

# 沙氏大气激光雷达技术及其研究进展

梅亮\*

大连理工大学光电工程与仪器科学学院, 辽宁 大连 116024

**摘要** 沙氏大气激光雷达技术是近几年来发展起来的一种新型大气激光雷达技术。该技术以高功率连续波二极管激光器作为光源,图像传感器作为探测器,在满足沙氏成像原理的条件下实现了对大气回波信号的距离分辨探测。介绍了沙氏大气激光雷达技术的基本原理、技术特点、系统结构及大气回波信号处理的一般方法。总结了近年来沙氏大气激光雷达技术在大气气溶胶及大气气体浓度分布探测等方面的研究进展,并分析了当前面临的主要挑战。最后对下一步研究工作及未来发展进行了展望。

**关键词** 大气光学;激光雷达;气溶胶探测;差分吸收激光雷达;遥感和传感器;二极管激光器;图像传感器

中图分类号 TN958.98

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP55.090004

## Atmospheric Scheimpflug Lidar Technique and Its Progress

Mei Liang\*

School of Optoelectronic Engineering and Instrumentation Science, Dalian University of Technology,  
Dalian, Liaoning 116024, China

**Abstract** The Scheimpflug lidar (SLidar) technique has been recently developed for atmospheric remote sensing. By utilizing high-power continuous-wave laser diodes as laser sources and area image sensors as detectors, the SLidar technique can measure range-resolved atmospheric backscattering signal when the optical layout satisfies the Scheimpflug principle. This paper presents the principle, features, system architecture as well as the signal processing methods of the SLidar technique. The developments and applications of the SLidar technique in atmospheric aerosol sensing and gas monitoring are summarized in detail. The challenges of the SLidar technique are also discussed. Finally, the future work and the outlook of the SLidar technique are presented.

**Key words** atmospheric optics; lidar; aerosol detection; differential absorption lidar; remote sensing and sensors; laser diode; image sensor

**OCIS codes** 010.3640; 010.1100; 280.1910; 010.0280

## 1 引言

大气是人类生存的重要环境之一,大气气溶胶在地球-大气辐射收支平衡、全球气候变化以及大气灰霾形成与演变过程中扮演着重要角色。大气激光雷达(Lidar)是一种主动式光学遥感探测技术,可探测气溶胶消光系数、后向散射系数、退偏振比及粒径特性、大气温湿度、大气气体浓度等参数的时空分布。这些大气参数对大气化学、大气辐射、大气污染监测、天气预报以及气候模式研究具有重要意义。大气激光雷达技术在高度/空间分辨率、探测灵敏

度、抗干扰能力以及实时监测等方面具有独特的优势,已经成为大气气溶胶、温度、风速、温室及污染气体探测中必不可少的重要工具之一<sup>[1-2]</sup>。

中科院安徽光学精密机械研究所<sup>[3-5]</sup>、中国海洋大学<sup>[6]</sup>、西安理工大学<sup>[7-8]</sup>、希腊雅典理工大学<sup>[9]</sup>、美国航空航天局(NASA)Langley研究中心<sup>[10]</sup>、德国莱布尼茨对流层研究所<sup>[11]</sup>等国内外诸多研究机构和大学都开展了米散射、拉曼以及高光谱分辨率气溶胶探测激光雷达技术的研究工作。脉冲式激光雷达系统向大气中发射纳秒量级的光脉冲,使用大口径望远镜系统收集光脉冲的后向散射信号,并利用

收稿日期:2018-03-15;修回日期:2018-04-13;录用日期:2018-04-16

基金项目:国家重点研发计划(2016YFC0200600)、国家自然科学基金(61705030)、辽宁省自然科学基金(201602163)

\*E-mail: meiliang@dlut.edu.cn

光电倍增管(PMT)或雪崩光电二极管(APD)来检测微弱的后向散射信号。为了增大测量的动态范围以同时测量远、近距离的后向散射信号,通常需要联合高速模拟采样和单光子计数技术。经过近二三十年的迅速发展,脉冲式米散射气溶胶激光雷达技术已较为成熟,应用也最为广泛,美国 Sigma Space、希腊 Raymetrics、无锡中科光电等公司均研制出脉冲式米散射气溶胶激光雷达的商业化产品。针对较为复杂的拉曼以及高光谱气溶胶激光雷达技术主要是国内外学术机构在从事相关的研究工作。自 20 世纪 90 年代以来,美国、日本、中国等国家的研究学者提出了一种双基成像雷达技术(CLidar)<sup>[12-14]</sup>。虽然 CLidar 探测盲区小,但是一方面该技术接收和发射系统距离远(10~100 m 量级),另一方面,接收望远镜口径小而导致信号弱,宽视场导致难以应用窄带干涉滤光片,因此在利用大功率 Nd:YAG 激光器的情况下也主要是在夜间测量大气颗粒物,研究进展相对缓慢。近年来,地基激光雷达网络和机载/星载气溶胶激光雷达监测的需求日益增加,对气溶胶激光雷达系统的结构和成本提出了更高的要求,进一步提高其性能指标、稳定性、自动化水平,降低系统成本,简化系统结构等依然是未来的重要发展方向<sup>[15]</sup>。

在大气气体探测方面,自 20 世纪以来,美国 NASA<sup>[16]</sup>、德国柏林自由大学<sup>[17]</sup>、日本中央电力研究所<sup>[18]</sup>、瑞典隆德大学<sup>[19-20]</sup>、中科院安徽光学精密机械研究所<sup>[21-22]</sup>、武汉大学<sup>[23]</sup>、中科院上海技术物理研究所<sup>[24]</sup>等机构都开展了基于差分吸收激光雷达(DIAL)技术的大气污染及温室气体的探测研究,如 SO<sub>2</sub>、NO<sub>x</sub>、O<sub>3</sub>、Hg、NH<sub>3</sub>、SF<sub>6</sub>、CO<sub>2</sub>、H<sub>2</sub>O 等气体。利用 DIAL 技术探测大气气体含量时,需要高脉冲能量、窄线宽、可调谐且稳定性好的纳秒量级(10~100 ns)脉冲光源,并且激光工作波长要与待测气体吸收峰匹配。正是 DIAL 技术对光源的高要求,使得研制高灵敏度、可长时间稳定运行的 DIAL 系统成为该领域的主要难题,因此该领域的工作主要停留在学术研究层面。目前只有希腊 Raymetrics、德国 Elight 等少数公司研发了针对 SO<sub>2</sub>、O<sub>3</sub> 的 DIAL 系统应用于大气污染测量,而且系统结构复杂,价格不菲。

总体而言,脉冲式大气激光雷达技术在硬件设计、软件及理论算法分析等方面的研究已取得阶段性成果,但其系统的设计和维护成本却居高不下,限制了其在大气环境探测领域的大规模推广和应用。

究其原因,主要有两方面:1) 需要的高性能纳秒量级脉冲光源如 Nd:YAG 激光器等,不仅成本高而且维护费用不菲,应用于 DIAL 技术的激光光源尤为复杂;2) 由于激光雷达信号与距离的平方成反比,系统对动态范围的要求非常高,不仅需要高灵敏度探测器如 PMT 等,而且需要高速模拟采样以及单光子计数技术等复杂的信号采样技术。2014 年,瑞典隆德大学课题组将沙氏成像原理应用于大气探测,提出了沙氏大气激光雷达(SLidar)技术<sup>[25-26]</sup>。SLidar 技术以连续波作为发射光源(如连续波高功率二极管激光器),利用倾斜的 CCD/CMOS 图像传感器在满足沙氏成像原理的条件下探测大气后向散射光,以角度分辨的方式获得距离分辨的大气后向散射信号,成功实现了距离分辨的大气后向散射信号探测。近几年来,SLidar 技术相关的研究工作方兴未艾,展示了其在大气环境探测方面的巨大应用潜力,成为传统脉冲式大气激光雷达技术的有力补充。本文重点介绍了 SLidar 技术的基本原理和特点,激光雷达信号处理及激光雷达方程求解的基本方法,并总结了近年来的研究进展,最后对 SLidar 技术的未来发展及其在大气环境监测等方面的应用进行了展望。

## 2 沙氏大气激光雷达技术

### 2.1 基本原理

SLidar 技术立足于沙氏成像原理,如图 1 所示。其基本要点如下:对一个成像系统而言,当成像系统的物面与透镜不平行时,只要像面、物面及透镜所在平面三者相交于一条直线,依然可以对物面成清晰的像,并且成像系统将具备无穷远景深。Scheimpflug 原理的优点在于使用大口径的望远镜/透镜系统的同时具备理论上无穷远的景深,从而可以对大范围内的物体成清晰的像,这一点对于测量微弱大气后向散射信号的激光雷达技术而言是至关重要的。实际上,沙氏成像原理最早由法国工程师 Jules Carpentier 于 1901 年首次提出并申请专利。1904 年,澳大利亚军官 Theodor Scheimpflug(沙氏)研究从热气球上进行对地观测成像时再次对该课题进行了深入研究并申请了专利。同时,沙氏提出平行于像面并且穿过透镜光学中心的平面、透镜的前焦平面以及物面三者也相交于一条直线,该规则又被称为合页规则。此后,描述成像系统在物面与透镜不平行情况下清晰成像的规则称为沙氏成像原理。近年来,沙氏成像原理已广泛应用于人眼角膜成像<sup>[27-28]</sup>、距离测量<sup>[29-30]</sup>等领域。

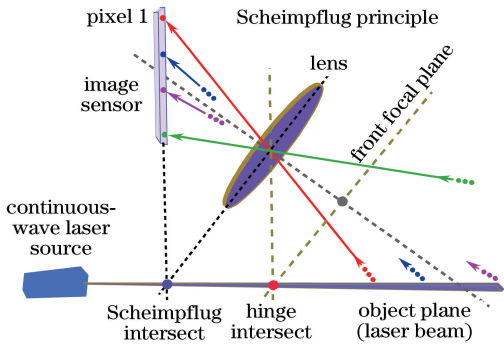


图1 沙氏成像原理示意图(该成像系统可对不同距离上的激光光束清晰成像,具备无穷远景深)

Fig. 1 Optical layout of the Scheimpflug imaging principle (the laser beam that is transmitted into atmosphere can be clearly focused on the image sensor, while infinite depth of focus can be achieved)

利用沙氏成像原理开展大气激光雷达探测研究时,可向大气中发射连续波,然后由望远镜系统收集后向散射信号并由图像传感器进行探测。在满足沙氏成像原理的条件下,成像系统可在使用大口径光

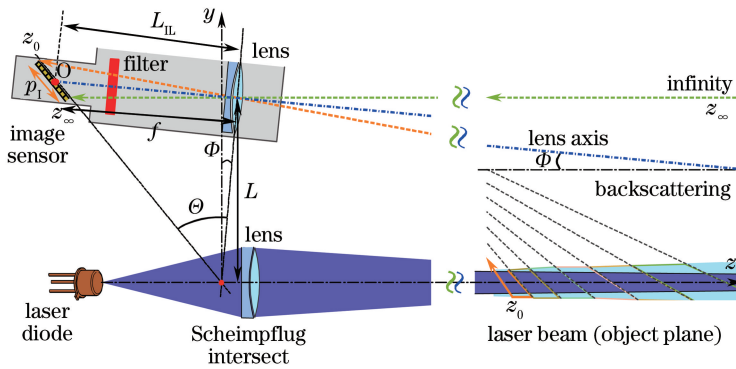


图2 SLidar原理示意图( $f$ 为接收望远镜的焦距, $O$ 为图像传感器的参考原点)

Fig. 2 Principle schematic of the SLidar technique ( $f$  is the focal length of the receiving telescope,  $O$  is the referenced origin of image sensor)

由(2)式不难看出,激光雷达系统的距离分辨率随着测量距离的平方而增加。如图3所示,SLidar系统的近距离分辨率非常高(厘米量级),而远距离分辨率则低于传统脉冲式大气激光雷达技术的7.5 m。虽然SLidar技术的发射和接收端分离,但是距离较近,探测的后向散射信号的散射角均接近 $180^\circ$ 。因此,SLidar技术的大气激光雷达方程和传统离轴脉冲式激光雷达系统的激光雷达方程类似,不需要考虑后向散射信号的相位函数问题。结合距离分辨率与探测距离之间的比值关系[(2)式],SLidar技术的大气激光雷达方程可表示为

$$P(\lambda, z) = KP_0(\lambda)O(r)\beta(\lambda, z) \times$$

学元件(如透镜、抛物面反射镜等)的条件下实现理论上的无穷远景深。基于这一点,沙氏大气激光雷达实现了从近距离到远距离的大气后向散射信号的清晰成像和探测,这是常规大口径成像系统难以实现的。根据几何光学基本原理,可以推导得到SLidar系统图像传感器像素与距离的关系为

$$z = \frac{L [p_1(\sin \Theta - \cos \Theta \tan \Phi) + L_{IL}]}{p_1(\cos \Theta + \sin \Theta \tan \Phi) + L_{IL} \tan \Phi}, \quad (1)$$

式中: $\Theta$ 是像面相对于成像透镜的倾角; $\Phi$ 是接收望远镜的观测角(也称为摆角); $L$ 是接收望远镜与发射望远镜光轴之间的间隔, $L_{IL} = L \tan \Theta$ ;  $p_1$ 描述每个像素单元在成像平面上的位置,可表示为  $p_1 = (N_p/2 - n_p)\omega_p$ ,其中  $N_p$  是总像素个数,  $n_p$  表示每个像素元的索引,  $\omega_p$  是像素大小。具体参数如图2所示。如果对(1)式进行微分,可以计算距离分辨率随探测距离的变化:

$$dz = \frac{z^2 \sin \Theta (-1 - \tan^2 \Phi)}{[p_1(\sin \Theta - \cos \Theta \tan \Phi) + L_{IL}]^2} dp_1. \quad (2)$$

式中: $\lambda$ 是波长; $z$ 是测量距离; $P_0(\lambda)$ 是激光器的输出功率; $K$ 是系统常数; $O(r)$ 是几何重叠因子(在SLidar系统中,使用面阵图像传感器时通常为1); $\beta(\lambda, z)$ 是大气的后向散射系数; $\alpha(\lambda, z)$ 是大气消光系数; $P(\lambda, z)$ 是SLidar系统探测到的距离分辨的大气后向散射信号。从(3)式可以看出,SLidar的激光雷达信号不随距离的平方衰减。因此,虽然SLidar系统的远距离分辨率有所下降,但是远距离信号的信噪比不随距离的平方衰减,不需要运用单光子计数技术即可探测数千米远的大气后向散射信号。根据SLidar技术激光雷达方程的特点,并结合

Klett-Fernald 反演算法,可求解大气的后向散射系数或消光系数,以及能见度等大气参数。由图 2 不难看出,SLidar 技术对大气回波信号的距离分辨能力不仅与接收望远镜焦距、图像传感器大小等因素有关,还与发射到大气中的激光光束在光学布局所

在平面(纸面)上的尺寸有关。光束尺寸越大,将会使激光雷达信号在距离上被平均,从而降低了 SLidar 技术的有效距离分辨力。因此,对于 SLidar 技术而言,激光光束在光学布局平面上的光束大小和发散角都应该尽可能小<sup>[31]</sup>。

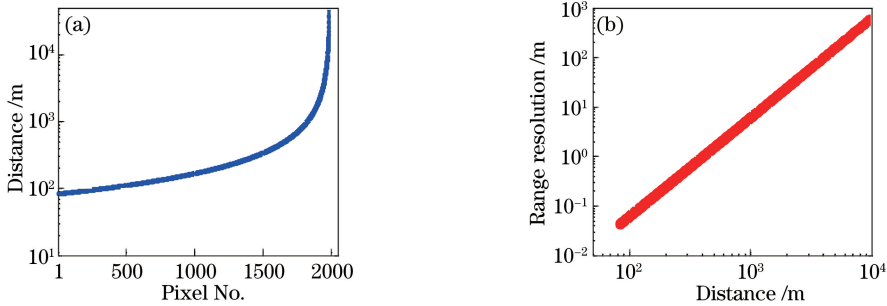


图 3 (a)  $\Phi=0.266^\circ$  时图像传感器像素与测量距离之间的关系(系统参数:接收透镜/望远镜焦距 800 mm,像素大小  $5.5 \mu\text{m}$ ,像素数  $2048 \times 1024$ , $\Theta=45^\circ$ , $L=806$  mm);(b)距离分辨率与测量距离之间的关系

Fig. 3 (a) Relationship between the pixel and the measurement distance when  $\Phi=0.266^\circ$  (system parameters:  $f=800$  mm, pixel width  $5.5 \mu\text{m}$ , pixel number  $2048 \times 1024$ ,  $\Theta=45^\circ$ ,  $L=806$  mm); (b) relationship between the range resolution and the measurement distance

## 2.2 SLidar 技术的特点

SLidar 技术以沙氏成像原理为基础,结合先进的半导体激光器技术和图像传感器技术,实现大气后向散射信号的距离分辨探测,具备与传统脉冲式大气激光雷达技术不同的特点,从三个方面来探讨。

首先,从光源角度,SLidar 技术可以使用大功率、连续波二极管激光器。二极管激光器不仅成本低、尺寸小,而且在稳定性上优于传统脉冲式激光雷达系统使用的 Nd:YAG 激光器等。实际上,高功率二极管激光器在很多场合已经取代闪光灯用于抽运 Nd:YAG 激光器<sup>[32-33]</sup>。因此,SLidar 技术解决了传统脉冲式激光雷达技术由于需要使用高性能纳秒量级脉冲光源而导致的系统结构复杂、成本居高不下、维护成本高的难题。另外,二极管激光器光谱可选择范围大,因此 SLidar 技术具备丰富的光谱资源,对探测气溶胶粒子谱具有很大的应用潜力。SLidar 技术的探测波长将不再局限于 Nd:YAG 激光器的三种输出波长(1064, 532, 355 nm),这一点对当前气溶胶粒子谱分布研究具有特殊意义。

其次,从激光雷达系统光学结构角度来看,虽然 SLidar 技术的发射和接收端分离,但是距离较近( $\approx 1$  m),因此依然属于单基激光雷达系统,在探测距离范围内一般不需要对后向散射信号的相位函数进行特殊处理。此外,由于满足沙氏成像原理,对大范围内的物体清晰成像的同时还可采用大口径的望远镜系统(如 200 mm),因而极大地提升了激光雷

达信号的信噪比。

最后,从光电检测角度,由于 SLidar 技术激光雷达回波信号不随距离的平方衰减,极大地降低了系统对测量动态范围的要求。采用的图像传感器结构紧凑、性价比高,相比于脉冲式激光雷达系统中采用的 PMT 及其附属的高速采样设备和单光子计数技术等具有显著的技术、结构、成本优势。此外,利用面阵图像传感器(长度约 11 mm),SLidar 技术可探测到近距离大气回波信号,极大地缩短了近场探测盲区( $< 100$  m)<sup>[31]</sup>,有效解决了传统脉冲式大气激光雷达技术近距离探测盲区大的问题<sup>[34-38]</sup>。

SLidar 技术在光源和光电检测方面的独特优势,使其系统结构紧凑,成本约为传统脉冲式激光雷达系统的 10%~20%,这对大气激光雷达技术的广泛应用及地基激光雷达网络建设等具有重要意义。在发展多波长大气激光雷达技术方面,SLidar 技术在系统集成、波长选择范围等方面具有诸多的技术优势。

## 2.3 SLidar 实验系统及大气激光雷达信号探测方法

典型的 SLidar 系统结构如图 4 所示。高功率二极管激光器安装在具备半导体制冷及加热功能的机械安装结构件内。通过精确控制二极管激光器芯片的温度和电流,可以调节二极管激光器的工作波长。安装好的二极管激光器接入折射式天文望远镜中,激光经主透镜准直后发射到大气中。为了减小

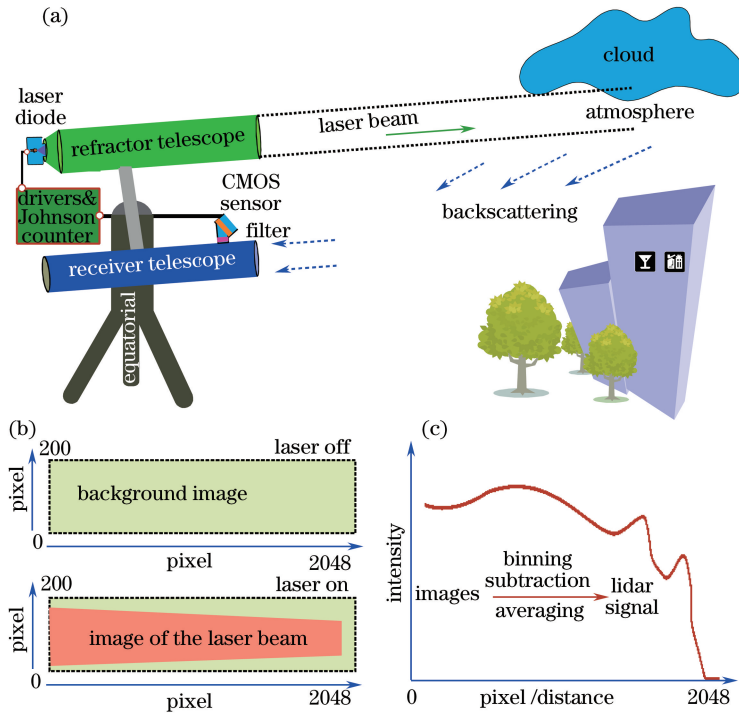


图 4 (a) SLidar 系统原理及大气实验测量示意图(CMOS 图像传感器倾斜  $45^\circ$  放置以满足沙氏成像原理);(b) 二极管激光器开和关时图像传感器记录的图像信号示意图;(c) SLidar 技术探测到的典型激光雷达信号

Fig. 4 (a) System schematic and measurement diagram of the Scheimpflug lidar system (the CMOS sensor is tilted by  $45^\circ$  to satisfy the Scheimpflug principle); (b) images in the region of interest of the image sensor, recorded when the laser diode is turned off and on, respectively; (c) the lidar signal is retrieved by vertically binning the recorded images, subtracting the background signal and performing signal averaging

表 1 典型 SLidar 系统参数

Table 1 Specifications of typical SLidar system

Component	Model	Specifications
Laser source	Continuous-wave high power multi-mode laser diodes	Wavelength: 407, 450, 520, 638, 808, 850, 1064 nm; output power: 1-5 W
Collimator	Tianlang, F6 refractor	Focal length: 600 mm; diameter: 100 mm
Receiver	Skywatcher, CFP200	Focal length: 800 mm; diameter: 200 mm
Detector	CMOS, CMV2000 Lumenera, Lt225NIR	Tilt angle: $45^\circ$ ; area: 2048 pixel $\times$ 1024 pixel; frame rate: 170 frame/s; bit depth: 12/8 bit; exposure time: 20-500 ms
Filters	Interference filters	1.7-10 nm (full width at half-maximum)
Transmitter-receiver separation		$\sim 806$ mm

光束的发散角,同时优化二极管激光器光束通过透镜的几何透过率,一般选取焦距为 600 mm、口径为 100 mm 的折射式望远镜(焦比 F6)。发射到大气中的激光光束将会被大气颗粒物及分子吸收和散射。其中,后向散射信号由牛顿反射式望远镜(焦距 800 mm,口径 200 mm)收集,经窄带滤光片滤去背景光后最终成像到图像传感器上。图像传感器相对于牛顿望远镜光轴的倾角一般设计为  $45^\circ$ 。在保证发射系统和接收系统的光轴间隔约为 806 mm 的条

件下,SLidar 系统的光学结构可以满足沙氏成像原理。通过调节激光发射端的角度使得激光光束位于接收望远镜的视场中心,从而实现从近距离到远距离的大范围内清晰成像。由于激光发射端与接收望远镜之间的夹角非常小( $\Phi \approx 0.27^\circ$ ),难以直接测量,因此一般通过测量远距离固定物体(如楼顶等)的回波信号在图像传感器上的位置来校准像素和距离之间的关系。SLidar 系统的典型参数如表 1 所示。

进行大气测量时,为了排除太阳背景信号对激

光雷达回波信号的影响,不仅需要使用窄带的干涉滤光片抑制背景信号的强度,还需要对二极管激光器的发射光强进行开-关调制。由图像传感器产生的曝光时钟信号触发约翰逊计数器产生调制方波信号,该方波信号触发二极管激光器驱动电路板产生方波电流,从而实现了对二极管激光器发射光强的方波调制。由于二极管激光器的开-关调制与图像传感器的曝光同步,图像传感器可分别采集大气背景信号的图像以及包含后向散射信号的图像,如图 4 (b)所示。以获取的图像信号为基础,SLidar 技术的大气激光雷达信号处理一般遵循如下步骤。

1) 对采集到的图像在纵向进行累加,分别得到大气背景信号的曲线以及包含有效激光雷达信号的曲线。为进一步剔除强背景信号对激光雷达信号的影响,扣除背景信号时一般采用线性插值的方式。将在某一时刻背景信号前后测量得到的有效信号进行加权平均之后再减去该时刻的背景信号<sup>[31]</sup>,从而获得单次测量的大气激光雷达信号。

2) 为了改善信噪比,SLidar 技术采用中值平均的方式对多次测量得到的大气激光雷达信号进行平均,最终得到某一时间段内的激光雷达信号,如图 4 (c)所示。相比于传统脉冲式大气激光雷达技术中广泛使用的数学平均而言,中值平均可以在实现类似的信噪比改善效果的同时剔除大气测量过程中的异常值,比如鸟类或者昆虫飞过激光光束时产生的强反射信号。需要特别指出的是,由于 SLidar 技术单次测量的时间尺度(20~500 ms)远大于传统脉冲式激光雷达技术的时间尺度(微秒量级),因此 SLidar 技术探测到鸟类或昆虫的概率远大于脉冲式大气激光雷达技术。这也是 SLidar 技术可以被应用于昆虫迁飞行为探测的重要原因之一<sup>[39-40]</sup>。

3) 分析信号平均之后的激光雷达信号发现,在白天太阳背景辐射非常强的条件下激光雷达信号主要受太阳背景噪声影响,而在夜间测量时主要受图像传感器的光子响应不均匀性(PRUNU)噪声影响<sup>[41]</sup>。信号处理时可利用 Savitzky-Golay(S-G)滤波器或低通滤波器等对激光雷达信号进行降噪处理。S-G 滤波器可有效滤除大气的背景噪声以及图像传感器的 PRNU 噪声,将信噪比提升 3 倍以上<sup>[42]</sup>。

4) 如图 3 所示,SLidar 技术的近距离分辨率非常高,可达到厘米量级。进行实际大气测量时,一般不需要如此高的距离分辨率。因此,将像素信息转换为测量距离之后还可以对近距离的大气激光雷达信号进行重采样。定义像素变量为  $n_p$ ,重采样之后的距离为  $z_R$ ,激光雷达信号强度为  $P(z_R)$ ,重采样后的距离和激光雷达信号可分别表示为

$$z_R = \sum_{n_p=n_{low}}^{n_{upp}} z(n_p) n_p / \sum_{n_p=n_{low}}^{n_{upp}} n_p, \quad (4)$$

$$P(z_R) = \sum_{n_p=n_{low}}^{n_{upp}} P(n_p) n_p / \sum_{n_p=n_{low}}^{n_{upp}} n_p, \quad (5)$$

式中:像素区间  $[n_{low}, n_{upp}]$  表示在距离  $[z(n_{low}), z(n_{upp})]$  范围内进行重采样。预先设置重采样之后的目标距离分辨率  $z_{Res}$  的值,对激光雷达信号进行逆向搜索(从远距离到近距离),在每一段距离间隔约为  $z_{Res}$  的信号范围内对原始激光雷达信号进行重采样<sup>[41]</sup>。经过重采样后的距离分辨率与测量距离之间的关系如图 5 所示,其中设置的目标距离分辨率  $z_{Res}=3$  m。由于 SLidar 技术的像素-距离关系是非线性的,因此重采样后的近距离分辨率并非恒等于 3 m,而是有所波动。经过重采样后,不仅近距离信号的信噪比可以提升 1~3 倍,同时可将数据量压缩到 1/4 左右,极大地减轻了后期大气参数反演的负担。

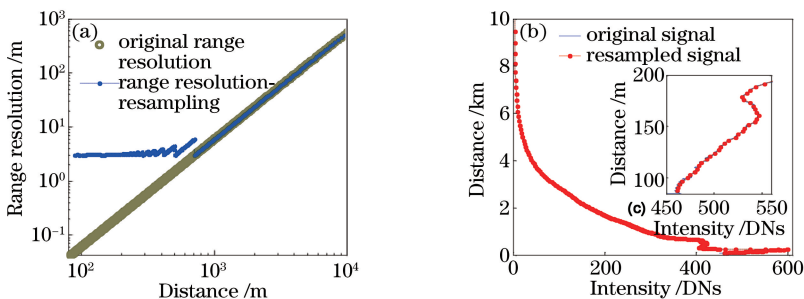


图 5 (a)重采样后的距离分辨率与测量距离之间的关系[重采样仅针对距离分辨率高于 3 m 的近距离信号处理( $<700$  m)];(b)重采样前后的大气激光雷达信号

Fig. 5 (a) Relationship between the range resolution and the measurement distance after signal resampling (the signal resampling is performed only in the close range ( $<700$  m) where the range resolution is beyond 3 m);

(b) atmospheric lidar signal before and after signal resampling

### 3 研究进展

#### 3.1 大气气溶胶探测

2015年,瑞典隆德大学联合挪威纳斯克公司最早利用SLidar技术开展了大气气溶胶遥感探测实验研究工作<sup>[31]</sup>。该系统采用808 nm高功率二极管激光器作为光源,并利用半峰全宽为3 nm的窄带干涉滤光片滤除大气背景光,实现了大气回波信号的探测并对SLidar技术的激光雷达方程以及距离分辨率等问题进行了探讨,初步论证了SLidar技术在大气气溶胶探测方面的可行性。2017年,大连理工大学研究小组在此基础上,利用输出功率约为4 W的808 nm二极管激光器和二维CMOS图像传感器(Lumenera, Lt225NIR)搭建了一套808 nm单波长米散射SLidar实验系统,并在近似水平方向上开展了24 h连续实验测量<sup>[43]</sup>。CMOS图像传感器的曝光时间为20 ms,信号平均1000次(约45 s)。激光光束在光学布局平面的发散角约为0.1 mrad。该系统的最近探测距离约为85 m,最远探测距离可达7~10 km。尽管在洁净大气条件下10 km附近仍然能观测到信噪比较好的激光雷达信号(信噪比 $\geq 10$ ),但由于远距离分辨率下降,求解大气消光系数时,边界值的求解一般只针对7 km以内的大气激光雷达信号。根据Klett算法,SLidar技术的大气消光系数可表示为

$$\alpha(z) = \frac{P(z)}{\frac{P(z_m)}{\alpha(z_m)} + 2 \int_z^{z_m} P(z') dz'}, \quad (6)$$

式中: $z_m$ 是边界距离, $\alpha(z_m)$ 是大气消光系数在边界距离上的值。通过斜率法可以求解消光系数的边界值,并最终实现大气消光系数的时空分布反演,如图6所示。由于SLidar技术大气激光雷达信号不随距离的平方衰减,因此信号强度 $P(z)$ 不需要进行距离校准。实验结果表明,在洁净及雾霾天气下,利用SLidar技术测量得到的大气消光系数与传统点式监测站测量得到的PM2.5和PM10浓度之间存在较高的相关性,相关系数达到0.85。同时,SLidar技术测量得到的大气后向散射信号以及消光系数时空分布很好地反映了雾霾产生和消散的过程。即使在中度污染的天气条件下,大气消光系数的反演距离也能达到3~4 km。该项研究工作论证了SLidar技术在大气参数量化探测及应用方面的潜力和前景。

为了进一步拓展SLidar技术的应用方向,大连理工大学开展了808 nm偏振SLidar技术的研究工

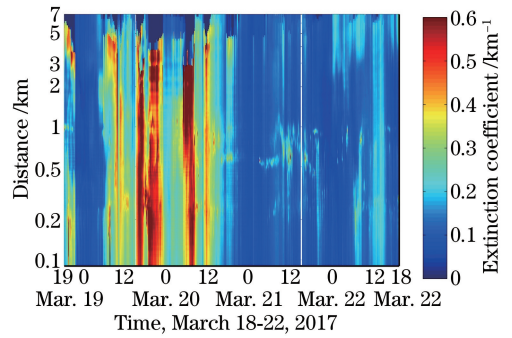


图6 由808 nm SLidar系统测量得到的大气消光系数时空演变图<sup>[43]</sup>

Fig. 6 Time-space map of the atmospheric extinction coefficient measured by a 808-nm SLidar system<sup>[43]</sup>

作<sup>[44]</sup>。不同于传统的脉冲式偏振激光雷达系统采用单光源、双偏振探测器的技术方案,该研究工作采用正交偏振的两个二极管激光器,利用单个图像传感器通过时分复用的方式分别探测水平和垂直偏振的后向散射光信号,系统工作原理如图7所示。二极管激光器1(LD1)的快轴放置于纸面(光学平面或称为沙氏平面),其偏振态和慢轴均垂直于纸面。为了保证两束激光准直后的激光特性一致,二极管激光器2(LD2)的快轴同样放置于纸面。因此,需要使用半波片将LD2的偏振态旋转90°。经由偏振分束器将不同偏振态的激光光束进行整合,最终由准直望远镜(焦比F6)进行准直并发射到大气中。在激光雷达信号探测端,在808 nm干涉滤光片之后放置垂直于纸面的线偏振片,也即偏振态与LD1相同。当LD1工作时,CMOS图像传感器探测的是平行偏振的大气激光雷达信号;当LD2工作时,CMOS图像传感器探测的是垂直偏振的大气激光雷达信号。因此,通过时分复用的方式可实现不同偏振态激光雷达信号的探测。平行和垂直偏振的大气激光雷达信号可分别表示为

$$P_p(z) = P_1 \eta_{p,T} \eta_{R,D} \beta_p(z) \exp \left[ -2 \int_0^z \alpha_p(z') dz' \right], \quad (7)$$

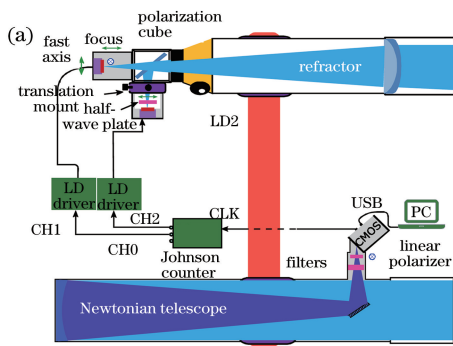
$$P_s(z) = P_2 \eta_{s,T} \eta_{R,D} \beta_s(z) \times \exp \left\{ - \int_0^z [\alpha_s(z') + \alpha_p(z')] dz' \right\}, \quad (8)$$

式中: $z$ 是测量距离; $P_1$ 和 $P_2$ 分别是LD1和LD2的输出功率; $\beta(z)$ 和 $\alpha(z)$ 分别是大气的后向散射以及消光系数; $\eta_T$ 是激光光束经过偏振分束器、透镜等光学元件的透过率; $\eta_{R,D}$ 主要考虑牛顿望远镜和滤光片的透过率以及图像传感器的效率等;下标p和s分别表示平行和垂直偏振。由于CMOS图像

传感器仅探测与线偏振片平行的后向散射光,因此 $\eta_{R,D}$ 对平行和垂直偏振的大气回波信号是相同的。此外,大气颗粒物对不同偏振态的入射光波的消光系数一般相同,即 $\alpha_s(z) = \alpha_p(z)$ 。因此,大气的退偏振比 $\delta(z)$ 可表示为

$$\delta(z) = \frac{P_1 \eta_{p,T} P_s(z)}{P_2 \eta_{s,T} P_p(z)} = k \frac{P_s(z)}{P_p(z)}, \quad (9)$$

式中: $k = P_1 \eta_{p,T} / P_2 \eta_{s,T}$ 是系统偏振相关常数。在不放置线偏振片时分别探测 LD1 和 LD2 的大气后向散射信号,并计算其比值即可得到常数  $k$  的值。图 7 所示为 2017 年 5 月在大连地区进行 24 h 垂直观测时得到的大气退偏振比时空演变图。不



难看出,在距离地面 1 km 附近的大气中出现了低退偏振比的洁净大气层,并且近地层的退偏振比反而小于 500~1000 m 高度。实验研究发现,垂直偏振的大气激光雷达信号的信噪比偏低。尤其是在白天强背景光条件下,信号平均 1.5 min 测量得到的垂直偏振大气回波信号的信噪比仅为 30 左右。尽管 SLidar 技术激光雷达信号信噪比不随距离的平方衰减,但这在一定程度上依然限制了 SLidar 系统在白天的工作性能。利用更高功率的二极管激光器或提升图像传感器的量子效率有望进一步提高偏振 SLidar 系统在白天工作时的信噪比。

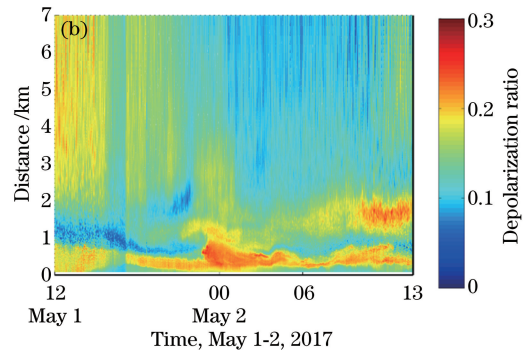


图 7 (a)偏振 SLidar 系统结构原理图;(b)偏振 SLidar 系统垂直测量的大气退偏振比时空分布<sup>[44]</sup>

Fig. 7 (a) System schematic of the polarization Scheimpflug lidar technique; (b) time-space map of the depolarization ratio measured by the polarization SLidar system<sup>[44]</sup>

SLidar 技术的重要特点之一就是其波长可选择性大,从可见光波段到近红外 1550 nm 均有高功率二极管激光器。为了拓展 SLidar 技术的工作波长以及构建多波长 SLidar 实验系统,大连理工大学课题组相继开展了 407,450,520 nm SLidar 系统的实验研究工作<sup>[42]</sup>。407 nm 等蓝绿光二极管激光器以及近红外 808 nm 二极管激光器的发散角及激光芯片发射截面的尺寸如表 2 所示。从表中可以看出,二极管激光器的快轴和慢轴发散角以及尺寸差异较大,除 808 nm 二极管激光器外,快轴的发散角都很大。因此,如果仅利用焦比为 F6 的透镜对激光器进行准直,由于其接收角仅为 $\pm 4.8^\circ$ ,蓝绿光二极管激光器发射光束将会被透镜截止,导致激光光束的几何透过率非常低( $\approx 25\%$ ),降低了激光雷达信号的信噪比。如果单纯减小透镜的焦比,比如增大透镜口径或减小焦距,则会导致发射光束的发散角增大,远距离光斑尺寸变大,从而降低 SLidar 系统的有效距离分辨率。根据蓝绿光激光器慢轴尺寸较小的特点,大连理工大学课题组提出利用柱透镜单独对二极管激光器的快轴进行准直,并将二极管

激光器的慢轴放置于沙氏成像平面<sup>[45]</sup>,从而在有效提高发射光束耦合效率的同时不影响 SLidar 系统对大气回波信号的距离分辨能力。如图 8 所示,二极管激光器发射的光束先经由凸柱透镜(接收角 $\pm 19^\circ$ )进行准直,再由凹柱透镜发散成虚像。此时,激光光束快轴的发散角( $\approx \pm 4.6^\circ$ )与焦比为 F6 的透镜的接收角匹配,从而可将大部分光发射到大气中。实验研究表明,通过这种方式,激光光束的输出耦合效率提高了 3 倍以上,达到 70%~80%,极大地提高了蓝绿光波段内 SLidar 系统大气回波信号的信噪比。大连理工大学课题组成功论证了该技术的可行性,并利用 407,450,520 nm 的 SLidar 系统开展了大气实验测量工作。实验测量得到的大气回波信号如图 9 所示。

2017 年,采用双干涉滤光片(10 nm 和 1.7 nm 半峰全宽),输出功率为 1 W 的 407 nm 二极管激光器搭建了 407 nm 的 SLidar 系统,大连理工大学成功实现了 6 天全天候 24 h 连续大气遥感探测。实验过程中采用自动曝光的技术方案,CMOS 图像传感器随着背景变化自动改变曝光时间。在白天强背



表 2 二极管激光器的发散角、激光发射面积以及 SLidar 系统使用的滤光片的半峰全宽

Table 2 Divergence and emission area of high power multimode laser diode, as well as the filter bandwidth (full-width at half-maximum, FWHM) employed in the SLidar system

Wavelength /nm	Specifications	Divergence (fast, slow) /( $^{\circ}$ )	Emission area / ( $\mu\text{m} \times \mu\text{m}$ )	Filter bandwidth /nm
407	Ushio HL40033G; power: 1 W	45, 13	$\sim 1 \times 50$	1.7
450	Nichia NDB7k75; power: 3.5 W	46, 14	$\sim 1 \times 50$	10
520	Nichia NDG7475; power: 1.0 W	46, 11	$\sim 1 \times 50$	10
808	Power: 3.2-4.0 W	8, 6	$1 \times 230$	3

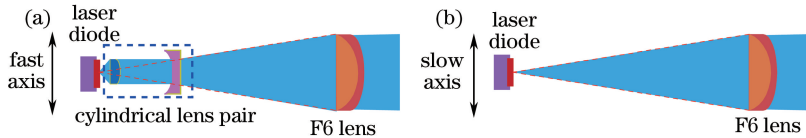
图 8 二极管激光器光束准直方法。(a)快轴先由柱透镜组准直,再由焦距为 F6 的透镜准直;  
(b)慢轴仅由焦距为 F6 的透镜准直

Fig. 8 Beam collimation of the laser diode. (a) The fast axis is collimated by the cylindrical lens pair and then by the F6 lens; (b) the slow axis is only collimated by the F6 lens

景下曝光时间为 20 ms,夜间曝光时间为 500 ms。大气激光雷达信号的信噪比在强背景照射下(太阳照射方向面向激光雷达系统)也能达到 100:1。在 500 ms 曝光时间、45 s 信号平均的情况下,激光雷达信号在夜间的信噪比甚至达到 1000:1 左右。在研究工作中,首次利用 Fernald 算法反演获取大气消光系数,并与点式监测站点测量的颗粒物浓度取得了较好的一致性。520 nm 的 SLidar 系统在白天日照强烈的条件下,尤其是激光雷达探测方向与太阳照射方向相近时,探测器容易饱和。这主要是由于太阳光在 520 nm 附近辐射强,而相应的干涉滤光片带宽比较宽(10 nm)。因此,利用窄带滤光片(如 2~3 nm 半峰全宽),有望实现 24 h 连续监测的 520 nm SLidar 实验系统。此外,520 nm 的大气测量实验表明,在雾霾条件下,大气高湿度(75%以上)会使大气气溶胶的消光系数急剧增加。450 nm SLidar 系统采用 3.5 W 的二极管激光器以及半峰全宽为 10 nm 的干涉滤光片,在 12 月连续 10 天的实验测量中能够实现大气后向散射信号及消光系数的全天时探测。在白天太阳背景辐射较强的情况下,大气激光雷达信号的信噪比可超过 100:1。瑞典隆德大学课题组使用 808 nm 和 405 nm 二极管激光器作为光源,利用时分复用结构对双波长 SLidar 系统进行了初步研究,但是仅能在夜间以及短距离范围内进行测量。通过提高激光耦合效率、双探测器以及一系列信号处理方法,有望实现可全天候运行的双波长 SLidar 实验系统,应用于颗粒物形态定性分析。

### 3.2 大气气体探测

传统脉冲式 DIAL 技术的基本原理是向大气中交替发射波长不同的激光脉冲(其中一个波长位于待测气体吸收峰  $\lambda_{on}$ ,另一个波长偏离待测气体吸收峰  $\lambda_{off}$ ,参见图 10),同时探测其后向散射信号并根据待测气体对两个波长激光雷达信号吸收强度的不同来求解大气气体的浓度分布  $N(z)$ :

$$N(z) = \frac{1}{2[\sigma(\lambda_{on}) - \sigma(\lambda_{off})]} \frac{d}{dz} \ln \left[ \frac{P(\lambda_{off}, z)}{P(\lambda_{on}, z)} \right], \quad (10)$$

式中:  $\sigma(\lambda_{on})$  和  $\sigma(\lambda_{off})$  分别为  $\lambda_{on}$  和  $\lambda_{off}$  波长的吸收截面;  $P(\lambda_{on}, z)$  和  $P(\lambda_{off}, z)$  分别为  $\lambda_{on}$  和  $\lambda_{off}$  的大气后向散射信号强度;  $dz$  为距离分辨率。因此,脉冲式 DIAL 技术测量大气气体浓度分布时,需要采用纳秒量级的可调谐脉冲光源,从而实现  $\lambda_{on}$  和  $\lambda_{off}$  两个甚至更多波长的光脉冲输出,这给 DIAL 技术的实现及实际应用带来了巨大的挑战。

SLidar 技术在实现距离分辨探测的同时,不需要使用脉冲光源,这为 DIAL 技术的实现提供了一种新的可能。瑞典隆德大学最早在 2014 年提出连续波差分吸收激光雷达技术(CW-DIAL),并开展了大气中  $O_2$  浓度距离分布探测的研究工作<sup>[25]</sup>。该系统使用的激光雷达系统装置与气溶胶 SLidar 系统类似,但是需要采用窄线宽(10 MHz)的分布反馈式(DFB)半导体激光器,输出功率仅为 30 mW,因此实验测量仅在夜间开展。通过控制半导体激光器的温度可以设置工作波长,调节驱动电流实现输出激光波长的连续可调谐。在该研究工作中,通过扫描

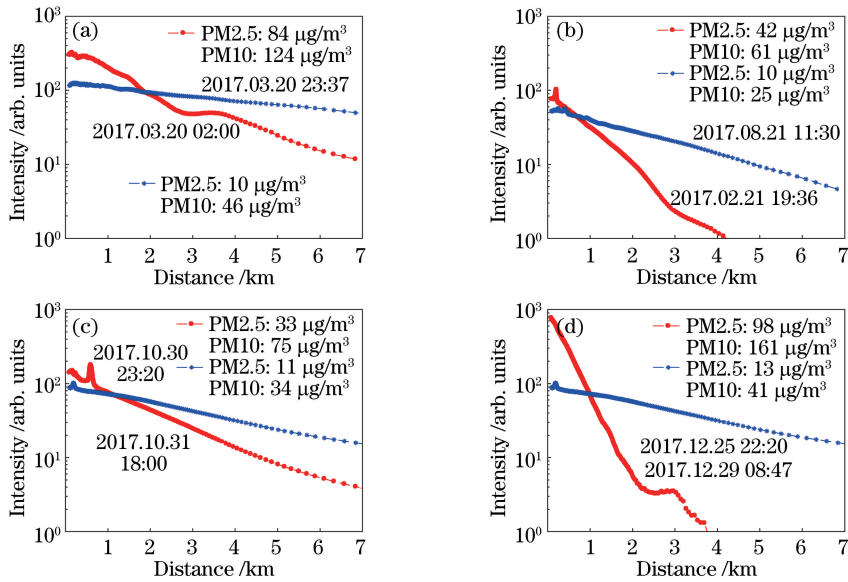


图9 在洁净及雾霾天气条件下,不同波长 SLidar 系统测量得到的大气激光雷达信号(信号强度归一化为 20 ms 曝光时间, 2 倍增益的测量条件)。(a) 808 nm;(b) 407 nm;(c) 520 nm;(d) 450 nm

Fig. 9 Atmospheric backscattering signals measured by the SLidar system operating at different wavelengths under different weather conditions (the signals are normalized to 20 ms exposure time and twice of gain).

(a) 808 nm; (b) 407 nm; (c) 520 nm; (d) 450 nm

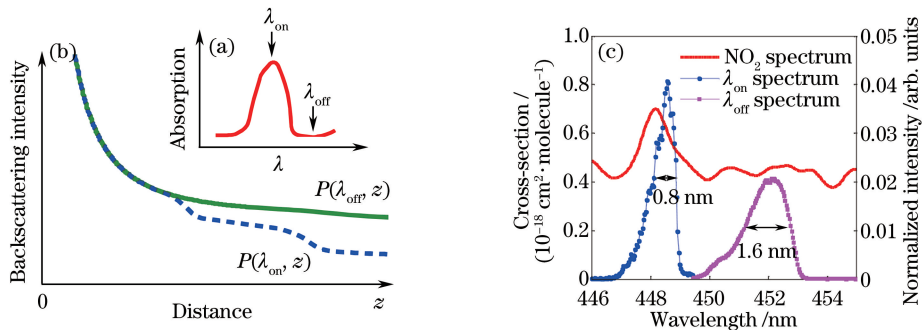


图10 (a)待测气体吸收谱线局部示意图;(b)不同波长的大气后向散射信号强度;(c)  $\text{NO}_2$  吸收光谱以及 CW-DIAL 中的  $\lambda_{\text{on}}$  和  $\lambda_{\text{off}}$  激光波长

Fig. 10 (a) Absorption spectrum of the target gas; (b) atmospheric backscattering intensities at different wavelengths; (c)  $\text{NO}_2$  absorption spectrum and the  $\lambda_{\text{on}}$  and  $\lambda_{\text{off}}$  wavelengths in the CW-DIAL technique

$\text{O}_2$  在 761.1394 nm 附近的吸收峰,并由线阵 CCD (Alphas, CCD-S3600-D) 分别探测 9 个不同波长 (7 个  $\lambda_{\text{on}}$  波长, 2 个  $\lambda_{\text{off}}$  波长) 上的大气回波信号,可求解  $\text{O}_2$  吸收峰附近 7 个不同  $\lambda_{\text{on}}$  波长上的差分吸收曲线,根据已知  $\text{O}_2$  浓度 (20.9%), 拟合差分吸收曲线计算得到  $\text{O}_2$  的吸收截面,实验结果与  $\text{O}_2$  吸收截面的理论值具有很好的一致性。该研究工作论证了 CW-DIAL 技术方案的可行性,为 CW-DIAL 技术在大气气体探测的实际应用铺平了道路。

为了进一步拓展基于沙氏成像原理的 CW-DIAL 技术在实际中的应用,大连理工大学研究组利用高功率 450 nm 蓝光二极管激光器开展了可测

量大气中  $\text{NO}_2$  浓度分布的 CW-DIAL 技术的研究工作<sup>[46]</sup>。该研究方案采用功率为 1.6 W、波长约为 450 nm 的多模二极管激光器作为光源,高灵敏度的 CCD 传感器 (Hamamatsu S11071) 作为大气激光雷达信号的探测器。如图 11 所示,  $\text{NO}_2$  在 450 nm 附近有较宽的吸收峰及吸收谷。通过调节二极管激光器的驱动电流并精确控制二极管激光器芯片的温度,可以分别产生位于  $\text{NO}_2$  吸收峰 (448.6 nm) 的  $\lambda_{\text{on}}$  激光以及位于吸收谷 452.1 nm 附近的  $\lambda_{\text{off}}$  激光。激光器的输出波长由高分辨率的光谱仪实时监测。实验测量时, CCD 传感器分别探测  $\lambda_{\text{on}}$  和  $\lambda_{\text{off}}$  波长的大气回波信号,并由计算机进行信号平均 (15 min)

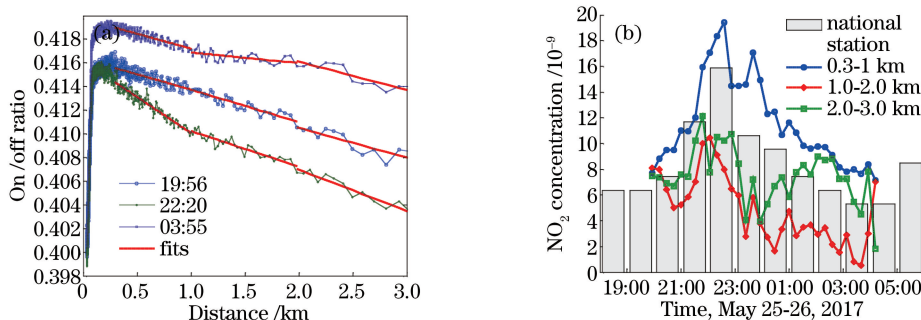


图 11 (a)  $\text{NO}_2$  差分吸收曲线; (b) CW-DIAL 测量的  $\text{NO}_2$  浓度与点式监测站点测量结果对比<sup>[46]</sup>

Fig. 11 (a)  $\text{NO}_2$  differential absorption curves; (b) range-resolved  $\text{NO}_2$  concentration measured by the CW-DIAL technique and the  $\text{NO}_2$  concentration measured by the point monitoring station<sup>[46]</sup>

和处理,最终可得到大气中  $\text{NO}_2$  气体的差分吸收曲线。在距离激光雷达系统 0.3~1 km, 1~2 km, 2~3 km 的近似水平探测区间内分别实现了  $0.9 \times 10^{-9}$ ,  $1.5 \times 10^{-9}$  和  $2.4 \times 10^{-9}$  (体积分数) 的探测灵敏度。该系统的探测灵敏度主要受限于探测器的噪声、激光器的输出功率等因素,实验测量也仅在夜间开展。在使用制冷型、低噪声图像传感器以及更高功率二极管激光器的情况下,  $\text{NO}_2$ -DIAL 系统的探测灵敏度、距离分辨率、测量时间还有很大的提升空间。

## 4 结束语

近年来,SLidar 技术在大气气溶胶和气体探测中的技术和应用研究方兴未艾。在大气气溶胶探测方面,实现并考察了 407, 450, 520, 808 nm SLidar 系统开展大气遥感探测的可行性,分析了其性能指标,初步建立了大气激光雷达信号处理方法。目前的研究工作主要集中于单波长及偏振 SLidar 技术,包括 Klett-Fernald 算法反演大气消光系数、颗粒物浓度的对比分析、大气退偏振比探测等。下一步将重点开展 SLidar 技术在大气环境探测中的实际应用研究,包括大气边界层及能见度探测,同时发展多波长 SLidar 技术研究大气颗粒物的粒径信息等。此外,利用 SLidar 技术低成本、低维护费用的优势,研究便携式、结构紧凑、自动化的 SLidar 系统,与传统脉冲式大气激光雷达技术相结合构建大气激光雷达网,开展跨地区、立体式大气气溶胶及雾霾探测也是未来的重要发展方向。在大气气体探测方面,瑞典隆德大学通过对  $\text{O}_2$  分布测量的研究工作论证了 CW-DIAL 技术的可行性。大连理工大学利用高功率、多模、连续波二极管激光器,成功实现了  $\text{NO}_2$  浓度分布的探测,为 CW-DIAL 技术在大气污染气体

探测中的应用迈出了坚实的一步,但是其性能指标还有待进一步提升。尽管 SLidar 技术近年来得到迅速发展,未来依然需要从激光光源、探测器效率、滤光片带宽以及信号处理方法等多方面入手,进一步提升 SLidar 系统的性能指标,推动其在大气环境监测中的实际应用。

SLidar 技术在其他领域的研究工作也在逐渐展开。瑞典隆德大学<sup>[47-48]</sup>、华南师范大学<sup>[39]</sup>等利用 SLidar 技术开展了大气中飞行昆虫的运动动态研究,赵光宇等<sup>[49]</sup>和高飞等<sup>[50]</sup>进一步将 SLidar 技术拓展为高光谱分辨率激光雷达技术,用于水体生态系统以及油污染问题的研究。因此,融合其他先进的激光光谱技术,拓展 SLidar 技术的新应用也是未来研究的重点之一。

**致谢** 衷心感谢于清旭教授、丁洪斌教授、王晓娜高级工程师、陈珂博士、吴兴伟博士对本文工作的支持和帮助,感谢关鹏、程胜男、徐奕冉、孔政、刘智、张立山、李丽美、杨洋对本文中实验工作的贡献,感谢 Sune Svanberg 教授和 Mikkel Brydegaard 博士对本文前期研究工作的帮助。

## 参 考 文 献

- [1] Lenoble J, Remer L, Tanre D. Aerosol remote sensing [M]. Verlag Berlin Heidelberg: Springer, 2013.
- [2] Fujii T, Fukuchi T. Laser remote sensing [M]. Boca Raton: Taylor & Francis, 2005.
- [3] Liu D, Wang Y J, Wang Z Z, *et al.* Development of multi-wavelength Raman lidar and its application on aerosol and cloud research [J]. EPJ Web of Conferences, 2016, 119: 25011.
- [4] Lü L H, Liu W Q, Zhang T S, *et al.* Characteristics

- of boundary layer height in Jing-Jin-Ji area based on lidar[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2017, 54(1): 010101.
- 吕立慧, 刘文清, 张天舒, 等. 基于激光雷达的京津冀地区大气边界层高度特征研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2017, 54(1): 010101.
- [5] Chen S S, Xu Q S, Xu C D, *et al.* Calculation of whole atmospheric aerosol optical depth based on micro-pulse lidar[J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 37(7): 0701002.
- 陈莎莎, 徐青山, 徐赤东, 等. 基于微脉冲激光雷达计算整层大气气溶胶光学厚度[J]. *光学学报*, 2017, 37(7): 0701002.
- [6] Wu S H, Song X Q, Liu B Y, *et al.* Mobile multi-wavelength polarization Raman lidar for water vapor, cloud and aerosol measurement[J]. *Optics Express*, 2015, 23(26): 33870-33892.
- [7] Di H G, Hou X L, Zhao H, *et al.* Detections and analyses of aerosol optical properties under different weather conditions using multi-wavelength Mie lidar[J]. *Acta Physica Sinica*, 2014, 63(24): 244206.
- 狄慧鸽, 侯晓龙, 赵虎, 等. 多波长激光雷达探测多种天气气溶胶光学特性与分析[J]. *物理学报*, 2014, 63(24): 244206.
- [8] Shao J F, Hua D X, Wang L, *et al.* Full-time lidar system for ultraviolet high spectral Rayleigh temperature measurement[J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 37(6): 0601003.
- 邵江锋, 华灯鑫, 汪丽, 等. 全天时紫外高光谱瑞利测温激光雷达系统[J]. *光学学报*, 2017, 37(6): 0601003.
- [9] Mamouri R E, Papayannis A, Amiridis V, *et al.* Multi-wavelength Raman lidar, sun photometric and aircraft measurements in combination with inversion models for the estimation of the aerosol optical and physico-chemical properties over Athens, Greece[J]. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2012, 5(7): 1793-1808.
- [10] Rogers R R, Hair J W, Hostetler C A, *et al.* NASA LaRC airborne high spectral resolution lidar aerosol measurements during MILAGRO: observations and validation[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2009, 9(14): 4811-4826.
- [11] Engelmann R, Kanitz T, Baars H, *et al.* EARLINET Raman lidar Polly<sup>XT</sup>: the neXT generation [J]. *Atmospheric Measurement Techniques Discussions*, 2015, 8(7): 7737-7780.
- [12] Meki K, Yamaguchi K, Li X, *et al.* Range-resolved bistatic imaging lidar for the measurement of the lower atmosphere[J]. *Optics Letters*, 1996, 21(17): 1318-1320.
- [13] Barnes J E, Sharma N C P, Kaplan T B. Atmospheric aerosol profiling with a bistatic imaging lidar system[J]. *Applied Optics*, 2007, 46(15): 2922-2929.
- [14] Tao Z M, Liu D, Wang Z Z, *et al.* Measurements of aerosol phase function and vertical backscattering coefficient using a charge-coupled device side-scatter lidar[J]. *Optics Express*, 2014, 22(1): 1127-1134.
- [15] Rocadenbosch F. Lidar-aerosol sensing [M] // *Encyclopedia of optical engineering*. New York: Marcel Dekker, Inc., 2013.
- [16] Sullivan J T, McGee T J, Sumnicht G K, *et al.* A mobile differential absorption lidar to measure sub-hourly fluctuation of tropospheric ozone profiles in the Baltimore-Washington, D. C. region [J]. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2014, 7(10): 3529-3548.
- [17] Beniston M, Wolf J P, Benistonrebetz M, *et al.* Use of lidar measurements and numerical-models in air-pollution research [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 1990, 95(D7): 9879-9894.
- [18] Fukuchi T, Nayuki T, Cao N W, *et al.* Differential absorption lidar system for simultaneous measurement of O<sub>3</sub> and NO<sub>2</sub>: system development and measurement error estimation [J]. *Optical Engineering*, 2003, 42(1): 98-104.
- [19] Guan Z G, Lundin P, Mei L, *et al.* Vertical lidar sounding of atomic mercury and nitric oxide in a major Chinese city[J]. *Applied Physics B*, 2010, 101(1/2): 465-470.
- [20] Mei L, Zhao G Y, Svanberg S. Differential absorption lidar system employed for background atomic mercury vertical profiling in South China[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2014, 55: 128-135.
- [21] Hu S X, Hu H L, Zhang Y C, *et al.* A new differential absorption lidar for NO<sub>2</sub> measurements using Raman-shifted technique[J]. *Chinese Optics Letters*, 2003, 1(8): 435-437.
- [22] Fan G Q, Zhang T S, Fu Y B, *et al.* Temporal and spatial distribution characteristics of ozone based on differential absorption lidar in Beijing [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2014, 41(10): 1014003.
- 范广强, 张天舒, 付毅宾, 等. 差分吸收激光雷达监测北京灰霾天臭氧时空分布特征[J]. *中国激光*,

- 2014, 41(10): 1014003.
- [23] Gong W, Ma X, Han G, *et al.* Method for wavelength stabilization of pulsed difference frequency laser at 1572 nm for CO<sub>2</sub> detection lidar [J]. *Optics Express*, 2015, 23(5): 6151-6170.
- [24] Liu H, Chen T, Shu R, *et al.* Wavelength-locking-free 1.57  $\mu\text{m}$  differential absorption lidar for CO<sub>2</sub> sensing[J]. *Optics Express*, 2014, 22(22): 27675-27680.
- [25] Mei L, Brydegaard M. Continuous-wave differential absorption lidar [J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2015, 9(6): 629-636.
- [26] Brydegaard M, Gebru A, Svanberg S. Super resolution laser radar with blinking atmospheric particles—application to interacting flying insects [J]. *Progress in Electromagnetics Research*, 2014, 147: 141-151.
- [27] Huseynova T, Waring G O, Roberts C, *et al.* Corneal biomechanics as a function of intraocular pressure and pachymetry by dynamic infrared signal and Scheimpflug imaging analysis in normal eyes[J]. *American Journal of Ophthalmology*, 2014, 157(4): 885-893.
- [28] Grewal D S, Brar G S, Jain R, *et al.* Corneal collagen crosslinking using riboflavin and ultraviolet-A light for keratoconus one-year analysis using Scheimpflug imaging [J]. *Journal of Cataract & Refractive Surgery*, 2009, 35(3): 425-432.
- [29] Blais F. Review of 20 years of range sensor development [J]. *Journal of Electronic Imaging*, 2004, 13(1): 231-243.
- [30] Miks A, Novak J, Novak P. Analysis of imaging for laser triangulation sensors under Scheimpflug rule [J]. *Optics Express*, 2013, 21(15): 18225-18235.
- [31] Mei L, Brydegaard M. Atmospheric aerosol monitoring by an elastic Scheimpflug lidar system [J]. *Optics Express*, 2015, 23(24): A1613-A1628.
- [32] Chen J C, Li J, Xu J L, *et al.* 4350 W quasi-continuous-wave operation of a diode face-pumped ceramic Nd:YAG slab laser [J]. *Optics & Laser Technology*, 2014, 63: 50-53.
- [33] Zhong L, Ma X. Recent developments in high power semiconductor diode lasers[M] // Predeep P (Ed.), *Optoelectronics-devices and applications*. London: InTech, 2011.
- [34] Comeron A, Sicard M, Kumar D, *et al.* Use of a field lens for improving the overlap function of a lidar system employing an optical fiber in the receiver assembly[J]. *Applied Optics*, 2011, 50(28): 5538-5544.
- [35] Guerrero-Rascado J L, Costa M J, Bortoli D, *et al.* Infrared lidar overlap function: an experimental determination[J]. *Optics Express*, 2010, 18(19): 20350-20359.
- [36] Povey A C, Grainger R G, Peters D M, *et al.* Estimation of a lidar's overlap function and its calibration by nonlinear regression [J]. *Applied Optics*, 2012, 51(21): 5130-5143.
- [37] Berezhnyy I. A combined diffraction and geometrical optics approach for lidar overlap function computation [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2009, 47(7/8): 855-859.
- [38] Kovalev V A, Eichinger W E. *Elastic lidar: theory, practice, and analysis methods*[M]. Hoboken: John Wiley & Sons, 2004.
- [39] Zhu S M, Malmqvist E, Li W S, *et al.* Insect abundance over Chinese rice fields in relation to environmental parameters, studied with a polarization-sensitive CW near-IR lidar system [J]. *Applied Physics B*, 2017, 123(7): 211.
- [40] Brydegaard M, Malmqvist E, Jansson S, *et al.* The Scheimpflug lidar method[J]. *Proceedings of SPIE*, 2017, 10406: 104060I.
- [41] Mei L, Zhang L S, Kong Z, *et al.* Noise modeling, evaluation and reduction for the atmospheric lidar technique employing an image sensor [J]. *Optics Communications*, 2018, 426: 463-470.
- [42] Mei L, Kong Z, Guan P. Implementation of a violet Scheimpflug lidar system for atmospheric aerosol studies[J]. *Optics Express*, 2018, 26(6): A260-A274.
- [43] Mei L, Guan P, Yang Y, *et al.* Atmospheric extinction coefficient retrieval and validation for the single-band Mie-scattering Scheimpflug lidar technique[J]. *Optics Express*, 2017, 25(16): A628-A638.
- [44] Mei L, Guan P. Development of an atmospheric polarization Scheimpflug lidar system based on a time-division multiplexing scheme [J]. *Optics Letters*, 2017, 42(18): 3562-3565.
- [45] Mei L, Kong Z. Diode laser beam collimation method: CN107346062A[P]. 2017-11-14. 梅亮, 孔政. 一种二极管激光器光束准直的方法: CN107346062A[P]. 2017-11-14.
- [46] Mei L, Guan P, Kong Z. Remote sensing of atmospheric NO<sub>2</sub> by employing the continuous-wave

- differential absorption lidar technique [J]. *Optics Express*, 2017, 25(20): A953-A962.
- [47] Kirkeby C, Wellenreuther M, Brydegaard M. Observations of movement dynamics of flying insects using high resolution lidar [J]. *Scientific Reports*, 2016, 6(1): 29083.
- [48] Malmqvist E, Jansson S, Török S, *et al.* Effective parameterization of laser radar observations of atmospheric fauna [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2016, 22 ( 3 ): 6900408.
- [49] Zhao G Y, Ljungholm M, Malmqvist E, *et al.* Inelastic hyperspectral lidar for profiling aquatic ecosystems[J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2016, 10(5): 807-813.
- [50] Gao F, Li J W, Lin H Z, *et al.* Oil pollution discrimination by an inelastic hyperspectral Scheimpflug lidar system[J]. *Optics Express*, 2017, 25(21): 25515-25522.