电压值的变化曲线。从图4可以看出,最低电压抖动为1.233 mV(rms),正弦波峰值约为2 V,因此,可认为正弦波的偏置电压几乎不变,不会影响系统测量。

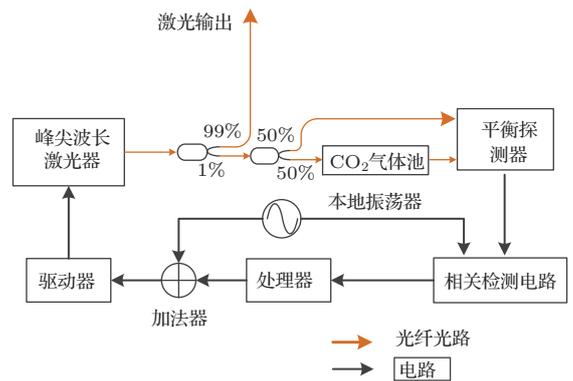


图2 峰尖波长激光器稳频系统框图

4 实验测试

4.1 系统精度测试

精确标定差分吸收激光雷达系统的精度是一个难题。国外文献少有关于此方面的报道,大部分文献都没有给出实际系统的精度计算方法,只是简单比较了激光雷达测量数据和点探测器测量数据,进而对系统精度进行大致推算。但是,由于激光雷达测量得到的大气CO₂浓度是路径积分浓度,和点探测器测得的数据有差异,因此这种方法无法精确地标定系统精度。

本文提出了一种能简单快速进行系统精度自标定的方法。首先,使峰尖波长激光器和峰外波长激光器工作在正常测量状态,这时测量值反映的是

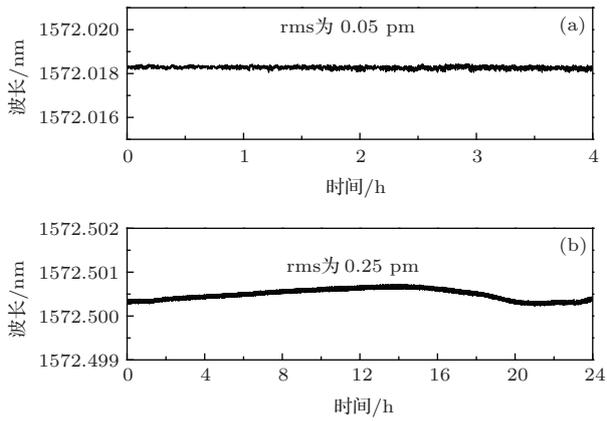


图3 峰尖波长激光器和峰外波长激光器的频率稳定性测试结果 (a) 峰尖波长激光器; (b) 峰外波长激光器

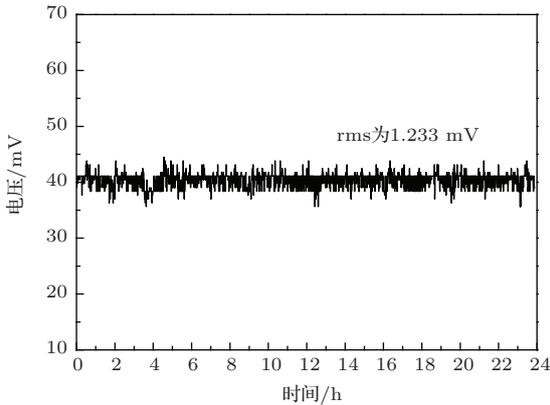


图4 偏压控制稳定性结果

大气 CO₂ 总浓度 N_w . 由于峰尖波长是被锁定的, 我们把峰外波长激光器的波长调整到峰尖波长, 即把峰尖波长激光器与峰外波长激光器的波长调成一致, 待测量稳定后发现 N_w 的测量值发生改变, 改变量为 δ , 这时外界环境对两束激光的影响完全一致, 峰尖波长激光回波与峰外波长激光回波比值的对数为零. 由于实际系统存在各种各样的噪声 (如电子学噪声、大气抖动噪声等), 测量值会在零值附近抖动, 这个抖动就是系统固有噪声, 该噪声决定了系统的精度, 设测量值抖动的 rms 为 $\Delta\delta$. 假设外界环境实际的 CO₂ 含量为 N (可以由点探测器测量得到), 则系统对于大气中 CO₂ 总含量的测量精度为 $\frac{\Delta\delta}{\delta}N$. 系统扫频结果如图 5 所示. 图 5 中 a 段为 $\ln \frac{P_{\text{off},n}(\lambda = 1572.500 \text{ nm})}{P_{\text{on},n}(\lambda = 1572.018 \text{ nm})}$, 此时计算得到的平均值为 0.156, 此过程中的抖动为系统噪声加上大气 CO₂ 浓度抖动共同造成. 图 5 中的 b 段为下降段, 把峰外波长激光器的波长从 $\lambda = 1572.500 \text{ nm}$ 调整到 $\lambda = 1572.018 \text{ nm}$, 下降段的第一个波谷值为 $\lambda = 1572.335 \text{ nm}$ 的吸收峰, 即 $\ln \frac{P(\lambda = 1572.335 \text{ nm})}{P(\lambda = 1572.018 \text{ nm})}$. 由于波长调

整过程会有过调和回调问题, 即波长调整到 $\lambda = 1572.018 \text{ nm}$ 时波长会继续变小, 之后慢慢稳定, 因此出现了第二个波谷, 最后比值稳定在 $\ln \frac{P_{\text{off},n}(\lambda = 1572.018 \text{ nm})}{P_{\text{on},n}(\lambda = 1572.018 \text{ nm})}$, 即图 5 所示的 c 段, 此时平均值为 -0.0177 , 抖动的 rms 为 0.00118. 理论上, c 段的平均值应该为零, 但是由于系统存在固有的微小偏置, 因此平均值为一负值, 该误差可以后期校正. 通过 CO₂ 点探测器得到的大气 CO₂ 浓度大约为 5×10^{-4} (点探测器误差较大, 无法作为精确参考数据), 本文系统的 $\Delta\delta$ 值为 0.00118, δ 为 0.174, 则系统对于大气 CO₂ 测量的精度为 3.39×10^{-6} (大气总浓度的 0.678%), 即使大气 CO₂ 浓度测量结果误差为 1×10^{-4} , 对精度的估算误差仅为 0.678×10^{-6} , 能够满足精确定标要求. 由于扫频过程中数据没有通过时间累积取平均, 测量精度的积分时间为系统完成一次测量的时间 (1 s), 如果每分钟取一次平均, 系统精度将会进一步提高.

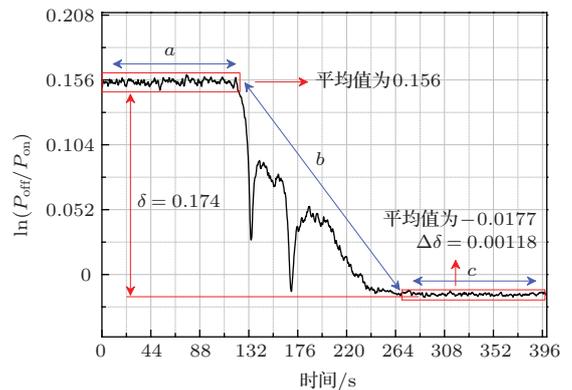
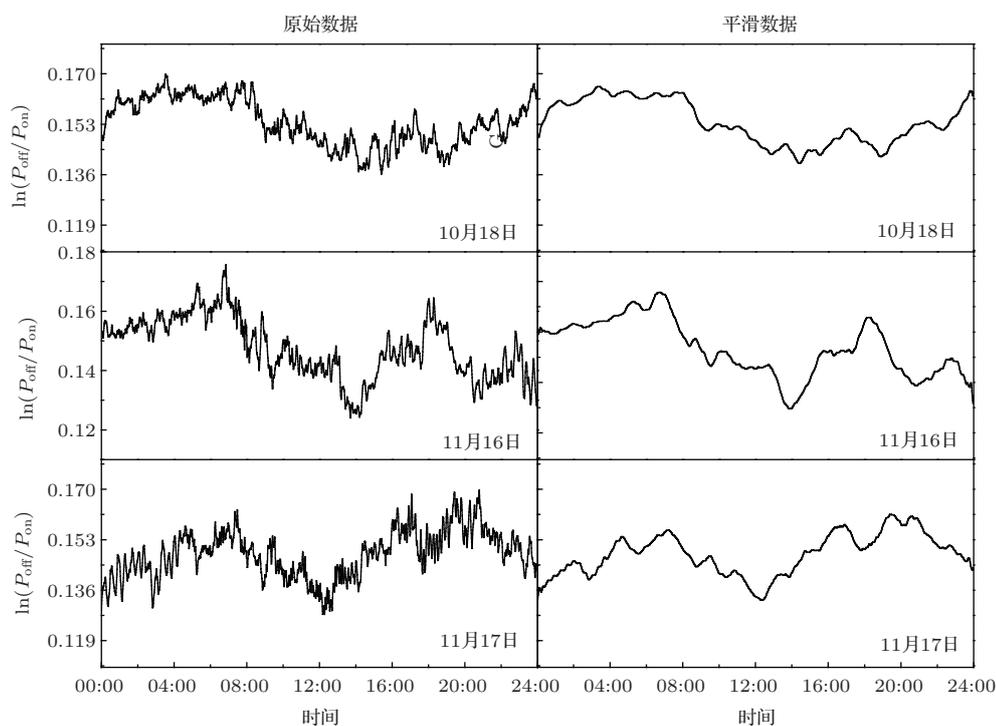


图5 系统扫频测试结果

4.2 实验结果

图 6 给出了上海市虹口区 2013 年 10 月 18 日、11 月 16 日和 11 月 17 日三天的大气 CO₂ 浓度变化测量结果. 从图 6 可以看出: 三天的日出时刻 CO₂ 浓度均呈现下降趋势, 因为此时人类活动还不频繁, 对大气 CO₂ 浓度影响较小, 主要是植物的光合作用影响; 午后大气 CO₂ 浓度都呈现一个上升趋势, 应该是人类活动对大气 CO₂ 浓度产生了较大影响; 晚上大气 CO₂ 浓度变化差异较大, 产生这种现象的一个可能原因是晚上大气 CO₂ 浓度变化主要影响因素是本地与周围区域的空气流动, 这将导致一定的不确定性, 具体原因还需进一步研究. 另外全天的大气 CO₂ 浓度波动约为大气总 CO₂ 浓度的 1/3 左右, 这与文献 [4] 的结果接近.

图6 2013年上海市虹口区三天大气CO₂浓度变化观测结果

5 结 论

本文研制了基于连续波正弦强度调制的差分吸收激光雷达系统. 结合单频检测技术, 通过450 m积分路径和1 s积分时间获得了优于 3.39×10^{-6} 的CO₂探测精度. 该探测系统运行稳定可靠, 可满足长期监测大气CO₂浓度的需要. 利用此系统对上海市虹口区的大气CO₂浓度进行了多天观测, 获得了完整多天24 h的CO₂浓度日变化曲线, 该数据对于研究CO₂的时空分布以及人类活动对CO₂浓度变化的影响有着重要意义. 但由于暂时没有高精度的点探测器数据比较, 本文系统的探测精度还需进行后续比较测试. 由于核心部件已经实现自主研制, 后期将在此基础上探索新体制和新方法, 以进一步提高测量精度和系统的可靠性.

参考文献

[1] Clissold P 2008 *Candidate Earth Explorer Core Missions Reports for Assessment: Advanced Space Carbon*

and Climate Observation of Plant Earth (Noordwijk: ESA Communication Production Office)

[2] Amediek A, Fix A, Wirth M, Ehret G 2008 *Appl. Phys. B* **92** 295

[3] Daisuke S, Chikao N, Tomohiro N, Makoto A, Yasukuni S, Masahisa N, Tetsu S 2009 *Appl. Opt.* **48** 748

[4] Shumpei K, Masaharu I, Yoshihito H, Shinichi U, Shuji K, Daisuke S, Masakatsu N 2009 *Opt. Lett.* **34** 1513

[5] Masaharu I, Shumpei K, Yoshihito H, Shinichi U, Daisuke S, Shuji K, Masakatsu N 2012 *Opt. Lett.* **37** 2688

[6] Gibert F, Flamant P H, Bruneau D, Loth C 2006 *Appl. Opt.* **45** 4448

[7] Sun X L, Abshire J B 2012 *Opt. Express* **20** 21291

[8] Lin B, Ismail S, Wallace H F, Browell E V, Nehrir A R, Dobler J, Moore B, Refaat T, Kooi S A 2013 *Appl. Opt.* **52** 7062

[9] Abshire J B, Riris H, Weaver C J, Mao J P, Allan G R, Hasselbrack W E, Browell E V 2013 *Appl. Opt.* **52** 4446

[10] Hong G L, Zhang Y C, Zhao Y F, Shao S S, Tan K, Hu H L 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 983 (in Chinese) [洪光烈, 张寅超, 赵曰峰, 邵石生, 谭锟, 胡欢陵 2006 物理学报 **55** 983]

[11] Yu H L, Hu S X, Yuan K E, Wu X Q, Cao K F, Meng X Q, Huang J, Shao S S, Xu Z H 2012 *Acta Photon. Sin.* **41** 812 (in Chinese) [于海利, 胡顺星, 苑克娥, 吴晓庆, 曹开法, 孟祥谦, 黄见, 邵石生, 徐之海 2012 光子学报 **41** 812]

[12] Jérôme C, Yannig D 2009 *Appl. Opt.* **48** 5413

Continuous-wave modulation differential absorption lidar system for CO₂ measurement*

Liu Hao¹⁾ Shu Rong¹⁾ Hong Guang-Lie¹⁾ Zheng Long¹⁾ Ge Ye¹⁾ Hu Yi-Hua^{1)2)†}

1) (*Key Laboratory of Space Active Opto-Electronics Technology, Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China*)

2) (*State Key Laboratory of Pulsed Power Laser Technology, Electronic Engineering Institute, Hefei 230037, China*)

(Received 21 November 2013; revised manuscript received 10 January 2014)

Abstract

An intensity modulation hard-target differential laser absorption lidar system for CO₂ sensing is demonstrated. On and off wavelength lasers are modulated with 10 kHz and 12 kHz sinusoidal waves. The echo is extracted using coherent detection technique. The system is fiber based, which makes it compact and removable. We obtain three day variation of horizontal column averaged CO₂ concentration of Shanghai district. We also propose an accuracy evaluation method based on electronic noise analysis combined with laser frequency modulation. The result shows that the measurement precision for the column corresponds to 3.39×10^{-6} (rms) with 1s integral time and 450 m path.

Keywords: continuous-wave modulation, differential absorption lidar, CO₂, precision evaluation

PACS: 42.62.Fi, 42.68.Ca, 42.68.Wt

DOI: [10.7498/aps.63.104214](https://doi.org/10.7498/aps.63.104214)

* Project supported by the Civil Aerospace Pre-Research Program of “12th Five-Year” Plan of China (Grant No. MYHT-201104).

† Corresponding author. E-mail: yh_hu@263.net