



DOI: 10.12086/oe.2018.170452

## 国外差分吸收激光雷达探测大气 CO<sub>2</sub> 研究综述

洪光烈<sup>1</sup>, 章桦萍<sup>2</sup>, 刘豪<sup>1\*</sup>, 胡以华<sup>3</sup><sup>1</sup>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;<sup>2</sup>中国科学院大学, 北京 100049;<sup>3</sup>脉冲功率激光技术国家重点实验室, 安徽 合肥 230037

**摘要:** 差分吸收激光雷达是探测大气 CO<sub>2</sub> 时间和空间分布不可或缺的工具。2.0 μm 波段 Ho:Tm:YLF 或 Ho:Tm:LuLiF 激光器复合外差接收机, 1.6 μm 种子注入的 KTP 光参量振荡器或参量发生器复合光电倍增管的光子计数技术, 可以探测 7 km 以下对流层大气 CO<sub>2</sub> 混合比的分布。调制连续波种子激光强度、共用 1.6 μm 光纤放大器, 以及相关检测技术的使用, 积分路径差分吸收激光雷达在大气 CO<sub>2</sub> 柱浓度探测方面具有独特的优点和特色。探测大气二氧化碳柱浓度的空间计划有美国 NASA 的 ASENSDS 计划, 采用脉冲式、积分路径差分吸收工作方式。用 CO<sub>2</sub> 气体吸收池作为参照物, 稳定种子光频率和精确控制谐振腔长, 锁定发射机的 on 光源波长, 是差分吸收激光雷达探测大气二氧化碳的关键技术。

**关键词:** 激光雷达; 差分吸收激光雷达; 二氧化碳; 体积混合比

中图分类号: TN959.98

文献标志码: A

引用格式: 洪光烈, 章桦萍, 刘豪. 国外差分吸收激光雷达探测大气 CO<sub>2</sub> 研究综述 [J]. 光电工程, 2018, 45(1): 170452

## Review of measurement for atmospheric CO<sub>2</sub> differential absorption lidar

Hong Guanglie<sup>1</sup>, Zhang Huaping<sup>2</sup>, Liu Hao<sup>1\*</sup>, Hu Yihua<sup>3</sup><sup>1</sup>Key Laboratory of Space Active Opto-Electronics Technology, Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China;<sup>2</sup>University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;<sup>3</sup>The Key Laboratory Pulse Power Laser Technology of China, Hefei, Anhui 230037, China

**Abstract:** Differential absorption lidar is an indispensable tool to measure atmospheric CO<sub>2</sub> for temporal and spatial distribution. The 2.0 μm wavelength Ho:Tm:YLF/Ho:Tm:LuLiF lidar were used for remote sensing atmospheric CO<sub>2</sub> with heterodyne receiver. The KTP parametric oscillator was injected into the seeds, and a differential absorption lidar (DIAL) system of 1.6 μm by using the photon counting technique to profile the atmospheric CO<sub>2</sub> in the troposphere under 7 km. Modulation continuous wave seed laser intensity and the integral path differential absorption lidar, common 1.6 μm optical fiber amplifier, and the use of correlation detection technique, have unique advantages and characteristics in the detection of atmospheric CO<sub>2</sub> column concentrations. The space program for detecting atmospheric CO<sub>2</sub> column concentrations is NASA's ASENSDS (active sensing of CO<sub>2</sub> emission over nights, days, and seasons) mission which adopts the method of pulse and integral path differential absorption. The absorption of CO<sub>2</sub> gas cell as a reference to stabilize seed light frequency and the precise control of cavity length lock the on-line wavelength of transmitter, is the key technique for DIAL to

收稿日期: 2017-08-26; 收到修改稿日期: 2017-12-01

基金项目: 国家重点研发计划“京津冀城市群高时空分辨率碳排放监测及应用示范”(2017YFB0504000)

作者简介: 洪光烈(1966-), 男, 研究员, 主要从事激光雷达与激光遥感等方面的研究。E-mail: glhong@mail.sitp.ac.cn

通信作者: 刘豪(1989-), 男, 博士, 主要从事激光雷达的研究。E-mail: 06272071@bjtu.edu.cn

measure atmospheric CO<sub>2</sub>.

**Keywords:** lidar; differential absorption lidar(DIAL); carbon dioxide; volume mixed ratio

**Citation:** Hong G L, Zhang H P, Liu H, *et al.* Review of measurement for atmospheric CO<sub>2</sub> differential absorption lidar[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2018, 45 (1):170452

## 1 引言

二氧化碳对于来自太阳的光辐射几乎是透明的。不过,它在地球向外散发的热红外光谱带 15 μm 处是一个强吸收体。可见大气中 CO<sub>2</sub> 含量的增加会造成大气捕获更多从地表和底层大气向外辐射的红外能量,从而增强温室效应。

自 100 多年前的工业革命以来,碳就开始从煤、石油和天然气中被迁移出来,通过燃烧,生成二氧化碳。其中一部分留在大气中,另一部分被海洋溶解或被地球上的植物所吸收。大气-海洋-陆地系统的碳收支是一个亟待解决的复杂的研究课题。

对于 CO<sub>2</sub> 的地域性分布净的源和净的汇还不很清楚(哪些地方是源,哪些地方是汇)。CO<sub>2</sub> 与生物圈是如何相互影响的,自然界碳元素循环确切机制怎样等许多方面至今尚不完全清楚。矿石燃料大量燃烧造成的大气二氧化碳含量的持续增高对地球表面温度的影响是气候研究中最关心的问题之一。

近年来,大气二氧化碳浓度被动遥感仪器 GOSAT、OCO-2 和中国的全球二氧化碳监测科学实验卫星已经在轨运行,但是被动遥感由于以太阳光作为光源,因此难以获得晚上的二氧化碳浓度信息,且受到云层阻挡和太阳高度角变化等因素的影响,其精度受到一定限制。

一方面,激光束可以穿过薄云和云层缝隙<sup>[1]</sup>,夜晚也不受影响,且激光束的发射方向相对地表基本没有变化,所以空间差分吸收激光雷达的主动遥感技术能够很好地弥补上述不足。另一方面,被动遥感仪器 GOSAT、OCO-2 和中国的全球二氧化碳监测科学实验卫星的数据进入全球变化模拟模式中计算,还需要地面差分吸收激光雷达测量数据作为初始值带入模式当中参与迭代。因此,差分吸收激光雷达主动探测技术备受重视,然而因其系统复杂,发射机研制难度大,所以至今还没有在轨运行的空间有效载荷。

差分吸收激光雷达是一种可以自定标的测量仪器,除了检测回波信号之外,反演所需要的双波长或多波长激光对二氧化碳的吸收截面参数可以直接测量出来,目前可以用 HITRAN 数据库里的数据带

入,不需要其他传感器对其标定。差分吸收激光雷达不仅可以用来验证卫星遥感数据的可靠性,还能获得对流层二氧化碳的垂直廓线。遥感碳卫星是低轨道太阳同步卫星,地面掠过的条带比较窄,其他没有被碳卫星扫到的地区的二氧化碳数值还需要差分吸收激光雷达来实地测量予以补充。因此地面的差分吸收激光雷达对大气二氧化碳的探测不可或缺。

探测大气二氧化碳的差分吸收激光雷达(differential absorption lidar, DIAL)按其工作波长可分为两个类:1.6 μm 波段和 2.0 μm 波段。前者从发射机来说,包括掺铒光纤放大器(erbium-doped fiber amplifier, EDFA),Nd:YAG 激光器基波泵浦的光参量振荡器(optical parametric oscillator, OPO)或光参量发生器(optical parametric generation, OPG),而后者发射机主要是 Ho,Tm:YLF 激光器及其近系激光器。从是否具有距离分辨率来看,也可以分为两类,一类是距离分辨差分吸收激光雷达(range resolved differential absorption lidar),另一类是路径积分差分吸收激光雷达(integrated path differential absorption lidar, IPDA)。前者间隔一定距离(距离分辨率)就会给出一个二氧化碳浓度数值,多点数值可绘制出随距离变化的二氧化碳浓度分布廓线,其发射机一般是脉冲方式工作的,望远镜接收的回波是大气后向散射;后者激光束在激光雷达和硬目标之间往返,不检测路径上大气对激光束的后向散射,而从实现双程路径吸收,演算出激光雷达与硬目标之间空气柱中二氧化碳的柱浓度,其发射机既可以是脉冲方式工作的,也可以是连续波方式工作的,望远镜接收的回波是硬目标的表面反射。

## 2 大气 CO<sub>2</sub> 探测差分吸收激光雷达主流发展概况

### 2.1 距离分辨差分吸收激光雷达(range resolved DIAL) 对流层大气二氧化碳廓线探测

$S_{on}(z)$ 、 $S_{off}(z)$  代表探测到的 on-line、off-line 光回波功率,探测 CO<sub>2</sub> 的廓线距离分辨(range-resolved)差分吸收激光雷达方程给出如下:

$$S_{on}(z) = \frac{E_{on}\eta A c}{2z^2} \eta_t \eta_r \beta(z) \exp\left\{-2\int_0^z [\alpha(r) + n(r)\sigma_{on}] dr\right\}, \quad (1)$$

$$S_{off}(z) = \frac{E_{off}\eta A c}{2z^2} \eta_t \eta_r \beta(z) \exp\left\{-2\int_0^z [\alpha(r) + n(r)\sigma_{off}] dr\right\}, \quad (2)$$

式中： $\eta_t$  是发射光学效率， $\eta_r$  是接收光学效率， $A$  是望远镜的有效接收面积， $\alpha(r)$  是气溶胶及目标气体以外分子的消光系数， $n(r)$  是二氧化碳气体分子密度， $\sigma_{on}$  和  $\sigma_{off}$  是对应的二氧化碳气体吸收截面 ( $\sigma_{off}$  相对较小)， $c$  是光速， $z$  是被探测处空气体积单元所对应高度， $\beta(r)$  表示体积单元大气后向散射系数。做理想的简化假设，除吸收截面  $\sigma$  之外，认为对于双波长来说，所有参数时间和距离变化相同。 $r$  是被积分函数的高度参数， $\Delta z$  是距离分辨率。激光雷达两个方程相除再做差分运算，得到  $z$  处二氧化碳分子密度 ( $/m^3$ )：

$$n(z) \approx \frac{1}{2(\sigma_{on} - \sigma_{off})\Delta z} \ln\left(\frac{S_{off}(z + \Delta z) S_{on}(z)}{S_{off}(z) S_{on}(z + \Delta z)}\right). \quad (3)$$

实际上， $\lambda_{off}$  和  $\lambda_{on}$  不完全相等，DIAL 双波长大气的后向散射系数是不同的，以及不同的大气消光系数、气溶胶消光系数和分子消光系数，因此两个波长的依赖效应需要加以修正，如下：

$$n(z) \approx \frac{1}{2(\sigma_{on} - \sigma_{off})\Delta z} \ln\left(\frac{S_{off}(z + \Delta z) S_{on}(z)}{S_{off}(z) S_{on}(z + \Delta z)}\right) - \ln\left(\frac{\beta_{off}(z + \Delta z) \beta_{on}(z)}{\beta_{off}(z) \beta_{on}(z + \Delta z)}\right) - D - E - F, \quad (4)$$

式中：大气分子消光系数对波长的依赖关系

$$D = \frac{\alpha_m^{on} - \alpha_m^{off}}{\sigma_{on} - \sigma_{off}};$$

气溶胶消光系数对波长的依赖关系

$$E = \frac{\alpha_a^{on} - \alpha_a^{off}}{\sigma_{on} - \sigma_{off}};$$

干扰气体水汽对波长的依赖关系

$$F = \frac{N_{IG} \Delta \sigma_{IG}}{\sigma_{on} - \sigma_{off}},$$

$N_{IG}$  为干扰气体水汽的分子密度， $\sigma_{IG}$  为吸收截面差；

探测灵敏度

$$n_{min}(z) \propto \frac{1}{2(\sigma_{on} - \sigma_{off})\Delta z} \left( \frac{1}{SNR_{on}} + \frac{1}{SNR_{off}} \right),$$

SNR 为回波信噪比。

可见，选择的 on-line 和 off-line 双波长对二氧化碳气体的吸收截面差别越大，灵敏度越高；on-line 和 off-line 双波长回波信号的信噪比越高，探测灵敏度越高。on-line 和 off-line 双波长之间差别越小，误差越小并且探测灵敏度与距离分辨率两者之间是矛盾的。

美国 NASA 兰利研究中心的科学家在 2004 年报道了他们研制的地基相干差分吸收激光雷达，用于探测大气二氧化碳垂直浓度廓线<sup>[2]</sup>，还附加多普勒风廓线探测技术，信号处理包括外差信号功率测量的算法。工作波长 2.05  $\mu m$ ，探测器为双平衡 InGaAs 光电二极管。Ho: Tm: YLF 发射机复合相干探测接收机，1000 脉冲对的平均，给出了足够高的信噪比使得差分吸收激光雷达能够测量边界层大气信号。 $1\sigma$  标准方差的精度为 1%~2%，探测高度自 1.2 km 到 2.8 km，具有足够的灵敏度去探测 CO<sub>2</sub> 日变化。DIAL 与在线传感器相比较表明，从一天的日出到下午，共 8 个小时，两个仪器观测到相同的 CO<sub>2</sub> 浓度变化趋势，如图 1 所示。同时观测到，DIAL 的精度受到大气折射率湍流的影响，白天同夜里相比，精度下降接近 1.5 倍，如图 2 所示。要么通过减小 off-line 和 on-line 脉冲之间的时间间隔，要么增加脉冲重复频率或者使用双脉冲机构，湍流情况下 DIAL 的性能可能得到提升。

2008 年，Koch 等研制了脉冲能量更大 (90 mJ/5 Hz) 的 Ho: Tm: LuLiF 激光器，并在美国威斯康星州一个 WLEF 塔边上测量二氧化碳浓度，利用 153 m~1353 m 之间的全部数据，使用斜率法反演该段范围内的柱浓度<sup>[3]</sup>，并与 396 m 高的在线传感器比较。采用 InGaAsSb 双平衡光电二极管探测器做外差式回波探测，以提高探测灵敏度，如图 3 所示。用 30 min 滚动平均，DIAL 与在线传感器相比存在 7.9 ppm 均方差。

2006 年法国科学家 Gibert 等人在 LMD-IPSL 也研制了一种 2.0  $\mu m$  相干差分吸收激光雷达 (coherent differential absorption lidar, CDIAL)，用大气边界层气溶胶当作分布目标探测 CO<sub>2</sub> 混合比的绝对值<sup>[4]</sup>，增加距离并水平测量以反演光学厚度，同样实验发挥了外差激光雷达能够探测风的优点，如图 4 所示。基于 CO<sub>2</sub> 光声气体池的控制单元用来修正 on-line 光频的抖动。差分 DIAL 的测量结果得到在线路径上的

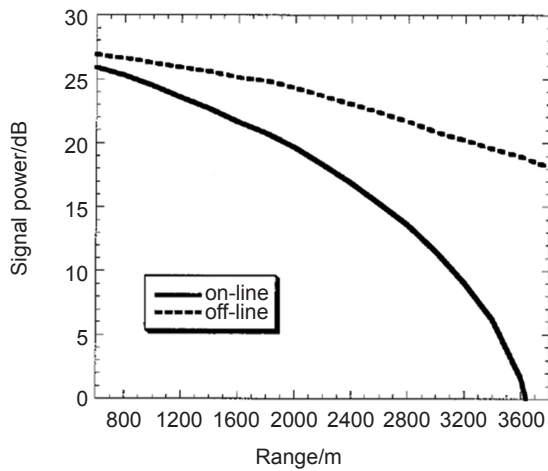


图 1 on-line 和 off-line 脉冲的大气回波功率，每一个波长 1000 脉冲累积平均  
Fig. 1 Power in the atmospheric return for on- and off-line pulses. They averaged 1000 pulses for each wavelength

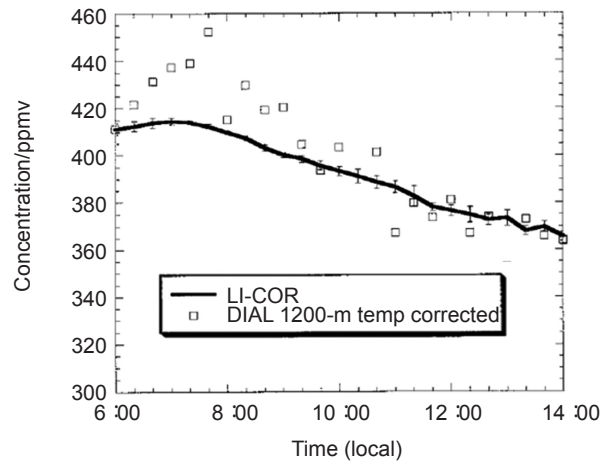


图 2 CO<sub>2</sub> 浓度 DIAL 测量和 LI-COR 在线传感器 (2003 年 8 月 22 日从 6:00 a.m. 至 2:00 p.m.)  
Fig. 2 CO<sub>2</sub> concentration measured by DIAL and LI-COR in situ sensor from 6:00 a.m. to 2:00 p.m. 22 August 2003

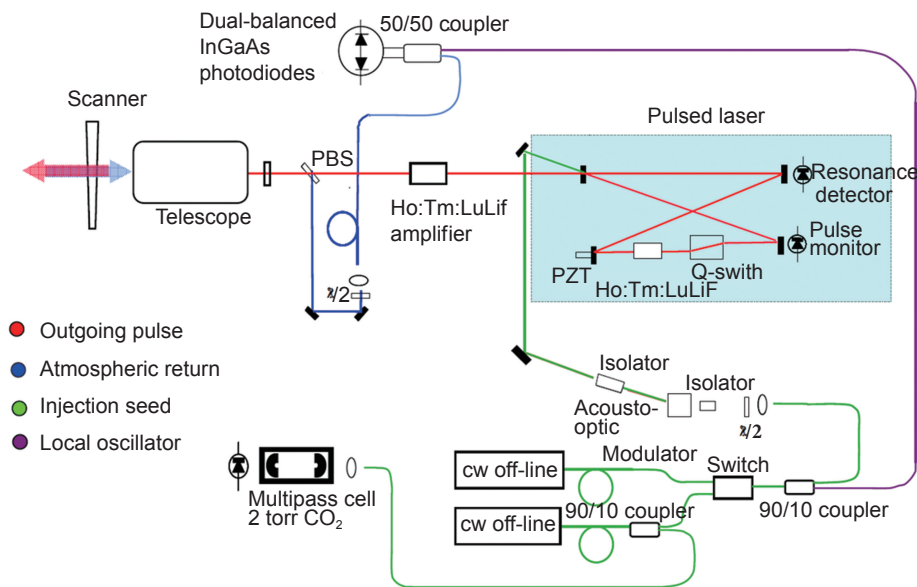


图 3 NASA 兰利研究中心外差式激光雷达的布局图。PBS: 偏振分束器; HWP: 半波片; QWP: 四分之一波片; AOM: 声光调制器  
Fig. 3 NASA langley research center layout of the heterodyne lidar. PBS: polarization beam splitter; HWP: half-wave plate; QWP: quarter-wave plate; AOM: acousto-optic modulator

传感器的证实。他们在 2006 年<sup>[4]</sup>、2008 年<sup>[3,5]</sup> 以及 2015 年<sup>[6]</sup> 报道的结果总结在表 1。Gibert 于 2015 年在《Optics Letters》发表的论文展示了真正意义上的 CO<sub>2</sub> 垂直廓线连续监测结果<sup>[6]</sup>，如图 5 所示。

2009 年，日本科学家 Sakaizawa 建立了 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>[7]</sup>。该系统包括工作在光子计数模式的短波红外光电倍增

管的接收机和种子注入的光参量振荡器发射机，光参量振荡器用到周期性极化 LiTaO<sub>3</sub> 非线性光学晶体，工作在 1.572 μm，波长的选择水汽干扰小和温度敏感性小的 (30012 0001) 吸收线，如图 6 所示。光参量振荡器发射机实验结果，证实了最大单脉冲输出能量达 10 mJ，脉冲重复频率 200 Hz，晶体温度 40 °C。他们的实验观测累积时间 5 h，CO<sub>2</sub> 差分吸收激光雷



表 1 法国科学家的报道的三次研究结果性能对比  
Table 1 Performance comparison of three literature cover

	2015	2008	2006
Laser	2 $\mu$ m Ho:YLF	2 $\mu$ m Tm,Ho:YLF	2 $\mu$ m Tm,Ho:YLF
Energy/mJ	10	10	80
PRF/Hz	1 k	5	2.5
Duration/ns	40	230	140
Detection	Coherent	Coherent	Coherent
Time/min	15	30	30
Space/m	150	1000	500
Distance/km	<1	<1	<2
Precision/%	0.5~2	2	0.7

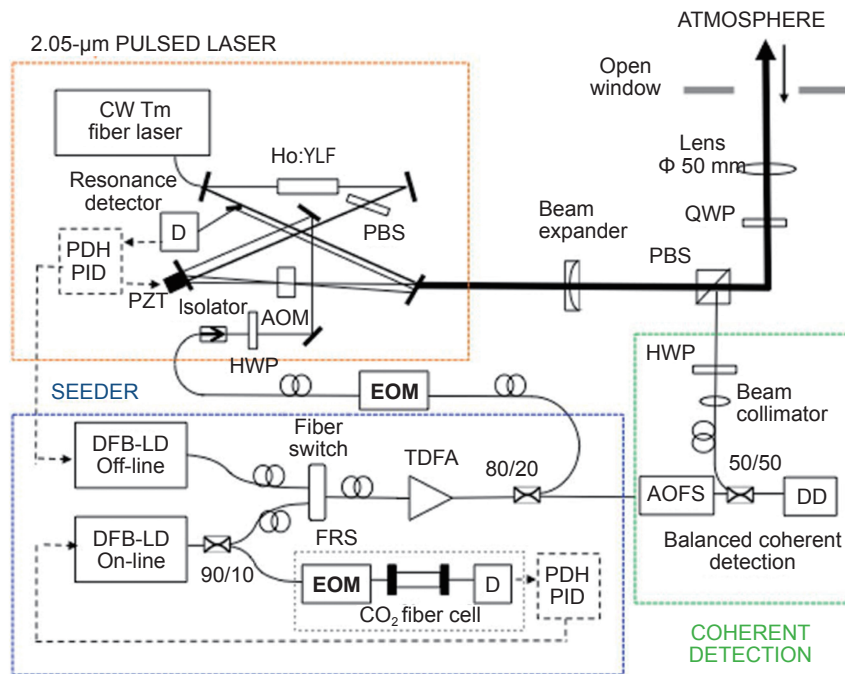


图 4 法国科学家 Gibert 等人研制的外差式差分吸收激光雷达系统框图 (2015)。EOM: 电光调制器; AOM: 声光调制器; PID: 比例积分微分; PDH: 相位调制光外差稳频; AOFS: 声光频移器; TDFA: 掺铥光纤放大器; PBS: 偏振分束器; HWP: 半波片; QWP: 四分之一波片; PZT: 压电换能器

Fig. 4 The coherent differential absorption lidar (CDIAL) consists in a 2.05- $\mu$ m pulsed oscillator, a dual-wavelength seeding module locked to a frequency reference system and a coherent detection (2015). EOM: electro-optic modulator; AOM: acousto-optic modulator; PID: proportional integral and differential; PDH: Pound-Drever-Hall; AOFS: acousto-optic frequency shifter; TDFA: Thulium doped fiber amplifier; PBS: polarization beam splitter; HWP: half-wave plate; QWP: quarter-wave plate; PZT: piezo-electric transducer

达能够以 2% 精度用来观测对流层从几百米至 5.2 km 的 CO<sub>2</sub> 垂直廓线。2 km 高度处 CO<sub>2</sub> 密度统计误差不超过 1%，并且可以用更好的接收系统和光束质量减小误差。在二氧化碳廓线的估计中，大气压力的不确定性可能引入附加的误差源<sup>[2]</sup>。

2017 年《Applied Optics》报导了 Shibata<sup>[8]</sup> 等日本科学家以 OPG/OPA(光参量发生器/光参量放大器)

组合，发明了 1.6  $\mu$  m 发射机，DIAL 用直接探测方式测量对流层 CO<sub>2</sub> 浓度廓线。DIAL 系统如若照例采用 OPO 发射机，需要采取腔长 (ramp-and-fire) 控制技术，而他们的 OPG 发射机不需要谐振腔。而且用低功率激光器种子注入晶体可以使 OPG 输出波长受到控制。此 CO<sub>2</sub> 的 DIAL 1.6  $\mu$  m OPG/OPA 发射机系统，基于碘分子锁频的、调 Q-开关 Nd:YAG 激光器

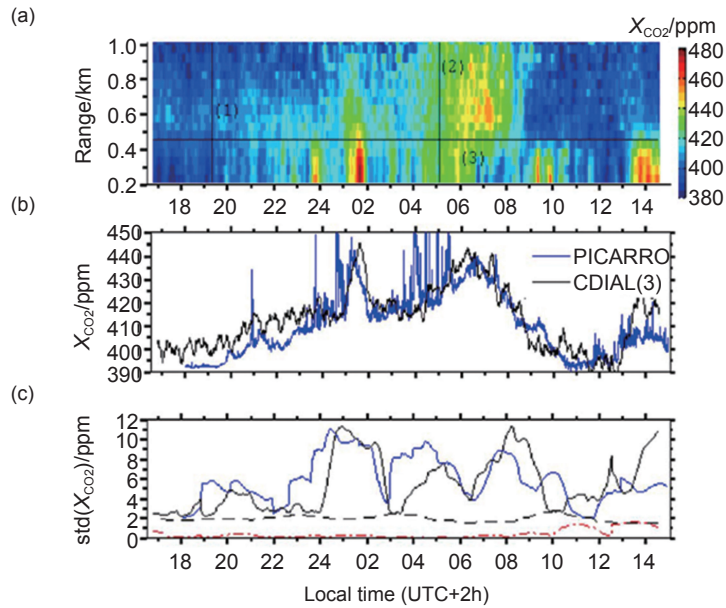


图 5 相干差分吸收激光雷达 CO<sub>2</sub> 混合比廓线 (20h 时间长度) 实验, 时间分辨率 15 min, 空间分辨率 100 m。 (a) CO<sub>2</sub> 干空气混合比横截面图, 时间分辨率 15 min, 距离分辨率 150 m; (b) 相干差分吸收激光雷达和在线 X<sub>CO2</sub> 测量时间序列; (c) 相干差分吸收激光雷达 (黑线和在线 (蓝线) X<sub>CO2</sub> 测量实验, 相干差分吸收激光雷达标准方差 (黑色点虚线) 和在线 (蓝线) X<sub>CO2</sub> 测量 (红色点虚线)

Fig. 5 CDIAL CO<sub>2</sub>-mixing ratio profiling during the 20-h-long time experiment above Ecole Poly technique campus. Time and space resolution are 15 min and 100 m, respectively. (1-3) is for the cross section reported in Figs. 3(a) and 3(b); (b) Time series of CDIAL and in situ X<sub>CO2</sub> measurements; (c) Experimental CDIAL (black line) and in situ (blue line) X<sub>CO2</sub> standard deviation (over a slicing 2-h time gate) and CDIAL instrumental standard deviation on X<sub>CO2</sub> from  $\alpha$  (black dashed line) and WF (red dashed and dotted line)

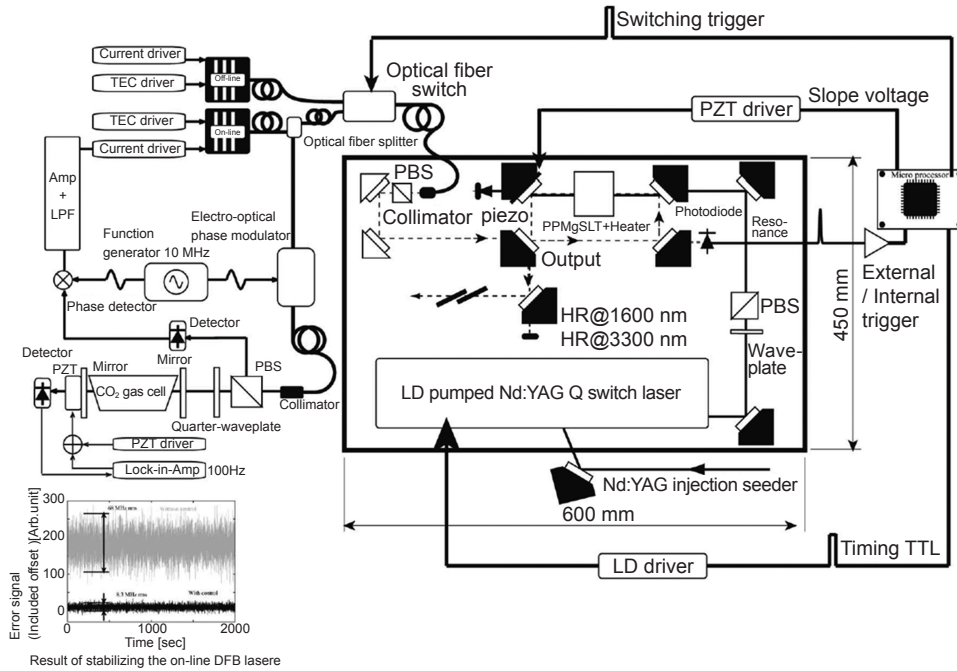


图 6 日本搭建的 PPMgLT 光参量振荡器探测二氧化碳廓线的实验装置。PZT: 压电换能器; LPF: 低通滤波器; PBS: 偏振分束器

Fig. 6 Japan experimental setup of the LD-pumped Q-switched Nd:YAG pumping the PPMgLT optical parametric oscillator (OPO). PZT: piezo-electric transducer; LPF: low pass filter; PBS: polarization beam splitter

泵浦, 1064 nm 波长, 100 mJ 输出, 和 500 Hz 重复频率。这个泵浦激光器用不到 40 mJ 脉冲能量泵浦三个准相位匹配晶体, 避免了在高能量泵浦的损伤。最大输出功率 20.5 mJ × 500 Hz, 而且光束横模为 TEM<sub>00</sub> 模。OPG/OPA 发射机的脉冲能量和平均功率分别比传统 OPO 高出 4.1 倍和 18.6 倍。在 DIAL 系统中, 它常常要求脉冲序列对的两个脉冲之间的时间间隔最小化, 以减小大气湍流产生的脉冲对的时间去相关。在两发脉冲之间 on-line 和 off-line DFB 种子激光波长轮流切换, 和之前的 OPO 系统相比, 切换的速度从 5 Hz 增加到 250 Hz。种子注入的 OPG/OPA 辐射在无种子的 OPG/OPA 参变辐射谱范围里内可以自由跳模的。种子注入 OPG/OPA 产生一个强的、不大于 280 MHz 窄谱信号、1.4 nm 谱宽的边带。测量误差用到吸收截面宽的边带补偿, 然而, 边带里的实时抖动不能忽略, 如图 7, 图 8 所示。

OPG/OPA 输出频率的稳定性在 10 MHz 以内,

CO<sub>2</sub> 浓度误差接近 0.1%。这些结果表明, 发射机的性能优良。DIAL 对 CO<sub>2</sub> 测量随机的和系统的影响, 已经在 1573 nm 波段的 OPG/OPA 发射机的研发得到考虑。这些研究的结果可以分别用于高模式和低模式。它们展示了 CO<sub>2</sub> 廓线测量精度小于 1.0% 是可能的, 高度小于 6.3 km CO<sub>2</sub> DIAL 系统采用高模式, 垂直分辨率 500 m; 高度小于 3.8 km 采用低模式, 距离分辨率 100 m。CO<sub>2</sub> 的 DIAL 测量可以和传感器相比较。通过修正宽边带的影响, DIAL 与传感器测量之间的平均差为 -0.06 ppm, 如图 9 所示。从这些结果看出, 它能证明 1.6 μm 直接探测 CO<sub>2</sub> DIAL, 用 OPG/OPA 发射机在对流层能够测量 CO<sub>2</sub> 浓度廓线, 精度达到 1.0%。

## 2.2 路径积分差分吸收激光雷达 (integrated path DIAL) 探测大气二氧化碳柱浓度

路径积分式差分吸收激光雷达, 光束照射硬目标

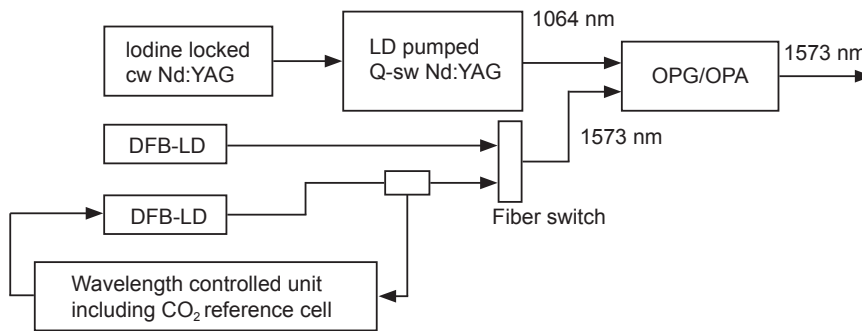


图 7 日本探测二氧化碳差分吸收激光雷达 1.6 μm 发射机框图  
Fig. 7 Japan schematics of the 1.6 μm transmitter for the CO<sub>2</sub> DIAL system

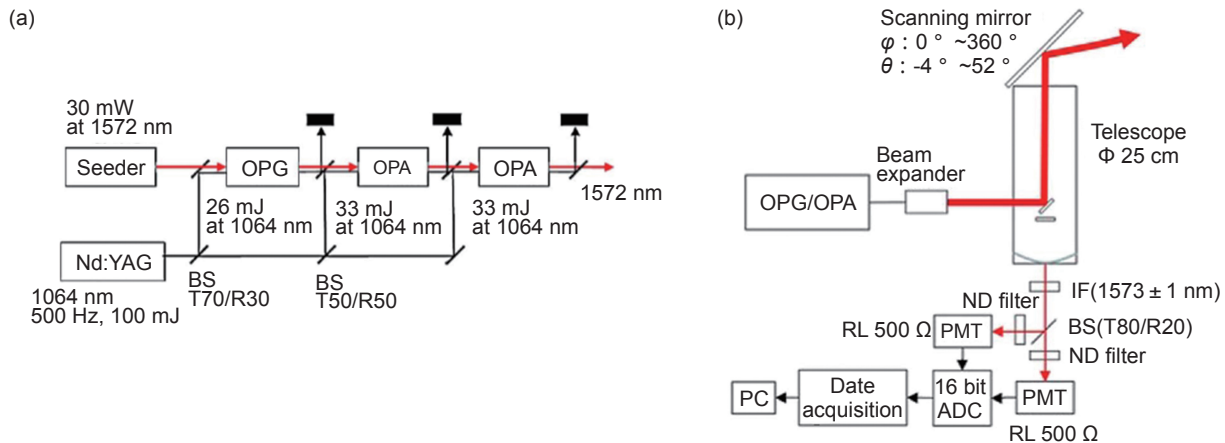


图 8 OPG/OPA 发射机的系统框图 (IF: 干涉滤光片)  
Fig. 8 (a) Detailed block diagram of the OPG/OPA transmitter system; (b) Schematic of the 1.6 μm CO<sub>2</sub> DIAL system used for the validation measurements

表面的足印千变万化，可以是草原、沙地、海面等，其反射系数不同，回波光信号随之不同反射系数变化不定。以相近的路径，间隔很短时间发射探测光束和参考光束，它们照射硬目标的光斑几乎重合：

$$S_{on}(R) = \frac{E_{on} A_R}{\tau R^2} \eta_i \eta_r \exp\left\{-2 \int_0^R [\alpha(r) + n(r) \sigma_{on}] dr\right\} (r_{sur} / \Omega_{sur}) \quad (5)$$

$$S_{off}(R) = \frac{E_{off} A_R}{\tau R^2} \eta_i \eta_r \exp\left\{-2 \int_0^R [\alpha(r) + n(r) \sigma_{off}] dr\right\} (r_{sur} / \Omega_{sur}) \quad (6)$$

$$q_{CO_2} = \frac{1}{2 N_{air} R \Delta \sigma} \ln \left( \frac{S_{off,i} / E_{off,i}}{S_{on,i} / E_{on,i}} \right)$$

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，而  $E$  对应发射机的脉冲能量。吸收截面差  $\sigma$  和空气分子密度  $N_{air}$  都需要大气压力和温度，通过 HITRAN 数据库和气体状态方程求的。距离  $R$  可用激光测距仪的脉冲往返激光雷达与靶标之间的时间间隔来确定。 $i$  表示累加后求对数。 $q_{CO_2}$  的单位是相对混合比 (ppm)。

2015 年，德国 Amediek 等在 CHARM-F (CO<sub>2</sub> and CH<sub>4</sub> Remote Monitoring-Flugzeug) 计划支持下，研制了基于种子注入 OPO 的 1.57 和 1.645  $\mu\text{m}$  脉冲差分吸收激光雷达系统<sup>[9]</sup>，并且实现了机载垂直方向的大气二氧化碳和甲烷柱浓度测量。利用种子注入的 Nd:YAG 激光器基波作为泵浦光，KTP 作为非线性光学晶体，分布反馈 (distribute feed-back, DFB) 激光器作为注入的种子光，其中 online 种子光利用 36 m

的 (CO<sub>2</sub>/20 hPa, CH<sub>4</sub>/6 hPa) 气体池进行稳频，通过高速光开关，轮流把 on 和 off 种子光切换至光参量振荡器 (optical parametric oscillator, OPO) 谐振腔内，经过 OPO 变换后的 1.57  $\mu\text{m}$ /1.645  $\mu\text{m}$  激光脉冲 (10 mJ/50 Hz) 垂直发射到地面，利用 PIN 探测器和 APD 探测器接收反射光来测量大气甲烷和二氧化碳浓度，测量结果表明其测量精度在 1% 以下<sup>[10]</sup>。

同样道理，前面提到的 2.0  $\mu\text{m}$  脉冲激光器和 InGaAs 探测器组成的脉冲激光雷达廓线探测系统<sup>[11-12]</sup>，都被用作路径积分差分吸收激光雷达 (integrated path DIAL) 探测大气二氧化碳柱浓度，只是接收的不是大气气溶胶的后向散射，而是激光束自飞机向地面发射，接收地面的反射光信号，可以不必采用外差探测方式，从两次穿透大气的吸收，反演出大气空气柱这一段二氧化碳的柱浓度。此处不再赘述。

2009 年，日本学者首次提出了正弦波强度调制的连续波差分吸收激光雷达系统<sup>[13]</sup>，其系统框图如图 10，图 11 所示。包括两个 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 1572.992 nm 和 1573.137 nm，两个连续波激光强度被  $f_{m1}$  和  $f_{m2}$  低频正弦波波形调制 (锂酸铌导电光强度调制器)，被调制的连续波激光汇合一起，再被掺铒光纤放大器作功率放大，被放大的光功率大部分发射出去，很小部分功率被取样用于发射功率监测，被发射的光功率水平穿过空气柱打在硬目标上，再由硬目标反射回来，沿原路回到接收望远镜，回波功率被探测器转换成电信号，对回波电信号做傅里叶变换，就能把频率  $f_{m1}$  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 1572.992 nm

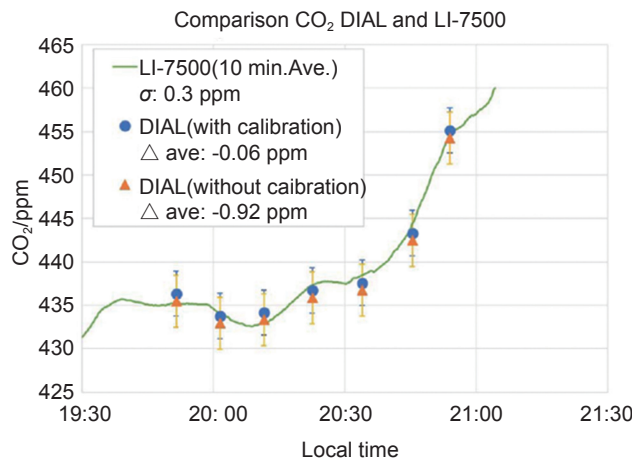


图 9 差分吸收激光雷达与 LI-7500 在线传感器的对比

Fig. 9 Comparison of the CO<sub>2</sub> concentration measurements from the CO<sub>2</sub> DIAL and the in situ sensor (LI-7500) at 10 min average intervals



探测光分量和 1573.137 nm 参考光分量的强度。连续波差分吸收激光雷达和激光测距仪复合一体化工作。

数值计算根据 on-line/off-line 两种波长的光束在发射机与硬目标之间来回的光吸收差异，探测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，昼夜持续实时探测，获取 CO<sub>2</sub> 浓度随时间日变化的曲线。

外场测量评价激光雷达水平和垂直 CO<sub>2</sub> 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约 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 CO<sub>2</sub> 密度误差在 2.8 ppm 之内。

2013 年 Lin 等人提出了连续波差分吸收激光雷

达系统的改进方法，即啁啾波形代替正弦波调制发射光强度以便区分气溶胶、薄云的反射信号<sup>[14]</sup>，试图同步探测目标回波强度和空气柱长度。

LaRC/ITT(lang-ley research center) Campbell 等研究了复合脉冲调制技术，连续波差分吸收激光雷达测量中，用最大长度决定于伪随机码的正弦波去同时调制 on-line/off-line 强度。振幅和相移键控复合调制光载波的强度，表现出最佳的自相关性<sup>[15]</sup>。它可以减小 on/off 回波信号的混叠和强度调制载波的带宽。

2017 年 Aiuppa 等科学家基于 (difference-frequency mixing, DFM)/(optical parametric amplifier, OPA) 差分吸收激光雷达“BRIDGE”，调研了在 Campi Flegrei 火山 Pisciarelli 出口喷发的热火山灰雾。“BRIDGE”

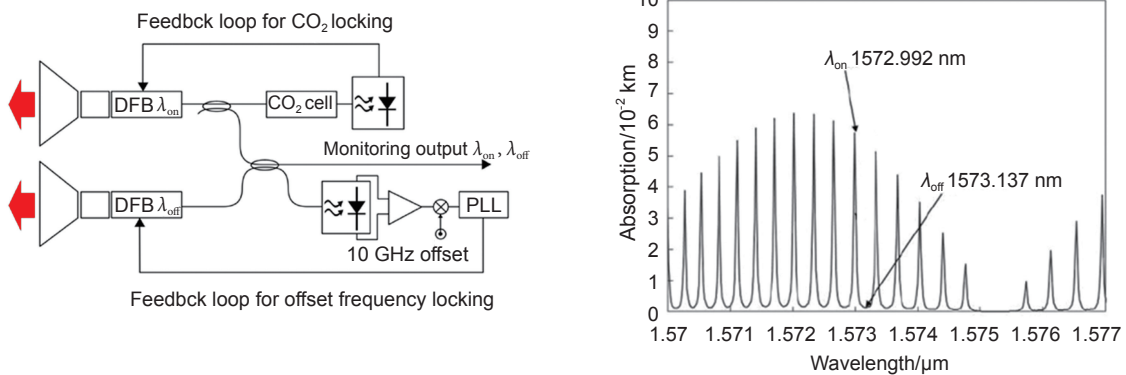


图 10 半导体激光器探测波长和参考波长的锁定单元。PLL: 锁相环; DFB: 分布反馈半导体激光器  
Fig. 10 Block scheme of the proposed frequency stabilization unit. PLL: phase locked loop; DFB: distributed feedback laser diode

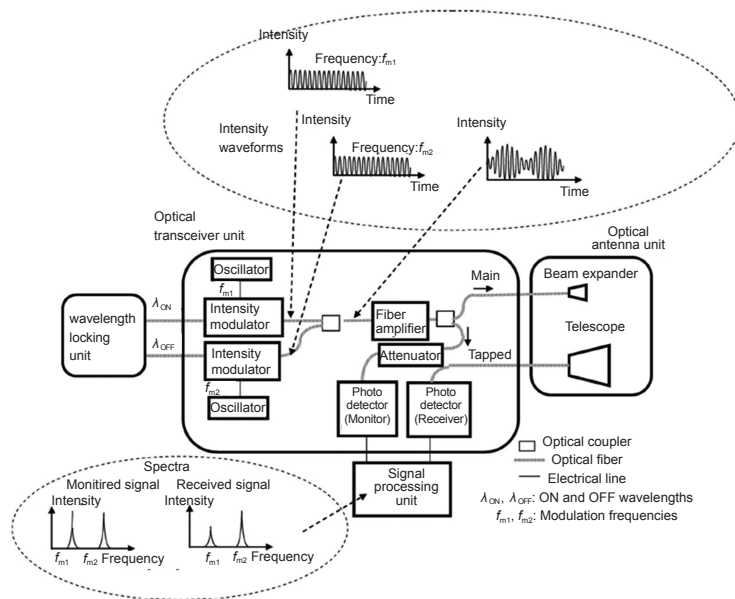


图 11 连续波差分吸收激光雷达系统框图  
Fig. 11 System configuration of the 1.6 micron CW modulation hard-target DIAL system

激光雷达用差分吸收技术遥测了喷口 CO<sub>2</sub> 浓度的截面，能够从大气背景信号中分出火山灰散发出的二氧化碳信号，据称这是国际上基于激光雷达测量火山灰散发 CO<sub>2</sub> 浓度的第一例，空间分辨率 5 m，时间分辨率 20 s。激光器包括种子注入的 Nd:YAG 激光器、双光栅染料激光器、光差频混频器、光参量放大器构成。探测波长 on-line 为 2009.537 nm，参考波长 off-line 为 2008.484 nm，水汽在这个波长干扰非常小，脉冲重复频率 10 Hz，脉冲能量 25 mJ，脉冲宽度 8 ns，牛顿式接收望远镜口径 310 mm，椭圆扫描镜长轴 450 mm。可以大气（气溶胶、水滴、颗粒）后向散射为回波信号，通过水平和垂直扫描，获得很多条线方向上的双波长光学厚度差，能够反演得到扇形的 CO<sub>2</sub> 浓度分布截面<sup>[16]</sup>，如图 12 所示。

### 3 对地探测大气二氧化碳柱浓度的差分吸收激光雷达的空间计划

#### 3.1 ASEINDS

除了 GOSAT 和 OCO-2 碳卫星计划之外，美国航天局 NASA，欧洲航天局 ESA 和日本的 JAXA 等机构都相继提出了星载主动遥感探测大气二氧化碳计划。美国 NASA 提出的是 ASEINDS (active sensing of CO<sub>2</sub> emission over nights, days, and seasons) 计划<sup>[17]</sup>，如图 13 所示。本来预计 2016 年发射。其目的就是为

了观测全球，包括陆地和海洋的二氧化碳源和汇情况，并希望将测量精度提高到 2 ppmv (0.5%)，陆地和海洋的地面水平分辨率分别为 100 km 和 200 km。并且填补被动方式无法准确获得高纬度地区以及夜间的观测数据。

预计空间运行的资源需求：500 km 轨道，1.5 m 望远镜，3 mJ 单脉冲能量，1 μs 激光脉冲宽度，10 s 累积平均时间，采用制冷的 HgCdTe 雪崩二极管 APD 探测器。

美国航天局 Abshire 等在 ASEINDS 计划的资助下开展了机载实验验证，并于 2010 年公布了一种脉冲差分吸收激光雷达机载系统<sup>[18]</sup>，一只可调谐的 DFB 激光器相当于它的种子源，在一定时间宽度内，线性地改变注入电流，可以使得该激光器的波长在 1572.29 nm ~ 1572.39 nm 范围内扫描，波长步进约 5 pm，覆盖二氧化碳的 1 个吸收峰，中心波长 1572.335 nm。出射激光通过声光调制器 (acousto-optic modulator, AOM) 斩成脉冲波形，经过掺铒光纤放大器 (erbium deposited fiber amplifier, EDFA) 放大功率后，大约有 25 W 的峰值功率，由 200 mm 口径的望远镜接收地面回波并被光电倍增管 PMT 探测器检测，通过吸收峰拟合等处理得到空气柱的二氧化碳浓度，如图 13 所示。和前述的连续波系统相比，该方法产生的激光出射峰值能量更高，结构更加紧凑，但是后续数据处理会比较复杂。由二氧化碳多通道

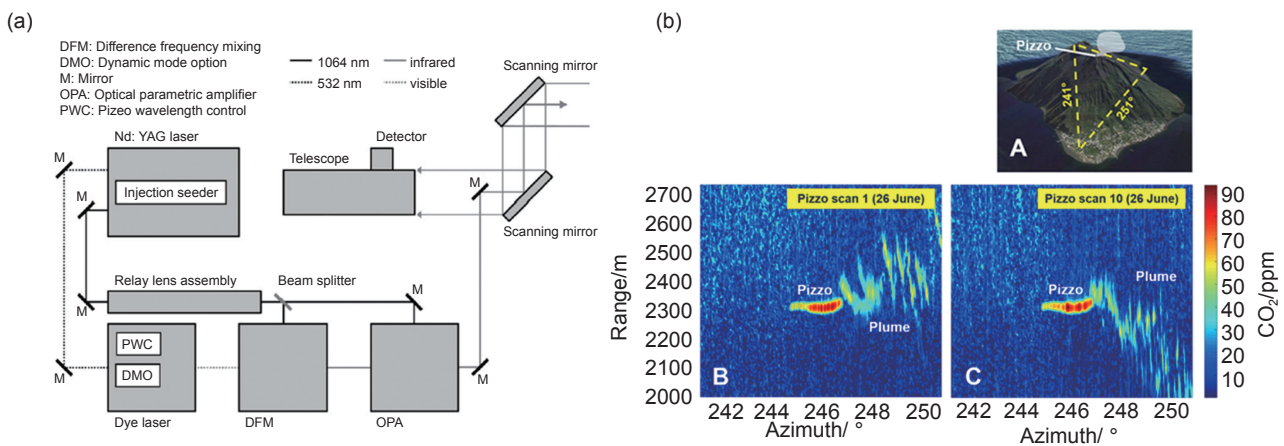


图 12 BRIDGE 激光雷达的组成框图 (a) 以及探测火山灰中 CO<sub>2</sub> 含量的二维截面分布图 (b)

Fig. 12 Example of two CO<sub>2</sub> concentration maps (B,C) obtained during a Pizzo horizontal scan on June 26. Geometry of the scans and location of the plume are schematically shown in (A). The maps show the distribution of CO<sub>2</sub> concentrations in the lidar's field of view (FOV), as a function of heading angle and range. Each map was obtained by interpolation of all CO<sub>2</sub> concentration profiles (e.g., same as 3A), obtained during a given Pizzo scan. In the maps, the red colored horizontal bands identify the margin of the Pizzo peak (heading angle: 244° ~ 245°), while the volcanic plume is the band of peak CO<sub>2</sub> concentration (up to 60 ppm) areas at heading angles of 245° ~ 250°

光学吸收池为基准，其中心波长采取 Pound-Drever-Hall 技术进行自动控制，其他波长采取偏频 (offset) 锁定。

戈达德飞行中心 (Goddard Space Flight Center) 研制基于  $1.57 \mu\text{m}$  可调谐脉冲掺铒光纤激光器的差分吸收激光雷达，该系统可以测量二氧化碳吸收线上七个波长的回波，利用光子计数器探测回波，并且激光雷达利用脉冲飞行时间可以直接测量出积分路径长度，通过氧气 A 带数据来反演地表气压用来修正二氧化碳的测量结果。他们在 2013 年再次进行飞行实验，得到了精度优于  $1 \text{ ppmv}$  的测量结果<sup>[19]</sup>。为进一步升空入轨探测做准备。

### 3.2 A-SCOPE

2008 年欧空局对外公布 A-SCOPE 遥感计划<sup>[20]</sup>，是他们六个地球观测计划之一。先后顺序发射两个激光脉冲，光谱上特别靠近。一个脉冲 (on-line) 被二

氧化碳强吸收，另一个 (off-line) 不被吸收且作为辐射度参考。若利用大气后向散射信号，则需要难以想象的大口径望远镜。最后确定的概念称之为 IPDA (路径积分差分吸收激光雷达)，提供大气  $\text{CO}_2$  总的垂直柱浓度的测量。本来计划 2016 年发射升空，而实际情况并未落实。

## 4 差分吸收激光雷达探测大气二氧化碳关键技术

探测波长稳定是最关键的技术之一，需要连续波小功率种子激光注入脉冲激光器的谐振腔，种子激光的波长必须稳定住，谐振腔的腔长又必须锁定在种子激光波长的整数倍；作为差分吸收的 on 光源和 off 光源，探测 / 参考种子光的切换导致脉冲激光器交替输出探测激光和参考激光，用被探测气体本身的多通道光学吸收池和谐振腔的精确控制来锁定发射机的光

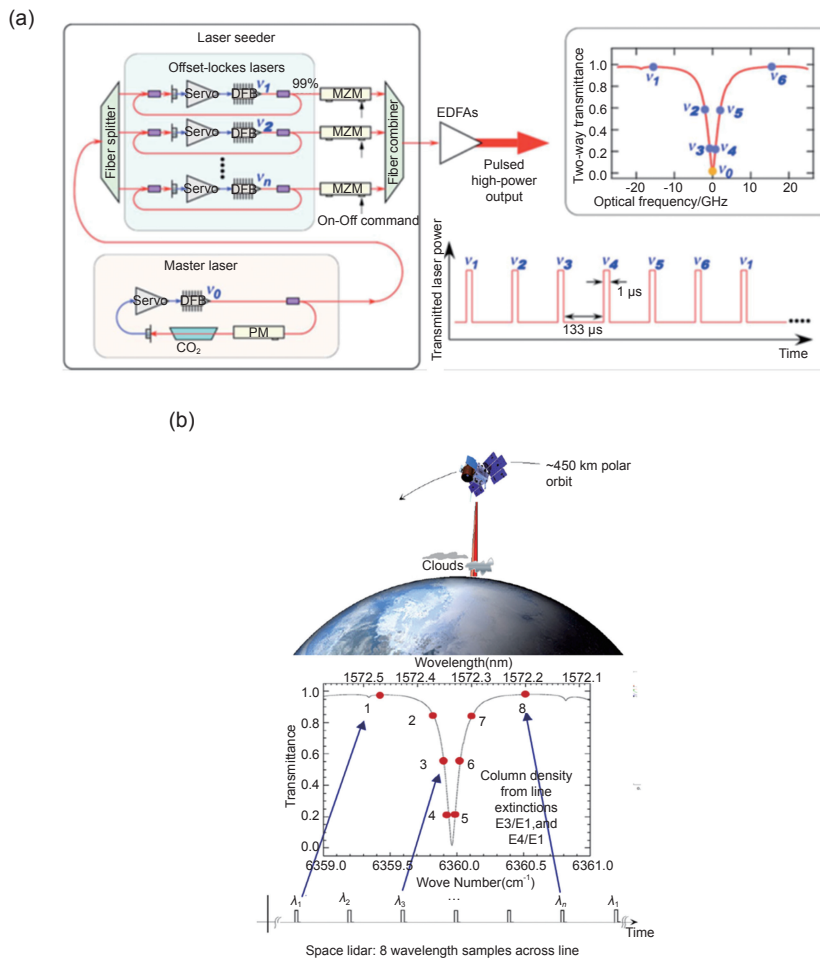


图 13 美国 NASA-ASENDS 计划

Fig. 13 ASENDS (active sensing of  $\text{CO}_2$  emission over nights, days, and seasons) space measurement concept



源波长；种子光波长控制的目前主流方法是 Pound-Drever-Hall 技术<sup>[21]</sup>和波长调制-相敏检波技术<sup>[22]</sup>两种；前者是通过相位调制器对种子激光的相位进行正弦波外调制，后者正弦波直接调节半导体激光器的注入电流或外腔半导体激光器的压电电压，从而对半导体激光器光频率（波长）进行直接调制，被调制光进入气体池，被气体吸收之后的光再被探测器检测，检测的电信号与调制信号相乘，被低通滤波之后输出误差信号，去反馈调节半导体激光器偏置电流或半导体激光器的外腔 PZT 的偏置电压。off 光源波长是在稳定的 on 种子光源波长的基础上进行偏频控制，相干外差检测和射频锁相环配合使用<sup>[23]</sup>，去稳定 off 光源波长与 on 光源波长之间的差值。

其二，发射波长必须对应于目标气体的某个特征吸收谱线，脉冲能量要求足够大；除了半导体激光器和放大器、L 波段掺铒光纤激光器和光纤放大器可以覆盖二氧化碳的 1.572  $\mu\text{m}$  吸收线，其它没有这样现成的固体激光器光波长正好覆盖目标气体的吸收线，往往需要做必要的波长转换，并且发射的脉冲能量还需要进行放大，光谱纯度足够高，因此光脉冲的横模（光束截面质量）和纵模（光谱质量）兼顾十分必要。

其三，误差修正，比如目标气体的吸收截面  $\sigma$  受大气压力  $P$  和大气温度  $T$  的影响，因此必须加以考虑；探测波长（on-line）和参考波长（off-line）必须足够接近，否则气溶胶的消光系数和后向散射系数的波长依赖性将产生误差。

激光波长 on-line 和参考激光波长 off-line 相差不宜超过一定的范围，若要  $|\Delta\beta/\beta| \approx 0.1\%$ ， $\lambda_{\text{off}}$  必须满足  $|\lambda_{\text{off}} - \lambda_{\text{on}}| \leq 0.01\lambda_{\text{on}}/\alpha$ ，探测双波束发射时间间隔在 200  $\mu\text{s}$  以内<sup>[24]</sup>。

## 5 结束语

地基的激光雷达垂直向上发射脉冲激光，接收大气的 Mie 后向散射和 Rayleigh 后向散射，反演大气对流层二氧化碳浓度的垂直廓线，相对于差分吸收激光雷达探测大气臭氧、二氧化氮、二氧化硫，以至于水汽浓度而言，因为 1.6  $\mu\text{m}$  激光 Mie 后向散射（后向散射系数大约与波长成反比）和 Rayleigh 后向散射（后向散射系数大约与波长 4 次方成反比）比蓝紫外后向散射弱得多，必须用光子计数技术来探测；2.0  $\mu\text{m}$  激光 Mie 后向散射和 Rayleigh 后向散射，被望远镜收集到的就更微弱，2.0  $\mu\text{m}$  波段目前没有合

适的光子计数模式的探测器件，而必须采用相干外差探测方式，线性模式的直接探测其灵敏度已经不能满足要求，并且和外差探测风场结合在一起。

就地基差分吸收激光雷达  $\text{CO}_2$  浓度廓线探测而言，1.57  $\mu\text{m}$  的光参量振荡器和光参量放大器为发射机优势显现，理由有二，1) 1.57  $\mu\text{m}$  的探测波长可以直接选择该波段吸收光谱的峰值波长，波长容易控制，2.0  $\mu\text{m}$  的探测波长不是选择该波段吸收光谱的峰值波长，而是偏离峰值波长一定数值，波长稳定稍难；2) 1.57  $\mu\text{m}$  波长稍短，大气后向散射系数较大，回波较强。脉冲光参量振荡器和参量放大器质量越来越进步。

大气不是凝固不变的，增加脉冲的重复频率以及缩短 on-line/off-line 脉冲间隔时间有利于减小大气湍流带来的误差。

就大气  $\text{CO}_2$  柱浓度探测而言，连续波强度调制的差分吸收激光雷达，一方面探测光束（on-line）/参考光（off-line）同时发射，同时接收，最大限度地遏制了的大气湍流带来的误差；另一方面所用器件接近光纤通信器件和射频器件，容易实现成熟可靠<sup>[25]</sup>，具有普及使用的潜力。

如果在飞机平台，激光雷达向地面垂直发射激光脉冲，接收地面反射的回波，根据探测波束和参考波束的之间的双程吸收差别，推演出垂直空气柱二氧化碳的混合比，但没有高度距离分辨能力。激光雷达工作体制可以是脉冲的体制，也可以是连续波强度调制的体制。

空间平台的探测距离遥远，不小于 400 km，途经的大气后向散射已经太弱，因此垂直廓线探测已经是奢望；未来空间平台的遥感探测大气二氧化碳，现实的方案就是在空间平台向地面发射激光脉冲，以地面或云层作为散射体，接收地面或云顶的回波，根据全路径大气  $\text{CO}_2$  吸收数值，只能获得空气柱  $\text{CO}_2$  浓度，而不能获得不同高度的浓度分布垂直廓线<sup>[26]</sup>。

空间  $\text{CO}_2$  遥感计划当中，连续波激光器使用相对困难，因为连续波功率难以提高。美国 NASA 因为具有多年全固态 Ho:Tm:YLF 或 Ho:Tm:LuLiF 脉冲激光器的经验积累，难以割舍 2.0  $\mu\text{m}$  波段的差分吸收激光雷达的方案<sup>[27]</sup>，试图把探测大气  $\text{CO}_2$  和大气水汽的功能综合在一起<sup>[28]</sup>。

## 致谢

感谢中国气象局气象探测中心姚波博士、赵培涛



博士的热心帮助!

## 参考文献

- [1] Ramanathan A K, Mao J P, Abshire J B, *et al.* Remote sensing measurements of the CO<sub>2</sub> mixing ratio in the planetary boundary layer using cloud slicing with airborne lidar[J]. *Geophysical Research Letters*, 2015, **42**(6): 2055–2062.
- [2] 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.
- [3] Koch G J, Beyon J Y, Gibert F, *et al.* Side-line tunable laser transmitter for differential absorption lidar measurements of CO<sub>2</sub>: design and application to atmospheric measurements[J]. *Applied Optics*, 2008, **47**(7): 944–956.
- [4] Gibert F, Flamant P H, Bruneau D, *et al.* Two-micrometer heterodyne differential absorption lidar measurements of the atmospheric CO<sub>2</sub> mixing ratio in the boundary layer[J]. *Applied Optics*, 2006, **45**(18): 4448–4458.
- [5] Porcheron F, Gibert A, Jacquin M, *et al.* High Throughput Screening of amine thermodynamic properties applied to post-combustion CO<sub>2</sub> capture process evaluation[J]. *Energy Procedia*, 2011, **4**(1): 15–22.
- [6] Gibert F, Edouard D, Cenac C, *et al.* 2- $\mu$ m Ho emitter-based coherent DIAL for CO<sub>2</sub> profiling in the atmosphere[J]. *Optics Letters*, 2015, **40**(13): 3093–3096.
- [7] Sakaizawa D, Nagasawa C, Nagai T, *et al.* Development of a 1.6 microm 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.
- [8] Shibata Y, Nagasawa C, Abo M. Development of 1.6  $\mu$ m DIAL using an OPG/OPA transmitter for measuring atmospheric CO<sub>2</sub> concentration profiles[J]. *Applied Optics*, 2017, **56**(4): 1194–1201.
- [9] Amediek A, Fix A, Wirth M, *et al.* Development of an OPO system at 1.57  $\mu$ m for integrated path DIAL measurement of atmospheric carbon dioxide[J]. *Applied Physics B*, 2008, **92**(2): 295–302.
- [10] 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.
- [11] Singh U N, Yu J R, Petros M, *et al.* Development of a pulsed 2-micron integrated path differential absorption lidar for CO<sub>2</sub> measurement[J]. *Proceedings of SPIE*, 2013, **8872**: 887209.
- [12] Singh U N, Yu J R, Petros M, *et al.* Airborne 2-micron double-pulsed integrated path differential absorption lidar for column CO<sub>2</sub> measurement[J]. *Proceedings of SPIE*, 2014, **9246**: 924602.
- [13] Sakaizawa D, Kawakami S, Nakajima M, *et al.* Ground-based demonstration of a CO<sub>2</sub> remote sensor using a 1.57  $\mu$ m differential laser absorption spectrometer with direct detection[J]. *Journal of Applied Remote Sensing*, 2010, **4**(1): 043548.
- [14] Lin B, Ismail S, Harrison F W, *et al.* Modeling of intensity-modulated continuous-wave laser absorption spectrometer systems for atmospheric CO<sub>2</sub> column measurements[J]. *Applied Optics*, 2013, **52**(29): 7062–7077.
- [15] Campbell J F, Lin B, Nehrir A R. Advanced sine wave modulation of continuous wave laser system for atmospheric CO<sub>2</sub> differential absorption measurements[J]. *Applied Optics*, 2014, **53**(5): 816–829.
- [16] Aiuppa A, Fiorani L, Santoro S, *et al.* New advances in dial-lidar-based remote sensing of the volcanic CO<sub>2</sub> flux[J]. *Frontiers in Earth Science*, 2017, **5**: 15.
- [17] Michalak A, Miller C, Briwell E, *et al.* ASCENDS—active sensing of CO<sub>2</sub> emissions over nights, days, and seasons (ASCENDS) mission[R]. Technical report. Michigan: University of Michigan in Ann Arbor, 2008.
- [18] Abshire J B, Riris H, Allan G R, *et al.* pulsed airborne Lidar measurements of atmospheric CO<sub>2</sub> column absorption[J]. *Tellus B*, 2010, **62**(5): 770–783.
- [19] Abshire J B, Riris H, Weaver C J, *et al.* Airborne measurements of CO<sub>2</sub> column absorption and range using a pulsed direct-detection integrated path differential absorption lidar[J]. *Applied Optics*, 2013, **52**(19): 4446–4461.
- [20] Ingmann P, Bensi P, Duran Y, *et al.* A-scope—advanced space carbon and climate observation of planet earth[R]. ESA Report for Assessment, SP-1313/1. ESA, 2008.
- [21] Numata K, Chen J R, Wu S T, *et al.* Frequency stabilization of distributed-feedback laser diodes at 1572 nm for lidar measurements of atmospheric carbon dioxide[J]. *Applied Optics*, 2011, **50**(7): 1047–1054.
- [22] Koch G J, Dharamsi A N, Fitzgread C M, *et al.* Frequency stabilization of a Ho:Tm:YLF laser to absorption lines of carbon dioxide[J]. *Applied Optics*, 2000, **39**(21): 3664–3669.
- [23] Ambrico P F, Amodeo A, Di Girolamo P, *et al.* Sensitivity analysis of differential absorption lidar measurements in the mid-infrared region[J]. *Applied Optics*, 2000, **39**(36): 6847–6865.
- [24] Esquivias I, Consoli A, Krakowski M, *et al.* High-brightness all semiconductor laser at 1.57  $\mu$ m for space-borne lidar measurements of atmospheric carbon dioxide: device design and analysis of requirements[J]. *Proceedings of SPIE*, 2014, **9135**: 913516.
- [25] Refaat T F, Singh U N, Yu J R, *et al.* Double-pulse 2- $\mu$ m integrated path differential absorption lidar airborne validation for atmospheric carbon dioxide measurement[J]. *Applied Optics*, 2016, **55**(15): 4232–4246.
- [26] Wagner G A, Plusquellic D F. Ground-based, integrated path differential absorption LIDAR measurement of CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, and H<sub>2</sub>O near 1.6  $\mu$ m[J]. *Applied Optics*, 2016, **55**(23): 6292–6310.
- [27] Yu J R, Petros M, Singh U N, *et al.* An airborne 2- $\mu$ m double-pulsed direct-detection lidar instrument for atmospheric CO<sub>2</sub> column measurements[J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2017, **34**(2): 385–400.
- [28] Reffaat T F, Singh U N, Yu J R, *et al.* Evaluation of an airborne triple-pulsed 2  $\mu$ m IPDA lidar for simultaneous and independent atmospheric water vapor and carbon dioxide measurements[J]. *Applied Optics*, 2015, **54**(6): 1387–1398.

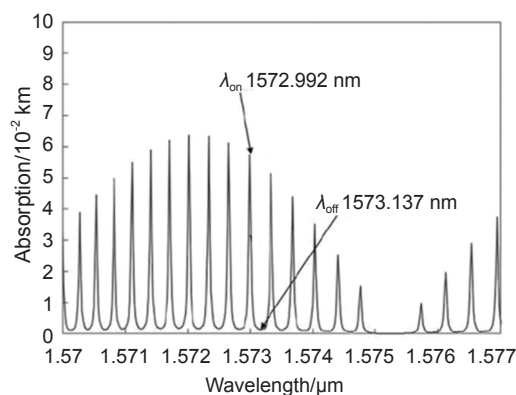
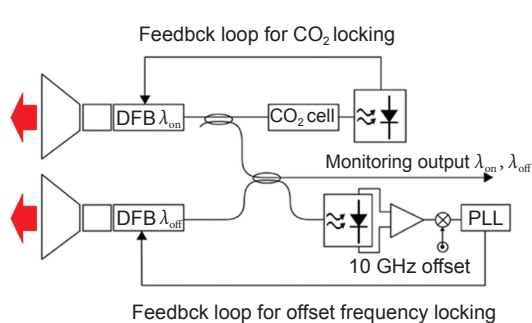
# Review of measurement for atmospheric CO<sub>2</sub> differential absorption lidar

Hong Guanglie<sup>1</sup>, Zhang Huaping<sup>2</sup>, Liu Hao<sup>1\*</sup>, Hu Yihua<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Key Laboratory of Space Active Opto-Electronics Technology, Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China;

<sup>2</sup>University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

<sup>3</sup>The Key Laboratory Pulse Power Laser Technology of China, Hefei, Anhui 230037, China



Block scheme of the proposed frequency stabilization unit. PLL: phase lock loop; DFB: distribute feedback diode laser

**Overview:** Accurate measurements of tropospheric CO<sub>2</sub> mixing ratios are needed to study CO<sub>2</sub> emissions and CO<sub>2</sub> exchange with the land and oceans. 1.6 μm transmitter is based on an injection-seeded KTP optical parametric oscillator. Accurate control of the OPO cavity length ensures powerful single-mode narrow-band pulsed signal radiation out. Combined PMT photon counting technique, this DIAL can profile CO<sub>2</sub> through the planetary boundary layer (PBL) and into the free troposphere. A double-pulse 2.05 μm high-energy Ho:Tm:YLF laser, tuned to on- and off-line CO<sub>2</sub> absorption wavelengths, has been developed. Transmitter operation and performance have been verified on ground and airborne platform. This instrument has the potential to enhance both spatial and temporal resolution for CO<sub>2</sub> global measurement during day and night. The IPDA lidar relies on the measurement of the laser echoes reflected by hard targets as the ground or the top of the vegetation to measure atmospheric CO<sub>2</sub> column concentration. The system can take advantage of a less power demanding semiconductor laser in intensity modulated continuous wave operation, benefiting from a better efficiency, reliability and radiation hardness. Such a time-gated technique is a promising way to overcome the sources of systematic errors inherent to passive missions. Coherent detection instruments are generally limited by speckle noise, while direct detection instruments suffer from high detector noise using current technology. The ASCENDS mission will be the first laser spectroscopy from space with the objective to profile CO<sub>2</sub> column integrals for climate emissions. The approach uses two tunable pulsed laser transmitters allowing simultaneous measurement of the absorption from a CO<sub>2</sub> absorption line in the 1572 nm band, O<sub>2</sub> absorption in the oxygen A-band, and surface height and atmospheric backscatter in the same path. To scale for space, It is needed to increase the energy per pulse in each of these wavelengths (1.53 μm and 1.57 μm) to appropriate levels. These are for a 500 km orbit, a 1.5 m diameter telescope and a 10 second integration time, which allows a 70 km along track integration in low earth orbit. HgCdTe APD detector photon counting technique and Si APD photon counting technique will be developed. The on-channel MOPA will be locked to the selected CO<sub>2</sub> absorption line using a multi pass CO<sub>2</sub> reference cell and a feedback loop based on the Pound-Drver-Hall detector used to generate a low noise error signal, or the lock-in regulator accomplishing top-of-fringe frequency stabilization laser frequency locking equipment. A second feedback loop will be used to stabilize the beat note of the on- and off- channel signal at a fixed 10 GHz offset.

**Citation:** Hong G L, Zhang H P, Liu H, *et al.* Review of measurement for atmospheric CO<sub>2</sub> differential absorption lidar[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2018, 45 (1): 170452

Supported by the National Key R&D Program of China (2017YFB0504000)

\*E-mail: 06272071@bjtu.edu.cn