

# 激光多普勒测风技术最新进展

马福民<sup>1</sup>, 陈涌<sup>2\*</sup>, 杨泽后<sup>2,3</sup>, 周鼎富<sup>2</sup>, 李晓锋<sup>2</sup>, 陈春利<sup>2</sup>, 冯力天<sup>2</sup>, 余臣<sup>2</sup>

<sup>1</sup>中国人民解放军海军装备部驻西安地区军事代表局, 陕西 西安 710043;

<sup>2</sup>西南技术物理研究所, 四川 成都 610041;

<sup>3</sup>北京理工大学物理学院, 北京 100081

**摘要** 激光多普勒测风雷达利用光学多普勒效应来实现对大气风场的非接触式测量, 具有空间和时间分辨率高、覆盖范围大、探测距离大等特点, 适用于可移动式、地基、车载、舰载、机载、星载等多种承载平台, 广泛应用于飞行安全、风力发电、气象预报、科学研究、国防军事等领域。针对当前激光多普勒测风雷达的主要体制、技术、国内外最新研究成果及应用进行介绍和分析, 对直接探测和相干探测 2 种测风技术进行比较, 并对激光多普勒测风技术的发展趋势、研究热点和应用拓展进行简要总结。

**关键词** 遥感; 测风; 多普勒激光雷达; 风场

**中图分类号** TN958.98

**文献标识码** A

**doi:** 10.3788/LOP56.180003

## Latest Development of Laser Doppler Wind Measurement Technology

Ma Fumin<sup>1</sup>, Chen Yong<sup>2\*</sup>, Yang Zehou<sup>2,3</sup>, Zhou Dingfu<sup>2</sup>, Li Xiaofeng<sup>2</sup>,  
Chen Chunli<sup>2</sup>, Feng Litian<sup>2</sup>, Yu Chen<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Equipment Department of the Navy Stationed in Xi'an Military Representative Bureau,  
Chinese People's Liberation Army, Xi'an, Shaanxi 710043, China;

<sup>2</sup>Southwest Institute of Technical Physics, Chengdu, Sichuan 610041, China;

<sup>3</sup>School of Physics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China

**Abstract** Doppler wind lidar can ensure non-contact measurement of the atmospheric wind field based on optical Doppler effect. Doppler wind lidar is scalable with high resolution in time and space and exhibits large coverage and wide detection range. Further, it is suitable for mobile, foundation, vehicle, shipboard, airborne, and spaceborne platforms and is extensively used in flight safety, wind power generation, weather forecasting, scientific research, military defense, and so on. Herein, the main systems, technologies, latest developments, and applications of Doppler wind lidar at home and abroad are introduced and analyzed. Further, two techniques for direct and coherent detection are compared and summarized based on our analysis. In addition, the development trends, research hotspots, and application development of Doppler wind lidar are briefly summarized.

**Key words** remote sensing; wind measurement; Doppler lidar; wind field

**OCIS codes** 280.3640; 010.0280; 010.3640

## 1 引言

大气风对人类的日常工作与生活影响较大。对大气风场进行实时快速探测与分析在飞行安全、数值天气预报、灾害天气防治、空间天气态势分析、风力发电、轨道测风、星际测风、军事环境预报等方面

具有重要意义<sup>[1-6]</sup>。因此,对大气各高度层(数米到数百千米)的风场分布进行快速主动遥测,在军事、民用领域具有广泛的应用,是现代雷达技术的一个重要应用领域。

主动式大气风遥测手段有很多,常见的有微波雷达、声雷达、激光多普勒测风雷达等。激光多普勒

收稿日期: 2019-01-15; 修回日期: 2019-03-07; 录用日期: 2019-04-10

基金项目: 四川省重大科技专项(2018TZDZX0006)、中国兵器工业集团联合基金(6141B010254)

\* E-mail: 151953766@qq.com

测风雷达利用光学多普勒效应来测量大气风场,具有空间和时间分辨率高、覆盖范围大、探测距离大等特点<sup>[7-8]</sup>。激光与传统光源相比具有强度高、单色性好、相干性强等优点,自20世纪60年代激光出现以来,激光多普勒测风技术一直是研究的热点。

经过50多年的发展,激光多普勒测风雷达从诞生初期仅应用于基础技术演示<sup>[9]</sup>,已发展到目前适用于可移动式、地基、车载、舰载、机载、星载等多种承载平台,其具备更高的激光效率和输出功率、更强大的镀膜加工工艺、更先进的结构材料,可探测从数米到数千千米的大气风场数据,广泛应用于航空、风力发电、气象、国防军事等领域。

本文对当前激光多普勒测风雷达的主要体制即直接探测技术和相干探测技术进行分析和比较,介绍这2种互补技术的最新发展成果及应用,并在此基础上总结激光多普勒测风技术的发展趋势和研究热点。

## 2 基本原理

### 2.1 激光多普勒测风技术概述

激光多普勒测风技术是一种利用大气中气溶胶对激光后向散射回波的多普勒频移效应来实现对大气风场分布的非接触式测量方法<sup>[7]</sup>。激光多普勒测风雷达依据激光对大气散射的多普勒频移而设计,工作原理如图1<sup>[10]</sup>所示。其中,频率为 $f_x = c/\lambda$ 的发射激光束被大量粒子(气溶胶粒子和分子)散射,其中 $c$ 为光速, $\lambda$ 为激光波长。不考虑相对论效应,激光发射机的频率 $f_p$ 为

$$f_p = f_x + (v/\lambda) \cos \phi_x, \quad (1)$$

式中: $v$ 为平均风速; $\phi_x$ 为速度分量与投射到激光发射机视线的夹角。同样,接收器测得的激光反射的频率 $f_r$ 为

$$f_r = f_p + (v/\lambda) \cos \phi_r, \quad (2)$$

式中, $\phi_r$ 为速度分量与投射到激光接收机视线的夹角。

因此,多普勒频移 $f_D$ 为

$$f_D = f_r - f_x = \frac{v(\cos \phi_x + \cos \phi_r)}{\lambda}. \quad (3)$$

若光学系统为收发合一,则 $\phi_r = \phi_x = \phi$ ,多普勒频移即为

$$f_D = 2v \cos \phi / \lambda = 2v_{\text{los}} / \lambda, \quad (4)$$

式中,径向速度 $v_{\text{los}}$ 为投射到收发器视线的速度分量。通过接收器得到多普勒频移,从而测得径向风速<sup>[10]</sup>。

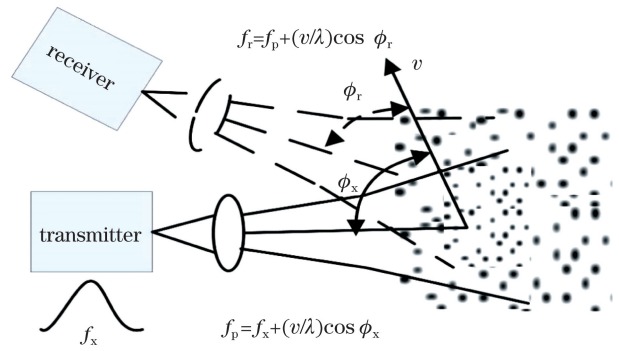


图1 激光多普勒测风雷达的工作原理<sup>[10]</sup>

Fig. 1 Principle of Doppler wind lidar<sup>[10]</sup>

### 2.2 检测技术

激光多普勒测风雷达通过大量气溶胶、云粒子和空气体积中分子运动的多普勒效应来测量风速。通常,激光多普勒测风雷达通过2种不同的检测技术来实现对多普勒频移的光谱鉴频:1)直接探测,即通过光谱分析方式实现对多普勒频移的测量;2)相干探测,即通过光学混频方式实现对多普勒频移的测量。

通过检测技术,激光多普勒测风雷达可以获取测量高度的径向风。如果需要测量三维大气风场(水平风速、水平风向、垂直气流),则需要利用扫描技术获取风场信息<sup>[11]</sup>。

直接探测激光多普勒测风雷达依赖于信号强度或光子数量获取风场信息,而相干探测激光多普勒测风雷达则通过测量后向散射信号的相位和频率获取风场信息。由于探测方式不同,因此相干探测、直接探测激光多普勒测风雷达在激光器、大气后向散射、接收器、校准方式、附加参数、技术成熟度、主要应用领域等各个方面存在不同,详细情况如表1<sup>[8]</sup>所示。

#### 2.2.1 直接探测技术

基于直接探测技术的激光多普勒测风雷达采用光谱分析方式鉴频,直接采用光频鉴频器或光谱分析仪,通过对接收信号与发射信号的相对能量变化来测量频移,从而实现对风速多普勒信号的测量<sup>[12]</sup>。直接探测激光多普勒测风技术主要有条纹(成像)技术和边缘技术。边缘技术利用窄带鉴频器,如Mach-Zehnder干涉仪、F-P标准具、Michelson干涉仪、光栅等,或者利用各种原子、分子滤波器,如碘、钠、钾、银蒸汽滤波器,将频率信号的变化转换为相对能量信号的变化来测定多普勒频移<sup>[13-14]</sup>;条纹技术利用干涉形成的条纹移动来测量频率的变化,主要采用Fizeau干涉仪或F-P标准具产生环形条纹或线形条纹<sup>[14-15]</sup>。图2<sup>[11]</sup>所示为利用双边缘技术

表 1 相干探测、直接探测激光多普勒测风雷达比较<sup>[8]</sup>

Table 1 Comparison of coherent detection and direct detection Doppler wind lidar<sup>[8]</sup>

Contrastive item	Coherent detection lidar	Direct detection lidar
Wavelength and lasers	CO <sub>2</sub> gas lasers at 10.6 μm, Tm:LuAG or Tm, Ho:YAG at 2 μm, Er-doped fiber at 1.5-1.6 μm	Nd:YAG at 1 064 nm, frequency doubled at 532 nm and tripled at 355 nm
Atmospheric backscatter	atmospheric aerosol	molecules with Rayleigh-Brillouin line shape (broad bandwidth), aerosol and cloud return
Receiver	mainly heterodyne detection	1) edge technology: edge filter based on optical interferometer, such as F-P (Farby-Perot) etalon or molecular edge absorption filter; 2) fringe image technology: fringe image detection based on optical interferometer, such as F-P interferometer
Calibration	no calibration needed	calibration needed to obtain relationship between Doppler frequency shift and detected signal
Additional parameter	no additional parameters needed for wind retrieval	atmospheric temperature and pressure needed for correction of retrieved wind from molecular backscatter
Technology readiness	systems commercially available	mainly for research systems
Main application	1) vertical wind profiles of the atmosphere from the ground to an altitude about 10 km; 2) wind shear and gust front detection, as well as other high-resolution and high-density wind measurements at high data rates; 3) aircraft wake detection and tracking near the airport; 4) aerial wind measurements to detect clear-sky turbulence in front of aircraft; 5) weather forecast; 6) wind power monitoring	wind sensing for higher altitudes of upper troposphere, stratosphere, and mesosphere, such as orbital and interstellar wind measurements

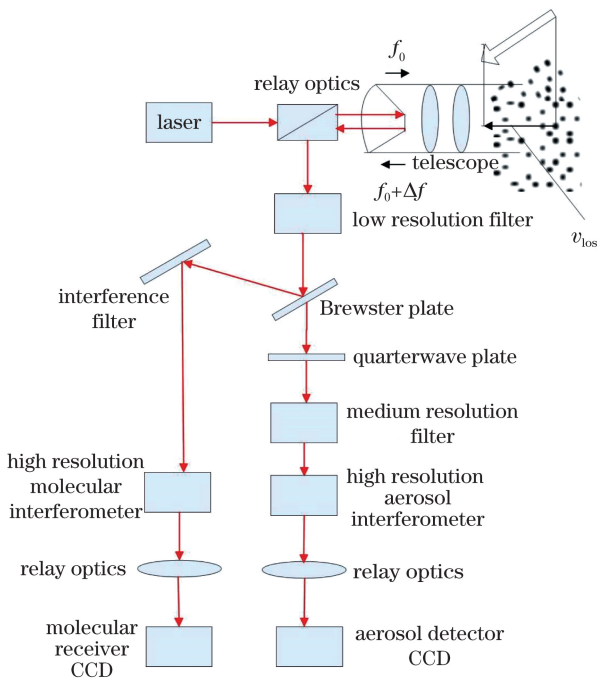


图 2 直接探测激光多普勒测风雷达原理示意图<sup>[11]</sup>

Fig. 2 Principle of direct detection Doppler wind lidar<sup>[11]</sup>

的直接探测激光多普勒测风雷达原理示意图,其中  $f_0$  为激光器发射频率,  $\Delta f$  为大气风场对激光产生的多普勒频移。发射激光脉冲通过一个中继光学器件到达发射望远镜并进入大气层。大气后向散射的回波通过布氏片将接收系统分为 2 个通道,即气溶胶和分子通道。2 个通道都通过几个滤光片,最后由电荷耦合器件(CCD)探测器进行记录,完成多普勒风速测量。直接探测激光多普勒测风雷达适用于对大气气溶胶散射、分子散射、共振荧光散射的探测,具有从近地面到高空大气探测的能力<sup>[11]</sup>。

### 2.2.2 相干探测技术

基于相干探测技术的激光多普勒测风雷达采用光学混频方式来实现对风速多普勒信号的测量<sup>[10]</sup>,根据多普勒频移可计算气溶胶颗粒相对于光束方向的运动速度,得到气溶胶沿光束方向的风速分量。图 3<sup>[16-17]</sup>所示为相干探测激光多普勒测风雷达原理示意图,其中 CW 为连续波,T/R 为发射/接收。激光器提供频率为  $f_0$  的本振光输出,同时分出一束激光作为发射激光。发射激光经声光调制器(AOM)

调制,产生频移  $f_{AOM}$ ,在激光放大器中进行放大后,得到频率为  $f_0 + f_{AOM}$  的较大功率激光脉冲输出。放大输出的激光脉冲经分束器分出一部分与声光调制后的光信号进行混频,得到频率为  $f_{AOM}$  的参考信号<sup>[16]</sup>。同时,大部分放大后的发射激光经过 AOM 后,经天线和扫描器发射激光。假设大气风场对激光产生的多普勒频移为  $\Delta f$ ,接收到气溶胶的散射回波信号中心频率为  $f_0 + f_{AOM} + \Delta f$ ,并与雷达本

振光进行相干混频,经过平衡探测器转换成  $f_{AOM} + \Delta f$  的回波信号<sup>[16]</sup>。回波信号与参考信号进行相干混频后,通过对中频信号的数字鉴频和信息处理,获取气溶胶沿光束方向的风速分量<sup>[17]</sup>。通过扫描装置可测得不同方向的径向风速,从而获得测量范围内的大气风场信息。因多普勒展宽较窄,相干探测技术适用于对大气气溶胶,大气对流层高度内风场的探测。

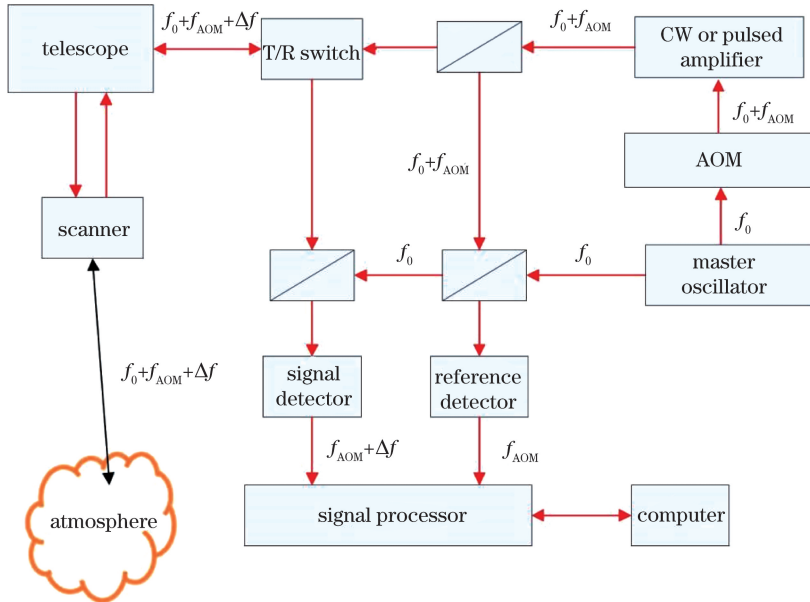


图 3 相干探测激光多普勒测风雷达原理示意图<sup>[16-17]</sup>

Fig. 3 Principle of coherent detection Doppler wind lidar<sup>[16-17]</sup>

## 3 研究进展

### 3.1 直接探测激光多普勒测风技术

自 1972 年, Benedti-Michelangeli 等用 F-P 干涉仪搭建第一台直接探测激光多普勒测风雷达系统以来,直接探测激光多普勒测风技术得到了快速发展<sup>[8]</sup>。直接探测激光多普勒测风雷达已被证明可以提供从地面到海拔 60 km 的风场信息<sup>[18]</sup>,甚至可以提供更大距离的风场信息。近几年,边缘技术被广泛采用,其中的典型代表为美国国家航空航天局(NASA)Goddard 公司的对流层风激光雷达技术实验(TWiLITE)测风仪和欧洲航空局的远程星载直接探测激光多普勒测风雷达。

2001 年,美国 NASA Goddard 公司的 Gentry 等<sup>[19]</sup>利用双边缘直接探测测风理论,成功研制出车载激光多普勒测风雷达系统 GLOW(Goddard Lidar Observatory for Winds)。2009 年, NASA Goddard 公司开发完成 TWiLITE 多普勒测风雷达,如图 4<sup>[20]</sup>所示,该系统采用双边缘技术,以单

频、导电冷却的 Nd:YAG 激光器为发射装置,接收系统采用 F-P 标准具,工作波长为 355 nm,测量距离为 250 m~18 km,垂直分辨率为 250 m,速度精度优于 2 m/s<sup>[20]</sup>。2009 年 9 月,该系统集成在 ER-2 Q 航班,并完成多次飞行任务,进一步测试了该仪器的性能。此后,工作人员重新配置该仪器,作为 NASA 飓风和严重风暴哨兵计划的一部



图 4 TWiLITE 多普勒测风雷达<sup>[20]</sup>

Fig. 4 TWiLITE Doppler wind lidar<sup>[20]</sup>

分,完成了美国空军“全球鹰”无人机的 25 区飞行测试<sup>[21]</sup>。

NASA Goddard 公司近年来致力于开发火星激光雷达(MARLI),设计并测试用于火星轨道的直接探测激光多普勒测风雷达。该雷达采用双边缘光学鉴别技术,用于测量来自轨道的风廓线,目前处于早期实验室测试阶段。当前设计的激光测风雷达指

向角为  $30^\circ$ ,用于测量环绕火星极地轨道的大气风。图 5<sup>[22]</sup>所示为 MARLI 测量概念图。图 5(a)为 MARLI 测量跨轨道方向风的多普勒频移,实现风的测量;图 5(b)为 MARLI 指向距最低点  $30^\circ \sim 45^\circ$  的交叉轨道,用于测量交叉轨道方向的风场信息;图 5(c)为采用双发射器/接收器系统实现连续矢量风的测量<sup>[22]</sup>。

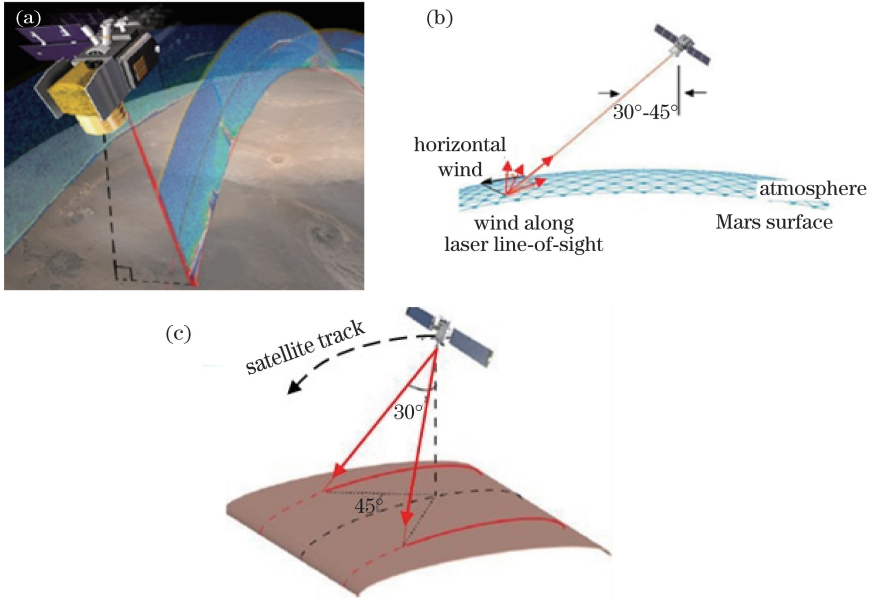


图 5 MARLI 测量概念图。(a)火星极地轨道上测量概念图;(b)测量方向;(c)允许矢量风测量的双光束概念图<sup>[22]</sup>

Fig. 5 Conceptual drawings of MARLI measurement. (a) Conceptual drawing in Mars polar orbit;

(b) measurement orientation; (c) dual-beam concept of instrumental lowering vector wind measurement<sup>[22]</sup>

为在全球观测系统中获取更丰富的直接风廓线数据,欧洲航天局在 1999 年全面启动全球第一台星载直接探测激光多普勒测风雷达计划,开始研制远程星载直接探测激光多普勒测风雷达(ALADIN)<sup>[23]</sup>。该雷达采用二极管抽运三倍频 Nd:YAG 激光器,波长为 355 nm,重复频率为 50 Hz,脉冲能量为 60 mJ,选择双边缘的 F-P 干涉仪进行瑞利散射。图 6<sup>[24]</sup>为 ALADIN 测量示意图。ALADIN 搭载海拔为 400 km 的卫星沿极地轨道进行测量,望远镜指向方向以  $\alpha = 35^\circ$  偏离最低点,激光发射方向与卫星运行方向垂直,因此卫星飞行速度在视线方向的分量为 0,可以消除卫星飞行速度对风速测量的影响。ALADIN 通过向大气发射激光,接收大气气溶胶、云粒子、大气分子散射的回波,计算由大气运动所产生的激光多普勒频移,从而测得风速<sup>[24]</sup>,获取地面和平流层下部(0~30 km)的风速<sup>[25]</sup>。该雷达于 2005 年 10 月首次被部署在飞机上,此后经过 10 年的发展,ALADIN 对大气风廓线进行全球连续观测,测量距离从 250 m 到 2 km,风速精度优于

2 m/s<sup>[26-28]</sup>。2018 年 8 月 22 日,ALADIN 搭乘 Vega 火箭从法国圭亚那的欧洲太空港基地成功升空,在距离地球 320 km 的高空中执行为期 3 个月的任务,标志着星载激光多普勒测风雷达进入应用阶段。

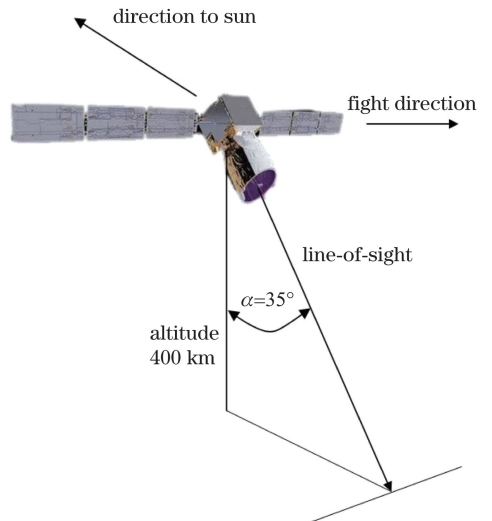


图 6 ALADIN 测量示意图<sup>[24]</sup>

Fig. 6 Schematic of ALADIN measurement<sup>[24]</sup>

我国在 20 世纪 90 年代才开始从事激光测风技术的研究,主要目的是用于管道流体速度测量、大气监测、天气预报等领域,应用方式为实验室、车载式或固定安装式。2003 年,中国海洋大学的研究团队研制了车载式非相干激光多普勒测风雷达系统,采用进口的脉冲 Nd:YAG 激光器进行倍频,并利用吸收法将激光波长锁定在 532 nm,利用碘分子吸收线进行边缘检测,进而反演得到风速剖面、风场数据,作用距离可达到 12 km。2008 年,该系统在青岛奥运帆船赛中在水域风速进行实时测量,取得了圆满成功。目前,该团队致力于星载测风雷达研究<sup>[29]</sup>。2013 年,中国科学技术大学的研究团队基于双边缘技术建立车载瑞利激光多普勒测风雷达,激光器的重复频率为 50 Hz,单脉冲能量为 350 mJ,探测器量子效率为 20%,实现了对平流层至中间层底部的风场测量,探测高度达 60 km,水平风速误差约为 6 m/s<sup>[30-31]</sup>。

### 3.2 相干探测激光多普勒测风技术

国外学者在 20 世纪 60 年代便开始进行相干探测激光多普勒测风雷达的研究。目前技术已经相当成熟,在大气监测、风力发电、飞行安全、国防军工等领域发挥着越来越大的作用。按照所采用的激光发射器的发展历程,激光多普勒测风雷达共经历了

3 个阶段<sup>[17]</sup>:

1) 第一代(20 世纪 70 至 90 年代):采用 10  $\mu\text{m}$  波段 CO<sub>2</sub> 激光器为代表的激光多普勒测风雷达,光束稳定性好,输出功率大,缺点是体积庞大、质量大、效率低,需要较高的能量供应和冷却系统,导致 CO<sub>2</sub> 激光器系统应用受到限制。

2) 第二代(20 世纪 90 年代):采用 2  $\mu\text{m}$  波段固体激光器为代表的激光多普勒测风雷达,光束质量好,寿命长,结构紧凑,但是功耗高,2  $\mu\text{m}$  波段激光的水气吸收大,使其应用推广受到一定的限制。

1992 年美国相干技术(CTI)公司首次研制出 2  $\mu\text{m}$  二极管抽运全固化相干探测激光多普勒测风雷达系统 WindTracer。CTI 公司归入 Lockheed Martin 公司后,采用 1.6  $\mu\text{m}$  固体激光器对原有系统进行了改进,并在民航业开展应用,如图 7<sup>[32-33]</sup> 所示。其中 07LA、07RA 分别为安放测风雷达系统的跑道走廊编号,UTC 为世界标准时间,PPI 为平面位置指示器,一种常见的雷达显示方式;kt 是速度的单位,是 knots 的缩写,1 kt=1.852 n mile/h;ft 为英尺,1 ft=30.48 cm。激光器工作的重复频率约为 700 Hz,输出能量最大值为 2.7 mJ,采用的天线直径为 96 mm,新系统作用距离达到 15 km<sup>[32-33]</sup>。

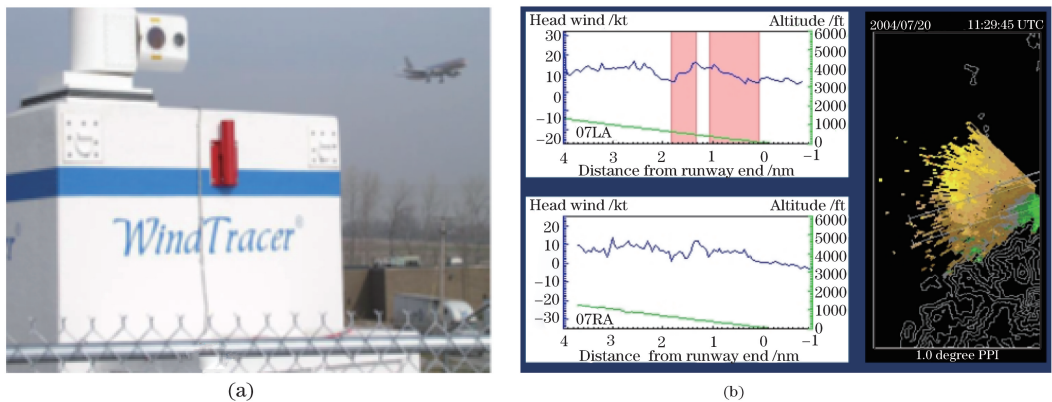


图 7 WindTracer 激光测风雷达及其风切变探测测量结果。(a) WindTracer 实物;(b) 风切变探测<sup>[32-33]</sup>

Fig. 7 WindTracer and wind shear measurement results. (a) Photo of WindTracer; (b) wind shear detection<sup>[32-33]</sup>

3) 第三代(2000 年开始):采用光纤激光器为代表的激光多普勒测风雷达,稳定性强、光束质量好、体积小、环境适应性强,使得小型批量商用化的激光多普勒测风雷达逐渐成为主流。

光纤激光器是最近十几年来发展的热点,与气体、固体激光器相比,具有模块化集成度高、可靠性高、寿命长、功耗低、不需水冷、光纤输出、使用灵活、维护方便等特点,整机系统在体积、质量、紧凑性、可靠性等方面都有很大优势。

全光纤多普勒测风激光雷达的工作方式分为连续工作方式和脉冲工作方式。由于连续工作方式的系统对信号采集和处理速度要求不高且不需要脉冲调制和偏振保持,因此连续激光多普勒测风系统相对容易实现,但连续系统的探测距离最大只有几百米。2004 年,英国 Nature Power 公司研发出商用全光纤连续激光多普勒测风雷达 ZephIR,并将它应用于陆地和海洋低空风廓线测量。该雷达采用收、发同轴的光学天线,利用电控楔形棱镜作为扫描装

置,系统框架内置探测器和信号处理单元,成功在风能应用中进行探测<sup>[34]</sup>。为解决缺少移频器件导致辨别风向困难的问题,ZephIR 使用外置风向传感器完成风向辨别<sup>[34]</sup>。目前该公司的产品为 ZephIR300,可应用于机载、陆地和海上测风,能够提供 10~200 m(可任意设置 10 个高度层)的精确风资源数据,如图 8<sup>[35]</sup>所示。



图 8 ZephIR 激光多普勒测风雷达的应用<sup>[35]</sup>

Fig. 8 Application of ZephIR Doppler wind lidar<sup>[35]</sup>

随着主振荡功率放大(MOPA)光纤激光器的快速发展,对风场探测距离要求也在不断提高,脉冲相干探测激光多普勒测风系统逐渐成为主流<sup>[34]</sup>。日本、美国、法国等较早地开始进行 1.5  $\mu\text{m}$  激光多普勒测风雷达的研究,技术较为成熟,并形成部分产品。2014 年,随着光纤激光器技术逐渐成熟,国际上逐步出现脉冲三维激光多普勒测风雷达产品,雷达的水平测量范围逐步增大到约 10 km 级,但系统的质量仍然较大(100 kg 量级),基本上采用地基固定安装的方式。其中的典型代表为美国 Lockheed Martin 公司的 WindTracer 系列、WindImager 系列,法国 Leosphere 公司的 Windcube 系列,英国 Halo-photonics 公司的 Galion 系列,日本三菱公司的 ENRI 系列。

美国 Lockheed Martin 公司于 2015 年研发了新的激光多普勒测风雷达 WindImager。该雷达为全光纤和模块化架构,减小了尺寸、质量和功耗,如图 9<sup>[36]</sup>所示,其中 PFN 为光脉冲形成网络,PAA 为平面阵列天线。这种紧凑的模块化系统能为测风和尾涡探测提供移动性、可靠性和便利性<sup>[36]</sup>。该测风雷达已完成各种大气条件下的验证测试,如图 10<sup>[36]</sup>所示。

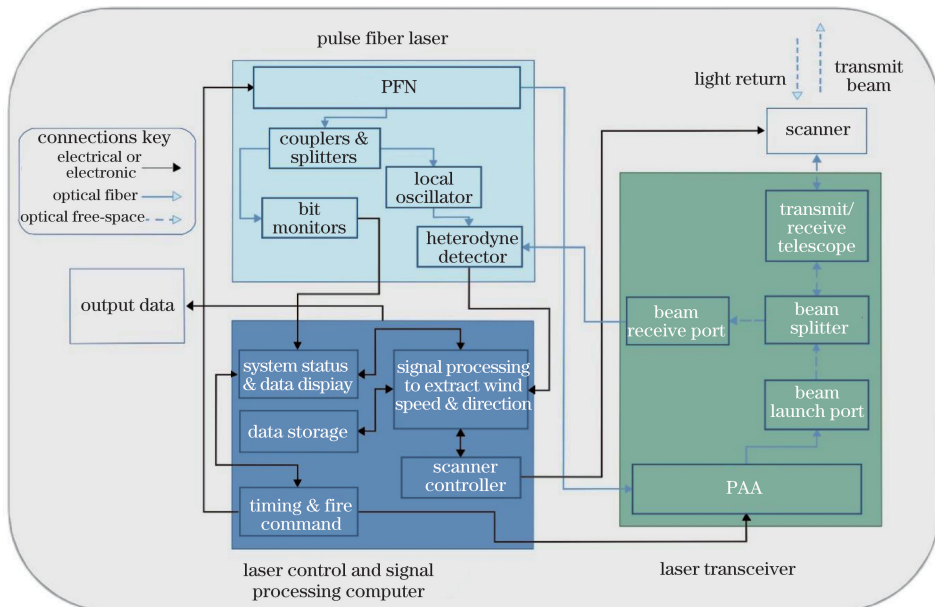


图 9 WindImager 激光多普勒测风雷达系统的架构<sup>[36]</sup>

Fig. 9 Architecture of WindImager Doppler wind lidar<sup>[36]</sup>

法国 LEOSPHERE 公司自 2004 年成立至今,在全球范围内已经设计、生成和安装使用了超过 400 台激光多普勒测风雷达系统,在各种环境条件下被广泛应用。2014 年研制的 Windcube 400s 系统采用窄线宽脉冲光纤激光器,激光峰值功率为

2 kW,光学系统有效直径为 40 mm,扫描方式为四波束,目前最远测量距离达到 12 km,可用于飞机尾涡流的探测、机场空中交通优化、风能应用、大气研究、气象监测等,如图 11<sup>[37]</sup>所示。

国内光纤器件制造工艺的逐步提高,以及机场

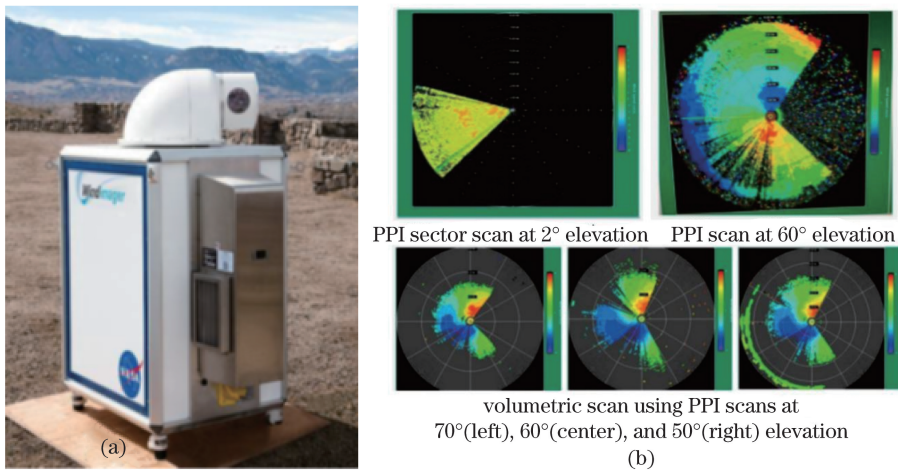


图 10 WindImager 激光多普勒测风雷达。(a)实物图;(b)验证测试图<sup>[36]</sup>

Fig. 10 WindImager Doppler wind lidar. (a) Picture of real product; (b) verification test charts<sup>[36]</sup>

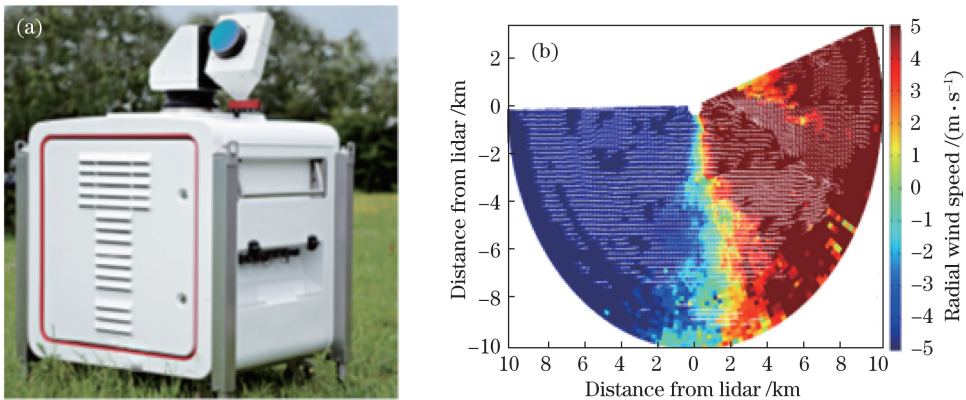


图 11 Windcube 400s 激光多普勒测风雷达系统。(a)实物图;(b)机场测试结果<sup>[37]</sup>

Fig. 11 Windcube 400s Doppler wind lidar. (a) Picture of real product; (b) airport test result<sup>[37]</sup>

飞行安全、风力发电、气象观测、环境监测等对风场测量需求的日益增多,使得我国相干探测激光多普勒测风雷达的技术水平得到迅猛的发展,国内从事相干探测激光多普勒测风雷达研究的主要研究机构有西南技术物理研究所<sup>[38]</sup>、中国科学院上海光学精密机械研究所、中国科学院安徽光学精密机械研究所、中国海洋大学、电子科技大学、哈尔滨工业大学等<sup>[17]</sup>。

2015年,西南技术物理研究所根据民用航空的需求推出面向民航机场应用的三维激光测风雷达,如图12所示,用于机场上空及周边大气风场实时探测和下滑道风切变预警,机组报告验证了测量结果的准确性<sup>[1]</sup>。

2016年,南京牧镭激光科技有限公司依托中国科学院上海光学精密机械研究所面向风电行业推出民用低空激光多普勒测风雷达产品Molas B300,可实现40~300 m风场信息测量<sup>[39]</sup>。图13<sup>[39]</sup>为Molas B300实物图和某地实际测试现场



图 12 三维激光测风雷达在机场中的应用<sup>[1]</sup>

Fig. 12 Application of three-dimensional Doppler wind lidar in airport<sup>[1]</sup>

图,其观测数据用于评估该区域风资源储量,为风电场设计提供了数据支撑。

经过多年的技术研究和发 展,国内相干探测激光多普勒测风雷达的软硬件技术与国外差距逐步减小。但是,国产雷达的商用化程度较低,商用激光多





图 13 民用低空激光多普勒测风雷达 Molas B300  
在风电行业中的应用<sup>[39]</sup>

Fig. 13 Application of civil low altitude Doppler wind lidar  
Molas B300 in wind power industry<sup>[39]</sup>

普勒测风雷达市场仍基本被国外几个厂家占有。应用国外产品成本高昂,且可能给国家气象大数据造成泄漏隐患。因此,加快开展工程研制和应用推广,推出更多种类的激光多普勒测风雷达产品是我国急需解决的问题。

## 4 发展与展望

### 4.1 低成本、高功率、窄线宽光纤激光器光源越来越占主导地位

光纤激光器具有光路结构紧凑,价格相对便宜,体积、质量、功耗小的特性,在激光多普勒测风雷达系统中逐渐成为研究热点。

用于相干探测激光多普勒测风雷达的窄线宽光纤激光器常采用多级 MOPA 工作方式来获得所需的窄线宽、宽脉宽、高重复频率、高峰值功率的稳频激光脉冲输出。图 14<sup>[7]</sup>为 MOPA 结构的光纤放大器示意图。采用高稳定性、低功率的连续波分布式反馈激光器(DFB)作为种子光源,通过声光调制及多级全光纤放大光路,可实现 10 kHz 以上的高重复频率,脉宽较宽(数十 ns 到数百 ns 可控),脉冲能量可逐级放大<sup>[7]</sup>。该类激光器不仅具有体积小、寿命长、结构紧凑、易于集成等优点,而且还具有免调节、稳定性高、抗恶劣环境能力强等特点。技术的不断发展使得稳频光纤激光器的频率稳定性越来越高,线宽越来越窄,在相干探测激光多普勒测风雷达领域中将得到越来越广泛的应用。随着光纤激光器技术的发展,尤其是大纤芯多包层光纤以及光子晶体光纤技术的发展,窄线宽脉冲光纤激光器的输出能量越来越高,在远程相干探测激光多普勒测风雷达中将得到进一步应用。

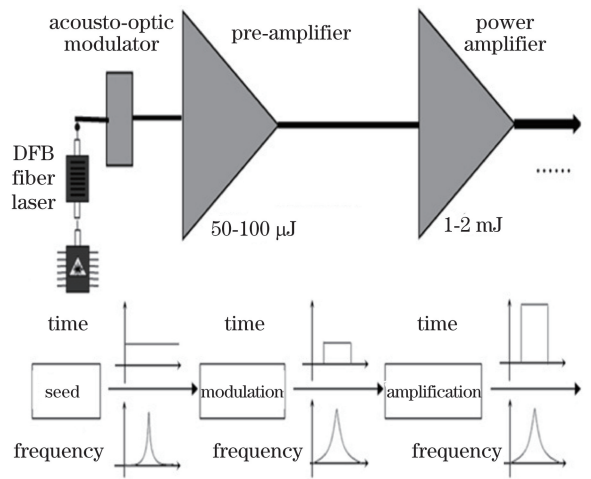


图 14 MOPA 结构的光纤放大器示意图<sup>[7]</sup>

Fig. 14 Schematic of fiber-optic amplifier based  
on MOPA structure<sup>[7]</sup>

### 4.2 对多功能复合大气探测系统的需求越来越强烈

近年来,多功能复合大气探测系统越来越受到用户青睐,用户不再满足某产品的单一功能,“一机多能”是激光多普勒测风雷达的发展趋势,对多种大气参数(如风场、温度、湿度、压强)进行准确遥测的装备需求越来越强烈。因此,基于激光多普勒测风技术,可叠加额外的功能,实现多样式、多元素的探测。例如,ALOMAR 观测站的 RMR 雷达、中国科学技术大学的车载瑞利多普勒测风雷达、美国科罗拉多大学 Chu 教授课题组基于 Na 双边缘技术的测风激光雷达,均具备对风场和温度持续观测的能力<sup>[40]</sup>,为解决大气科学研究中的难题提供了技术手段。

除了“一机多能”外,多种体制复合探测激光多普勒测风雷达也是研究热点。近 20 年来,美国致力于从地球轨道测量全球风速的研究,正在研究的 GWOS 系统同时使用 2 μm 波长相干探测和 355 nm 波长直接探测技术,通过 2 台激光雷达子系统之间共用同一望远镜来实现多视角的改进。一方面相干探测技术非常适合检测对流层低层的气溶胶反向散射信号,但可用带宽不足以检测分子信号;另一方面,使用直接探测技术检测分子信号可以使得雷达系统在更高海拔处具有更高的灵敏度。通过 2 种技术互补,可以增加测程,完成全球风速的测量<sup>[41]</sup>。

为了适应多样式、多元化气象探测需求,未来的激光多普勒测风雷达越来越趋向于多承载平台、多功能大气环境遥测复合系统,从而实现对大气的多种参数测量,满足多种应用需求。

### 4.3 通过数据多源融合、多观测设备组网实现更全面、系统的观测

激光多普勒测风雷达的应用越来越趋向于组网观测。单一的激光多普勒测风雷达可以实现局部地区的风场信息探测。通过激光多普勒测风雷达分布式组网探测,不仅可以实现信息互联,还能与现有的卫星、气象台站互联,形成组网应用,并进一步建立气象数据服务平台,实现气象大数据挖掘与多源数据融合,可为危险天气预警、风场资源评估、大气粒子形态识别、大气污染条件分析、人工影响天气辅助决策、军事活动等具体应用提供数据保障。

## 5 结 论

激光多普勒测风技术是实现远程大气风场进行精确描述的一种可靠手段,能对大气风场的三维分布进行快速遥感测量。直接探测技术与相干探测技术有各自的特点与适用范围,二者相辅相成,近年来都得到了快速发展。采用低成本、全光纤结构来实现雷达系统的紧凑小型化、应用范围的扩大,与其他大气遥测手段进行多功能复合是未来的发展趋势。目前,我国激光测风技术与国外差距逐渐减小,相关研究机构需要进一步突破关键技术,以现有技术带动系统应用,将新技术投入应用并实现产品技术更新,逐渐占领市场。激光多普勒测风雷达搭载平台正趋向多样化、探测功能多元化、探测设备集成化、应用场景网络化。在未来,激光多普勒测风技术将在飞行安全、数值天气预报、灾害天气防治、空间天气态势分析、风力发电、军事等应用中发挥更大的作用。

### 参 考 文 献

- [1] Feng L T, Zhou J, Fan Q, *et al.* Three-dimensional lidar for wind shear detection and early warning in Civil Aviation Airport[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2019, 48(5): 0512001.  
冯力天, 周杰, 范琪, 等. 应用于民航机场风切变探测与预警的三维激光测风雷达[J]. *光子学报*, 2019, 48(5): 0512001.
- [2] Tucker S C, Weimer C S, Baidar S, *et al.* Theoptical autocovariance wind lidar. part I: OAWL instrument development and demonstration[J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2018, 35(10): 2079-2097.
- [3] Baidar S, Tucker S C, Beaubien M, *et al.* The optical autocovariance wind lidar. part II: Green OAWL (GrOAWL) airborne performance and validation[J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2018, 35(10): 2099-2116.
- [4] Iijima T, Uemura T, Matayoshi N, *et al.* Development and evaluation of a new airspeed information system utilizing airborne Doppler LIDAR[C]//2017 IEEE/AIAA 36th Digital Avionics Systems Conference (DASC), September 17-21, 2017, St. Petersburg, FL, USA. New York: IEEE, 2017: 8102144.
- [5] Fan Q, Zhu K Y, Zheng J F, *et al.* Detection performance analysis of all-fiber coherent wind 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.
- [6] Chen Y, Chen C L, Luo X, *et al.* Research on wind field algorithm of wind lidar based on BP neural network and grey prediction[J]. *Proceedings of SPIE*, 2018, 10619: 106190O.
- [7] Chen Y, Zhou B Z, Tan J, *et al.* Research and application of airborne laser Doppler wind lidars[J]. *Laser Technology*, 2011, 35(6): 795-799.  
陈涌, 周秉直, 谭锦, 等. 机载激光多普勒测风雷达技术及其应用[J]. *激光技术*, 2011, 35(6): 795-799.
- [8] Reitebuch O. Wind lidar for atmospheric research [M]//Schumann U. *Atmospheric physics*. Berlin Heidelberg: Springer, 2012: 487-507.
- [9] Baker W E, Atlas R, Cardinali C, *et al.* Lidar-measured wind profiles: the missing link in the global observing system[J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2014, 95(4): 543-564.
- [10] Fujii T, Fukuchi T. *Laser remote sensing*[M]. Boca Raton: CRC Press, 2005: 482-485.
- [11] Werner C. *Doppler wind lidar*[M]//Weitkamp C. *Lidar*. New York: Springer, 2005, 102: 325-354.
- [12] Wang J X, Dehring M, Nardell C A, *et al.* Direct detection Doppler wind lidar: ground-based operation to space[J]. *Proceedings of SPIE*, 2003, 5154: 93-104.
- [13] McKay J A. Modeling of direct detection Doppler wind lidar. I: the edge technique[J]. *Applied Optics*, 1998, 37(27): 6480-6486.
- [14] Zhou X L, Sun D S, Zhong Z Q, *et al.* Development of Doppler wind lidar[J]. *Journal of Atmospheric and Environmental Optics*, 2007, 2(3): 161-168.  
周小林, 孙东松, 钟志庆, 等. 多普勒测风激光雷达研究进展[J]. *大气与环境光学学报*, 2007, 2(3): 161-168.

- [15] McKay J A. Modeling of direct detection Doppler wind lidar. II: the fringe imaging technique[J]. *Applied Optics*, 1998, 37(27): 6487-6493.
- [16] Zhang J. Signal extraction and simulation for 2  $\mu\text{m}$  coherent wind lidar[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2007: 6-7.  
张健. 2  $\mu\text{m}$  相干激光测风雷达信号提取与仿真[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2007: 6-7.
- [17] Zhou Y Z, Wang C, Liu Y P, *et al.* Research progress and application of coherent wind lidar[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2019, 56(2): 020001.  
周艳宗, 王冲, 刘燕平, 等. 相干测风激光雷达研究进展和应用[J]. *激光与光电子学进展*, 2019, 56(2): 020001.
- [18] Dou X K, Han Y L, Sun D S, *et al.* Mobile Rayleigh Doppler lidar for wind and temperature measurements in the stratosphere and lower mesosphere[J]. *Optics Express*, 2014, 22(S5): A1203-A1221.
- [19] Gentry B M, Chen H L, Li S X. GLOW: the Goddard lidar observatory for winds[J]. *Proceedings of SPIE*, 2001, 4153: 314-320.
- [20] Gentry B, Chen H, Cervantes J, *et al.* Airborne testing of the TWiLiTE direct detection Doppler lidar [C]//*Proc. 16th Coherent Laser Radar Conference*, June 20-24, 2011, Long Beach, California, USA. USA: Universities Space Research Association (USRA), 2011.
- [21] Pu Z X, Zhang L, Zhang S X, *et al.* The impact of Doppler wind lidar measurements on high-impact weather forecasting: regional OSSE and data assimilation studies[M]//Park S, Xu L. *Data assimilation for atmospheric, oceanic and hydrologic applications (Vol. III)*. Cham: Springer, 2017: 259-283.
- [22] Cremons D R, Abshire J, Allan G, *et al.* Development of a Mars lidar (MARLI) for measuring wind and aerosol profiles from orbit[J]. *Proceedings of SPIE*, 2018, 10791: 1079106.
- [23] 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.
- [24] Tan D G H, Andersson E, de Kloe J, *et al.* The ADM-Aeolus wind retrieval algorithms[J]. *Tellus A: Dynamic Meteorology and Oceanography*, 2008, 60(2): 191-205.
- [25] Reitebuch O. The spaceborne wind lidar mission ADM-Aeolus[M]//Schumann U. *Atmospheric physics*. Berlin Heidelberg: Springer, 2012: 815-827.
- [26] Marksteiner U, Reitebuch O, Lemmerz C, *et al.* Airborne direct-detection and coherent wind lidar measurements over the North Atlantic in 2015 supporting ESA's Aeolus mission[J]. *EPJ Web of Conferences*, 2018, 176: 02011.
- [27] Lux O, Lemmerz C, Weiler F, *et al.* Airborne wind lidar observations over the North Atlantic in 2016 for the pre-launch validation of the satellite mission Aeolus[J]. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2018, 11(6): 3297-3322.
- [28] Straume A G, Elfving A, Wernham D, *et al.* ESA's spaceborne lidar mission ADM-Aeolus; project status and preparations for launch[J]. *EPJ Web of Conferences*, 2018, 176: 04007.
- [29] Liu Z S, Chen Z, Yu C R, *et al.* Doppler wind lidar: from vehicle-mounted to space-borne[J]. *Journal of Atmospheric and Environmental Optics*, 2015, 10(2): 126-138.  
刘智深, 陈震, 于翠荣, 等. 多普勒测风激光雷达从车载到星载[J]. *大气与环境光学学报*, 2015, 10(2): 126-138.
- [30] Gao X, Han Y L, Jin G. Data acquisition system for wind lidar in the upper atmosphere[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2015, 42(1): 0113002.  
高昕, 韩於利, 金革. 中高层大气测风激光雷达数据采集系统[J]. *中国激光*, 2015, 42(1): 0113002.
- [31] Tang L, Jiang S, Li Z M, *et al.* Performance improvement of Rayleigh wind lidar and wind field observation in middle and upper atmosphere[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2016, 43(7): 0710004.  
唐磊, 蒋杉, 李梓霖, 等. 瑞利测风激光雷达系统性能改进与中高层大气风场观测[J]. *中国激光*, 2016, 43(7): 0710004.
- [32] Henderson S W, Hannon S M. Advanced coherent lidar system for wind measurements[J]. *Proceedings of SPIE*, 2005, 5887: 588701.
- [33] 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.
- [34] Yan B D. Preliminary design of fiber pulsed coherent wind lidar[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2013: 4-6.  
闫宝东. 脉冲光纤相干测风激光雷达初步设计[D].

- 青岛: 中国海洋大学, 2013: 4-6.
- [35] Pitter M, Burin des Roziers E, Medley J. Performance stability of ZephIR in high motion environments: floating and turbine mounted[J]. ZephIR Lidar, 2014, 10: 1-13.
- [36] 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.
- [37] Thobois L, Loaec S, Boquet M, *et al.* Recent developments of windcube Doppler lidars for airport wind hazards monitoring[C] // WakeNet Europe, May 13-14, 2014, Bretigny, France. Brussels: Eurocontrol, 2014: 1-22.
- [38] Li C, Zhao P E, Peng T, *et al.* Technical research of 3-D wind lidar[J]. Laser Technology, 2017, 41(5): 703-707.  
李策, 赵培娥, 彭涛, 等. 3 维激光测风雷达技术研究[J]. 激光技术, 2017, 41(5): 703-707.
- [39] Move Laser. Molas B300 ground-based wind lidar [Z/OL]. [2019-01-15]. [http://www.movelaser.com/Cn/newslid/id/23?tdsourcetag=s\\_pcqq\\_aiomsg](http://www.movelaser.com/Cn/newslid/id/23?tdsourcetag=s_pcqq_aiomsg). 牧镭激光. Molas B300 地基式测风激光雷达 [Z/OL]. [2019-01-15]. [http://www.movelaser.com/Cn/newslid/id/23?tdsourcetag=s\\_pcqq\\_aiomsg](http://www.movelaser.com/Cn/newslid/id/23?tdsourcetag=s_pcqq_aiomsg).
- [40] Han Y L. Development of middle atmospheric temperature and wind lidar for gravity wave observation[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2016: 31-115.  
韩於利. 中高层大气测温测风激光雷达研制及重力波观测[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2016: 31-115.
- [41] Singh U N, Kavaya M J, Yu J R, *et al.* Development of 2-micron Doppler wind lidar for NASA 3-D winds mission[C] // International Conference on Space Optical Systems and Applications, May 7-9, 2014, Kobe, Japan. Tokyo: NICT, 2014: S5-1.