

星载多普勒测风激光雷达应用需求与研究进展

陈炳龙^{1**}, 杨忠东^{1*}, 闵敏², 刘继桥³, 赵一鸣⁴, 王富¹

¹国家卫星气象中心中国气象局中国遥感卫星辐射测量和定标重点开放实验室, 北京 100081;

²中山大学大气科学学院广东省气候变化与自然灾害研究重点实验室, 广东 珠海 519082;

³中国科学院上海光学精密机械研究所空间激光信息传输和探测技术重点实验室, 上海 201800;

⁴北京遥测技术研究所, 北京 100076

摘要 星载多普勒测风激光雷达是目前能够有效获取全球大气三维风场的主动探测设备,能够弥补气象卫星被动探测的不足,对其需求和进展的综述研究具有重要的意义。首先阐述了天气预报精度提升、数值模式同化和气候变化研究等领域对全球三维风场探测的迫切需求;接着回顾了相干探测、直接探测和混合探测三种体制的星载多普勒测风激光雷达的发展历程,并总结了当前星载测风激光雷达研究所面临的挑战;然后根据我国多普勒测风激光雷达的研究现状,归纳出我国星载测风激光雷达发展所急需解决的七类关键技术;最后指出星载混合体制测风激光雷达结合了相干探测和直接探测的优势,既能降低研制成本,又能提高大气垂直风廓线探测精度,是未来星载测风激光雷达的主要发展方向。

关键词 测量;星载激光雷达;风场探测;相干探测;直接探测

中图分类号 P414

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP57.190003

Application Requirements and Research Progress of Spaceborne Doppler Wind Lidar

Chen Binglong^{1**}, Yang Zhongdong^{1*}, Min Ming², Liu Jiqiao³, Zhao Yiming⁴, Wang Fu¹

¹Key Laboratory of Radiometric Calibration and Validation for Environmental Satellites, China Meteorological Administration, National Satellite Meteorological Center, Beijing 100081, China;

²Guangdong Province Key Laboratory for Climate Change and Natural Disaster Studies, School of Atmospheric Sciences, Sun Yat-Sen University, Zhuhai, Guangdong 519082, China;

³Key Laboratory of Space Laser Communication and Detection Technology, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China;

⁴Beijing Research Institute of Telemetry, Beijing 100076, China

Abstract A spaceborne Doppler wind lidar is an efficient active detection device that can be used to obtain the global three-dimensional atmospheric wind field in global scale. It is able to make up for the weakness of passive sensing of meteorological satellites. The review for its requirements and progress indicates important scientific significance. First, this study describes the urgent needs for three-dimensional wind fields in various fields such as accuracy improvement of weather forecast, numerical weather forecast model assimilation, and global climate change research. Then, it reviews the development history of spaceborne wind lidar based on three schemes of coherent detection, direct detection and hybrid detection, and summarizes the challenges of the present spaceborne wind lidar. After that, according to the research progress of Chinese Doppler wind lidar, this paper summarizes the current seven key and unsolved technologies of Chinese spaceborne wind lidar. Finally, it is suggested that the spaceborne hybrid wind lidar with the advantages of both coherent detection and direct detection can well reduce the research and fabrication cost and significantly enhance the detection accuracy of atmospheric vertical wind profiles,

收稿日期: 2020-05-27;修回日期: 2020-06-12;录用日期: 2020-06-18

基金项目: 国家自然科学基金(41975031,41975020)、国防科工局十三五民用航天专业技术预先研究项目(D040103)

* E-mail: yangzd@cma.gov.cn; ** E-mail: chenbl@cma.gov.cn

and the spaceborne hybrid wind lidar will be the future trend in the field of spaceborne wind lidar.

Key words measurement; spaceborne lidar; wind field detection; coherent detection; direct detection

OCIS codes 120.0280; 120.4820; 280.3340; 280.3640

1 引言

大气风场作为全球大气水循环、碳循环、气溶胶运输以及天气变化的主要动力因素,是气候学和大气动力学研究的重要参数之一。在1960年第一台激光器问世之前,受技术条件的限制,大气风场探测只局限于大气直接接触测量风速信息的直接探测方式,比如杯状风速计、热球式电风速计以及风向标等。这些探测设备对全球大尺度三维风场的探测能力十分有限。20世纪中后期,随着激光技术和信息处理技术的快速发展,星载测风激光雷达逐渐成为广泛应用于地球大气研究的重要探测手段,是目前能够获得全球三维大气风场的有效探测设备,所获得的大气垂直风廓线在提高全球气象数值预报模型的准确性的同时,还可用于获取海洋、沙漠等偏远无人区的风场廓线信息,优化民航飞行路线,提供军事环境保障等^[1-2]。因此,全球大气三维风廓线测量在提高数值天气预报精度,实现数值模式同化,以及评估预测全球气候等方面有着重要意义^[3-4]。

根据探测方式的不同,多普勒测风激光雷达可以分为非相干测风激光雷达(又称直接测风激光雷达)^[5]和相干测风激光雷达^[6]。其中,直接测风激光雷达采用光学鉴频器或光谱仪将频率变化的信息转换为功率、强度或功率空间分布的信息,进而通过反演得到大气风场;相干测风激光雷达采用外差探测方式,将回波信号与本振信号在探测器中进行混频处理,利用多普勒频移信息反演得到大气风场。两者各有优缺点,直接测风激光雷达具有探测范围广和数据处理算法相对简单的优势,而相干测风激光雷达在微弱信号探测方面有优势,具有良好的滤波性能和高转换增益^[7-10]。搭载于卫星平台上的星载直接测风激光雷达多用于对流层上层和平流层大气风场的探测,星载相干测风激光雷达多用于低对流层和边界层的大气风场探测。相比之下,星载混合体制测风激光雷达结合了相干探测和直接探测两者的优势,能够更精确地获得整条大气风场廓线,在未来星载测风激光雷达领域有重要的应用价值。

对于星载测风激光雷达而言,探测体制的不同决定了其仪器设计原理、探测方式、反演方法等都不相同。因此,本文从相干探测体制、直接探测体制和

混合探测体制三个方面回顾和阐述了星载测风激光雷达的研究进展和发展历程,以期为我国在该领域的发展和规划提供参考。

2 星载多普勒测风激光雷达的应用需求

早在1998年,世界气象组织(WMO)在关于用户要求和卫星性能的评估报告中指出,三维风场的观测是现今全球观测系统中最重要也是最具挑战性的课题。2007年,美国国家研究委员会列出了9项需要风场信息支持的社会应用,提高数值天气预报的准确性是优先发展项,其中对流层风场探测有助于提高天气预报的准确性,但其在实际应用中并未得以实现^[11]。

目前,除了星载多普勒测风激光雷达,其他风场观测资料无法满足全球三维风场的观测需求,比如陆地观测站、船舶、浮标等测得的表面风场,虽然能够很好地提供天气系统的强度等信息,但不能提供高空风信息;机载航线测量以及机场的高分辨率风场资料能够提供高空单层风场信息,但关于全球范围的资料非常有限;卫星成像仪通过示踪云的运动轨迹反演得到云导风,但云轨迹不完全由背景风场决定,也难以精确地提供风场的高度信息,且得到的是云顶高度以上的离散风场;对于高空多层风场的测量,可以通过无线电探空仪、测风气球、风廓线雷达等来实现,目前无线电探空仪和测风气球是获取全球风廓线数据资料的主要手段,获得的资料大多是关于北半球陆地区域的,而关于南半球陆地以及海洋的资料较少。因此,通过星载多普勒测风激光雷达测得的全球三维风场廓线资料可以弥补南半球及海洋风场资料的不足,对热带以及中高纬度小尺度天气系统的预报有重要意义。

首先,全球三维风场观测资料对提升天气预报精度有重要意义。在美国国家环境预报中心(NCEP)与欧洲中期天气预报中心(ECMWF),基于地基测量以及探空测量的风廓线雷达资料已经被应用于同化系统中,这有利于提高风场的短时(3~6 h)和短期(2~3 d)预报的精度^[12]。统计分析 with 个例研究结果表明,同化风廓线雷达资料能提高强降水过程中的中尺度天气系统的预报精度,同时也能

削弱复杂地形的影响,从而较好地改善边界层内的预报效果。2003年,ECMWF进行的机载激光雷达观测实验证实,在使用机载测量得到的风廓线信息后,欧洲区域的天气预报时效增加了12个小时,相当于预报模式开发者工作5年取得的成效^[13]。2007年的一项研究也表明ECMWF数值模型系统在同化了激光雷达风廓线结果后,欧洲区域2~4 d的位势高度的预报精度有了3%的提升^[14]。2008年,T-PARC (THOPREX-Pacific Asian Regional Campaign)机载激光雷达测量实验证实,风廓线信息有效地改善了台风引导气流的反演结果,明显提升了台风Nuri^[15]和台风Sinlaku^[16]的预报精度。将机载激光雷达风廓线测量结果同化到预报模型后,ECMWF全球台风预报模型的12~120 h的台风路径预报误差减少了9%^[16]。芬兰和德国的风场观测数据分析结果显示,在春季、夏季和秋季,表层驱动对流是湍流混合的主导因素,低空急流是湍流夜间混合的重要来源^[17]。2018年,Zhang等^[18]利用机载多普勒测风激光雷达观测热带气旋边界层,结果显示,当垂直高度大于750 m时,能明显观察到Erika涡旋倾斜,与典型的飓风相比,Erika热带风暴的边界层更深,其垂直风和径向风的不对称性更加明显。

其次,全球三维风场观测资料对环境预报同样有着重要作用,大气污染物的环境预报十分依赖于中尺度数值天气预报场动力过程的准确性。比如二氧化硫、雾霾粒子等大气污染物的生成、发展和扩散都与大气输送紧密关联,特别是边界层内的动力输送过程直接影响大气污染物的浓度和时空分布特征,风廓线资料能有效改善污染物垂直分布的预报效果^[19-22]。

再者,在对气候的影响方面,比如赤道平流层纬向风的准两年振荡(QBO)现象是平流层大气环流最主要的特征之一,虽然其出现在热带的平流层,但QBO可以通过调整风场、温度场、赤道外波动和经圈环流来影响整个平流层中的物质分布和输送,从而影响全球平流层环流和对流层气候^[23-24]。此外,平流层中的重要大气成分,如臭氧、气溶胶等的输送对全球长期的气候演变具有至关重要的影响^[25-26]。

此外,在地球上很多人类无法到达的荒漠地区、远海地区及无人区等,探测设备无法在地面布设,从而导致这些区域的风场探测信息缺失。另外,在军事方面,比如战斗机的起飞、降落等对高精度风场信息有需求,还有民航飞机的航线安全等对风场信息

也有需求,星载多普勒测风激光雷达所测量的全球三维风廓线信息能有效满足这些领域的需求^[2]。美国国家海洋和大气管理局(National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA)给出了不同高度层风场的高精度探测对基本气候变量的要求,如表1所示。当地表风速大于20 m/s时,地表风速测量的不确定度要求是风速偏差不高于0.5 m/s,二次平均统计结果的不确定度不超过10%;高空风速测量的不确定要求是风速偏差不高于2 m/s,风向偏差不超过20°。同时,在风速测量的稳定性方面,地表风速测量的稳定性要求是每个垂直分辨率层面的偏差不高于0.05 m/s;高空风速测量的稳定性要求是风速偏差不得超过0.5 m/s,风向偏差不得超过5°。星载多普勒测风激光雷达能够很好地满足这些要求。

表1 风场高精度探测对基本气候变量的要求
Table 1 Essential climate variables for requirements of wind field detection

Parameter	Surface	Upper-air
Period	3 h	1 h
Resolution	10 km	10 km(horizontal)/ 0.5 km(vertical)

总之,无论是对流层的天气预报精度的提升,还是平流层的气候变化研究,各个领域都对全球风廓线资料有着迫切的需求。但目前的气象卫星测量的是地球大气的热力场,也就是地气系统辐射值,还不能用天基观测手段有效地实现全球三维大气风场的观测^[11]。星载多普勒测风激光雷达能够填补全球三维风场观测的技术空白,对提高天气预报准确率,特别是对灾害性天气预报准确率的提升有着不可估量的作用。

3 星载多普勒测风激光雷达的研究进展

3.1 星载多普勒相干测风激光雷达的研究进展

1987年,美国国家航空航天局(NASA)宣布,在对地观测系统卫星(EOS)上搭载的LAWS(Laser Atmospheric Wind Sounder)系统^[27-29]开创了星载多普勒相干测风激光雷达的先河。LAWS系统计划采用脉冲能量为20 J、重复频率为5 Hz的频率调制CO₂脉冲激光器,接收望远镜口径是1.5 m左右,操作模式是望远镜锥形扫描发射。LAWS平台提出了两个轨道:一个轨道高度是525 km,轨道倾角为98°;另一个轨道高度是575 km,轨道倾角为55°。后来由

于预算压力,LAWS 在 1994 年被迫取消。

星载多普勒相干测风激光雷达的波长选取,既要考虑波长的大气传输特性,又要考虑激光波长的安全性、能量稳定性以及研制成本等因素。主要用于相干测风激光雷达的光谱波段有 $1.0 \sim 1.06 \mu\text{m}$ (Yb 离子激光器), $1.48 \sim 1.62 \mu\text{m}$ (掺 Er 激光器)和 $1.8 \sim 2.1 \mu\text{m}$ (掺 Tm 或 Ho 激光器)^[30]。随着大功率半导体激光器技术的发展成熟,理想的激光器逐渐向高效率、小体积、长寿命的全固态激光器方向发展, $1.06 \mu\text{m}$ 波长的固态 Nd:YAG 激光器以及 $2 \mu\text{m}$ 波长的全固态激光器等先后被应用于相干测风系统中。 $1 \sim 1.4 \mu\text{m}$ 波段的激光对人眼伤害很大,不宜用于激光雷达。后来随着光纤器件的发展, $1.5 \mu\text{m}$ 波段的激光器由于具有人眼安全、结构紧凑等优点,也曾被考虑应用于相干测风激光雷达,但其脉冲能量较低,很难满足星载平台的要求^[31]。 $2 \mu\text{m}$ 全固态激光器处于人眼安全波段,比 $1.06 \mu\text{m}$ 全固态激光器具有更加广泛的应用前景,逐渐成为了研究的热点。Henderson 等^[32]在 1991 年首次报道了半导体激光器泵浦的 $2 \mu\text{m}$ 相干激光雷达系统的地基应用,脉冲能量为 22 mJ,可以探测地面与 30 km 处靶向目标之间的回波信号。

1998 年,NASA 新千年计划的第二地球轨道任务提出使用 SPARCLE(SPAce Readiness Coherent Lidar Experiment)相干激光雷达系统进行全球三维风场探测^[33-36],该系统采用激光波长为 $2.051 \mu\text{m}$,脉冲能量为 100 mJ,重复频率为 6 Hz 的二极管泵浦 Tm, Ho: YLF 固态激光器,接收望远镜直径为 25 cm,所使用的硅楔扫描器能将光束偏转扩展到 30° ^[37]。由于所设计的系统探测高度和覆盖范围有限,加上经费问题,该任务于 1999 年被取消。

星载多普勒相干测风激光雷达的研制难度较大,成功完成飞行试验的当属 2008 年 NASA 开展的 DAWN(Doppler Aerosol WiNd)任务^[38-39],该任务的目标是研制出第一架机载相干脉冲激光雷达系统,使用的是基于 Ho:Tm:LuLiF 激光晶体的固态激光器,采用激光二极管阵列(Laser Diode Array, LDA)侧面泵浦,单脉冲能量为 250 mJ,脉冲重复频率为 10 Hz,望远镜口径为 15 cm。该系统被安装在 DC-8 飞机上于 2010 年参与了 NASA 的“飓风成因及演化过程”研究项目,并通过 Earl 和 Gaston 等飓风系统进行了一系列的测风试验^[40-41]。

日本邮政省通信研究实验室(CRL,现为国家信

息与通信技术研究所)联合美国相干技术公司(Coherent Technologies Incorporated, CTI)从 1998 年开始就计划在国际空间站(International Space Station, ISS)上搭建多普勒相干测风激光雷达系统,即 JEM/CDL(Japanese Experiment Module/Coherent Doppler Lidar)系统^[42-44]。系统采用波长为 $2.051 \mu\text{m}$ 的全固态 Tm, Ho: YLF 激光器,由主振荡器和 2~5 级激光放大器构成的频率振荡器系统可以实现 10 Hz 重复频率的激光输出,两级光学放大系统可使激光输出能量大于 2 J。接收望远镜采用具有两个固定指向的 0.4 m 口径望远镜,其中一个指向偏离空间站沿轨 45° 方位角(前视),另一个指向偏离沿轨的反方向 45° 方位角(后视),可分别接收空间站飞行轨迹斜前向和斜后向的散射回波光^[45-46]。两点扫描模式的目的是获取风场的三维立体分布,实现对流层矢量风的测量,因为多普勒测量原理是只能测得激光束指向的径向风速。基于高空风场的水平风速很大而垂直风速很小的实际情况,这里的三维测量通常忽略垂直风速,实际测量的是二维风场。该测量成功的关键依赖于两光束的精确指向,需要利用卫星敏感器和全球定位系统(Global Positioning System, GPS)设备不断校正空间站的姿态和绝对指向。受技术水平限制,JEM/CDL 于 2011 年 3 月加入 NOAA/NASA 的混合体制多普勒测风计划^[47]。星载多普勒相干测风激光雷达的研制历经几十年,欧美以及日本等国家走在研究的前列,但由于研制难度较大,至今尚无星载应用实践。

3.2 星载多普勒直接测风激光雷达的研究进展

多普勒直接测风激光雷达通过探测接收信号和发射信号的相对能量变化来测量频移,从而反演风速,其本质是测量激光的回波能量。因此,它对于光学系统和激光器性能的要求不像相干探测技术那样严格,但需要对激光器发射能量进行持续的监测和标定。上世纪 80 年代末,出现了直接探测激光雷达进行风场探测的应用^[48]。

2005 年, NASA 开展了 TWiLiTE(Tropospheric Wind Lidar Technology Experiment)项目,该项目的任务是为完整的分子直接探测多普勒雷达系统集成子系统,这对未来星载对流层风廓线探测具有重要的意义。TWiLiTE 多普勒激光雷达搭载在飞机上进行机载实验,采用分子直接探测系统,工作波长为 355 nm,多普勒频移测量采用双边缘技术,仪器在飞机上自

主操作,俯仰视场激光可以探测整个对流层的风廓线,飞机飞行高度为 18 km, TWiLiTE 多普勒激光雷达具有 250 m 的垂直分辨率和 <2 m/s 的风速分辨率^[49-50]。

1999 年,欧洲航天局(European Space Agency, ESA)提出 ADM-Aeolus (Atmospheric Dynamics Mission-Aeolus)任务^[51],该任务提出在卫星上搭载 355 nm 直接探测的大气激光多普勒仪器 ALADIN (Atmospheric Laser Doppler Lidar Instrument),用于测量地面到低平流层(20~30 km)的垂直风廓线,ALADIN 具备 0.5~2 km 的垂直分辨率和 1~3 m/s 的测风精度^[52]。2003 年,欧洲航天局、太空公司(EADS-Astrium)和德国宇航中心(DLR)开始研制机载验证仪器 A2D (ALADIN Airborne Demonstrator),目的是对 ALADIN 仪器、地基和机载平台性能进行验证^[53]。2018 年 8 月 22 日,欧洲航天局成功发射 Aeolus 卫星,其搭载的 ALADIN 测风激光雷达是太空中首颗星载测风激光雷达,也是多普勒直接测风激光雷达在卫星平台上的首次应用,具有里程碑的意义^[54]。Aeolus 卫星基于紫外 355 nm 激光碰撞粒子的多普勒频移原理探测地球 30 km 以下的风廓线信息,垂直分辨率为 250 m~2 km,沿轨水平径向风速的测量精度(随机误差)为 1~2.5 m/s^[55]。2018 年 9 月 12 日,Aeolus 卫星传回的首张风速剖面图(图片网址 http://www.esa.int/Applications/Observing_the_Earth/Aeolus/)

表 2 星载相干测风激光雷达与直接测风激光雷达对比

Table 2 Comparison of spaceborne coherent wind lidar and direct wind lidar

Parameter	Spaceborne coherent wind lidar	Spaceborne direct wind lidar	
		Filter	Fabry-Perot
Laser wavelength	10.6 μm @ CO ₂ , 1.064 μm @ Nd:YAG, 2.1 μm @ Tm, Ho:YAG, and 1.5 μm @ Er, Yb:Glass/Fiber	694.3 nm and 374.2 nm @ Ruby, 355, 532, 1064 nm@ Nd:YAG, and 351 nm@ XeF	1064 nm@Nd:YAG
Detection target	Aerosol	Dust, cloud and smoke	Aerosol
Product	Wind speed	Temperature and wind speed	Wind speed
Sensitivity	High	Low	
Detection range	0-6 km	3-30 km	

3.3 星载多普勒混合体制测风激光雷达的研究进展

星载多普勒混合体制测风激光雷达(Hybrid Doppler Wind Lidar, HDWL)结合了相干探测和直接探测两者的优势。相干探测技术通常采用 2 μm 激

Aeolus_wows_with_first_wind_data)如图 1 所示。可以看到,地球表面和平流层下部之间的东风和西风,包括急流,还有南极周围的强风,被称为平流层极地涡旋,其对南极臭氧层的消耗发挥重要作用。2018 年 11 月,Aeolus 卫星发射后的第一次机载验证试验是在德国空军基地进行的,DLR 研制的机载验证仪器 A2D 同时搭载了 355 nm 直接测风激光雷达和 2 μm 相干测风激光雷达,在 Aeolus 卫星的仪器测量中实现了风场反演优化和相关质量控制,结果显示 355 nm 直接测风激光雷达和 2 μm 相干测风激光雷达的观测结果吻合较好^[56-57]。

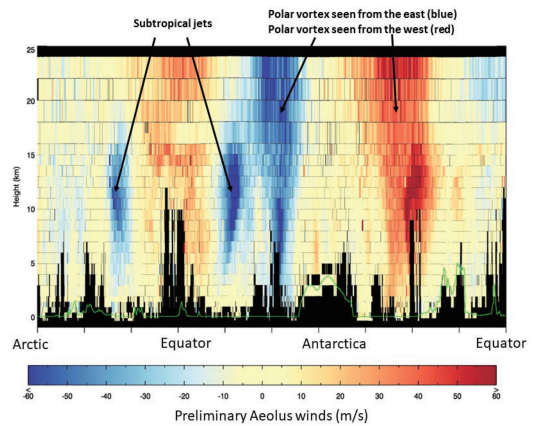


图 1 Aeolus 卫星传回的第一张风廓线图

Fig. 1 First wind profile returned by Aeolus

综上,星载相干测风激光雷达和直接测风激光雷达的对比情况如表 2 所示。

光,激光在大气中的衰减与波长呈反比,因此该技术对低对流层和边界层风场有较高的探测精度,但在气溶胶分子稀薄的高空,探测精度较低;与之相反,直接探测技术采用 355 nm 激光(ALADIN),在对流层上层和平流层风场探测上有较高的探测精度。

1995年,研究者首次提出星载多普勒混合体制测风激光雷达的概念^[58],应用混合体制测风激光雷达能够降低直接和相干探测分开设计的成本及缩短时间,提高大气垂直风廓线的探测精度^[59],且任务风险小^[60]。2000年,研究者提出星载混合体制激光雷达仿真模型 DLSM (Defense Lidar Simulation Model)^[61],该模型包括卫星模型、扫描方式模型、激光器模型、信号处理模型、大气传输模型、视向风速模型、水平风速模型及误差模型。DLSM 是一组独特的计算机模型,可以实现空间多普勒激光雷达系统的最佳功能。除此之外,DLSM 还用于解决工程问题,包括精度、分辨率和覆盖范围等测量问题^[62]。2006年,NASA 开始进行 GWOS(Global Wind Observing Sounder)任务的顶层设计,采用的是相干探测技术与直接探测技术结合的方式,其中 355 nm 直接探测系统由 NASA/

GSFC(Goddard Space Flight Center)负责研制,2 μm 相干探测系统由 NASA/LaRC(Langley Research Center)负责研制,卫星轨道高度也由前期任务设计的 525 km 降低为 400 km,以获得高测量精度,实现大覆盖范围的全球风场探测^[63-64]。2010年,NASA 开展了混合多普勒测风激光雷达接收机研制项目,该项目集成了 2 μm 和 355 nm 激光器,并采用四个望远镜,两个前视及两个后视分别收集回波信号^[62]。2013年,NASA 开展了混合体制多普勒测风雷达验证机的研制^[65],相干和直接探测共享一个接收光学系统,使用二向色分束器使 2 μm 回波光透射,355 nm 回波光反射。该验证机既满足相干探测技术衍射受限的需求,也满足直接探测技术低散射、高受损阈值的要求^[66]。

综上所述,星载测风激光雷达的研究进展如表 3 所示。

表 3 星载测风激光雷达的研究进展

Table 3 Research progress of spaceborne wind lidar

Organization	Project	Year	System	Wavelength /nm	Problem	Progress
CRL & CTI	JEM/CDL	1998	Coherent	2051	Technical difficulty	Transformation
NASA	LAWS	1987	Coherent	2051	Large caliber and high energy consumption	Cancel
	SPARCLE	1998	Coherent	2051	High cost	Cancel
	TWiLiTE	2005	Direct	355	Large size	Onboard
	HDWL	2006	Hybrid	355, 2051	Receiver malfunction	Onboard
ESA	ALADIN	1999	Direct	355	Hardware malfunction	Onboard
					Laser energy attenuation	

3.4 中国多普勒测风激光雷达的研究进展

中国目前还没有发射星载大气探测激光雷达^[67-68],但中国研制的月球探测卫星“嫦娥一号”和“嫦娥二号”上的激光高度计在月球表面高程探测方面已取得成功应用^[69]。国内在多普勒测风激光雷达方面的研究起步较晚,致力于这方面研究的单位主要有中国科学院上海光学精密机械研究所^[70-71]、中国科学院安徽光学精密机械研究所^[72-73]、中国科学院国家空间科学中心^[74]、中国科学院武汉物理与数学研究所^[75-76]、北京遥测技术研究所^[68]、中国科学技术大学^[77-80]、北京理工大学^[81-83]、中国海洋大学^[84-85]以及电子科技集团公司第 27 研究所^[86]等。2012年,中国科学院上海光学精密机械研究所报道了 1.064 μm 全固态相干激光雷达系统^[70],并采用硬靶开展了速度校准实验,基于傅立叶变换的方法得到 30 m 到 870 m 的风速分布曲线,之后又于

2014年报道了 1.5 μm 全光纤相干激光雷达系统^[71]。2006年,中国科学院安徽光机所也报道了 1064 nm 直接探测多普勒测风激光雷达,采用基于 Fabry-Perot 标准具的双边缘技术,探测了对流层三维风场分布^[87]。2013年,于翠荣等^[88]基于 355 nm 波长双边缘 Fabry-Perot 鉴频器和 532 nm 波长碘分子鉴频器,模拟了星载测风激光雷达系统的性能。2015年,中国科学技术大学的张飞飞^[79]针对平流层大气变化规律和空间环境的区域变化特征展开了研究,着力于突破激光雷达系统集成和频率检测关键技术,为多普勒激光雷达的工程化奠定了基础。2018年,中国科学技术大学的刘燕平等^[80]报道了时频分析在激光雷达中的最新应用进展,其中包括时频分析在大气粒子运动目标成像与检测以及微多普勒特征分析中的应用研究。2018年,中国科学院国家空间科学中心的巴金等^[74]利用廊坊观测站的钠

荧光多普勒激光雷达观测数据,研究发现重力波动力学输送、重力波化学输送、湍流混合输送及环流输送对钠原子输送贡献的量级相当。同年,夏媛等^[75]利用单模窄线宽 589 nm 钠多普勒激光雷达获得了具有高分辨率的钠层风场和温度探测结果。2019年,中国科学院安徽光机所的张战盈等^[78]提出了一种基于相关计算的激光雷达三光束二维风场反演方法,并搭建了激光雷达系统,结果显示,反演结果与风塔传感器的风速数据吻合较好。2019年,中国海洋大学的刘磊等^[89]提出一种将测风激光雷达数据导入到计算流体动力学的方法,并研究了地物对首都机场风速的影响。

综上,中国地基测风激光雷达的发展已经相对成熟,但星载测风激光雷达仍处于关键技术攻关和地面原理样机研制阶段,离卫星搭载尚有一段距离。目前,中国科学院上海光机所和北京遥测技术研究所等单位已具备研制大气激光雷达载荷的相关技术,正在开展星载混合体制多普勒测风激光雷达的原理样机的研制工作。

4 星载多普勒测风激光雷达面临的挑战与发展展望

相对于地基和机载激光雷达系统而言,星载激光雷达系统的探测距离更远(400 km),探测信号更加微弱,这对激光雷达系统的各项硬件指标提出了更高的要求,即更高的激光能量、具有超高灵敏度的探测器、受限制的载荷质量与体积、受约束的空间环境、具有更高精度的卫星平台稳定性和指向性等。通常为了提高星载激光雷达的探测精度,将其搭载于轨道高度更低的极轨卫星平台。因此,基于星载多普勒测风激光雷达的原理,在进行风速反演时,需要去除卫星平台与地球的相对运动速度的影响。

由于相干测风激光雷达的研制难度较大,目前尚无星载应用实践。2009年,美国公布了由 NOAA、NASA 和美国国防部(Department of Defense, DOD)联合制定的激光测风卫星的概念研究计划,以用于全球三维风场探测的演示验证卫星 GWOS 为基础,计划于 2026 年发射可实现全球三维风场探测业务化运行的下一代 NPOESS 卫星,并将相干测风激光雷达作为标配。

2018年,欧洲航天局成功发射的 ADM-Aeolus 卫星搭载了 ALADIN,这是星载多普勒直接测风激光雷达的首次应用实践^[54]。在轨运行的 ALADIN 面临着许多问题。2018年11月,第一次机载验证

实验表明, Aeolus 所反演的瑞利风随机误差在 4 m/s 左右,比发射前模拟的预期值 2.5 m/s 高,原因一是光学接收系统的视场光阑导致了瑞利回波信号的丢失,原因二是发射后激光器能量的衰减(发射后能量为 50~65 mJ,低于设计值 80 mJ)^[56]。目前,ESA 官方已经针对仪器的漂移和校正,更新了处理器和数据产品并完善了相关算法,主要应对策略是通过联合使用仪器内部测量的光谱特征(最低响应值)和地面返回的风速信息,校正风速偏差中残余的线性偏差和谐波漂移^[57,90-91]。

通过分析国外星载多普勒测风激光雷达的研究进展以及所面临的挑战,为中国星载多普勒测风激光雷达的载荷研制、验证技术的开发和观测资料的充分利用提供了宝贵的经验。中国星载多普勒测风激光雷达在未来的发展中需要解决的关键技术如下。

- 1) 具有高能量、窄脉冲、高重频、高稳定性和长寿命等特性的 355 nm 和 2 μ m 单频激光器工程化技术;
- 2) 具有高响应率、高增益和高灵敏度的探测器的研制技术以及高精度频率的提取技术,以满足更高风速反演精度的需求;
- 3) 具有高采样速率的电路技术,以满足垂直风廓线层析分辨率不断提高的要求;
- 4) 具有低波相差和大口径的轻量化收发同置望远镜的研制技术,以满足星载混合体制测风激光雷达的需求;
- 5) 星上激光波长和能量的高稳定性测量和标定技术,以及星上数据的高速处理技术;
- 6) 全球风场反演在数值天气预报模式中的同化技术,以满足气象应用的需求;
- 7) 星载混合体制激光测风技术以及主被动融合探测技术。

5 结束语

全球三维风廓线观测资料能够有助于提高天气预报精度^[12-14]和台风的预报精度^[15-16],改善大气污染物等环境预报的效果^[19-22],对平流层 QBO^[23-24]和大气成分^[25-26]等气候影响因素的研究有重要意义。2020年5月,欧洲地球科学联盟(EGU)的一项研究报告详细评估了“风神”卫星(ADM-Aeolus)所提供的数据对数值天气预报的影响^[92],结果表明:对于短临和中期预报,位势和矢量风的预报误差在热带地区减少了约 2%,在南半球减少了 2%~3%,但

“风神”数据在总同化观测数据中的占比不到1%，可见其对数值天气预报的改善效果较为显著。

星载多普勒测风激光雷达能够弥补气象卫星被动探测的不足，可实现全球三维风场的探测，具有重要的科学和应用价值。针对国际上相干探测、直接探测和混合探测三种体制的星载测风激光雷达的研究历程和现状展开了调研，分析了星载多普勒测风激光雷达发展所面临的挑战，总结了我国星载多普勒测风激光雷达发展所急需解决的七类关键技术，为缩小我国与国际发达国家在星载多普勒测风激光雷达领域的差距提供了参考。

从全球首颗星载测风激光雷达 ADM-Aeolus 传回的首张风速剖面图可以看出，由于直接探测方式所采用的 355 nm 波长在大气中的传输能力相对较弱（相比于相干测风技术的 2051 nm），在 0~3 km 近地面处探测信噪比较低。相比之下，星载混合体制测风激光雷达能够降低设计成本，并能结合相干探测技术（2 μm）在低空的高精度探测和直接探测技术（355 nm）在高层风场的高精度探测的优势，从而提高全球风场垂直廓线的探测精度，是未来星载测风激光雷达发展的主流趋势。目前我国的星载多波长激光雷达研制工作已经通过专项立项^[11]，这为我国研制星载大气三维风场探测的有效载荷，实现全球三维大气风场探测奠定了坚实基础。我国下一代极轨气象卫星“风云五号”在预研论证中也将测风激光雷达纳入载荷范围，未来在国内各研究单位的合作努力下，我国星载测风激光雷达技术的发展会更加迅速。

参 考 文 献

- [1] 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.
- [2] Liu Z L, Barlow J F, Chan P, et al. A review of progress and applications of pulsed Doppler wind LiDARs[J]. *Remote Sensing*, 2019, 11(21): 2522.
- [3] Lolli S, Delaval A, Loth C, et al. 0.355-micrometer direct detection wind lidar under testing during a field campaign in consideration of ESA's ADM-Aeolus mission[J]. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2013, 6(12): 3349-3358.
- [4] Wang Y X, Wei M, Wang Z H, et al. Novel scanning strategy for future spaceborne Doppler

- weather radar with application to tropical cyclones [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2017, 10(6): 2685-2693.
- [5] McGill M J, Skinner W R, Irgang T D. Validation of wind profiles measured with incoherent Doppler lidar [J]. *Applied Optics*, 1997, 36(9): 1928-1939.
- [6] Mizutani K, Itabe T, Ishii S, et al. Development of coherent Doppler lidar for wind profiling [J]. *Proceedings of SPIE*, 2005, 5653: 138-145.
- [7] Tan D G H, Andersson E, Fisher M, et al. Observing-system impact assessment using a data assimilation ensemble technique: application to the ADM - Aeolus wind profiling mission[J]. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 2007, 133(623): 381-390.
- [8] 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.
- [9] Weissmann M, Busen R, Drnbrack A, et al. Targeted observations with an airborne wind lidar [J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2005, 22(11): 1706-1719.
- [10] Žagar N, Stoffelen A, Marseille G, et al. Impact assessment of simulated Doppler wind lidars with a multivariate variational assimilation in the tropics [J]. *Monthly Weather Review*, 2008, 136(7): 2443-2460.
- [11] Lu N M, Min M, Dong L X, et al. Development and prospect of spaceborne LiDAR for atmospheric detection[J]. *Journal of Remote Sensing*, 2016, 20(1): 1-10.
- 卢乃锰, 闵敏, 董立新, 等. 星载大气探测激光雷达发展与展望[J]. *遥感学报*, 2016, 20(1): 1-10.
- [12] Ma Z Z, Riishojgaard L P, Masutani M, et al. Impact of different satellite wind lidar telescope configurations on NCEP GFS forecast skill in observing system simulation experiments[J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2015, 32(3): 478-495.
- [13] Stoffelen A, Marseille G J, Bouttier F, et al. ADM-aeolus Doppler wind lidar observing system simulation experiment [J]. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 2006, 132(619): 1927-1947.
- [14] Weissmann M, Cardinali C. Impact of airborne Doppler lidar observations on ECMWF forecasts[J]. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological*

- Society, 2007, 133(622): 107-116.
- [15] Pu Z X, Zhang L, Emmitt G D. Impact of airborne Doppler wind lidar profiles on numerical simulations of a tropical cyclone [J]. *Geophysical Research Letters*, 2010, 37(5): L05801.
- [16] Weissmann M, Langland R H, Cardinali C, et al. Influence of airborne Doppler wind lidar profiles near Typhoon Sinlaku on ECMWF and NOGAPS forecasts [J]. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 2012, 138(662): 118-130.
- [17] Manninen A, Marke T, Tuononen M, et al. Atmospheric boundary layer classification with Doppler lidar [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2018, 123(15): 8172-8189.
- [18] Zhang J, Atlas R, Emmitt G D, et al. Airborne Doppler wind lidar observations of the tropical cyclone boundary layer [J]. *Remote Sensing*, 2018, 10(6): 825.
- [19] Schween J H, Hirsikko A, Lohnert U, et al. Mixing-layer height retrieval with ceilometer and Doppler lidar: from case studies to long-term assessment [J]. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2014, 7(11): 3685-3704.
- [20] Pearson G N, Davies F, Collier C G. An analysis of the performance of the UFAM pulsed Doppler lidar for observing the boundary layer [J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2009, 26(2): 240-250.
- [21] Huang M, Gao Z Q, Miao S G, et al. Estimate of boundary-layer depth over Beijing, China, using Doppler lidar data during SURF-2015 [J]. *Boundary-Layer Meteorology*, 2017, 162(3): 503-522.
- [22] 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.
- [23] Schoeberl M R, Douglass A R, Newman P A, et al. QBO and annual cycle variations in tropical lower stratosphere trace gases from HALOE and Aura MLS observations [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2008, 113(D5): D05301.
- [24] Hommel R, Timmreck C, Giorgetta M A, et al. Quasi-biennial oscillation of the tropical stratospheric aerosol layer [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2014, 15(10): 5557-5584.
- [25] Ramaswamy V, Schwarzkopf M D, Shine K P. Radiative forcing of climate from halocarbon-induced global stratospheric ozone loss [J]. *Nature*, 1992, 355(6363): 810-812.
- [26] Toumi R, Bekki S, Law K S. Indirect influence of ozone depletion on climate forcing by clouds [J]. *Nature*, 1994, 372(6504): 348-351.
- [27] Rohaly G D, Krishnamurti T N. An observing system simulation experiment for the laser atmospheric wind sounder (LAWS) [J]. *Journal of Applied Meteorology*, 1993, 32(9): 1453-1471.
- [28] Chan K, Killinger D. Short-pulse coherent Doppler Nd:YAG lidar [J]. *Optical Engineering*, 1991, 30(1): 49-54.
- [29] Michael Hardesty R, Post M J, Banta R M. Observing atmospheric winds with a Doppler lidar [J]. *Optics & Photonics News*, 1991, 2(10): 12-15.
- [30] Cariou J P, Valla M, Canat G. Fiber lasers: new effective sources for coherent lidars [J]. *Proceedings of SPIE*, 2007, 6750: 675007.
- [31] 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.
- [32] Henderson S W. Eye-safe coherent laser radar system at 2.1 μm using Tm, Ho:YAG lasers [J]. *Applied Optics*, 1991, 16: 773-775.
- [33] Emmitt G D. SPARCLE: an approved shuttle mission to demonstrate tropospheric wind sensing using a coherent 2- μm Doppler lidar [J]. *Proceedings of SPIE*, 1998, 3439: 31-38.
- [34] Phillips M W, Schnal D L, Hale C P, et al. Design and development of the SPARCLE coherent lidar transceiver [J]. *Proceedings of SPIE*, 1999, 3707: 256-267.
- [35] Emmitt G D, Miller T, Spiers G. Pointing knowledge for SPARCLE and space-based Doppler wind lidars in general [C] // Tenth Biennial Coherent Laser Radar Technology and Applications Conference, June 28 - July 2, 1999, Mount Hood, Oregon, USA. Washington: NASA, 1999: 20000012996.
- [36] Colver A. Study protocol: SPARCLE—a multi-centre European study of the relationship of environment to participation and quality of life in children with cerebral palsy [J]. *BMC Public Health*, 2006, 6(1): 105.
- [37] Kavaya M J, Emmitt G D. Space readiness coherent lidar experiment (SPARCLE) space shuttle mission [J]. *Proceedings of SPIE*, 1998, 3380: 2-11.

- [38] 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.
- [39] Beyon J Y, Koch G J, Kavaya M J, et al. Airborne wind profiling algorithms for the pulsed 2-micron coherent Doppler Lidar at NASA Langley Research Center [J]. *Proceedings of SPIE*, 2013, 8731: 87310K.
- [40] Kavaya M J, Singh U N, Koch G J, et al. Development of a compact, pulsed, 2-micron, coherent-detection, Doppler wind lidar transceiver [EB/OL]. (2008-01-15)[2019-11-23]. <http://www.meteo.fr/cic/meetings/clrc/Kavaya1.pdf>.
- [41] Beyon J Y, Koch G J, Kavaya M J. Development of the data acquisition and processing system for a pulsed 2-micron coherent Doppler lidar system [J]. *Proceedings of SPIE*, 2010, 7860: 78600A.
- [42] Phillips M W, Pete Tucker J. Amplification of Q-switched pulses to 400 mJ at 2051 nm using a conduction-cooled laser pump module [J]. *Proceedings of SPIE*, 2005, 5653: 146-157.
- [43] Itabe T and Mizutani K. Coherent Doppler wind lidar for the Japanese experimental module of the ISS[C]// *Optical Remote Sensing*, February 3, 2003, Québec City, Canada. Washington: OSA Publishing, 2003: OWA1.
- [44] Mizutani K, Itabe T, Ishii S, et al. Wind profiling by coherent Doppler lidar with 2 micron solid laser [EB/OL]. (2004-05-15) [2019-11-23]. https://www.researchgate.net/publication/234418980_Wind_Profiling_by_Coherent_Doppler_LIDAR_with_2MICRON_Solid_Laser.
- [45] Phillips M W, Henderson S W, Poling M, et al. Coherent lidar development for Doppler wind measurement from the International Space Station [J]. *Proceedings of SPIE*, 2001, 4153: 376-384.
- [46] Itabe T, Mizutani K, Ishizu M, et al. ISS/JEM-borne coherent Doppler lidar program to measure the wind from space [J]. *Proceedings of SPIE*, 2001, 4153: 412-419.
- [47] Ishii S, Baron P, Aoki M, et al. Feasibility study for future space-borne coherent Doppler wind lidar, part 1: instrumental overview for global wind profile observation[J]. *Journal of the Meteorological Society of Japan. Ser. II*, 2017, 95(5): 301-317.
- [48] 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.
- [49] Gentry B M, McGill M J, Schwemmer G, et al. The TWiLiTE airborne direct detection molecular Doppler lidar[EB/OL]. (2011-02-09) [2019-11-23]. <http://cires1.colorado.edu/events/lidarworkshop/LWG/Feb11/ISSPapers.feb11/Gentry.feb11.pdf>.
- [50] Gentry B M, McGill M J, Machan R, et al. Flight testing of the TWiLiTE airborne molecular Doppler lidar[EB/OL]. (2010-07-10) [2019-11-23]. <https://core.ac.uk/display/10554708>.
- [51] Reitebuch O. The spaceborne wind lidar mission ADM-Aeolus [M] // Schumann U. *Atmospheric Physics*. Heidelberg: Springer, 2012: 815-827.
- [52] Benjamin W, Keil C, German F, et al. ADM-Aeolus pre-launch activities and recent advances in spaceborne and airborne Wind Lidar Systems [EB/OL]. (2016-06-21) [2019-11-23]. https://elib.dlr.de/105540/1/Full_paper_Witschas_final.pdf.
- [53] Kavaya M J, Spiers G D, Frehlich R G. Potential pitfalls related to space-based lidar remote sensing of the Earth with an emphasis on wind measurement [J]. *Proceedings of SPIE*, 2001, 4153: 385-393.
- [54] Ansmann A, Wandinger U, Rille O L, et al. Particle backscatter and extinction profiling with the spaceborne high-spectral-resolution Doppler lidar ALADIN: methodology and simulations[J]. *Applied Optics*, 2007, 46(26): 6606-6622.
- [55] Flamant P, Cuesta J, Denneulin M L, et al. ADM-Aeolus retrieval algorithms for aerosol and cloud products[J]. *Tellus A*, 2008, 60: 273-286.
- [56] 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.
- [57] Marksteiner U, Lemmerz C, Lux O, et al. Calibrations and wind observations of an airborne direct detection wind lidar supporting ESA's Aeolus mission[J]. *Remote Sensing*, 2018, 10(12): 2056.
- [58] Emmitt G D. Combining direct and coherent detection for Doppler wind lidar[J]. *Proceedings of SPIE*, 2004, 5575: 31-37.
- [59] Emmitt G D. Hybrid technology Doppler wind lidar: assessment of simulated data products for a space-based system concept [J]. *Proceedings of SPIE*,

- 2001, 4153: 366-375.
- [60] Marx C, Gentry B, Kavaya M, et al. Hybrid Doppler wind lidar (HDWL) transceiver ACT project [EB/OL]. (2010-02-03) [2019-11-23]. <http://cires1.colorado.edu/events/lidarworkshop/LWG/Feb10/Papers.feb10/Marx.feb10.pdf>.
- [61] Masutani M, Riishojgaard L P, Woollen J S, et al. Observing system simulation experiments at joint center for satellite data assimilation[J]. Proceedings of SPIE, 2012, 8529: 8529OB.
- [62] Wood S A Jr, Emmitt G D, Greco S. DLSM: a coherent and direct detection lidar simulation model for simulating space-based and aircraft-based lidar winds[J]. Proceedings of SPIE, 2000, 4035: 2-12.
- [63] Gentry B M, Atlas R, Baker W, et al. Recent US activities toward development of a global tropospheric 3D wind profiling system [EB/OL]. (2008-12-03) [2019-11-23]. <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2008AGUFM.A21F0253G/abstract>.
- [64] Kavaya M J, Frehlich R G. Parameter trade studies for coherent lidar measurements of wind from space [J]. Proceedings of SPIE, 2007, 6681: 668109.
- [65] Marx C T, Gentry B, Jordan P, et al. Lab demonstration of the hybrid Doppler wind lidar (HDWL) transceiver [J]. Proceedings of SPIE, 2013, 8872: 887207.
- [66] Riishojgaard L P, Ma Z Z, Masutani M, et al. Observation system simulation experiments for a global wind observing sounder [J]. Geophysical Research Letters, 2012, 39(17): 17805.
- [67] Li R, Wang C, Su G Z, et al. Development and applications of spaceborne lidar [J]. Science & Technology Review, 2007, 25(14): 58-63.
李然, 王成, 苏国中, 等. 星载激光雷达的发展与应用[J]. 科技导报, 2007, 25(14): 58-63.
- [68] Zhao Y M, Li Y H, Shang Y N, et al. Application and development direction of lidar [J]. Journal of Telemetry, Tracking, and Command, 2014, 35(5): 4-22.
赵一鸣, 李艳华, 高雅楠, 等. 激光雷达的应用及发展趋势[J]. 遥测遥控, 2014, 35(5): 4-22.
- [69] Wang J Y, Shu R, Chen W B, et al. Chang'e 1 spaceborne laser altimeter [J]. Scientia Sinica (Physica, Mechanica & Astronomica), 2010, 40(8): 1063-1070.
王建宇, 舒嵘, 陈卫标, 等. 嫦娥一号卫星载激光高度计[J]. 中国科学(物理学、力学、天文学), 2010, 40(8): 1063-1070.
- [70] Zhu X P, Liu J Q, Bi D C, et al. Development of all-solid coherent Doppler wind lidar[J]. Chinese Optics Letters, 2012, 10(1): 012801.
- [71] Zhang X, Diao W F, Liu Y, et al. Single-frequency polarized eye-safe all-fiber laser with peak power over kilowatt[J]. Applied Physics B, 2014, 115(1): 123-127.
- [72] Sun D S, Liu D, Xia H Y, et al. Low tropospheric wind profile from a 1.06 μm Doppler lidar [J]. Infrared and Laser Engineering, 2007, 36(1): 52-56.
孙东松, 刘东, 夏海云, 等. 1.06 μm 多普勒激光雷达的低对流层风场测量[J]. 红外与激光工程, 2007, 36(1): 52-56.
- [73] Tian X M, Liu D, Xu J W, et al. Review on atmospheric detection lidar network and spaceborne lidar technology [J]. Journal of Atmospheric and Environmental Optics, 2018, 13(6): 401-416.
田晓敏, 刘东, 徐继伟等. 大气探测激光雷达网络和星载激光雷达技术综述[J]. 大气与环境光学学报, 2018, 13(6): 401-416.
- [74] Ba J, Hu X, Yan Z A, et al. Observation analysis on the characteristics of vertical dynamical transport of sodium atoms in the mesopause region over the Langfang area [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2018, 61(2): 449-457.
巴金, 胡雄, 闫召爱等. 廊坊地区中间层顶钠原子垂直动力学输送特征观测分析[J]. 地球物理学报, 2018, 61(2): 449-457.
- [75] Xia Y, Cheng X W, Li F Q, et al. Laser frequency stabilization and shifting applied in narrowband sodium lidar system for wind and temperature measurement[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2018, 55(10): 102801.
夏媛, 程学武, 李发泉, 等. 应用于窄带钠风温探测激光雷达的稳频和移频方法[J]. 激光与光电子学进展, 2018, 55(10): 102801.
- [76] Fan Y, Lin Z X, Cheng X W, et al. Pulsed laser spectral pattern detection based on Fabry-Perot interferometer[J]. Chinese Journal of Lasers, 2018, 45(8): 0804006.
樊焱, 林兆祥, 程学武, 等. 基于法布里-珀罗干涉仪的脉冲激光谱型测量[J]. 中国激光, 2018, 45(8): 0804006.
- [77] 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.
- [78] Zhang Z Y, Cai Y, Yu D S, et al. Two-dimensional wind field measurement based on lidar signal correlation[J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, 39(6): 0601003.
张战盈, 蔡熠, 余东升, 等. 基于相关计算的激光雷达二维风场探测[J]. *光学学报*, 2019, 39(6): 0601003.
- [79] Zhang F F. Research on Doppler wind lidar system with wind detection of high temporal and spatial resolution[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2015.
张飞飞. 高时空分辨率多普勒测风激光雷达系统研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2015.
- [80] Liu Y P, Wang C, Xia H Y. Application progress of time-frequency analysis for lidar [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2018, 55(12): 120005.
刘燕平, 王冲, 夏海云. 时频分析在激光雷达中的应用进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2018, 55(12): 120005.
- [81] Wu Y W, Guo P, Chen S Y, et al. Wind profiling for a coherent wind Doppler lidar by an auto-adaptive background subtraction approach [J]. *Applied Optics*, 2017, 56(10): 2705-2713.
- [82] Wu Y W, Guo P, Chen S Y, et al. Analysis of weighted subspace fitting and subspace-based eigenvector techniques for frequency estimation for the coherent Doppler lidar[J]. *Applied Optics*, 2017, 56(33): 9268-9276.
- [83] Wu Y W, Guo P, Chen S Y, et al. Performance of estimated Doppler velocity by maximum likelihood based on covariance matrix[J]. *Optical Engineering*, 2016, 55(9): 096112.
- [84] Lu B, Wu D, Zhang T C. Performance simulation of spaceborne coherent Doppler wind lidar based on CALIOP data[J]. *Periodical of Ocean University of China*, 2017, 47(1): 119-125.
卢博, 吴东, 张天澈. CALIOP 数据在星载相干多普勒测风激光雷达性能仿真中的应用[J]. *中国海洋大学学报*, 2017, 47(1): 119-125.
- [85] 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.
- [86] Diao W F, Zhang X, Liu J Q, et al. All fiber pulsed coherent lidar development for wind profiles measurements in boundary layers[J]. *Chinese Optics Letters*, 2014, 12(7): 072801.
- [87] Zhong Z Q, Sun D S, Wang B X, et al. Doppler wind lidar based on Fabry-Perot etalon[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2006, 35(6): 687-690.
钟志庆, 孙东松, 王邦新等. 基于 Fabry-Perot 标准具的多普勒测风激光雷达[J]. *红外与激光工程*, 2006, 35(6): 687-690.
- [88] Yu C R, Liu Z S, Bi D C, et al. Comparison of simulated performance of filters in space-borne wind lidar system [J]. *Chinese Journal of Quantum Electronics*, 2013, 30(5): 615-620.
于翠荣, 刘智深, 毕德仓, 等. 星载测风激光雷达系统鉴频器性能模拟比较[J]. *量子电子学报*, 2013, 30(5): 615-620.
- [89] Liu L, Wu S H, Zhang H W. Wind field simulation of capital airport based on lidar data[J]. *Journal of Atmospheric and Environmental Optics*, 2019, 14(4): 259-265.
刘磊, 吴松华, 张洪玮. 基于激光雷达数据的首都机场风场模拟[J]. *大气与环境光学学报*, 2019, 14(4): 259-265.
- [90] Lux O, Wernham D, Bravetti P, et al. High-power and frequency-stable ultraviolet laser performance in space for the wind lidar on Aeolus [J]. *Optics Letters*, 2020, 45(6): 1443-1446.
- [91] Zhai X C, Marksteiner U, Weiler F, et al. Rayleigh wind retrieval for the ALADIN airborne demonstrator of the aeolus mission using simulated response calibration [J]. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2020, 13(2): 445-465.
- [92] Rennie M P, Isaksen L. An assessment of the impact of aeolus Doppler wind lidar observations for use in numerical weather prediction at ECMWF [EB/OL]. (2020-05-04) [2020-05-10]. <https://meetingorganizer.copernicus.org/EGU2020/EGU2020-5340.html>.