

地基 CO₂ 廓线探测差分吸收激光雷达

韩舸 龚威 马昕 相成志 梁艾琳 郑玉新

A ground-based differential absorption lidar for atmospheric vertical CO₂ profiling

Han Ge Gong Wei Ma Xin Xiang Cheng-Zhi Liang Ai-Lin Zheng Yu-Xin

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 64, 244206 (2015) DOI: 10.7498/aps.64.244206

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.244206>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2015/V64/I24>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于差分吸收光谱技术的大气痕量气体二维观测方法

Two-dimensional observation of atmospheric trace gases based on the differential optical absorption spectroscopy technique

物理学报.2015, 64(16): 164209 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.164209>

基于匹配算法的脉冲差分吸收 CO₂ 激光雷达的稳频研究

Research on the frequency stabilization of pulsed differential absorbing lidar for CO₂ detection based on matching algorithm

物理学报.2015, 64(15): 154215 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.154215>

车载多轴差分吸收光谱探测对流层 NO₂ 分布研究

Detection and distribution of tropospheric NO₂ vertical column density based on mobile multi-axis differential optical absorption spectroscopy

物理学报.2015, 64(11): 114211 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.114211>

机载成像差分吸收光谱技术测量区域 NO₂ 二维分布研究

Observation of two-dimensional distributions of NO₂ with airborne Imaging DOAS technology

物理学报.2015, 64(3): 034217 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.034217>

温室气体及碳同位素比值红外光谱反演精度的影响因素研究

Influence factors of quantitative analysis precision of greenhouse gases and carbon isotope ratio based on infrared spectroscopy

物理学报.2015, 64(2): 024217 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.024217>

地基CO₂廓线探测差分吸收激光雷达*韩舸¹⁾ 龚威^{2)3)†} 马昕²⁾ 相成志²⁾ 梁艾琳²⁾ 郑玉新²⁾

1)(武汉大学国际软件学院, 武汉 430079)

2)(武汉大学, 测绘遥感信息工程国家重点实验室, 武汉 430079)

3)(地球空间信息技术协同创新中心, 武汉 430079)

(2015年7月24日收到; 2015年8月13日收到修改稿)

研制了一台利用气溶胶散射信号的CO₂廓线探测差分吸收激光雷达. 系统利用染料激光器实现波长调制, 采用双光路气体吸收池, 结合 Voigt 拟合方法实现了脉冲红外激光的高精度定标. 针对输出激光带宽较宽的问题, 采取仿真实验评估了影响, 并设计了基于吸收池的订正因子获取方案. 进而, 开展了水平、垂直和连续观测实验, 通过与地面CO₂分析仪测量值的对比, 证明了系统具备优越的精密性和精确性. 实验表明, 该样机能够俘获CO₂浓度随高程和时间变化而产生的变化.

关键词: 差分吸收激光雷达, CO₂, 大气探测, 脉冲激光**PACS:** 42.68.Ca, 42.68.Wt, 42.55.Mv, 42.68.-w**DOI:** 10.7498/aps.64.244206

1 引言

近年来, 气候变化和全球冷暖不仅是学界关注的科学问题, 也是影响普通民众生活的重大议题. 大气中CO₂浓度的升高被认为是改变地球能量收支、进而影响全球气候的关键因素^[1]. 目前的研究表明, 人类活动所释放的CO₂有约一半被未知的碳汇系统所吸收^[2,3]. 为减小估算碳源碳汇时空分布的不确定性, 科学家需要更密集的CO₂柱浓度观测和垂直廓线观测^[4,5]. 差分吸收激光雷达(differential absorption lidar, DIAL)是被认为最具潜力的下一代嗅碳技术^[6,7], 已被美国航空航天局的ASCENDS(active sensing of CO₂ emissions over nights, days, and seasons)计划和欧洲空间局的A-SCOPE(advanced space carbon and climate observation of planet earth)计划采纳成为下一代嗅碳卫星的核心技术. 因此, 研制CO₂廓线探测DIAL具有重大的科学意义.

考虑到CO₂吸收谱线的特点以及激光器和探测器工艺的限制, 2.0 μm和1.57 μm是CO₂探测DIAL(下简称CO₂-DIAL)的两个备选工作波段. 2006年, 法国皮埃尔西蒙-拉普拉斯研究所^[8]和NASA的朗格里研究中心^[9]分别公布了其2.0 μm方案的CO₂-DIAL. 这两套系统的原理比较相似, 利用一台闪光灯抽运的紫翠玉激光器去抽运一个Ho, Ym:YLF棒从而产生重复频率为10 Hz, 能量为10 mJ/pulse的出射激光, 同时利用两台连续波激光器注种从而实现出射激光的波长稳定, 回波信号经望远镜收集后用铟镓砷探测器(InGaAs-PIN)进行检测. 在大气边界层内, 利用3—7 min的积分时间可以获得2.4%—4%的观测精度. 2008年之后研制成功的CO₂-DIAL全部是工作在1.57 μm波段, 德国宇航中心(DLR)^[10]、日本宇宙航空研究开发机构(JAXA)^[11]和日本三菱电机^[12]于2009年分别公布各自的样机系统. 前两者的激光发射装置比较类似, 都是采用Nd:YAG激光器作为主

* 国家自然科学基金(批准号: 41127901, 41201362)资助的课题.

† 通信作者. E-mail: weigongwhu@gmail.com

激光器, 通过光参振荡器(OPO)将出射激光波长调至需要位置, 在此过程中利用连续波分布反馈激光器(CW-DFB)进行注种从而精确地控制波长. 两者的区别在于探测器, JAXA的样机使用了红外光电倍增管(PMT)来探测信号, 而DLR的样机使用的则是InGaAs-PIN. 在性能方面, DLR样机在1 min的积分时间内获得2.5%—8%的探测精度, 而JAXA的样机在5 h的积分时间内取得1%—2%的探测精度. 需要补充指出的, 出于不同的探测目的(柱浓度探测和廓线浓度探测) CO₂-DIAL可以分为硬目标DIAL(IPDA)和气溶胶DIAL, 前者的最终目标是成为星载激光雷达系统, 获取全球覆盖的CO₂柱浓度观测, 而后的目标是取得一个观测点上带有垂直分辨率的CO₂浓度测量值. 所以在进行观测时, IPDA的积分时间应该控制在秒级而气溶胶DIAL的积分时间可以达到小时级, 因此不能简单地对比这两个样机的性能. 日本三菱电机的样机使用了截然不同的激光发射装置, 该样机使用CW激光器作为光源, 通过对其进行调频从而在频率域上区分出双波长以此实现两个波长激光的同时发射和接收, 最后利用光纤放大器增强能量后发射, 该样机在32 s的积分时间内获得了接近1%的精度. NASA戈达德太空飞行中心于2010年公布的CO₂-DIAL样机也使用了类似三菱电机样机的激光发射装置, 但是, 该样机能同时发射20个不同波长的脉冲序列从而实现多波长的光谱扫描, 提高了系统的性能, 也是第一台进行了机载试验的CO₂-DIAL^[13]. 我国在CO₂-DIAL研制方面起步较晚, 2014年中国科学院上海技术物理研究所公布了其CO₂-IPDA^[14], 该样机构架与三菱电机的样机比较接近, 主激光器是连续波激光器, 使用调频技术实现双波长的同发同收, 并在上海进行了实测试验.

本课题组利用Nd: YAG激光器作为主激光器, 采用染料激光器实现波长可变调节, 并使用红外PMT作为信号探测器构建了一台地基CO₂廓线探测激光雷达系统(CO₂-VDIAL), 该系统依靠脉冲激光, 以气溶胶作为探测媒介, 实现距离分辨的CO₂浓度探测. 该系统将最终作为多波段多大气成分主被动综合探测系统(APSOS)^[15]的一部分被安置于西藏地区进行长期观测. 本文旨在介绍CO₂-VDIAL的系统构成和研制进展, 重点分析样

机研制中遇到的主要技术难点并提出相应的应对方法, 最后通过横向、纵向和连续试观测检验性样机的性能.

2 基本原理

激光雷达方程(见(1)式)是DIAL的物理基础. (1)式中, r 是探测距离, $P_i(r)$ 是 r 处的回波信号能量, ξ_i 是系统对于波长为 i 信号的总效率, $P_{0,i}$ 为激光出射能量, A 是望远镜有效接收面积, $\beta_i(r)$ 为大气散射系数, $\alpha_i(r)$ 是大气消光系数, c 是光速, τ_p 是脉冲宽度, N_g 是痕量气体 g 的分子数密度, $\sigma_{g,i}(r)$ 是探测距离为 r 处的痕量气体 g 之吸收截面积.

$$P_i(r) = \frac{\xi_i \cdot P_{0,i} \cdot A \cdot \beta_i(R) \cdot c \cdot \tau_p}{2 \cdot r^2} \cdot \exp \left\{ -2 \times \int_0^r [\alpha_i(r) + N_g \cdot \sigma_{g,i}(r)] dr \right\}. \quad (1)$$

当两束波长非常接近的激光沿着同样的轨道同时被发射接收时, 则(1)式中除 $\sigma_{g,i}(R)$ 外的其他变量皆可视为相同值. 一束激光波长位于待测气体的吸收峰附近(记为 λ_{on}), 另一束波长位于吸收谷附近(记为 λ_{off}), 利用其回波信号相除再求自然对数, 则得到(2)式, 即为DIAL反演CO₂浓度的基本公式. 需要特别指出的是, (1)和(2)式中的 $\sigma_{g,i}$ 除了与待测气体本身有关, 还与温度和压力有关, 对于垂直探测温度和压力又是关于高程的函数, 所以在此 $\sigma_{g,i}$ 被表示为一个关于探测距离的函数. 其具体关系可参加文献^[16], 此处不再赘述. 碳循环研究一般采用干空气混合比作为大气CO₂的常用单位, 因此需要将(2)式得到的CO₂分子数密度转换为ppm(百万分之一). (3)式为CO₂干空气混合比的反演公式, 其中 N_A 为阿伏加德罗常数, R 为理想气体常数, T 和 P 分别为温度和压力.

$$\begin{aligned} N_{CO_2}(r) &= \frac{1}{2(r_{top} - r_{bottom}) \cdot [\sigma_{CO_2, \lambda_{on}}(\bar{r}) - \sigma_{CO_2, \lambda_{off}}(\bar{r})]} \\ &\times \ln \frac{P_{\lambda_{off}}(r_{top}) \cdot P_{\lambda_{on}}(r_{bottom})}{P_{\lambda_{on}}(r_{top}) \cdot P_{\lambda_{off}}(r_{bottom})}, \quad (2) \\ X_{CO_2}(r) &= \frac{N_{CO_2}(r)}{N_{air}(r)} \\ &= \frac{\tau(r)'}{2} \cdot \frac{1}{[\sigma_{CO_2, \lambda_{on}}(\bar{r}) - \sigma_{CO_2, \lambda_{off}}(\bar{r})] \cdot N_A P / RT} \\ &= \frac{\tau(r)'}{2} \cdot \frac{1}{WF(r)}. \quad (3) \end{aligned}$$

3 系统介绍

CO₂-VDIAL 相对于现有其他 CO₂ 探测激光雷达的最大区别在于其目标不是作为星载/机载载荷, 而是以地基的方式获取时间上连续的 CO₂ 垂直廓线浓度观测. 其目标决定了该样机不能使用硬目标反射信号, 而必须依靠气溶胶散射信号. 在这种情况下, 连续波激光器的峰值功率相对较低, 无法获取高信噪比的原始信号. 因此, 必须使用脉冲激光器作为波长发射单元. 总体设计依据这一基本情况展开, 同时也衍生出两大主要技术难点.

3.1 样机设计

CO₂-VDIAL 的总体构架如图 1 所示. 全系统分为三大单元: 激光发射单元、波长控制单元和信号检测单元. 在激光器方面, 利用一个 Nd:YAG 激光器作为种子注入调 Q 脉冲激光器, 倍频后产生 532 nm 的激光, 注入一个变频染料激光器, 从而产生约 634 nm 的红光. 这束红光再和 Nd:YAG 激光

器产生的 1064 nm 的红外激光进行差频混合从而产生所需的约 1572 nm 红外激光. 之后, 将 1% 的光耦合入分光光纤输入至波长控制单元以实现波长的精确定标和稳定. 99% 的光通过自由光路出射, 同时利用一个 40 cm 口径的望远镜进行接收, 探测器选用红外 PMT 以实现红外高灵敏度检测, 最后通过数据采集系统 (licel) 将采集到的信号进行转换传送至计算机从而为后续反演提供基础数据. 该系统与目前其他 CO₂-DIAL 的最大区别在于利用染料激光器作为波长调制单元, 极大地降低了 CO₂-DIAL 的技术门槛, 减小了整机的复杂度, 提高了长期工作的稳定性. 但是, 染料激光器内在的短板决定了样机存在两大主要技术难点: 第一, 波长标定工作需要直接针对脉冲激光进行, 由于脉冲激光的能量波动较大, 而且无法使用成熟的锁相放大器以提高信噪比, 因此, 波长的精确标定和锁定存在困难; 第二, 差频混合过程无法通过种子注入技术进行控制, 使得出射激光的带宽较宽, 同时 CO₂ 在近红外波段光谱十分“狭窄”, 这衍生出利用宽带宽激光进行超高光谱分辨测量的难题.

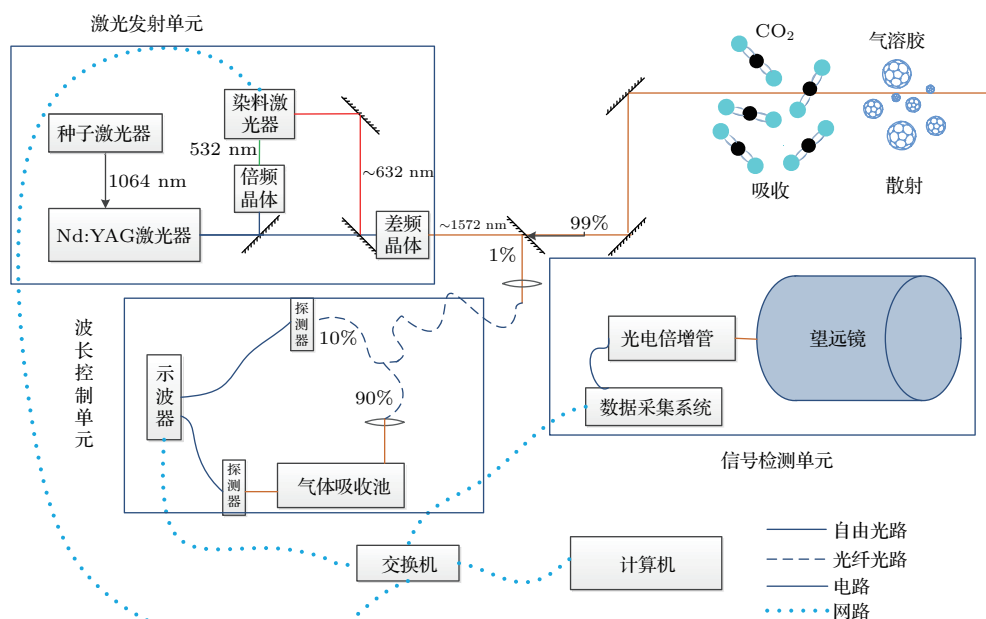


图 1 (网刊彩色) 全系统构架图

Fig. 1. (color online) Design sketch of the prototype.

3.2 波长控制

与 O₃, SO₂ 和 H₂O 等相比, CO₂ 的吸收谱线非常的纤细, 对于 on 波长设置在吸收峰的情况而言, 其波长定标和稳定的误差必须控制在 75 MHz (约

0.6 pm) 之内 [10]. 对于脉冲激光而言, 其能量波动比较大, 而且无法进行频率调制以利用锁相放大器提高特定波长信号的信噪比, 所以脉冲激光的高精度标定和稳定是全系统成败之关键.

图 2 为波长控制单元的实物图. 输入光通过分

光光纤分为两部分, 10%的光直接被一个 InGaAs-PIN 接收, 90% 的光经过一个 16 光程气体吸收池后被另一个相同型号的 InGaAs-PIN 所接收. 将两路所测的能量相除从而尽可能消除脉冲激光的能量波动, 以得到单一波长上的光学厚度测量值. 最后, 通过控制染料激光器进行波长扫描, 获取整个吸收谱, 然后利用 Voigt 线形求解吸收峰的位置. 因为波长标定中需要使用 Voigt 线形, 另外 3.3 节的带宽修正也涉及该线形的应用, 故在此对其进行详细介绍. Voigt 线形由 (4) 式给出, (4) 式涉及的其他变量由 (5)–(7) 式给出.

$$\sigma_g(v) = \frac{yS(T)\sqrt{\ln 2}}{\gamma_D\pi^{3/2}} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{\exp(-t^2)}{(x-t)^2 + y^2} dt, \quad (4)$$

$$y = \sqrt{\ln 2} \cdot \frac{\gamma_L}{\gamma_D}, \quad x = \sqrt{\ln 2} \cdot \frac{v - v_c}{\gamma_D}, \quad (4)$$

$$S(T) = S_0 \frac{T_0}{T} \exp \left[\frac{E''hc}{k_B} \left(\frac{1}{T_0} - \frac{1}{T} \right) \right], \quad (5)$$

$$\gamma_L = \gamma_0 \frac{P}{P_0} \left(\frac{T_0}{T} \right)^n, \quad (6)$$

$$\gamma_D = \frac{v_0}{c} \sqrt{\frac{2 \ln 2 \cdot (k_B T)}{m}}, \quad (7)$$

v 是波数 (波长的倒数), v_c 是吸收谱的中心波数, $S(T)$ 是吸收线强度, t 是积分变量, γ_L 是洛仑兹半宽, γ_D 是多普勒半宽, P 是给定的大气压力, P_0 和 T_0 分别为标准大气压和标准温度, γ_0 是标准线宽度, n 是压力增宽系数的温度依赖系数, k_B 是玻尔兹曼常量, E'' 是低能态, h 是普朗克常量, m 是分子质量. 上述谱线参数主要来源于 HITRAN2012 [17], 同时参考了朱翔飞等 [18] 的研究成果.

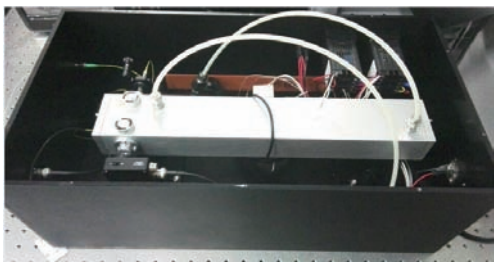


图2 (网刊彩色) 集成化的波长控制单元
Fig. 2. (color online) The integrated wavelength control unit.

目前, 缺乏能对 $\sim 1.6 \mu\text{m}$ 脉冲激光进行高精度 ($< 0.1 \text{ pm}$) 波长测量的波长计. 为检验上述定标方法的性能, 进行了三峰扫描实验, 即对三个相邻的吸收峰 (R14, R16 和 R18) 进行连续扫描, 通过测定相邻峰之间的距离来与理论值进行对比, 从而间接地验证精定标结果.

利用课题组现有的精度为 5 pm 的波长计 (Bristol 821-B) 进行辅助验证. 表 1 显示, 定标结果与理论值之差在 5 pm 的波长计测量误差范围以内, 而且峰到峰的距离与理论值的差异分别为 0.06 pm 和 1.5 pm . 实验结果表明, 利用自行研制的波长定标单元和定标方法能够满足实际应用对波长定标的高精度需求. 波长定标的性能分析和实验结果在文献 [19] 中有详细报道, 此处不再赘述.

表1 实测数据波长定标实验结果 (单位: nm)
Table 1. The result of wavelength calibrations (unit: nm).

	定标结果	理论值
R14	1572.655692	1572.66
R14—R16	0.32459	0.32465
R16	1572.331102	1572.335
R16—R18	0.315624	0.31715
R18	1572.015478	1572.018

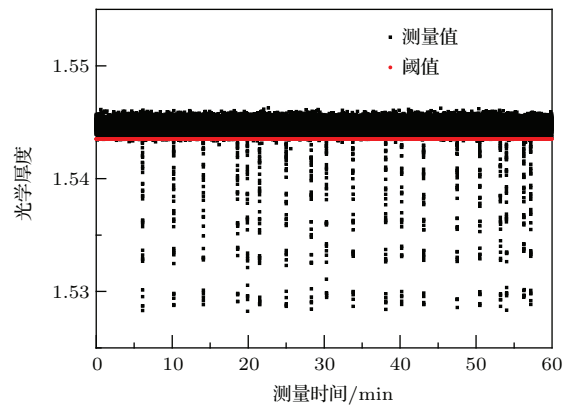


图3 (网刊彩色) 长时间稳频结果, 图中对光学厚度设置的阈值相当于波长漂移不大于 2 pm

Fig. 3. (color online) Frequency stabilization of long period, the threshold of OD is equivalent to wavelength drift of 2 pm .

由于目前尚无高精度的红外脉冲激光波长计, 因此波长监测只能依赖对双通道能量比的监测. 当波长被定标于吸收峰后, 如果波长出现任何方向的漂移则能量比会随之出现衰减, 通过这一现象可以发现波长的漂移, 但是无法判断漂移的方向 [20]. 同时, 尽管使用双通道设计以压制脉冲激光的能量波动, 但是由于双探测器的空载噪声差异, 测量结果中依然会存在随机误差. 由于, 稳频精度要求较高, 如果设置过小的阈值, 则会出现大量误调整的情况. 另外通过大量实验发现, 所采用的染料激光器输出波长尽管无法在长时间上保持稳定, 但是在短时间内具备很高的稳定性. 针对上述问题和情

况, 课题组缩短波长定标的间隔时间, 充分利用激光器波长的短时间稳定性, 从而实现长期实验过程中的波长稳定. 图3展示了利用上述策略得到的稳频结果.

3.3 带宽修正

考虑到CO₂光谱的特性, 国际上通行利用窄带宽激光器作为发射光源. 就目前的技术条件而言, 连续波激光很容易达到这个要求. 而脉冲激光器只有采取种子注入的OPO激光器才能输出窄带宽激光. 我国尚无法研制此类OPO激光器, 受制于相关国家的禁运规定也无法进口此类设备. 因此, 只能采用染料激光器作为激光发射单元. 输出激光的光谱纯净度有限, 虽然采取了相应的带宽压制技术, 也无法得到优于10 MHz的带宽. 所以, 必须在反演前对宽带宽引起的误差进行必要的修正.

激光能量的光谱分布可以由(8)式给出, 其中

$$a = \frac{1}{4} \left(\frac{1}{\tau_r} - \frac{1}{\tau_f} \right), \quad b = \frac{1}{4} \left(\frac{1}{\tau_r} + \frac{1}{\tau_f} \right),$$

τ_r 和 τ_f 分别是脉冲上升时间和下降时间. $L(v)$ 的带宽用半高全宽表示,

$$\text{FWHM} = \frac{b}{\pi^2} \ln \left(\frac{R + \sqrt{R^2 - 4}}{2} \right),$$

其中 $R = 2[2 + \cos(\pi a/b)]$.

$$L(v) = \frac{\pi^2}{b} \cdot \frac{1}{2 \cosh \left(2\pi^2 \frac{v}{b} \right) + 2 \cos \left(\pi \frac{a}{b} \right)}. \quad (8)$$

对(4)式和(8)式进行卷积运算, 模拟了CO₂的标准吸收谱和不同线宽激光测量得到的吸收谱, 如图4所示.

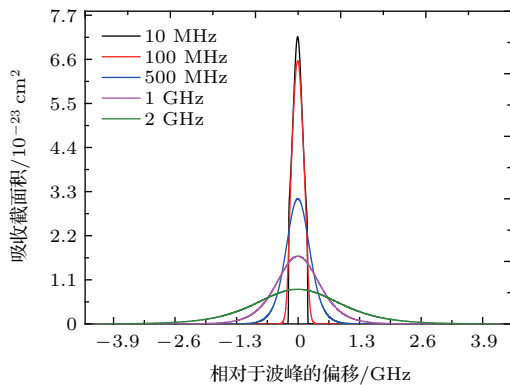


图4 (网刊彩色) 不同带宽激光测得的CO₂吸收谱
Fig. 4. (color online) Measured CO₂ spectra using lasers of different bandwidths.

在仿真实验中, 我们对激光能量进行了归一化处理, 因此得到的吸收谱能够直接与标准的CO₂吸收谱在数值上进行直接对比. 标准CO₂吸收谱与图4中10 MHz测量结果差别极小, 肉眼无法分辨, 因此图4中不再另外绘制标准谱. 图4显示, 当激光带宽很窄时(~10 MHz)反演公式(3)分母部分的双波长吸收截面差可以直接利用标准CO₂吸收谱来估算, 因此窄线宽的CO₂-DIAL无需进行订正. 然后, 随着带宽的增宽, 实测谱线和标准谱线的差距也越来越大. 需要指出的时, 实测谱线的线形依然是Voigt线形, 但是其半宽和峰值等参数会出现显著的变化. 因此, 必须根据实际带宽订正差分吸收截面, 才能准确地反演出CO₂浓度. 在此, 给出三种订正方法: 1) 利用激光光谱仪测出激光的带宽, 进而计算出差分吸收截面的订正因子; 2) 利用已知浓度和光程的吸收池, 计算出订正因子; 3) 利用水平测量实验和CO₂分析仪计算出订正因子. 从严格的物理意义上看, 方法1)是最合适的, 但是目前缺乏针对1.6 μm脉冲激光的超高分辨光谱仪. 如果使用方法3)则会使后期的样机验证缺乏独立的对比实验. 因此, 方法2)是目前最合适的订正因子获取手段.

图5展示了利用吸收池进行带宽订正实验的结果. 本组实验选取了R16吸收线, 相关参数参见HITRAN数据库和朱翔飞等^[18]的工作, 吸收池工作温度和压强分别为323 K和101325 Pa. 双波长差分吸收光学厚度(DAOP)在0.82左右, 而理论值为1.78. 通过两者之比可以得到所需的订正因子, 同时也可据此估算出脉冲激光的带宽在600—700 MHz之间.

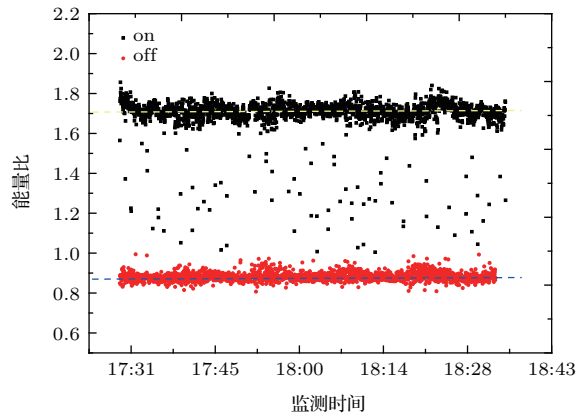


图5 (网刊彩色) 利用16 m气体吸收池测得的DAOP
Fig. 5. (color online) The measured differential absorption optical depth by using a 16 m gas cell.

4 样机验证

样机构建完毕后,为检验系统性能,设计了三类验证试验.首先,利用水平探测评估系统的精度;继而进行垂直探测实验评估系统探测垂直廓线的能力;最后,进行了连续观测,评估系统探测 CO₂ 浓度变化的能力.

4.1 水平大气测量

水平探测实验被国际上其他 CO₂-DIAL 广泛采纳用以检验系统的精度.其原理在于,一般而言 CO₂ 浓度在水平方向上数公里内是保持恒定的,而且气溶胶浓度较大有利于提高信噪比,如果测量到的 DAOD 与探测距离呈现显著的线性关系则可以说明系统具备良好的精密性.同时,可以使用 CO₂ 分析仪等 *in-situ* 测量手段来同步获取地表 CO₂ 的浓度,用于检验反演结果的精确性.图 6 展示了 2013 年 7 月 17 日夜采集信号所得出的 DAOD 与探测距离关系.拟合方程的 R^2 达到 0.9994,这表明系统具备优秀的精密性,根据气象站测量的温度 (300 K) 和压力 (100050 Pa) 计算得到的当时地面 WF 为 0.173 m^{-1} .反演得到的 CO₂ 浓度为 408 ppm,CO₂ 分析仪记录的当日 21 时至 22 时地面 CO₂ 浓度为 412 ppm,两者差距仅 4 ppm,显示 CO₂-DIAL 样机具备优秀的精确度.水平实验结果显示系统具备优秀的精密性和精确性,但是探测距离非常有限,仅能在 1800 m 以内进行高精度的探测,考虑到垂直探测时气溶胶的浓度会随着高度上升而下降,在这种情况下进行垂直探测,其有效探

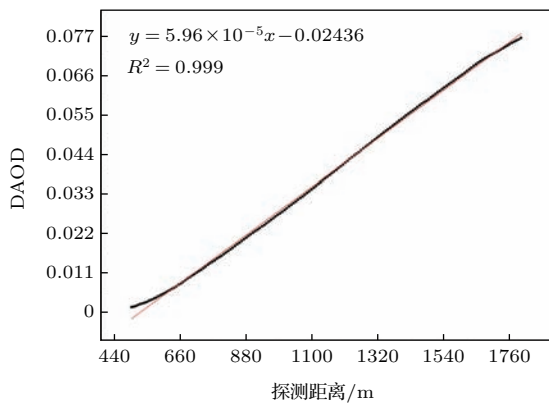


图 6 (网刊彩色) 水平探测实验结果

Fig. 6. (color online) The result of the horizontal detection.

测距离会非常有限.为提升探测距离,我们对接收系统的光路设计进行了改进,同时加大了激光器出射能量.完成硬件改进后,由于实验室周边建设,无法再进行横向测量实验.

4.2 垂直大气测量

在改善了系统后,进行了垂直浓度测量实验.垂直测量难度在两个方面明显大于水平测量:第一,探测高度超出大气边界层后,气溶胶浓度陡降,使得信号的信噪比急剧下降;第二,大气温度和压力随着高度的上升都会产生变化,会导致 WF 的估算出现偏差从而引起 CO₂ 浓度反演的误差.此外,由于双波长近实时接收系统尚未完工,因此需要依靠双波长的切换发射和接收,大气消光系数的变化也会引入明显的误差^[21].针对以上三点,我们依靠红外 PMT 光子信号进行高空反演,其信噪比显著优于模拟信号;其次,依赖于在武汉地区常年的探空资料和微波辐射计数据,构建了精确的武汉地区温度和压力廓线估算模型;最后,对于每个波长采取了 40 s 的短时间多组观测,从而降低气溶胶变化对信号的影响.实验时间为 2015 年 6 月 19 日夜,气象站测得的地表气温和压力分别为 299 K 和 100680 Pa. (9) 和 (10) 式为本文所用的温度和压力估算方程,其中 P_0 和 T_0 分别为地表压力和温度.需要指出的是,两式仅针对于武汉地区 6 月的压力和温度廓线估算.

$$P(h) = 1.14 \cdot P_0 \cdot \exp(-h \cdot 9.9874 \times 10^{-5}) - 14060.68, \quad (9)$$

$$T(h) = T_0 + 0.87 - 0.00475 \cdot h. \quad (10)$$

图 7 显示了两种信号测量的 DAOD 和利用压力温度廓线得到的 WF.光子信号在 1100 m 内存在饱和现象,无法用来反演.模拟信号超过 1000 m 后迅速衰减,也无法继续利用.因此对于低空部分使用模拟信号,而高空部分则依赖光子信号进行反演.考虑到垂直方向上 CO₂ 浓度存在变化的趋势,因此利用二次多项式进行拟合,继而求出各高程处对应的斜率.根据 (3) 式和依据 3.3 节中描述的带宽订正因子计算方法,反演得到廓线信息,如图 8 所示.

图 8 显示,两种机理的信号反演结果在趋势上保持一致,浓度都随着高程的上升而下降.但是,

两组数据之间存在一个“陡坎”，它们无法在绝对值上完美的对接，这也是后续工作的重点。

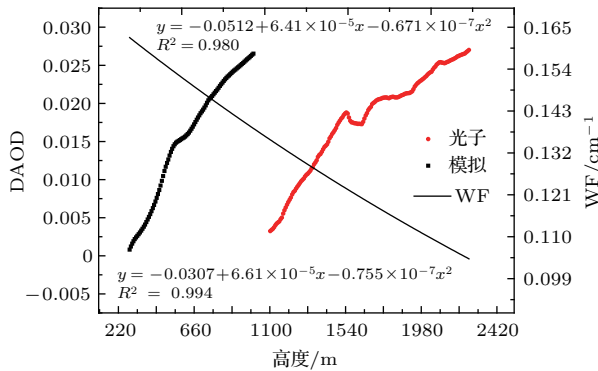


图7 (网刊彩色) 垂直探测实验结果

Fig. 7. (color online) The result of the vertical detection.

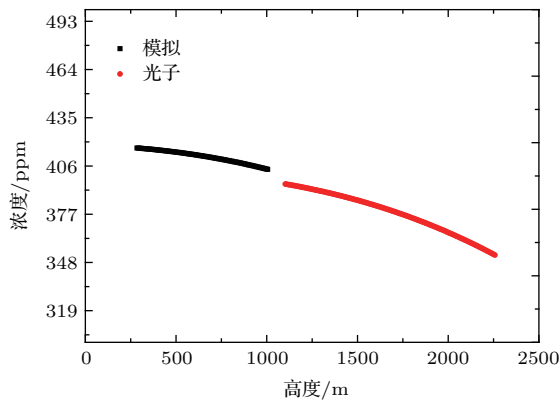


图8 (网刊彩色) 双通道信号反演出的CO₂廓线分布

Fig. 8. (color online) Retrieved CO₂ profiles by using photon counting and analog signal.

4.3 连续观测实验

在2015年3月24日夜至3月25日凌晨进行了连续观测实验。反演选择光子计数的测量数据，探测范围为1100—2000 m。地面监测结果使用的是前后一周内的CO₂分析仪数据，时间分辨率为分钟，误差带的计算是依据标准差(15天内同一时间测量结果的标准差)进行的。图9展示了实验结果，可以看出激光雷达的反演结果同地表测量结果之间还是存在一定偏差的，但是两者保持了相同的变化趋势。这表明样机能够很好地分辨出CO₂浓度的变化，但是绝对值的测量存在一定的偏差，这是后期工作需要继续改善的。这种偏差的来源可能是气溶胶的干扰，由于目前双波长近实时发射系统尚未部署完成，on和off波长需要交替发射。一组差分吸收测量加波长标定的时间在5 min左右，每

4组做平均反演出一个值。在这段时间间隔内气溶胶的波动可能超过5%，因此对测量结果的绝对精度造成明显的影响。另外，由于目前使用的望远镜口径仅为40 cm，回波信号的质量也比较有限。后期，用1 m口径望远镜进行替换后预期将明显地改进反演精度。

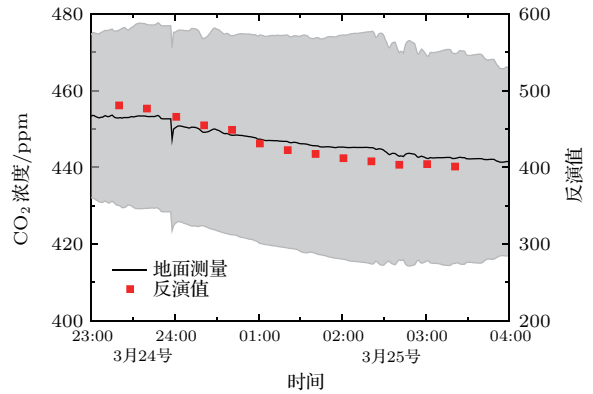


图9 (网刊彩色) 连续观测与地面测量的比较

Fig. 9. (color online) The comparison of the continuous observation and the *in-situ* measurements.

5 结论

本文展示了一台CO₂廓线探测差分吸收激光雷达。该CO₂-VDIAL的构建与国际上现有的CO₂-DIAL有着显著的区别，其采用染料激光器以产生所需波长的脉冲激光。这一设计降低了技术门槛，也使系统具备更高的稳定性和成熟度，但同时衍生出了脉冲激光波长高精度控制和宽带宽测量误差的问题。通过改进硬件设计、开发新型算法和模拟仿真实验等手段，实现了对脉冲激光器的稳频和宽带宽订正。最后，利用水平探测、垂直探测和连续观测等实验检验了样机性能。结果表明，该样机具备较高的精密性和精确性，能够获取CO₂的垂直分布，同时也具备对CO₂浓度时相变化的监测能力。在完成部分零部件升级后，样机将安置在中国科学院大气所淮南站进行综合验证调试，以进一步测试和优化性能，为最终的青藏高原大气探测做最后的准备。

参考文献

[1] Stocker T F, Qin D, Plattner G K, Tignor M, Allen S K, Boschung J, Nauels A, Xia Y, Bex V, Midgley P M 2013 *IPCC: Climate Change: The Physical Science Basis*

- [2] Bousquet P, Peylin P, Ciais P, Ramonet M, Monfray P 1999 *J. Geophys. Res.* **104** 26161
- [3] Gurney K R, Law R M, Denning A S, Rayner P J, Baker D, Bousquet P, Bruhwiler L, Chen Y H, Ciais P, Fan S, Fung I Y, Gloor M, Heimann M, Higuchi K, John J, Maki T, Maksyutov S, Masarie K, Peylin P, Prather M, Pak B C, Randerson J, Sarmiento J, Taguchi S, Takahashi T, Yuen C W 2002 *Nature* **415** 626
- [4] Stephens B B, Gurney K R, Tans P P, *et al.* 2007 *Science* **316** 1732
- [5] Gatti L V, Miller J B, D'Amelio M T S, Martinewski A, Basso L S, Gloor M E, Wofsy S, Tans P 2010 *Tellus B* **62** 581
- [6] Belmonte A 2004 *Opt. Express* **12** 1249
- [7] Ehret G, Kiemle C, Wirth M, Amediek A, Fix A, Houweling S 2008 *Appl. Phys. B: Lasers Opt.* **90** 593
- [8] Gibert F, Flamant P H, Bruneau D, Loth C 2006 *Appl. Opt.* **45** 4448
- [9] Ismail S, Koch G, Abedin N, Refaat T, Rubio M, Davis K, Miller C, Vay S, Singh U 2006 *NASA Earth Science Technology Conference* USA, June 27–29, 2006
- [10] Amediek A, Fix A, Wirth M, Ehret G 2008 *Appl. Phys. B: Lasers Opt.* **92** 295
- [11] Sakaizawa D, Nagasawa C, Nagai T, Abo M, Shibata Y, Nakazato M, Sakai T 2009 *Appl. Opt.* **48** 748
- [12] Kameyama S, Imaki M, Hirano Y, Ueno S, Kawakami S, Sakaizawa D, Nakajima M 2009 *Opt. Lett.* **34** 1513
- [13] Abshire J B, Riris H, Allan G R, Weaver C J, Mao J, Sun X, Hasselbrack W E, Kawa S R, Biraud S 2010 *Tellus B* **62** 770
- [14] Liu H, Shu R, Hong G L, Zheng L, Ge Y, Hu Y H 2014 *Acta Phys. Sin.* **63** 104214 (in Chinese) [刘豪, 舒嵘, 洪光烈, 郑龙, 葛焯, 胡以华 2014 物理学报 **63** 104214]
- [15] Lu D R, Pan W L 2012 *International Radiation Symposium* Berlin, Germany, August 6–10, 2012 p244
- [16] Gong W, Han G, Ma X, Lin H 2013 *Opt. Commun.* **305** 180
- [17] Rothman L S, Gordon I E, Babikov Y, Barbe A, Chris B D, Bernath P F, Birk M, Bizzocchi L, Boudon V, Brown L R, Campargue A, Chance K, Cohen E A, Coudert L H, Devi V M, Drouin B J, Fayt A, Flaud J M, Gamache R R, Harrison J J, Hartmann J M, Hill C, Hodges J T, Jacquemart D, Jolly A, Lamouroux J, Le R R J, Li G, Long D A, Lyulin O M, Mackie C J, Massie S T, Mikhailenko S, Müller H S P, Naumenko O V, Nikitin A V, Orphal J, Perevalov V, Perrin A, Polovtseva E R, Richard C, Smith M A H, Starikova E, Sung K, Tashkun S, Tennyson J, Toon G C, Tyuterev V L G, Wagner G 2013 *J. Quant. Spectrosc. Ra.* **130** 4
- [18] Zhu X F, Lin Z X, Liu L M, Shao J Y, Gong W 2014 *Acta Phys. Sin.* **63** 174203 (in Chinese) [朱湘飞, 林兆祥, 刘林美, 邵君宜, 龚威 2014 物理学报 **63** 174203]
- [19] Han G, Gong W, Lin H, Ma X, Xiang C Z 2014 *Appl. Phys. B: Lasers Opt.* **117** 1041
- [20] Ma X, Gong W, Ma Y Y, Fu D W, Han G, Xiang C Z 2015 *Acta Phys. Sin.* **64** 154251 (in Chinese) [马昕, 龚威, 马盈盈, 傅东伟, 韩舸, 相成志 2015 物理学报 **64** 154251]
- [21] Han G, Gong W, Lin H, Ma X, Xiang C Z 2014 *IEEE Trans. Geosci. Remote.* **53** 3221

A ground-based differential absorption lidar for atmospheric vertical CO₂ profiling*

Han Ge¹⁾ Gong Wei^{2)3)†} Ma Xin²⁾ Xiang Cheng-Zhi²⁾ Liang Ai-Lin²⁾ Zheng Yu-Xin²⁾

1) (International School of Software, Wuhan University, Wuhan 430079, China)

2) (State Key Laboratory of Information Engineering in Surveying, Mapping and Remote Sensing, Wuhan University, Wuhan 430079, China)

3) (Collaborative Innovation Center for Geospatial Technology, Wuhan 430079, China)

(Received 24 July 2015; revised manuscript received 13 August 2015)

Abstract

A differential absorption lidar (CO₂-VDIAL), which is designed for vertical CO₂ profile retrieving by using aerosol-scattered signals, is demonstrated in this paper. To our knowledge, it is the first time that a dye laser has been utilized to realize the wavelength modulation for a CO₂-DIAL/IPDA system. Such a design scheme greatly reduces both the threshold and the cost to develop a CO₂-DIAL. However, two key problems emerge in this system, i.e., wavelength stability and broad bandwidth. By adopting the CO₂-VDIAL, a dual-path gas cell, and the Voigt fitting procedure, the accurate wavelength calibration of infrared pulse laser is achieved. Experimental results show that the error of wavelength calibration can be suppressed under 0.1 pm. And a wavelength stability of ~2 pm is then achieved. For tackling the error introduced by using the laser of a broad bandwidth, simulated experiments are carried out to estimate its influence. On that basis, we propose a method to calculate the correction coefficient and demonstrate the process via experiments by using a gas cell. It is demonstrated that the bandwidth of the output infrared laser is around 600–700 MHz. Hence, the broad bandwidth correction is an indispensable step for this CO₂-VDIAL. Finally, horizontal, vertical and continuous detections are carried out to verify the precision and the accuracy of our CO₂-VDIAL. The slope method is used to retrieve the X_{CO_2} in the above experiments. In the horizontal detections, an R_2 of 0.999 is achieved, suggesting that the precision of the system is excellent. By comparison with the in-situ measurements, a difference is found to be lower than 4 ppm. Consequently, it is concluded that the CO₂-VDIAL is capable of providing retrievals with the high precision and accuracy. Moreover, the X_{CO_2} decreases with increasing altitude according to the vertical detection experiment in the midnight on June 19th 2015 at an urban site, demonstrating that the CO₂-VDIAL is capable of providing retrievals of ranged-resolved. Finally, temporal characteristic of X_{CO_2} can be also revealed by the CO₂-VDIAL in light of continuous detections. The CO₂-VDIAL has already been assembled in a container which is due to be transported to Huainai for further verifications in late 2015. Once we finish the performance optimization, the CO₂-VDIAL will be installed in Tibet for long period observation.

Keywords: differential absorption lidar, CO₂, atmospheric sounding, pulsed laser

PACS: 42.68.Ca, 42.68.Wt, 42.55.Mv, 42.68.-w

DOI: 10.7498/aps.64.244206

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 41127901, 41201362).

† Corresponding author. E-mail: weigongwhu@gmail.com