

# 相干测风激光雷达研究进展和应用

周艳宗<sup>1,2</sup>, 王冲<sup>1,2</sup>, 刘燕平<sup>1,2</sup>, 夏海云<sup>1,2\*</sup>

<sup>1</sup>中国科学技术大学地球和空间科学学院, 安徽 合肥 230026;

<sup>2</sup>中国科学院近地空间环境重点实验室, 安徽 合肥 230026

**摘要** 相干测风激光雷达采用外差探测方式,其后向散射信号经本振光放大,信噪比理论上可达到量子极限,具有高时空分辨、高精度的特点。相干测风激光雷达广泛应用于测量风切变、大气湍流、飞机尾流、阵风以及重力波等。目前,国内外相继开展了相干测风激光雷达的研究。介绍了相干测风激光雷达的发展历史,详细介绍了各波段相干测风激光雷达的最新研究进展,并对相干测风激光雷达的发展趋势进行了简要总结。

**关键词** 遥感; 相干激光雷达; 全光纤; 测风; 多普勒

中图分类号 TN958.98

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP56.020001

## Research Progress and Application of Coherent Wind Lidar

Zhou Yanzong<sup>1,2</sup>, Wang Chong<sup>1,2</sup>, Liu Yanping<sup>1,2</sup>, Xia Haiyun<sup>1,2\*</sup>

<sup>1</sup>*School of Earth and Space Science, University of Science and Technology of China, Hefei, Anhui 230026, China;*

<sup>2</sup>*Key Laboratory of Geospace Environment, Chinese Academy of Sciences, Hefei, Anhui 230026, China*

**Abstract** Coherent wind lidar uses the heterodyne detection method to amplify the backscatter signal by the local oscillation laser. Because the signal-to-noise ratio can reach the theoretical quantum limit, the lidar has high spatial and temporal resolution and high precision. Coherent wind lidar is widely used to measure wind shear, atmospheric turbulence, aircraft wake, gustiness, and gravity waves. Researchers in China and other countries are presently studying on coherent wind lidar. This study introduces the history of coherent wind lidar, describes the theory using different wavelengths, and briefly summarizes the development trends in this field.

**Key words** remote sensing; coherent lidar; all fiber; wind detection; Doppler

**OCIS codes** 280.3640; 010.0280; 010.3640

## 1 引言

对流层风场、大气退偏比等参数是风能源开发供应、航空安全、大型建筑物和重大工程安全设计、城市规划和防灾管理等的重要参数,也是大气污染物稀释、扩散、输送的重要参数。目前,使用基于米氏散射原理的相干多普勒测风激光雷达,可以实现从地面到对流层无盲区的大气参数观测,并且具有高精度、高分辨率、大探测范围等优点,成为国际研究的重点。

目前,美国航空航天局(NASA)、美国国家海洋和大气管理局(NOAA)、美国洛克希德马丁公司(LMCT)、美国雷神公司(Raytheon)、日本三菱公司

(Mitsubishi Electric)、法国 Leosphere 公司等相继开展了理论和实验研究,并进行了商业化样机的研制。国内相干激光雷达主要研究单位包括中国科学技术大学(USTC)、中国电子科技集团公司第二十七研究所(CETC27)、中国科学院上海光学精密机械研究所(SIOM)、哈尔滨工业大学(HIT)、中国海洋大学(OUC)、北京理工大学(BIT)等。本文简要回顾了相干激光雷达的发展历史,介绍了不同波段相干激光雷达研究现状及其应用。

## 2 相干激光雷达研究现状

全光纤相干多普勒测风激光雷达系统可以分

为激光光源模块、发射接收模块及后期的信号处理模块。如图 1 所示,在激光出射模块,连续波(CW)激光器产生中心频率为  $\nu_0$  的线偏振光,经分束器分为出射激光和本振光,出射激光经声光调制器(AOM)调制为脉冲光,并产生  $\nu_M$  的频移,再由放大器进行功率放大,经望远镜出射。设风场对脉冲光产生的多普勒频移为  $\nu_d$ ,则回波信号中心频率为  $\nu_0 + \nu_M + \nu_d$ 。在接收机模块,回波信号与本振光两者的拍频信号经平衡探测器转换为频率为  $\nu_M + \nu_d$  的射频电信号,再经采集卡采样和后续电路数据处理分析得到风场信息。使用基于出射激光脉冲的飞行时间法,可以得到不同距离处的风场信息。

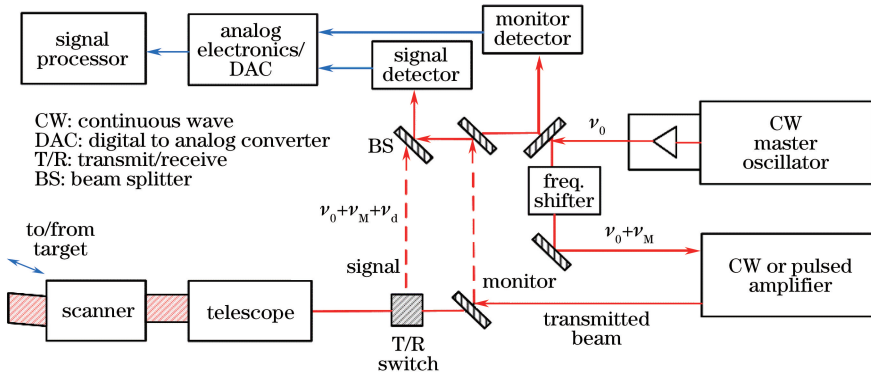


图 1 相干多普勒激光雷达示意图

Fig. 1 Coherent Doppler lidar schematic

表 1 给出了测风激光雷达的研究现状,可以看出,激光雷达的发展随着激光器技术的发展不断成熟。从最早的气体  $\text{CO}_2$  激光器到固体激光器,相干激光雷达的工作波长也随之变化。

相对于  $\text{CO}_2$  激光器和闪光灯抽运固体激光器,二极管抽运的固体激光器在发光效率、激光器尺寸大小和使用寿命等方面都有巨大提升。相对于  $\text{CO}_2$  激光器,固体激光器的波长更短。为了实现更好的相干混频效率,短波长对光学器件表面精度的要求更高,对光路精度要求也更高,短波长对大气折射率变化和湍流更敏感,但是短波长具

相干测风激光雷达具有如下优点:

- 1) 相干探测采取拍频的方式将后向散射信号放大,理论上信噪比可达到量子噪声极限;
- 2) 相干激光雷达要求本振光及信号光的波前匹配,因此相干激光雷达对背景噪声、探测器噪声具有抑制作用,可实现在无滤波器条件下的连续观测;
- 3) 相干测风激光雷达无需光学鉴频器,接收光路简单,对温度梯度、应力梯度不敏感;
- 4) 随着激光波长的增加,单光子能量  $E_0 = h\nu$  逐渐减小(其中  $h$  为普朗克常量),从而导致探测难度增加。与直接探测采用价格昂贵的超导探测器、上转换探测器等相比,相干探测常采用平衡探测器,缩减了系统成本。

有很多优势。根据径向风速  $v$ 、多普勒频移  $\nu_d$  与波长  $\lambda$  的关系:  $\nu_d = 2v/\lambda$ ,对于相同的径向风速,短波长产生的多普勒频移更大,因而在频率分辨率相同的情况下,提高了相干多普勒测风激光雷达的测风精度。同时,根据距离分辨率  $\Delta R$  和脉冲时域半峰全宽  $\Delta\tau$  之间的关系:  $\Delta R = c\Delta\tau/2$ ,固态激光器的脉冲宽度可以更短,从而提高激光雷达的距离分辨率。固态激光器的激光波长范围连续可调,因此,可以选择大气窗口更好的波长,实现更低的大气吸收率,在低激光能量下实现更远的探测距离。

表 1 多普勒测风激光雷达研究状况

Table 1 Research status of Doppler wind lidar

Detection method	Coherent detection	Coherent detection	Coherent detection / direct detection	Coherent detection / direct detection	Direct detection	Direct detection
Wavelength / nm	10600	2000	1500	1060	532	355
Laser	$\text{CO}_2$	Tm: YLuAG; Tm, Ho: YAG	Raman OPO- Nd: YAG; Er	Nd: YAG	Nd: YAG	Nd: YAG
Reference	[1]	[2]	[3]	[4]	[4]	[4]
Detection object	Aerosol	Aerosol	Aerosol	Aerosol	Molecule	Molecule

### 2.1 相干激光雷达波长选取考虑因素

1) 大气透过率。图 2 是基于 Modtra 软件模拟的不同天顶角下从可见光到近红外波段的大气透过率与波长的关系。从图中可以看出,在不同的天顶角下,1.1,1.5,2.0  $\mu\text{m}$  等波长处大气的透过率出现峰值<sup>[5]</sup>。

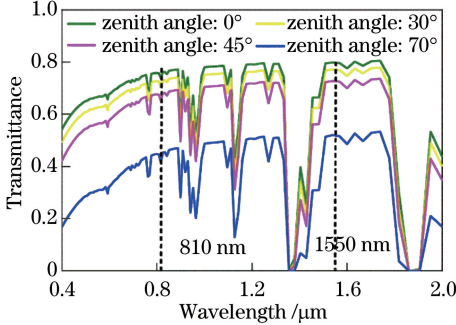


图 2 不同天顶角下可见光到近红外波段的大气透过率  
Fig. 2 Transmittance of the atmosphere from visible light to near infrared bands at different zenith angles

2) 人眼安全,激光增益介质。图 3 给出了近红外波段激光增益介质以及人眼最大曝光率(MPE)的示意图<sup>[6]</sup>,从图 3 可以看出:光纤激光器的增益介质分别在 1.06,1.55,2.1  $\mu\text{m}$  这 3 个波段可实现高脉冲能量的激光。与其他波段相比,1.55  $\mu\text{m}$  附近 MPE 达到最大值,约为  $10^4 \text{ J} \cdot \text{m}^{-2}$ ,比 2.1  $\mu\text{m}$  高出约 1 个数量级,比 1.06  $\mu\text{m}$  高出约 6 个数量级。

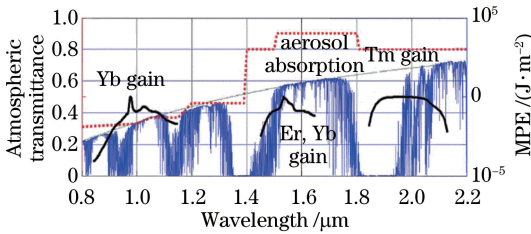


图 3 近红外波段激光增益介质和人眼最大曝光率示意图  
Fig. 3 Laser gain medium and human eye maximum exposure rate in the near infrared band

3) 光纤损耗。激光在光纤中的衰减主要由光纤本身材料不均匀、瑞利散射及光纤中的杂质散射和吸收等因素造成。图 4 给出了光纤损耗与波长间的关系,其中 1.5  $\mu\text{m}$  波段光纤损耗最小,可达 0.2 dB/km,2.0  $\mu\text{m}$  和 1.06  $\mu\text{m}$  次之,在这 3 个波段可实现全光纤链路,提高系统的集成度<sup>[7]</sup>。

4) 天空背景辐射。由于天空背景的影响,雷达白天工作的性能变差,假设太阳为 5900 K 的理想黑体,其光谱辐射如图 5 中黑线所示,黄色阴影和红色阴影分别为大气层顶和海平面的太阳辐射。从图 5 可以看出,随着波长的增加,太阳背景辐射逐渐减

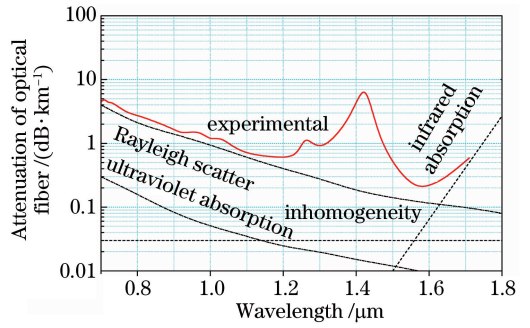


图 4 光纤损耗与波长的关系

Fig. 4 Relationship between fiber loss and wavelength

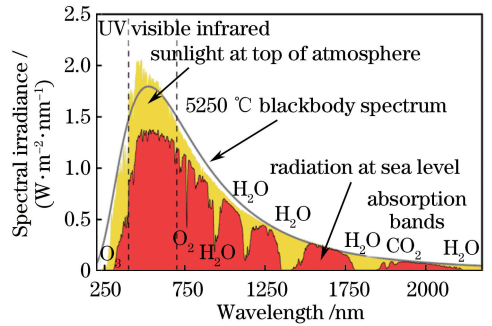


图 5 太阳辐射与激光波长之间关系图

Fig. 5 Relationship between solar radiation and laser wavelength

小,长波长的激光雷达更有优势<sup>[5,8]</sup>。

综上,相干激光雷达波长主要集中在 1.5  $\mu\text{m}$  和 2.0  $\mu\text{m}$ ,同时 1.5  $\mu\text{m}$  波段为通信波段,各种光器件比较成熟,使得 1.5  $\mu\text{m}$  成为目前的主流波段。接下来分别介绍不同波段的相干激光雷达的发展。

### 2.2 气体相干测风激光雷达

$\text{CO}_2$  激光器具有高能量转化效率、稳定的单频率激光输出、高能量的脉冲和连续波输出、大气透射窗口好、人眼安全的激光波长等特点,被相干雷达系统大规模使用<sup>[9]</sup>。

第一台基于连续波(CW) $\text{CO}_2$  激光器的相干多普勒测风激光雷达由 NASA 的 Huffaker 研制成功<sup>[1]</sup>,该雷达使用焦距可调的变焦光学系统实现了不同的空间分辨率;大气后向散射信号被接收望远镜耦合进  $\text{CO}_2$  激光器的谐振腔进行放大,并选择与本振光匹配的激光模式,与本振光进行拍频。系统的本振光和出射激光都没有经过移频,所以该系统是“自差”或“零差”系统。由于激光器谐振腔增益带宽受限,该系统在风速较大时多普勒频移较大,导致后向散射信号超出谐振腔增益带宽,无法工作。1968 年,Raytheon 和 NASA 合作对该系统进行升级,解决了大风速情况下系统失能的问题,并用于实

现几百米高空情况下由飞机产生的涡流<sup>[10-11]</sup>和大气边界层内风场的探测<sup>[12]</sup>。英格兰的 Vaughan 课题组使用基于 CW CO<sub>2</sub> 相干多普勒测风激光雷达系统实现了对气溶胶后向散射的探测<sup>[13-14]</sup>。

1970 年代,美国雷神公司成功研制出脉冲式 CO<sub>2</sub> 相干多普勒测风激光雷达,并将其用于商业航班路线上晴空湍流的探测,该系统激光脉宽为 1 μs,脉冲重复频率为 200 Hz<sup>[15]</sup>,随后,在 NASA Convair990 上进行了实验<sup>[16]</sup>。1984 年,NOAA 基于 10.6 μm 的 CO<sub>2</sub> 激光雷达,对大气风场进行了测量,并和风速计、气球及微波雷达的测量结果进行了比较,其结果和风速计比较,标准差为 0.34 m/s<sup>[17]</sup>。

1980 年代,为了进一步缩小激光器体积并增加激光器的功率,横向激励气体 (TEA) 激光器开始被使用,基于 TEA 技术,激光单脉冲能量可达到 100 mJ。1980 年代中期,美国的 Hardensty 课题组及其他机载测风项目的课题组,开始使用单脉冲能量 1 J,脉冲重复频率 20 Hz 的脉冲式 CO<sub>2</sub> 激光器<sup>[18-22]</sup>作为相干多普勒测风激光雷达的光源。

美国大气研究中心 (NCAR) 的 Mayor 等<sup>[23]</sup>和加州理工大学的 Kavaya 等<sup>[24]</sup>使用波长为 9.25 μm 和 10.6 μm 的 TEA CO<sub>2</sub> 相干多普勒测风激光雷达开展了大气折射率结构常数、湍流和大气后向散射参数测量的相关工作。法国国家科学院 (CNRS) 的 Flamant 和德国航空太空中心 (DLR) 的 Werner 课题组合作进行了基于 TEA CO<sub>2</sub> 激光器的机载脉冲式相干多普勒测风激光雷达的研究<sup>[25]</sup>。

CO<sub>2</sub> 激光技术的问世,在一定程度上提高了相干激光雷达探测能力,但 CO<sub>2</sub> 激光器能耗高、体积大、工作环境要求低温等缺点限制了其发展。

### 2.3 1.06 μm 相干激光雷达

1985 年,斯坦福大学的 Kane 课题组研发了基于 Nd:YAG 激光器的 1.06 μm 波长相干多普勒测风激光雷达<sup>[26]</sup>,该系统使用闪光灯抽运激光器将激光脉冲功率放大至 2.3 kW,实现了 600 m 风场和 2.7 km 的云层探测。1988 年,Kavaya 等<sup>[27]</sup>研发出了 1.06 μm 波长的相干多普勒测风激光雷达系统,该雷达在激光脉冲宽度为 1 μs 时能量为 8 mJ;脉冲宽度为 0.5 μs 时能量为 5 mJ,重复频率为 10 Hz,该雷达实现了 3.75 km 的水平风场探测距离。随后,在美国相干技术公司 (CTI)、NASA 马歇尔太空飞行中心 (MSFC) 和 NASA 兰利研究中心 (LaRC) 的共同合作下,该系统的脉冲能量升级为 1 J,脉冲重复频率为 10 Hz,在肯尼迪宇航中心 (KSC),为发现

者号航天飞机发射和着陆过程提供气象保障,实现了地表到 26 km 高度的风场探测<sup>[28]</sup>。考虑到人眼安全,1.06 μm 逐渐被 1.5 μm 和 2.0 μm 波长取代。

### 2.4 1.5 μm 相干激光雷达研究现状

2000 年以后,得益于光纤通信技术的发展,结构更为紧凑、发光效率更高、成本更低的 1.5 μm 波长的相干多普勒测风激光雷达系统成为研究的新热点。

从第一台基于 CO<sub>2</sub> 激光器的相干多普勒测风激光雷达问世以来,LMCT 和 CTI 就一直在致力于相干多普勒测风激光雷达的研究。2002 年,LMCT 发布了基于 2.0 μm 的 WindTracer 商用相干多普勒测风激光雷达系统。目前 WindTracer 已经升级为基于 1.617 μm 的 Er:YAG 激光器。NASA 使用商用 WindTracer 系统进行了飞机风切变、晴空湍流等探测,并于 2009 年在丹佛国际机场对飞机涡流进行了建模和预测<sup>[29]</sup>。

由于 3 mJ 的单脉冲能量导致 WindTracer 对激光器的性能、光学器件的品质等要求都很高,造成器件的寿命都很短且极易发生损坏,因此系统的适用性差<sup>[30-31]</sup>。为此,NASA 研发了基于 Er:Glass 光纤激光器的全光纤 Windimager 相干多普勒测风激光雷达系统<sup>[31]</sup>。其系统装置及风速扫描结果如图 6 所示。

与常用的相干多普勒测风激光雷达系统相比,该系统的创新点在于:1) 在 AOM 之前加入了一个光开关,用于抑制 AOM 的直流噪声泄露;2) 激光模块参数可调,可以实现近距离低脉冲能量、高脉冲重复频率、高距离分辨率的探测,或者实现高脉冲能量、低脉冲重复频率、低距离分辨率的远距离风场探测;3) 将 2 个相距 1 m 的 4 pixel 高灵敏度 InGaAs 探测器,放置在雷达望远镜前 40 m 处,用于调节望远镜的重叠因子。外场实验证明,在脉冲能量为 240 μJ,脉冲宽度为 400 ns,脉冲重复频率为 4 kHz,累计 0.25 s 情况下,当 PM2.5 含量(质量浓度,下同)为 10 μg·m<sup>-3</sup> 时,水平最远探测距离为 9.5 km;当 PM2.5 含量为 17 μg·m<sup>-3</sup> 时,垂直最远探测距离为 3 km。

2010 年 8 月,NCAR 的 Spuler 等<sup>[32]</sup>基于连续波相干多普勒测风激光雷达,在 12 km 高空进行了飞机前方湍流探测的机载实验。该系统使用的是波长为 1560 nm 的分布反馈式 (DFB) 激光器,5 W 的单模光纤放大器,带放大器模块的 InGaAs 二极管探测器,采集卡采样频率为 200 MHz。飞机机翼吊舱处安装直径为 50 mm 的望远镜,望远镜聚焦在飞机前方 30 m。对比使用飞机上皮托管与连续波相

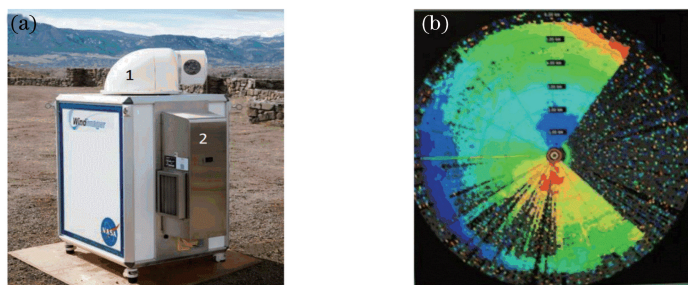


图6 NASA相干激光雷达装置图及风速测量结果图。(a)相干激光雷达装置图;(b)风速测量结果

Fig. 6 NASA coherent lidar installation diagram and wind velocity measurement results. (a) Lidar prototype; (b) wind speed measurement results

干多普勒测风激光雷达测得的飞行速度,得到激光雷达测量风速的精度优于 $0.052\text{ m/s}$ 。

2011年,FiberTek公司的Akbulut等<sup>[33]</sup>进行了湍流和波音747飞机尾流的数值模拟,并使用该公司自己研发的相干多普勒测风激光雷达进行了实际探测。该系统工作波长为 $1.55\text{ }\mu\text{m}$ ,线宽为 $2.5\text{ kHz}$ ,相对强度噪声(RIN)在 $20\text{ kHz}$ 重复频率时小于 $-140\text{ dBc/Hz}$ ,AOM频移 $55\text{ MHz}$ ,使用二级激光放大系统将出射激光脉冲能量放大至 $120\text{ }\mu\text{J}$ ,脉冲重复频率为 $25\text{ kHz}$ ,脉冲宽度为 $800\text{ ns}$ 。

2016年,FiberTek公司进一步提高了激光雷达的脉冲能量<sup>[34]</sup>。使用中心波长为 $1572.3\text{ nm}$ ,脉冲能量 $440\text{ }\mu\text{J}$ 的激光雷达实现了二氧化碳气体探测。

日本三菱电机有限公司(MEC)从20世纪90年代后期开始致力于相干多普勒测风激光雷达的研究工作<sup>[35]</sup>。

1998年,三菱电机公司的Asaka等<sup>[36]</sup>使用 $1.53\text{ }\mu\text{m}$ 波长的半导体种子激光器,经Er,Yb:Glass激光器放大器放大后,实现单脉冲能量为 $2.5\text{ mJ}$ ,脉冲宽度为 $200\text{ ns}$ ,脉冲重复频率为 $20\text{ Hz}$ 的脉冲激光输出,使用直径 $600\text{ mm}$ 的望远镜实现超过 $800\text{ m}$ 的水平探测距离。这是世界上首台基于 $1.5\text{ }\mu\text{m}$ 人眼安全波长的相干多普勒测风激光雷达。

2001年,Yanagisawa等<sup>[37]</sup>和Asaka等<sup>[38]</sup>将Er,Yb:Glass激光器改进为波长为 $1.54\text{ }\mu\text{m}$ 的Er,Yb:Glass激光器,单脉冲能量为 $10.9\text{ mJ}$ ,脉冲宽度为 $228\text{ ns}$ ,脉冲重复频率为 $15\text{ Hz}$ ,并将该激光器用于望远镜直径为 $100\text{ mm}$ 的相干多普勒测风激光雷达系统,在距离分辨率为 $30\text{ m}$ 的情况下可实现 $5\text{ km}$ 距离的风场探测。

2003年,经过Hiranno的升级,三菱电机公司将 $1.54\text{ }\mu\text{m}$ 的Er,Yb:Glass相干多普勒测风激光雷达系统的探测距离提升到 $10\text{ km}$ ,并使用该系统进行了

一些外场实验<sup>[39]</sup>。

全光纤系统具有结构紧凑、方便组装和维护、成本低、系统更稳定等诸多优点,因此三菱公司从2002年起开始报道其全光纤相干多普勒测风激光雷达系统的研发成果,完成了机载验证实验,并于2003年推出首台原理样机<sup>[40]</sup>。2006年,三菱电机公司推出了商用的全光纤相干多普勒测风激光雷达系统LR-05FC<sup>[41]</sup>。2010年,升级之后的LR-08FS系统被用于香港机场<sup>[42]</sup>。

2007年,三菱电机通过使用芯径 $25\text{ }\mu\text{m}$ 的大芯径光纤,在LR-08FS机型的光纤激光放大器后方再增加一个光纤激光放大器,使用二级放大系统将单脉冲能量提高至 $179\text{ }\mu\text{J}$ ,实现大于 $10\text{ km}$ 的水平风场探测。至此,三菱电机公司已将全光纤相干多普勒测风激光雷达系统按照探测距离分为3个系列(1,3,5 mile,其中 $1\text{ mile}=1.609344\text{ km}$ )<sup>[43-45]</sup>。

2012年,Sakimura等<sup>[46]</sup>使用Er,Yb:Glass平面波导技术和二级激光放大技术,对出射激光输出功率进一步放大<sup>[47]</sup>,实现了超过 $30\text{ km}$ 的水平风场探测距离。2014年,三菱电机公司又报道了该系统在机载实验中的结果,如图7所示<sup>[48]</sup>。在 $12\text{ km}$ 飞行高度时,该系统可以实现大于 $9\text{ km}$ 的水平探测距离,可以用于提前 $30\text{ s}$ 发现飞机前方的晴空湍流。

2008年,法国航空航天中心(ONERA)首次报道了基于 $1.5\text{ }\mu\text{m}$ 光纤激光器的相干多普勒测风激光雷达<sup>[49]</sup>,并使用该系统进行了飞机尾流的探测。在考虑到光纤的受激布里渊现象之后,ONERA自主研发了掺Er,Yb的光纤激光放大器<sup>[50]</sup>。

2009年,ONERA对第一代相干多普勒测风激光雷达系统进行了升级,使用三级抽运对种子激光进行放大,并使用大模场面积光纤抑制受激布里渊现象,进一步将激光器的脉冲能量提高至 $120\text{ }\mu\text{J}$ ,实现了飞机尾流的探测<sup>[51-52]</sup>。

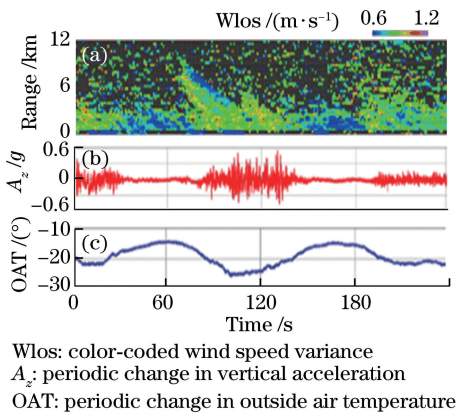


图7 三菱电机公司机载雷达风速测量结果。(a)风速结果;(b)垂直加速度的周期性变化;(c)室外温度的周期性变化

Fig. 7 Mitsubishi electric corporation airborne lidar wind velocity measurement results. (a) Results of wind velocity; (b) periodic change in vertical acceleration; (c) periodic change in outside air temperature

2014年,通过在大模场面积的光纤中加入应力等方式,ONERA 进一步提高了光纤的受激布里渊阈值<sup>[53]</sup>,在单脉冲能量 370  $\mu\text{J}$  的情况下,实现了超过 10 km 的风场探测距离。

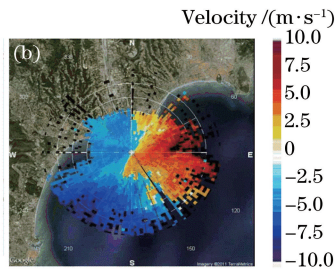
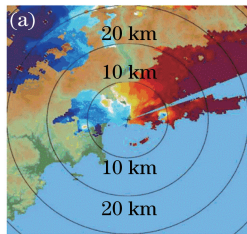


图8 不同雷达的风速测量结果。(a)微波雷达;(b) Leosphere 公司相干雷达

Fig. 8 Wind velocity measurement results of different radars. (a) Microwave radar; (b) Leosphere coherent lidar

2003年,QinetiQ 公司与 DTU 合作研发了该公司的第一台商用的基于连续波的相干多普勒测风激光雷达,该系统使用变焦式望远镜,实现了不同距离处的风场探测,并使用独特的算法系统,去除了云层对风速探测精度的干扰。该套系统在 2003 年 12 月经过外场实验验证后,已经在世界 50 多个国家和地区销售超过 3000 套。该公司目前的产品为 ZephIR300,可安装在陆基、移动平台或风电机舱上。

英国 SgurrEnergy 公司成立于 2002 年,与 DTU 合作生产了 Galion 系列脉冲式相干多普勒测风激光雷达,主要用于海上和陆地风力发电机的风场探测、风能储量预测等<sup>[72-73]</sup>。2013 年,DTU 根

2015 年,ONERA 通过使用多个光纤放大器并联,提高了光纤激光器的激光脉冲能量<sup>[54]</sup>,在 500  $\mu\text{J}$  脉冲能量情况下,实现了 16 km 的风场探测距离<sup>[55]</sup>。通过与 Leosphere 公司合作,该激光器已经应用于 WindCube 产品中<sup>[56-57]</sup>,并进行了灾难天气预测、机场风切变监测等外场实验<sup>[58-61]</sup>。

法国 Leosphere 成立于 2004 年,与 ONERA 和丹麦科技大学(DTU)都有合作关系<sup>[56-57]</sup>。其产品分为陆基 WindCube 系列和风电机舱雷达 Windiris 系列,广泛应用于风力发电<sup>[62]</sup>、航空安全保障<sup>[63]</sup>、天气预报<sup>[64]</sup>、空气质量监测<sup>[65]</sup>等。图 8 为其产品测量的风速结果与微波雷达测量结果,二者结合可以预测雷暴引起的风切变对飞机着陆的影响。

英国 ZephIR 公司为英国 QinetiQ 公司 2007 年成立的子公司。在 20 世纪 90 年代中期,QinetiQ 公司就致力于使用光纤激光器替代当时相干多普勒测风激光雷达系统中使用的  $\text{CO}_2$  激光器,并于 20 世纪 90 年代后期成功研究了全光纤的连续波相干多普勒测风激光雷达系统<sup>[66-67]</sup>,且在 2002 年成功研究了全光纤的脉冲式相干多普勒测风激光雷达系统<sup>[68-71]</sup>,同时与 DTU 合作,将其系统用在风力发电领域<sup>[69-70]</sup>。

据多年实际使用情况,给出了 Galion 系列的测试报告<sup>[74]</sup>,认为该系统稳定可靠,其目前的型号为 G250 和 G4000。

英国 Halo-Photonics 公司从 20 世纪 80 年代末期就开始研究基于  $\text{CO}_2$  激光器的相干多普勒测风激光雷达系统,2001 年研发了基于光纤器件的 1.548  $\mu\text{m}$  脉冲式相干多普勒测风激光雷达系统,并于 2002 年使用该系统进行大气风场观测<sup>[75]</sup>。

2004 年,Halo-Photonics 公司基于掺 Er, Yb 激光放大器,研发出了波长为 1.562  $\mu\text{m}$ ,脉冲能量为 1.15 mJ 的高功率激光器<sup>[76]</sup>。并于 2005 年使用该高功率激光器将相干多普勒测风激光雷达的探测距离提升至 8 km<sup>[77]</sup>。并使用该雷达对雷暴<sup>[78]</sup>、晴空

湍流<sup>[79]</sup>、热带雨林的边界层变化<sup>[80]</sup>、冰晶云下落速度<sup>[81]</sup>、湍流耗散率<sup>[82]</sup>等进行了研究。图9为该公司基于其产品对大气垂直速度及云顶高度的反演结果。目前,Halo-Photonics 公司将产品线分为长距离探测和短距离探测的相干多普勒测风激光雷达,可以实现视线风场和三维风场探测。其探测距离最远的产品为 Stream Line<sup>XR</sup>。

DTU 风能技术中心主要研究风力发电领域的相关技术,在相干多普勒测风激光雷达领域与 ZephIR 和 Leosphere 等公司有大量合作。由于风力发电领域对激光雷达的制造成本要求苛刻,因此 DTU 更关注于造价相对便宜的连续波相干多普勒测风激光雷达。Abari 课题组从理论上设计了具有区分径向风速方向的连续波相干多普勒测风激光雷达<sup>[83-85]</sup>,并从理论上提出了一种可以同时测大气退偏振比和大气风场的相干多普勒测风激光雷达<sup>[86]</sup>。DTU 也致力于使用更便宜的半导体激光器替代光纤激光器,进一步降低相干多普勒测风激光雷达的成本<sup>[87-88]</sup>。DTU 还推出了商用的 WindScanner 产品,有脉冲式和连续波两种模式,可以实现 0~300 m 高度的风场探测。表 2 给出了国外相干激光雷达主要研究单位及指标。

得益于国内光纤器件制造工艺的提高,以及机场飞行安全、环保产业、风力发电等对风场观测需求的加大,国内相干多普勒测风激光雷达的技术水平发展迅猛。

2010年,中国电子科技集团公司第二十七研究

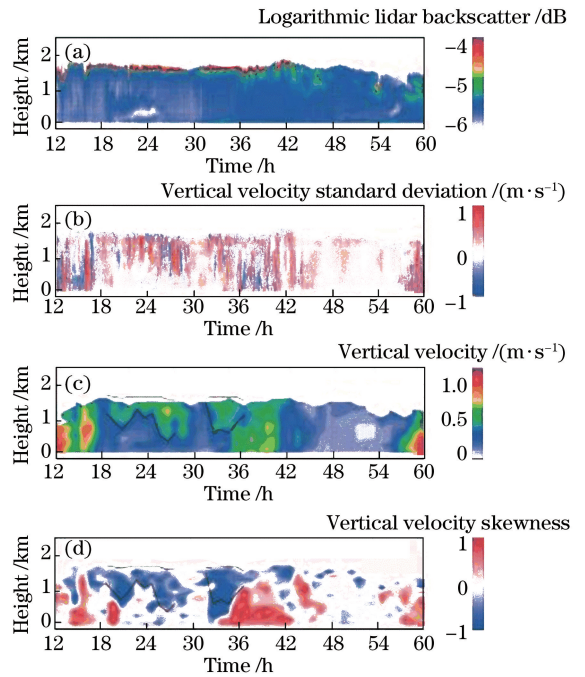


图9 Halo-Photonics 公司机载雷达风速测量结果边界层反演结果。(a)相干激光雷达后向散射系数;(b)垂直风速标准差;(c)垂直风速;(d)垂直速度偏度

Fig. 9 Halo-Photonics airborne lidar wind measurement results and boundary layer inversion results. (a) Coherent lidar backscatter coefficient; (b) vertical velocity standard deviation; (c) vertical velocity; (d) vertical velocity skewness

所李冬梅等<sup>[89]</sup>报道了一套基于 1.5 μm 的连续波相干多普勒测风激光雷达系统,实现了 200 m 距离内的风速测量。2013年和2015年,潘静岩等<sup>[90]</sup>和

表2 1.5 μm 国外相干激光雷达研究单位及指标

Table 2 Research institutes and parameters of 1.5 μm coherent lidar abroad

Company(year)	Wavelength / Energy /		Pulsewidth /	PRF /	Detection	Distance	Telescope
	μm	μJ					
Mitsubishi (2001) <sup>[37]</sup>	1.540	10900	228	15000	5	—	100
Halo-Photonics (2004) <sup>[77]</sup>	1.562	1150	—	—	8	—	—
Mitsubishi (2010) <sup>[42]</sup>	1.500	5	500	4000	1.5	70	50
FiberTek (2011) <sup>[34]</sup>	1.500	120	800	25000	—	—	—
Mitsubishi (2012) <sup>[47]</sup>	1.550	1400	580	4000	30	300	150
SgurrEnergy (2013) <sup>[74]</sup>	1.550	—	—	—	4	—	—
ONERA (2014) <sup>[55]</sup>	1.545	500	650	10000	16	200	—
QinetiQ (2015)	1.500	—	—	10000	0.2	20	—
NASA (2016) <sup>[30-31]</sup>	1.500	240	400	20000	0.4-10	15-60	101
Leosphere (2017)	1.540	—	25-200	—	12-14	25-200	—
LMCT (2017) <sup>[29]</sup>	1.617	2500±500	250±50	750	15	100	—
Halo-Photonics (2017)	1.562	—	800	—	12	18-120	—

Note: QinetiQ data are from ZephIR 300 (<https://www.zxlidars.com/wind-lidars/zx-300/>); Leosphere data are from WindCube (<https://www.leosphere.com/>); Halo-Photonics data are from Stream Line XR ([http://halo-photonics.com/StreamLine-XR-Doppler\\_Li](http://halo-photonics.com/StreamLine-XR-Doppler_Li))

封治华等<sup>[91]</sup>又分别报道了全光纤相干多普勒测风激光雷达系统与测风塔和探空气球的对比实验,在800 m的探测距离内,均取得了良好结果。

2011年,西南技术物理所(SITP)(209所)冯力天等<sup>[92]</sup>报道了1.55  $\mu\text{m}$ 全光纤相干多普勒测风激光雷达系统,实现了5~200 m高度范围内的风场测量,并与实验基地内测风塔数据进行了对比。

中国科学院上海精密光学机械研究所 Liu等<sup>[93]</sup>和 Diao等<sup>[94]</sup>2012年报道了基于全光纤1.539  $\mu\text{m}$ 的相干多普勒测风激光雷达,并于2014年对系统进行了升级,实现了水平3 km、垂直方向1.9 km的探测距离。2015年,刁伟峰等<sup>[95]</sup>采用非线性最小二乘法对激光雷达测量的风速剖面矢量进行反演,对比了激光雷达与风廓线雷达测量的风速,两者测量的水平风速、风向和垂直风速的相关系数分别为0.988,0.941,0.966。

北京理工大学张寅超课题组一直从事于相干多普勒测风激光雷达的理论研究。在2014年,与中国科学院上海精密光学机械研究所合作研制了一台全光纤的相干多普勒测风激光雷达系统,基于该系统进行了一些模拟仿真的研制和数据处理算法的研究<sup>[96]</sup>。

2017年,209所范琪等<sup>[97]</sup>报道了全光纤相干多普勒测风激光雷达系统在不同天气类型下的探测性能,证明了晴天、阴天、雾霾天和雨天4种天气类型下该系统都具有良好的性能。

中国海洋大学 Wu等<sup>[98]</sup>于2014年报道了

1.55  $\mu\text{m}$ 全光纤相干多普勒测风激光雷达系统。并将其用于风电厂的风场观测。经过不断改造和升级后,推出了商用的 WindPrint 系统,并报道了该系统在不同地形下的探测性能,以及用于湍流探测的一些算法<sup>[99-101]</sup>。2018年,冯长中等<sup>[101]</sup>提出基于共轭梯度算法的速度方位显示风场反演方法,应用最优化理论将共轭梯度算法代替传统傅里叶变换算法。

2017年,中国科学技术大学 Wang等<sup>[102]</sup>成功研制了世界上第一台能同时观测大气退偏振比和大气风场的相干多普勒测风激光雷达。测风模式下该系统在100  $\mu\text{J}$ 脉冲能量,15 kHz重复频率时,可以实现6 km的水平探测距离。相比于传统的相干测风激光雷达,该系统采用时分复用的模式,将回波信号通过偏振分束器(PBS)后,将P偏振态经过3 km的延时后到达探测器与本振光拍频,从而实现偏振态的测量。其装置图和系统测量结果如图10所示。

同年,Wang等<sup>[103]</sup>提出利用联合时频分析的方法对相干激光雷达数据进行处理,可以清楚地检测出风切变的动态结构。相比于传统的快速傅里叶变换算法,自适应最优核时频分布具有运算量小、交叉项抑制效果好、时频聚集度高等优点。表3为国内相干激光雷达研究单位及指标。

图11给出了国内外1.5  $\mu\text{m}$ 相干激光雷达的探测距离及脉冲能量指标,可以看出,探测距离随着激光脉冲量的增大而增大,同时国内机构研究相对于国外研究机构起步比较晚。

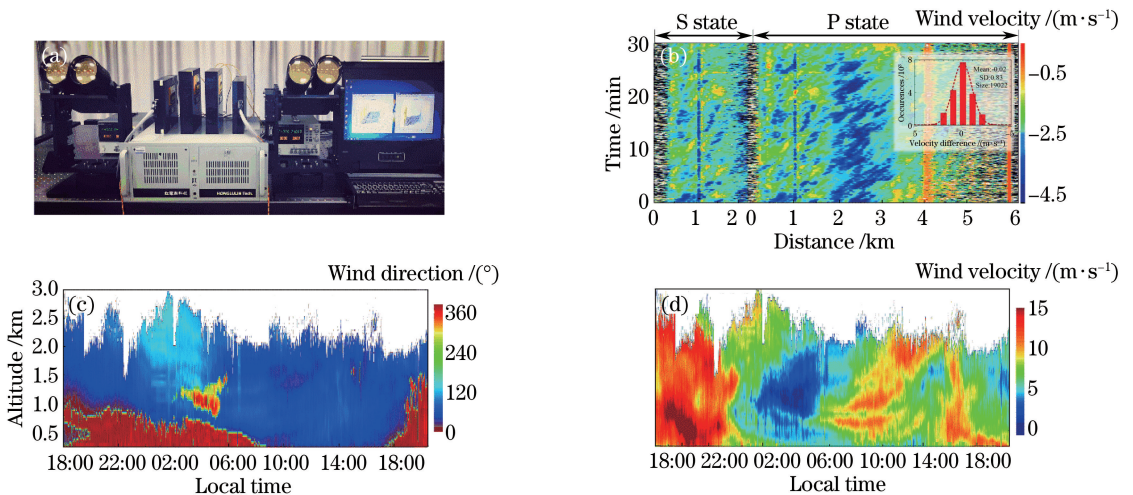


图10 中国科学技术大学全光纤测风激光雷达及风速风向测量结果。(a)相干激光雷达样机;(b)利用单平衡探测器从S态和P态反散射反演得到的风速,插图表示S态和P态之间的速度差;(c)水平风速;(d)水平风向

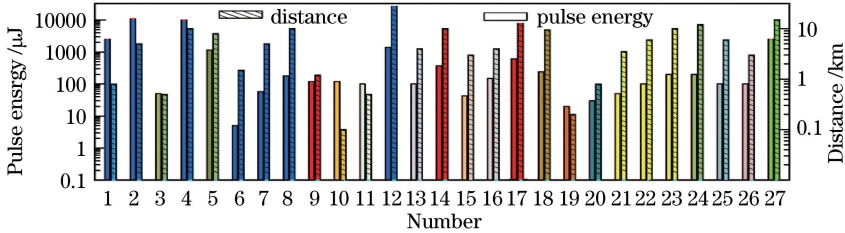
Fig. 10 All-fiber coherent wind lidar of USTC and results of wind velocity and direction. (a) Coherent lidar prototype; (b) wind velocity retrieved from both S and P states backscattering by single balanced detector, in which the inset shows the difference in velocity between S and P states; (c) horizontal wind speed; (d) horizontal wind direction



表3 国内相干激光雷达研究单位及指标

Table 3 Research institutes and parameters of coherent Doppler lidar in China

Company (year)	Wavelength / $\mu\text{m}$	Energy / $\mu\text{J}$	Pulse width / ns	PRF / Hz	Detection range / km	Distance resolution / m	Telescope diameter / mm
STIP (2011) <sup>[92]</sup>	1.550	100	—	—	3	—	—
SIOM (2012) <sup>[94]</sup>	1.540	43	500	10000	3	75	50
OUC (2015) <sup>[98]</sup>	1.550	50	400	10000	4	60	—
USTC (2017) <sup>[102]</sup>	1.548	100	300	15625	6	60	80



1: MEC (1998); 2: MEC (2001); 3:Halo-Photonics (2002); 4: MEC (2003); 5: Halo-Photonics (2004); 6: MEC (2006); 7: MEC (2007); 8: MEC (2007); 9: ONERA (2009); 10: FiberTek (2011); 11: SITP (2011); 12: MEC (2012); 13: SgurrEnergy (2013); 14: ONERA (2014); 15: SIOM (2014); 16: OUC (2014); 17: ONERA (2015); 18: NASA (2015); 19: QinetiQ (2015); 20: CETC27 (2015); 21: Lesosphere (2017); 22: NASA (2017); 23: Lesosphere (2017); 24: Halo-Photonics (2017); 25: USTC (2017); 26: SITP (2017); 27: LMCT (2017);

图11 1.5  $\mu\text{m}$  激光雷达研究机构探测距离及脉冲能量指标

Fig. 11 Detection distance and pulse energy parameters of 1.5  $\mu\text{m}$  lidar research institutions

2.5 2.0  $\mu\text{m}$  相干激光雷达研究现状

2.0  $\mu\text{m}$  波长在人眼安全方面优势巨大,比1.06  $\mu\text{m}$ 波长的人眼允许最大曝光功率高4个数量级。出于对人眼安全的考虑,2.0  $\mu\text{m}$ 波长的全固态相干多普勒测风激光雷达系统比1.06  $\mu\text{m}$ 系统应用领域更广泛。

第一台2.09  $\mu\text{m}$ 波长的相干多普勒测风激光雷达使用闪光灯抽运的  $\text{Tm, Ho} : \text{YAG}$  激光器,由Henderson课题组在1990年首次报道<sup>[104-105]</sup>。1991年,Henderson等<sup>[106]</sup>进一步优化了雷达系统,使用2.0  $\mu\text{m}$ 波长的激光器,在20 mJ的激光脉冲能量,20 cm直径的望远镜情况下,实现了20 km距离的水平风场探测和145 km的硬目标探测。基于Henderson的技术,美国相干技术公司使用纯半导体

抽运的  $\text{Tm} : \text{YAG}$  激光器,设计出了第一台2.01  $\mu\text{m}$ 的机载相干多普勒测风激光雷达,并于1994年使用NASA的波音737飞机进行机载实验,该系统使用InGaAs探测器,脉冲能量为1.8 mJ,脉冲宽度为0.5  $\mu\text{s}$ ,距离分辨率为75 m,探测到了风切变和微下击暴流<sup>[107]</sup>。1996年,该公司经过改进设计,进行了精度为10 cm/s的机载矢量风场探测。NOAA使用类似设计的相干多普勒测风激光雷达,基于船载<sup>[108]</sup>或地基系统<sup>[109-111]</sup>,在空间分辨率最高为30 m情况下,对大气边界层进行了多年的高分辨率风场观测<sup>[112]</sup>。图12为其观测结果。得益于2.0  $\mu\text{m}$ 激光器和激光雷达数据处理技术<sup>[113-114]</sup>的发展,美国洛克希德马丁公司合并美国相干技术公司后,推出了成熟的商用WindTracer<sup>[115-116]</sup>相干多普勒测风激光雷达系统。

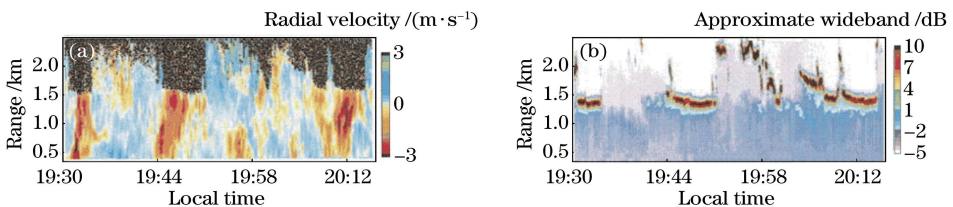


图12 NOAA相干激光雷达风速测量结果。(a)径向风速数据;(b)对应的相对后向散射强度

Fig. 12 NOAA lidar wind velocity measurement results. (a) Radial velocity data; (b) corresponding relative backscatter intensity profile

NASA和美国空军将高脉冲能量(10 mJ),100 Hz脉冲重复频率的2  $\mu\text{m}$ 相干多普勒测风激光

雷达系统用在机载测风应用上,用于晴空湍流探测以及飞机周边的风场探测。2012年,NASA的

Kavaya 等<sup>[117]</sup>报道了基于  $2\ \mu\text{m}$  相干多普勒测风激光雷达风速测量结果。该系统采用的脉冲能量为

250 mJ, 重复频率为 10 Hz, 脉宽为 180 ns。图 13 为其实验风速的测量结果。

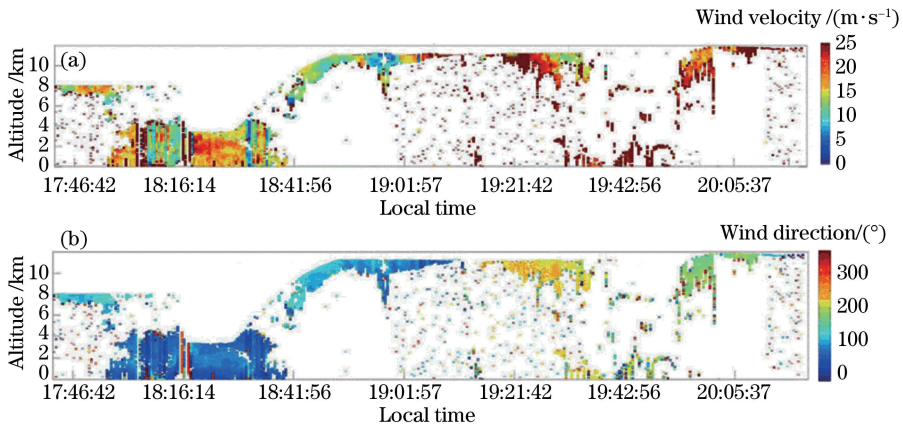


图 13 NASA 相干激光雷达风速风向测量结果。(a) 风速; (b) 风向

Fig. 13 NASA lidar wind velocity and wind direction results measurement results. (a) Wind velocity; (b) wind direction

单脉冲能量达到 125 mJ 的  $2.0\ \mu\text{m}$  激光器系统还计划用于星载测风激光雷达系统<sup>[118]</sup>, 目前也有小部分  $2.0\ \mu\text{m}$  的系统被集成在其他类型的雷达系统中<sup>[119]</sup>。

2010 年, 哈尔滨工业大学李彦超<sup>[120]</sup>建立了  $2.0\ \mu\text{m}$  相干测风激光雷达系统, 对理论模型、 $2.0\ \mu\text{m}$  处的光学设计及信号流程算法进行了验证。其中激光器单脉冲能量为 2 mJ, 重复频率为 100 Hz, 脉冲宽度为 300 ns, 望远镜口径为 150 mm, 得到了 16 m 和 96 m 处探测目标外差信号。

2015 年, 北京理工大学步志超等<sup>[121]</sup>基于全微分和统计理论对  $2.0\ \mu\text{m}$  星载相干测风激光雷达的风速及风向误差进行建模。建立了通用型的星载相干测风激光雷达合成水平风速和风向误差计算模型, 朱振宇等<sup>[122]</sup>对地基相干激光雷达的关键技术进行了分析。

### 3 相干激光雷达应用

从上述相干激光雷达发展历程来看, 目前其应

用方向主要有以下几个方面:

1) 风切变测量。风切变是指风速矢量在空中水平或垂直距离上的变化。风切变会使飞机偏离路线, 造成飞机失事。中国香港九龙天文台基于  $2.0\ \mu\text{m}$  的相干激光雷达实现了风切变的追踪, 其测量结果如图 14 所示, 图中 UTC 为协调世界时<sup>[123]</sup>。

2) 飞机尾流测量。飞机的飞行过程会对大气产生扰动, 其翼尖会产生涡旋流动场, 严重威胁飞行器的飞行安全。ONERA 基于  $1.5\ \mu\text{m}$  机载相干激光雷达, 对飞机产生的飞机轴向的涡流进行提取, 其测量结果如图 15 所示<sup>[124]</sup>。

3) 湍流测量。大气湍流常在大气边界层由大气不规则运动产生, 湍流扩散会伴随能量和物质交换, 其产生的剪切力远大于层流运动, 从而造成飞机飞行事故。NOAA 基于相干激光雷达风速测量结果, 反演出大气的湍流信息, 并对混合层的高度进行了估计。图 16 为垂直风速误差和混合层高度, 其中黑色线条表示混合层的高度<sup>[125]</sup>。

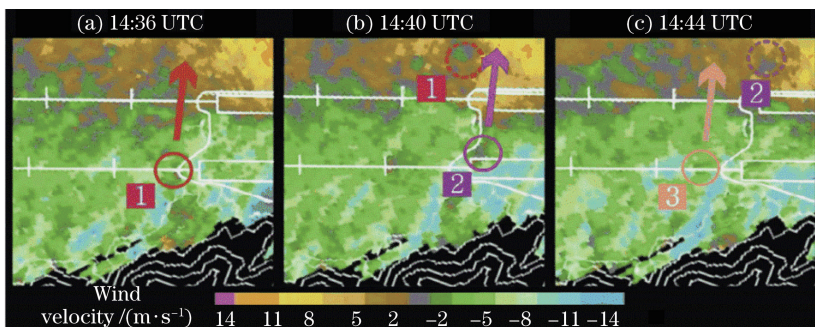


图 14 中国香港九龙天文台测得的风切变

Fig. 14 Wind shear detected by Kowloon Observatory, Hong Kong, China

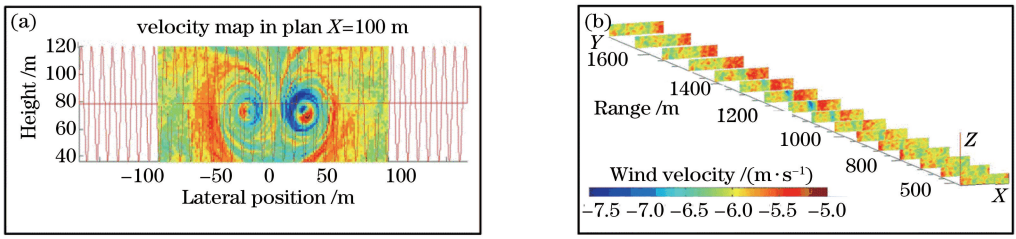


图 15 ONERA 测得的飞机涡流。(a)尾流涡模型径向速度;(b)平均速度三维视图  
Fig. 15 Aircraft wake vortex detected by ONERA. (a) Radial velocity of wake vortex model;  
(b) 3D view of mean velocity images

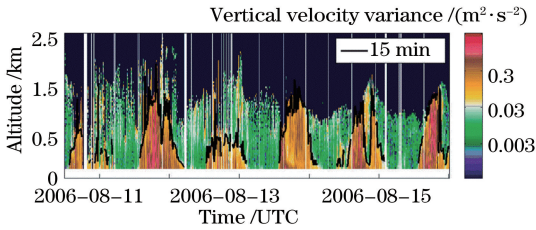


图 16 垂直风速误差和混合层高度图  
Fig. 16 Results of vertical wind velocity error and mixed layer height

4) 重力波分析。大气的温度、密度、风场等参数

信息会随着重力波活动发生变化,重力波的产生与强对流活动、背景风场、灾害性天气联系也十分密切。DLR 基于相干激光雷达的水平 and 垂直风速信息对纳维亚山脉的内部重力波进行表征。图 17 为其水平方向不同高度处风速图和小波变换后的功率谱图<sup>[126]</sup>。

5) 风能发电。风能作为新兴能源,其重要作用是风能发电,随着相干激光雷达稳健性的提高,其对大气研究和电力寻址等方面起着非常重要的作用。图 18 为中国海洋大学利用其相干激光雷达系统对风机及其周围风场扫描得到的结果<sup>[100]</sup>。

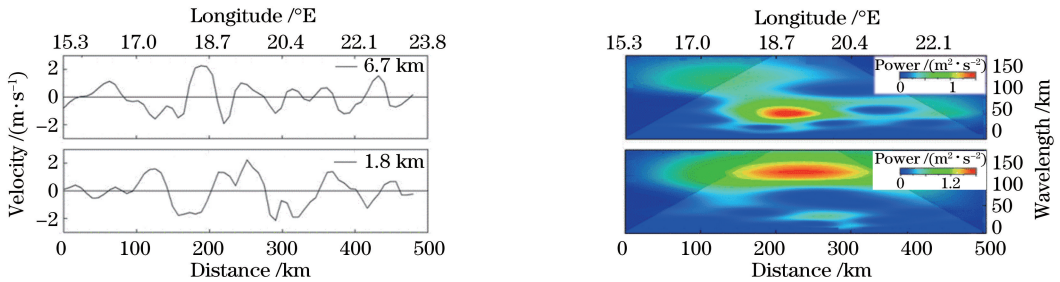


图 17 1.8 km 和 6.7 km 处的(a)水平风及(b)小波变换功率谱  
Fig. 17 (a) Horizontal wind perturbations and (b) wavelet power spectra measured at 1.8 km and 6.7 km altitude

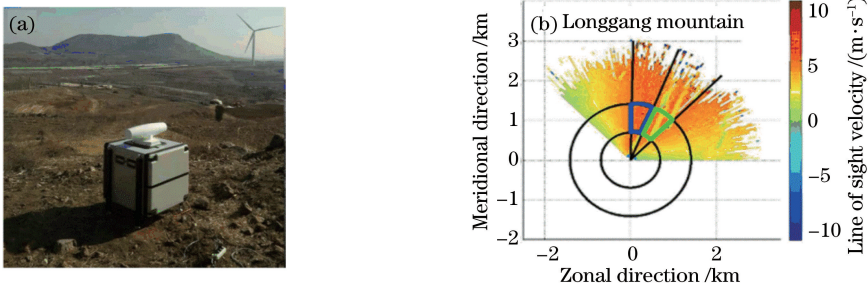


图 18 中国海洋大学相干激光雷达风速测量结果。(a)雷达样机;(b)风速测量结果  
Fig. 18 OUC lidar wind velocity measurement results. (a) Lidar prototype; (b) wind velocity measurement results

4 相干激光雷达发展趋势

通过对国内外相干激光雷达发展历史的总结,相干激光雷达呈现以下的发展趋势:

1) 相干激光雷达历经气态到全固态,再到全光

纤相干测风激光雷达三个过程,激光器的波长也由 10.6  $\mu\text{m}$  到 1.06  $\mu\text{m}$ ,再到 2.0  $\mu\text{m}$  和 1.5  $\mu\text{m}$ ,其中主流波段主要在 1.5  $\mu\text{m}$ 。

2) 由于风场的双向测量比单方向测量优势更明显,相干激光雷达也从以单一角度锥扫描发展到

多角度扫描模式,实现了三维风场的探测。

3) 随着相干探测技术的提高,相干激光雷达探测风速灵敏度以及探测距离增加。但是由于气溶胶主要分布在5 km以下,随着探测距离增加气溶胶含量急剧下降,从而增加了回波信号的探测难度,因此,相干激光雷达测风垂直探测距离往往限制在5 km的高度。目前通过光纤放大器并联、抽运放大等方式可提高激光器能量,从而提高测量距离。

4) 人眼安全方面得到满足,1.55  $\mu\text{m}$  附近 MPE 达到最大值,比 2.1  $\mu\text{m}$  高约 1 个数量级,比 1.06  $\mu\text{m}$  高约 6 个数量级。同时 1.5  $\mu\text{m}$  波段的光纤和光器件生产工艺成熟,大气窗口透过率高等优点也使得目前相干激光雷达研究的主流波段为 1.55  $\mu\text{m}$ 。

5) 从商业化角度来看,国外实现商业集成化的公司较多,如 Leosphere、Halo-Photonics 公司、日本三菱电机公司等,而国内研究机构目前主要用于实验研究,相对成熟的相干激光雷达公司较少。

6) 从信号算法处理角度来看,从传统的快速傅里叶变换、周期图算法,到联合时频分析等信号处理方法应用,从时间-频率域刻画了信号全貌,提高了系统的距离分辨率。

## 5 结 论

相干激光雷达因具有高精度、高时空分辨等优点被广泛应用于用大气风场测量、航空航天安全等各个方面。随着激光技术的发展,相干激光雷达技术也不断成熟,相干激光雷达目前已经实现全光纤结构,并朝着小型化、集成化的趋势迈进,本文介绍的各项研究机构成果对相干激光雷达的工作展开具有指导意义。

## 参 考 文 献

- [1] Huffaker R M. Laser Doppler detection systems for gas velocity measurement [J]. *Applied Optics*, 1970, 9(5): 1026-1039.
- [2] Quant F, Farmer K R, Tan P V, *et al.* Handheld laser induced breakdown spectroscopy device: US9506869 [P/OL]. 2016-11-29 [2018-05-21]. <http://www.freepatentsonline.com/9506869.html>.
- [3] Phillips M W, Hannon S M, Henderson S W, *et al.* Solid state coherent lidar technology for space-based wind measurement[J]. *Proceedings of SPIE*, 1997, 2956: 68-76.
- [4] Ikesue A, Kinoshita T, Kamata K, *et al.*

Fabrication and optical properties of high-performance polycrystalline Nd : YAG ceramics for solid-state lasers [J]. *Journal of the American Ceramic Society*, 1995, 78(4): 1033-1040.

- [5] Shanguan M J. Laser remote sensing with 1.5  $\mu\text{m}$  single photon detectors [D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2017.  
上官明佳. 1.5  $\mu\text{m}$  单光子探测器在激光遥感中的应用[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2017.
- [6] Philippov V, Codemard C, Jeong Y, *et al.* High-energy in-fiber pulse amplification for coherent lidar applications[J]. *Optics Letters*, 2004, 29(22): 2590-2592.
- [7] Zhu J P. *Optoelectronic technology foundation*[M]. Beijing: Science Press, 2009.  
朱京平. *光电子技术基础*[M]. 北京: 科学出版社, 2009.
- [8] Xia H Y. Direct detection Doppler wind lidar based on aerosol backscattered signal with twin-channel Fabry-Perot etalon [D]. Suzhou: Soochow University, 2006.  
夏海云. 基于气溶胶后向散射的双边缘直接探测多普勒测风激光雷达研究[D]. 苏州: 苏州大学, 2006.
- [9] Patel C K. Interpretation of CO<sub>2</sub> optical maser experiments[J]. *Physical Review Letters*, 1964, 12(21): 588-590.
- [10] Huffaker R M, Jelalian A V, Thomson J A L. Laser-Doppler system for detection of aircraft trailing vortices [J]. *Proceedings of the IEEE*, 1970, 58(3): 322-326.
- [11] Vaughan J M, Harris M. Lidar measurement of B747 wakes: observation of a vortex within a vortex [J]. *Aerospace Science and Technology*, 2001, 5(6): 409-411.
- [12] Köpp F, Schwiesow R L, Werner C. Remote measurements of boundary-layer wind profiles using a CW Doppler lidar [J]. *Journal of Applied Meteorology*, 1984, 23(1): 148-154.
- [13] Woodfield A A, Vaughan J M. Using an airborne CO<sub>2</sub> CW laser for free stream airspeed and wind shear measurements[Z]. [S. l.]: AGARD Flight Test Techniques Series, 1984: 18.
- [14] Vaughan J M, Brown D W, Davies P H, *et al.* Comparison of SAGE II solar extinction data with airborne measurements of atmospheric backscattering in the troposphere and lower stratosphere[J]. *Nature*, 1988, 332(6166): 709-

- 711.
- [15] Bilbro J W, Vaughan W W. Wind field measurement in the nonprecipitous regions surrounding severe storms by an airborne pulsed Doppler lidar system[J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 1978, 59(9): 1095-1101.
- [16] Bilbro J W, DiMarzio C, Fitzjarrald D, *et al.* Airborne Doppler lidar measurements[J]. *Applied Optics*, 1986, 25(21): 3952-3960.
- [17] Hall F F, Huffaker R M, Hardesty R M, *et al.* Wind measurement accuracy of the NOAA pulsed infrared Doppler lidar[J]. *Applied Optics*, 1984, 23(15): 2503-2506.
- [18] Post M J, Neff W D. Doppler lidar measurements of winds in a narrow mountain valley[J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 1986, 67(3): 274-281.
- [19] Post M J, Cupp R E. Optimizing a pulsed Doppler lidar[J]. *Applied Optics*, 1990, 29(28): 4145-4158.
- [20] Banta R M, Olivier L D, Gudiksen P H, *et al.* Implications of small-scale flow features to modeling dispersion over complex terrain [J]. *Journal of Applied Meteorology*, 1996, 35(3): 330-342.
- [21] Rothermel J, Cutten D R, Hardesty R M, *et al.* The multi-center airborne coherent atmospheric wind sensor [J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 1998, 79(4): 581-600.
- [22] Doran J C, Fast J D, Horel J. The VTMX 2000 campaign [J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2002, 83(4): 537-554.
- [23] Mayor S D, Lenschow D H, Schwiesow R L, *et al.* Validation of NCAR 10.6  $\mu\text{m}$  CO<sub>2</sub> Doppler lidar radial velocity measurements and comparison with a 915 MHz profiler[J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 1997, 14(5): 1110-1126.
- [24] Kavaya M J, Menzies R T. Lidar aerosol backscatter measurements: systematic, modeling, and calibration error considerations [J]. *Applied Optics*, 1985, 24(21): 3444-3453.
- [25] Werner C, Flamant P H, Reitebuch O, *et al.* Wind infrared Doppler lidar instrument [J]. *Optical Engineering*, 2001, 40(1): 115-126.
- [26] Kane T J, Byvik C E, Kozlovsky W J, *et al.* Coherent laser radar at 1.06  $\mu\text{m}$  using Nd : YAG lasers[J]. *Optics Letters*, 1987, 12(4): 239-241.
- [27] Kavaya M J, Henderson S W, Magee J R, *et al.* Remote wind profiling with a solid-state Nd : YAG coherent lidar system[J]. *Optics Letters*, 1989, 14(15): 776-778.
- [28] Hawley J G, Targ R, Henderson S W, *et al.* Coherent launch-site atmospheric wind sounder: theory and experiment[J]. *Applied Optics*, 1993, 32(24): 4557-4568.
- [29] Proctor F H, Hamilton D W. Evaluation of fast-time wake vortex prediction models [C] // 47th AIAA Aerospace Sciences Meeting Including The New Horizons Forum and Aerospace Exposition, January 5-8, 2009, Orlando, Florida. Virginia: AIAA, 2009: 344.
- [30] Prasad N S, Tracy A, Vettori S, *et al.* Innovative fiber-laser architecture-based compact wind lidar [J]. *Proceedings of SPIE*, 2016, 9754: 97540J.
- [31] Prasad N S, Sibell R, Vettori S, *et al.* An all-fiber, modular, compact wind lidar for wind sensing and wake vortex applications [J]. *Proceedings of SPIE*, 2015, 9465: 94650C.
- [32] Spuler S M, Richter D, Spowart M P, *et al.* Optical fiber-based laser remote sensor for airborne measurement of wind velocity and turbulence [J]. *Applied Optics*, 2011, 50(6): 842-851.
- [33] Akbulut M, Hwang J, Kimpel F, *et al.* Pulsed coherent fiber lidar transceiver for aircraft in-flight turbulence and wake-vortex hazard detection [J]. *Proceedings of SPIE*, 2011, 8037: 80370R.
- [34] Engin D, Mathason B, Stephen M, *et al.* High energy, narrow linewidth 1572 nm Er, Yb-fiber based MOPA for a multi-aperture CO<sub>2</sub> trace-gas laser space transmitter [J]. *Proceedings of SPIE*, 2016, 9728: 97282S.
- [35] Kameyama S, Yanagisawa T, Ando T, *et al.* Development of wind sensing coherent Doppler LIDAR at Mitsubishi Electric Corporation—from late 1990s to 2013 [C] // *Proceedings of 17th Coherent Laser Radar Conference*, June 17-20, 2013, Barcelona, Spain. Huntsville, Alabama: Universities Space Research Association, 2013: 12-13.
- [36] Asaka K, Hirano Y, Morimoto Y, *et al.* Er, Yb : glass coherent lidar using a microchip laser as a reference optical source [J]. *The Review of Laser Engineering*, 1998, 26(12): 876-880.
- [37] Yanagisawa T, Asaka K, Hamazu K, *et al.* 11-mJ, 15-Hz single-frequency diode-pumped Q-switched Er, Yb : phosphate glass laser [J]. *Optics Letters*, 2001, 26(16): 1262-1264.

- [38] Asaka K, Yanagisawa T, Hirano Y. 1.5  $\mu\text{m}$  eye-safe coherent lidar system for wind velocity measurement [J]. Proceedings of SPIE, 2001, 4153: 321-329.
- [39] Fujiyoshi Y, Yamashita K, Fujiwara C. Visualization of streaks, thermals and waves in the atmospheric boundary layer [J]. Journal of visualization, 2006, 9(4): 359-359.
- [40] Kameyama S, Ando T, Asaka K, *et al.* Compact all-fiber pulsed coherent Doppler lidar system for wind sensing [J]. Applied Optics, 2007, 46(11): 1953-1962.
- [41] Ando T, Kameyama S, Hirano Y. All-fiber coherent Doppler lidar technologies at Mitsubishi Electric Corporation [J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2008, 1(1): 012011.
- [42] Chan P W, Lee Y F. Application of short-range lidar in wind shear alerting [J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 2012, 29(2): 207-220.
- [43] Inokuchi H, Tanaka H, Ando T. Development of a long range airborne Doppler lidar [C/OL] // Proceedings of 27th Congress of International Council of the Aeronautical Sciences, ICAS, September 19-24, 2010, Nice, France. [S.l.: s.n.], 2010 [2018-05-21]. [http://icas.org/ICAS\\_ARCHIVE/ICAS2010/PAPERS/179.PDF](http://icas.org/ICAS_ARCHIVE/ICAS2010/PAPERS/179.PDF).
- [44] Inokuchi H, Endo E, Ando T, *et al.* Development of an airborne wind measurement system [J]. Proceedings of SPIE, 2009, 7328: 738205.
- [45] Inokuchi H, Tanaka H, Ando T. Development of an onboard Doppler lidar for flight safety [J]. Journal of Aircraft, 2009, 46(4): 1411-1415.
- [46] Sakimura T, Watanabe Y, Ando T, *et al.* 3.2 mJ, 1.5  $\mu\text{m}$  laser power amplifier using an Er, Yb : glass planar waveguide for a coherent Doppler LIDAR [C] // Proceedings of 17th Coherent Laser Radar Conference, June 17-20, 2013, Barcelona, Spain. Huntsville, Alabama: Universities Space Research Association, 2013: 35-39.
- [47] Kameyama S, Sakimura T, Watanabe Y, *et al.* Wind sensing demonstration of more than 30 km measurable range with a 1.5  $\mu\text{m}$  coherent Doppler LIDAR which has the laser amplifier using Er, Yb : glass planar waveguide [J]. Proceedings of SPIE, 2012, 8526: 85260E.
- [48] Inokuchi H, Furuta M, Inagaki T. High altitude turbulence detection using an airborne Doppler lidar [C/OL] // Proceedings of 29th Congress of the International Council of the Aeronautical Sciences, September 7-12, 2014, Petersburg, Russia. [S.l.: s.n.], 2014 [2018-05-21]. [http://www.icas.org/ICAS\\_ARCHIVE/ICAS2014/data/papers/2014\\_0208\\_paper.pdf](http://www.icas.org/ICAS_ARCHIVE/ICAS2014/data/papers/2014_0208_paper.pdf).
- [49] Dolfi-Bouteyre A, Augère B, Besson C, *et al.* 1.5  $\mu\text{m}$  all fiber pulsed lidar for wake vortex monitoring [C] // Conference on Lasers and Electro-Optics, May 4-9, 2008, San Jose, California United States. Washington: Optical Society of America, 2008: CMQ3.
- [50] Canat G, Lombard L, Durécu A, *et al.* Er-Yb-Doped LMA fiber structures for high energy amplification of narrow linewidth pulses at 1.5  $\mu\text{m}$  [C] // Conference on Lasers and Electro-Optics, May 6-11, 2007, Baltimore, Maryland United States. Washington: Optical Society of America, 2007: CTuBB1.
- [51] Dolfi-Bouteyre A, Canat G, Valla M, *et al.* Pulsed 1.5  $\mu\text{m}$  LIDAR for axial aircraft wake vortex detection based on high-brightness large-core fiber amplifier [J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2009, 15(2): 441-450.
- [52] Dolfi-Bouteyre A, Augere B, Valla M, *et al.* Aircraft wake vortex study and characterization with 1.5  $\mu\text{m}$  fiber Doppler lidar [J]. Aerospace Lab, 2009(1): 1-13.
- [53] Renard W, Goular D, Valla M, *et al.* Beyond 10 km range wind-speed measurement with a 1.5  $\mu\text{m}$  all-fiber laser source [C] // CLEO: Applications and Technology, June 8-13, 2014, San Jose, California United States. Washington: Optical Society of America, 2014: AW1P. 5.
- [54] Lombard L, Valla M, Planchat C, *et al.* Eyesafe coherent detection wind lidar based on a beam-combined pulsed laser source [J]. Optics Letters, 2015, 40(6): 1030-1033.
- [55] Lombard L, Dolfi-Bouteyre A, Besson C, *et al.* Long range wind lidars based on novel high spectral brilliance all-fibered sources [J]. Proceedings of SPIE, 2015, 9645: 96450B.
- [56] Thobois L P, Krishnamurthy R, Loac S. Wind and EDR measurements with scanning Doppler LIDARs for preparing future weather dependent separation concepts [C] // 7th AIAA Atmospheric and Space

- Environments Conference, June 22-26, 2015, Dallas, Texas, USA. Virginia: AIAA, 2015: 3317.
- [57] Thobois L, Loaec S, Boquet M, *et al.* Recent developments of WINDCUBE Doppler Lidars for airport wind hazards monitoring [R/OL] // WakeNet-Eu 2014 Workshop, 2014 [2018-05-21]. [http://www.wakenet.eu/fileadmin/user\\_upload/Workshop2014/Presentations/WakeNetEurope\\_Workshop2014\\_504\\_Thobois.pdf](http://www.wakenet.eu/fileadmin/user_upload/Workshop2014/Presentations/WakeNetEurope_Workshop2014_504_Thobois.pdf).
- [58] Vrancken P, Wirth M, Rempel D, *et al.* Clear air turbulence detection and characterization in the DELICAT airborne lidar project [C/OL] // Proceedings of the 25th International Laser Radar Conference, July 5-9, Petersburg, Russia, [S.l.: s.n.]. 2010 [2018-05-21]. [https://elib.dlr.de/67271/1/Seiten\\_aus\\_ILRC\\_25\\_PROCEEDINGS\\_VOL\\_1.pdf](https://elib.dlr.de/67271/1/Seiten_aus_ILRC_25_PROCEEDINGS_VOL_1.pdf).
- [59] Besson C, Augere B, Canat G, *et al.* New fiber laser for lidar developments in disaster management [J]. Proceedings of SPIE, 2014, 9250: 92500H.
- [60] Barbaresco F, Thobois L, Dolfi-Bouteyre A, *et al.* Monitoring wind, turbulence and aircraft wake vortices by high resolution RADAR and LIDAR remote sensors in all weather conditions[C/OL] // Proceedings of URSI France JS 15, Paris. [S.l.: s.n.]. 2015: 81-110 [2018-05-21]. [http://webistem.com/ursi-f2015/output\\_directory/cd1/data/articles/000033.pdf](http://webistem.com/ursi-f2015/output_directory/cd1/data/articles/000033.pdf).
- [61] Hallermeyer A, Dolfi-Bouteyre A, Valla M, *et al.* Development and assessment of a Wake Vortex characterization algorithm based on a hybrid LIDAR signal processing[C] // 8th AIAA Atmospheric and Space Environments Conference, June 13-17, 2016, Washington, DC. Virginia: AIAA, 2016: 3272.
- [62] Kigle S. Wake identification and characterization of a full scale wind energy converter in complex terrain with scanning Doppler wind Lidar systems [D]. München: Ludwig-Maximilians-Universität München, 2017.
- [63] Augros C, Tabary P, Davrinche D, *et al.* Test of an X-band Doppler polar metric radar combined with a Doppler LIDAR for wind shear detection at Nice Airport[C/OL] // The Seventh European Conference on Radar in Meteorology and Hydrology, June 25-29, 2012, Toulouse, France. [S.l.: s.n.], 2012 [2018-05-21]. [http://www.meteo.fr/cic/meetings/2012/ERAD/extended\\_abs/ATM\\_014\\_ext\\_abs.pdf](http://www.meteo.fr/cic/meetings/2012/ERAD/extended_abs/ATM_014_ext_abs.pdf).
- [64] Gibert F, Dumas A, Thobois L, *et al.* Afternoon transition turbulence decay revisited by Doppler Lidar[C/OL] // Symposium on Boundary Layer and Turbulence, July 8-13, 2012, Boston, USA. [2018-05-21]. [http://bllast.sedoo.fr/workshops/february2016/presentations/FabienGibert\\_TKE-budget.pdf](http://bllast.sedoo.fr/workshops/february2016/presentations/FabienGibert_TKE-budget.pdf).
- [65] Chen Y, An J, Wang X, *et al.* Observation of wind shear during evening transition and an estimation of submicron aerosol concentrations in Beijing using a Doppler wind lidar [J]. Journal of Meteorological Research, 2017, 31(2): 350-362.
- [66] Karlsson C J, Olsson F A, Letalick D, *et al.* All-fiber multifunction continuous-wave coherent laser radar at 1.55  $\mu\text{m}$  for range, speed, vibration, and wind measurements [J]. Applied Optics, 2000, 39(21): 3716-3726.
- [67] Harris M, Constant G, Ward C. Continuous-wave bistatic laser Doppler wind sensor [J]. Applied Optics, 2001, 40(9): 1501-1506.
- [68] Jørgensen H E, Mikkelsen T, Mann J, *et al.* Site wind field determination using a CW Doppler LIDAR-comparison with cup anemometers at Riso [C] // Special Topic Conference: The Science of Making Torque from Wind, April 19-21, 2004. Delft, Netherlands. [S.l.]: Delft University of Technology, 2004: 261-266.
- [69] Smith D A, Harris M, Coffey A S, *et al.* Wind lidar evaluation at the Danish wind test site in Høvsøre [J]. Wind Energy, 2006, 9(1/2): 87-93.
- [70] Bingöl F. Adapting a Doppler laser anemometer to wind energy [D]. Lyngby: Technical University of Denmark, 2005.
- [71] Pearson G N, Roberts P J, Eacock J R, *et al.* Analysis of the performance of a coherent pulsed fiber lidar for aerosol backscatter applications [J]. Applied Optics, 2002, 41(30): 6442-6450.
- [72] Wang H, Barthelmie R J, Crippa P, *et al.* Profiles of wind and turbulence in the coastal atmospheric boundary layer of Lake Erie [J]. Journal of Physics: Conference Series, 2014, 524(1): 012117.
- [73] Gottschall J, Wolken-Möhlmann G, Lange B. About offshore resource assessment with floating lidars with special respect to turbulence and extreme events [J]. Journal of Physics: Conference Series, 2014, 555(1): 012043.
- [74] Gottschall J. Galion lidar performance verification

- [R/OL]. Fraunhofer IWES, 2013 [2018-05-21]. [https://www.woodgroup.com/\\_\\_\\_data/assets/pdf\\_file/0023/15692/report\\_Sgurr\\_20130529\\_FINAL1.pdf](https://www.woodgroup.com/___data/assets/pdf_file/0023/15692/report_Sgurr_20130529_FINAL1.pdf).
- [75] Pearson G N, Eacock J R. Fiber-based coherent pulsed Doppler lidar for atmospheric monitoring[J]. Proceedings of SPIE, 2002, 4484: 51-58.
- [76] Philippov V N, Sahu J K, Codemard C A, *et al.* All-fiber 1.15-mJ pulsed eye-safe optical source[J]. Proceedings of SPIE, 2004, 5335: 1-8.
- [77] Pearson G N, Ridley K D, Willetts D V. Long range 3D active imagery with a scanned single element 1.5  $\mu\text{m}$  coherent lidar system [J]. Proceedings of SPIE, 2005, 5988: 59880M.
- [78] Collier C G, Davies F, Davies J, *et al.* Doppler radar and lidar observations of a thunderstorm outflow [C] // Proceedings of Fifth European Conference on Radar in Meteorology and Hydrology, June 30-July 4, 2008, Helsinki. [S.l.: s.n.], 2008-12-04.
- [79] Hogan R J, Grant A L M, Illingworth A J, *et al.* Vertical velocity variance and skewness in clear and cloud-topped boundary layers as revealed by Doppler lidar [J]. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 2009, 135(640): 635-643.
- [80] Pearson G, Davies F, Collier C. Remote sensing of the tropical rain forest boundary layer using pulsed Doppler lidar [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2010, 10(13): 5891-5901.
- [81] Westbrook C D, Illingworth A J, O'Connor E J, *et al.* Doppler lidar measurements of oriented planar ice crystals falling from supercooled and glaciated layer clouds [J]. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 2010, 136(646): 260-276.
- [82] O'Connor E J, Illingworth A J, Brooks I M, *et al.* A method for estimating the turbulent kinetic energy dissipation rate from a vertically pointing Doppler lidar, and independent evaluation from balloon-borne *in situ* measurements [J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 2010, 27(10): 1652-1664.
- [83] Abari C F, Pedersen A T, Mann J. An all-fiber image-reject homodyne coherent Doppler wind lidar [J]. Optics Express, 2014, 22(21): 25880-25894.
- [84] Pedersen A T, Abari C F, Mann J, *et al.* Theoretical and experimental signal-to-noise ratio assessment in new direction sensing continuous-wave Doppler lidar [J]. Journal of Physics: Conference Series, 2014, 524(1): 012004.
- [85] Abari C F, Dellwik E, Mann J. Performance evaluation of an all-fiber image-reject homodyne coherent Doppler wind lidar [J]. Atmospheric Measurement Techniques, 2015, 8(10): 4145-4153.
- [86] Abari C F, Chu X, Hardesty R M, *et al.* A reconfigurable all-fiber polarization-diversity coherent Doppler lidar: principles and numerical simulations[J]. Applied Optics, 2015, 54(30): 8999-9009.
- [87] Hu Q, Rodrigo P J, Pedersen C. Remote wind sensing with a CW diode laser lidar beyond the coherence regime [J]. Optics Letters, 2014, 39(16): 4875-4878.
- [88] Rodrigo P J, Pedersen C. Comparative study of the performance of semiconductor laser based coherent Doppler lidars [J]. Proceedings of SPIE, 2012, 8241: 824112.
- [89] Li D M, Zheng Y C, Pan J Y, *et al.* Index system of coherence Doppler wind lidar [J]. Optics Technology, 2010, 6: 880-884.  
李冬梅, 郑永超, 潘静岩, 等. 相干多普勒激光测风雷达系统研究[J]. 光学技术, 2010, 6: 880-884.
- [90] Pan J Y, Qin S Y, Liu G, *et al.* Coherent laser wind measurement radar wind field measurement technology [J]. Infrared and Laser Engineering, 2013, 42(7): 1720-1724.  
潘静岩, 邬双阳, 刘果, 等. 相干激光测风雷达风场测量技术[J]. 红外与激光工程, 2013, 42(7): 1720-1724.
- [91] Feng Z H, Du G L. Research and verification of coherent Doppler wind lidar [J]. Laser and Infrared, 2015, 45(2): 128-132.  
封治华, 杜改丽. 相干多普勒激光测风雷达系统研究及验证[J]. 激光与红外, 2015, 45(2): 128-132.
- [92] Feng L T, Guo H Q, Chen Y, *et al.* Experiment of all fiber Doppler lidar at 1.55  $\mu\text{m}$  [J]. Infrared and Laser Engineering, 2011, 40(5): 844-847.  
冯力天, 郭弘其, 陈涌, 等. 1.55  $\mu\text{m}$  全光纤多普勒测风雷达系统与试验[J]. 红外与激光工程, 2011, 40(5): 844-847.
- [93] Liu J, Chen W, Zhu X. Development of all-fiber coherent Doppler LIDAR to measure atmosphere wind speed [C] // Optical Instrumentation for Energy and Environmental Applications, November 11-14, 2012. Eindhoven Netherlands. Washington: Optical Society of America, 2012: ET4D. 1.



- [94] Diao W, Zhang X, Liu J, *et al.* All fiber pulsed coherent lidar development for wind profiles measurements in boundary layers [J]. Chinese Optics Letters, 2014, 12(7): 072801.
- [95] Diao W F, Liu J, Zhu X P, *et al.* Study of all-fiber coherent Doppler lidar wind profile nonlinear least square retrieval method and validation experiment [J] Chinese Journal of Lasers, 2015, 42(9): 0914003.  
刁伟峰, 刘继桥, 竹孝鹏, 等. 全光纤相干多普勒激光雷达非线性最小二乘风速反演方法及实验研究 [J]. 中国激光, 2015, 42(9): 0914003.
- [96] Bu Z, Zhang Y, Chen S, *et al.* Noise modeling by the trend of each range gate for coherent Doppler LIDAR [J]. Optical Engineering, 2014, 53(6): 063109.
- [97] Fan Q, Zhu K Y, Zheng J F, *et al.* Detection performance analysis of all-fiber coherent lidar under different weather types [J]. Chinese Journal of Lasers, 2017, 44(2): 0210003.  
范琪, 朱克云, 郑佳锋, 等. 不同天气类型下全光纤相干激光测风雷达探测性能分析 [J]. 中国激光, 2017, 44(2): 0210003.
- [98] Wu S, Yin J, Liu B, *et al.* Characterization of turbulent wake of wind turbine by coherent Doppler lidar [J]. Proceedings of SPIE, 2014, 9262: 92620H.
- [99] Zhai X, Wu S, Liu B. Doppler lidar investigation of wind turbine wake characteristics and atmospheric turbulence under different surface roughness [J]. Optics Express, 2017, 25(12): A515-A529.
- [100] Wu S, Liu B, Liu J, *et al.* Wind turbine wake visualization and characteristics analysis by Doppler lidar [J]. Optics Express, 2016, 24(10): A762-A780.
- [101] Feng C Z, Wu S H, Liu B Y. Research on wind retrieval method of coherent Doppler lidar and experiment verification [J]. Chinese Journal of Lasers, 2018, 45(4): 0410001.  
冯长中, 吴松华, 刘秉义. 相干多普勒激光雷达风场反演方法研究与实验印证 [J]. 中国激光, 2018, 45(4): 0410001.
- [102] Wang C, Xia H, Shangguan M, *et al.* 1.5  $\mu\text{m}$  polarization coherent lidar incorporating time-division multiplexing [J]. Optics Express, 2017, 25(17): 20663-20674.
- [103] Wang C, Xia H, Liu Y, *et al.* Spatial resolution enhancement of coherent Doppler wind lidar using joint time-frequency analysis [J]. Optics Communications, 2018, 424: 48-53.
- [104] Henderson S W, Hale C P, Magee J R, *et al.* Eye-safe coherent laser radar system at 2.1  $\mu\text{m}$  using Tm, Ho : YAG lasers [J]. Optics Letters, 1991, 16(10): 773-775.
- [105] Suni P J M, Henderson S W. 1-mJ/pulse Tm : YAG laser pumped by a 3-W diode laser [J]. Optics Letters, 1991, 16(11): 817-819.
- [106] Henderson S W, Suni P J M, Hale C P, *et al.* Coherent laser radar at 2  $\mu\text{m}$  using solid-state lasers [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1993, 31(1): 4-15.
- [107] Targ R, Steakley B C, Hawley J G, *et al.* Coherent lidar airborne wind sensor II: flight-test results at 2 and 10  $\mu\text{m}$  [J]. Applied Optics, 1996, 35(36): 7117-7127.
- [108] Wulfmeyer V, Randall M, Brewer A, *et al.* 2- $\mu\text{m}$  Doppler lidar transmitter with high frequency stability and low chirp [J]. Optics Letters, 2000, 25(17): 1228-1230.
- [109] Lenschow D H, Wulfmeyer V, Senff C. Measuring second-through fourth-order moments in noisy data [J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 2000, 17(10): 1330-1347.
- [110] Newsom R K, Banta R M. Shear-flow instability in the stable nocturnal boundary layer as observed by Doppler lidar during CASES-99 [J]. Journal of the Atmospheric Sciences, 2003, 60(1): 16-33.
- [111] Poulos G S, Blumen W, Fritts D C, *et al.* CASES-99: A comprehensive investigation of the stable nocturnal boundary layer [J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 2002, 83(4): 555-581.
- [112] Grund C J, Banta R M, George J L, *et al.* High-resolution Doppler lidar for boundary layer and cloud research [J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 2001, 18(3): 376-393.
- [113] Frehlich R, Hannon S M, Henderson S W. Performance of a 2- $\mu\text{m}$  coherent Doppler lidar for wind measurements [J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 1994, 11(6): 1517-1528.
- [114] Frehlich R, Hannon S M, Henderson S W. Coherent Doppler lidar measurements of winds in the weak signal regime [J]. Applied Optics, 1997, 36(15): 3491-3499.
- [115] Henderson S W, Yuen E H, Hannon S M. Autonomous lidar wind field sensor: design and

- performance[J]. Proceedings of SPIE, 1999, 3757: 18-28.
- [116] Hannon S M. Autonomous infrared Doppler radar: Airport surveillance applications [J]. Physics and Chemistry of the Earth, Part B: Hydrology, Oceans and Atmosphere, 2000, 25(10/11/12): 1005-1011.
- [117] Kavaya M J, Beyon J Y, Koch G J, *et al.* The Doppler aerosol wind (DAWN) airborne, wind-profiling coherent-detection Lidar system: overview and preliminary flight results [J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 2014, 31(4): 826-842.
- [118] Yu J, Singh U N, Barnes N P, *et al.* 125-mJ diode-pumped injection-seeded Ho : Tm : YLF laser[J]. Optics Letters, 1998, 23(10): 780-782.
- [119] Koch G J, Petros M, Barnes B W, *et al.* Validar: a testbed for advanced 2-micron Doppler lidar [J]. Proceedings of SPIE, 2004, 5412: 87-98.
- [120] Li Y C. Study on heterodyne method and key technology for 2-micrometer wind lidar [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2012.  
李彦超. 2  $\mu\text{m}$  激光测风雷达外差探测方法与关键技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2012.
- [121] Bu Z C, Chen S Y, Zhang Y C, *et al.* Error modeling and analysis on wind speed and direction for 2  $\mu\text{m}$  space based coherent Doppler lidar [J]. Journal of Infrared and Millimeter Waves, 2015, 34(4): 465-470.  
步志超, 陈思颖, 张寅超, 等. 2  $\mu\text{m}$  星载相干测风激光雷达风速及风向误差建模与分析[J]. 红外与毫米波学报, 2015, 34(4): 465-470.
- [122] Zhu Z Y, Gao K, Han L, *et al.* Technical analysis of space-based coherent wind lidar [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2015, 52(10): 101201.  
朱振宇, 高昆, 韩璐, 等. 天基相干测风激光雷达技术分析[J]. 激光与光电子学进展, 2015, 52(10): 101201.
- [123] Shun C M, Chan P W. Applications of an infrared Doppler lidar in detection of wind shear[J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 2008, 25(5): 637-655.
- [124] Dolfi-Bouteyre A, Canat G, Valla M, *et al.* Pulsed 1.5- $\mu\text{m}$  LIDAR for axial aircraft wake vortex detection based on high-brightness large-core fiber amplifier[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2009, 15(2): 441-450.
- [125] Tucker S C, Senff C J, Weickmann A M, *et al.* Doppler lidar estimation of mixing height using turbulence, shear, and aerosol profiles[J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 2009, 26(4): 673-688.
- [126] Witschas B, Rahm S, Dörnbrack A, *et al.* Airborne wind lidar measurements of vertical and horizontal winds for the investigation of orographically induced gravity waves[J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 2017, 34(6): 1371-1386.