

星载激光测风技术体制及其评估方法综述

孙学金¹, 张传亮^{1,2}, 方乐², 陆文¹, 赵世军¹, 叶松¹

1. 国防科技大学 气象海洋学院, 南京 211101;

2. 61741 部队, 北京 100081

摘要: 星载激光测风雷达是探测全球风场的重要工具。目前由欧洲空间局研制的全球首颗星载激光测风卫星 Aeolus 已于 2018 年 8 月顺利升空部署, 美国和日本也在积极论证和研制新的星载激光测风雷达技术体制, 分别采用混合多普勒测风雷达 HDWL (Hybrid Doppler Wind Lidar) 和相干多普勒测风雷达 CDWL (Coherent Doppler Wind Lidar) 技术体制。本文简要介绍了 Aeolus、HDWL 和 CDWL 技术体制, 并根据前人的研究成果, 从数据获取率和获取量、风场探测精度以及对数值预报系统的改进作用对这 3 种技术体制进行了评估综述。研究结果表明以气溶胶和云滴粒子为示踪物进行的大气风场探测具有更高的探测精度, 其测风精度约为 0—2 m/s, 其探测范围为边界层和对流层下层; 以大气分子为示踪物的大气风场探测精度相对较低, 其精度约为 1—3 m/s, 但其具有更大的探测范围。根据 3 种星载激光测风雷达技术体制, Aeolus 和 HDWL 具备探测边界层和对流层的大气风场能力, CDWL 只能获取边界层至对流层下层的风场数据, HDWL 体制相比 Aeolus 和 CDWL, 能够获取更多的风场探测数据, 且能够实现较高精度水平风场矢量探测数据。OSSE (Observing System Simulation Experiments) 实验表明, 将星载激光测风雷达风场探测资料同化到数值预报系统之后, 预报结果得到明显的改善, 在双星联合探测体制下, 更大的风场探测范围相比径向风场的探测更有助于提升数值预报系统的精度, 而径向风场的探测将更好地提升星下点的探测精度。HDWL 体制相比 Aeolus 和 CDWL, 由于其探测范围更广, 且可以实现径向风速的探测, 故推测其对数值预报系统的精度的提升作用更明显。对这 3 种技术体制的分析评估可为发展中国的星载激光测风雷达技术体制提供参考。

关键词: 遥感, 星载激光测风雷达, Aeolus, HDWL, CDWL, 数据获取率, 测风精度, 数值预报系统

引用格式: 孙学金, 张传亮, 方乐, 陆文, 赵世军, 叶松. 2022. 星载激光测风技术体制及其评估方法综述. 遥感学报, 26(6): 1260–1273
Sun X J, Zhang C L, Fang L, Lu W, Zhao S J and Ye S. 2022. A review of the technical system of spaceborne Doppler wind lidar and its assessment method. National Remote Sensing Bulletin, 26(6): 1260–1273 [DOI: 10.11834/jrs.20229067]

1 引言

风是描述大气状态的基本参量之一, 全球范围内大气风场的探测对于研究中尺度动力学过程、大气输送和交换作用以及极端天气的预报预防等具有重要意义 (Baker 等, 1995)。从 20 世纪 70 年代起, 人们就开始对风场卫星探测技术进行研究。1971 年 Endlich 等 (1971) 通过提取云的特征量实现了卫星云导风的探测。Leese 等 (1971) 通过引入快速傅里叶变化技术, 提高了云导风的计算速度。许健民等 (1997) 对云导风计算的相关问题开展了研究。王振会和曾维麟 (1996)、朱平等

(2007)、龙智勇等 (2011)、马侠霖等 (2014) 进一步发展了云导风的处理算法, 提高了云导风的计算效率和业务化应用。目前云导风的探测技术已经比较成熟, 然而该技术只能实现有云大气层的单层风信息的提取。同时, 人们也发展了利用微波辐射计、微波散射计获取海面风场的技术。1978 年, 美国发射的 SeaSAT 装载了微波辐射计载荷, 初步实现了海面风速的遥感 (Njoku 等, 1980)。后来人们在传统微波辐射计的基础上, 引入了对于电磁波第三、第四 Stokes 分量的测量, 使得探测海面风速风向成为可能。2003 年, 第一台星载全极化微波辐射计 WindSat 发射升空, 成功实现了海

收稿日期: 2019-03-13; 预印本: 2020-10-11

基金项目: 国家自然科学基金(编号:41575020,41406107)

第一作者简介: 孙学金, 研究方向为大气辐射与大气遥感。E-mail: xuejin.sun@outlook.com

通信作者简介: 张传亮, 研究方向为激光雷达测风技术。E-mail: zhangcl2015@126.com

表风速和风向的遥感 (Gaiser 等, 2004)。欧洲空间局研制的 SMOS (Soil Moisture and Ocean Salinity) 也搭载了极化微波辐射计, 实现了海面风场的探测 (Barre 等, 2008)。在国内, 中国航天科技集团公司第 504 研究所 (王晓海和李浩, 2005)、解放军理工大学 (施健康等, 2009; 陆文等, 2010; 严卫等, 2010) 等单位也对全极化微波辐射计的设计和应用展开了深入研究, 并取得了丰硕成果。然而, 星载微波辐射计只能实现全球海表风场的探测, 无法实现空中风场的廓线探测。在星载激光测风雷达发射之前, 探测空中风场廓线的主要手段包括无线电探空仪和风廓线雷达, 然而无线电探空仪站点主要分布在北半球的陆地地区 (Atlas 等, 1985), 南半球、赤道地区以及海洋分布较少, 无法实现全球风场廓线的有效和持续探测。世界气象组织将全球三维风场的探测视为 21 世纪最具挑战性和最有意义的气象观测任务之一 (WMO, 2001)。

通过对不同卫星测风技术的研究, 星载激光测风雷达被认为是探测全球风场的最佳手段。Abreu (1979) 首次提出在卫星或者空间站上搭载激光测风雷达进行全球风场探测的概念, 并研究了雷达参数对测风精度的影响。1985 年, 美国启动了大气风场探测计划 LAWS (Laser Atmospheric Wind Sounder), 开展了 $2\ \mu\text{m}$ 相干激光多普勒雷达的相关技术研究, 该项目由于受制于当时技术条件的限制而被迫搁浅 (Beranek 等, 1989)。经过 20 多年的探索, 美国于 2007 年再次启动星载激光测风计划: 全球风场探测系统 GWOS (Global Wind Observing System), 采用直接探测和相干探测的混合技术体制的多普勒激光测风雷达 HDWL (Hybrid Doppler Wind Lidar) 实现全球风场的探测, 目前该项目已推迟发射 (Baker, 2008)。欧空局对于星载激光测风雷达的研究也起步较早, 可追溯至 20 世纪 80 年代, 并于 1999 年正式启动大气动力学任务 ADM-Aeolus ADM (Atmospheric Dynamics Mission), 并计划搭载基于直接探测体制的星载激光测风雷达 ALADIN (Atmospheric LAsER Doppler INstrument) 来实现全球风场的探测。最早计划于 2007 年发射, 后因激光器和望远镜等硬件方面的技术难题几经推迟 (Wernham 等, 2016)。2018 年 8 月 22 日 (世界时), Aeolus 卫星顺利升空, 对于人类全球风场廓线的探测具有里程碑式的意义。1998 年日本开始研制运行于国际空间站

上的相干激光多普勒测风雷达 JEM/CDL (Japanese Experiment Module/Coherent Doppler Lidar) (Itabe 等, 2001)。2011 年日本又开展了运行于独立卫星轨道的相干多普勒激光测风雷达 CDWL (Coherent Doppler Wind Lidar) 的研究, 该技术体制可实现边界层和云场内部风场的探测 (Baron 等, 2017; Ishii 等, 2017)。

欧洲空间局、美国和日本都投入了大量人力、物力、财力积极探索和研制星载激光测风雷达, 提出了 3 种不同的技术体制。本文通过大量调研相关文献简要概述了欧洲空间局、美国和日本的星载激光测风雷达技术体制, 并从数据获取率和获取量、风场探测精度以及对数值预报系统的改善效果 3 个方面对这 3 种技术体制进行了评估和论证。

2 星载激光测风技术体制

本节分别对欧洲空间局 Aeolus、美国 HDWL 和日本 CDWL 研制的星载激光测风技术体制进行介绍。

2.1 欧洲空间局 Aeolus 技术体制

欧洲空间局研制的 Aeolus 星载激光测风技术体制如图 1 所示 (Marseille 和 Stoffelen, 2003; Reitebuch 等, 2006)。卫星拟运行在 400 km 高度的太阳同步晨昏轨道上, 以减小太阳背景辐射对测风精度的影响 (Zhang 等, 2019)。后来为了增加回波信号的信噪比, 将轨道高度调整至 320 km。卫星观测天顶角为 35° 。Aeolus 激光雷达工作在 355 nm 波段, 采用直接探测技术分别通过 Rayleigh 通道和 Mie 通道进行大气风场的探测, 其中 Rayleigh 通道主要以大气分子为示踪物探测对流层和平流层下层的大气风场, Mie 通道主要以气溶胶和云滴粒子为示踪物探测边界层和云内风场。欧洲空间局对 Aeolus 风场探测的垂直分辨率和精度要求如表 1 所示。为了提高测风精度, Aeolus 探测单元需累积若干个激光束后再进行径向风速的反演, 其中一次测量 (measurement) 过程累积的激光脉冲为 20 个, 一次观测 (observation) 是由 30 次测量组成的, 造成的一次观测过程的水平分辨率约为 90 km。

Aeolus 的系统结构如图 2 所示, 系统主要由激光器、发射接收系统和鉴频系统组成, 其详细工作流程参见张日伟等 (2014), 本文进行简要描

述。首先，激光器产生 355 nm 的激光，并发射到大气中，大气中分子、气溶胶或云滴粒子通过后向散射作用将部分激光信号散射回激光雷达。气溶胶和云滴粒子的后向散射信号进入到 Mie 通道鉴频器中，即 Fizeau 干涉仪。不同频率的回波信号会在 Fizeau 干涉仪不同位置产生干涉条纹。鉴频系统通过条纹形成的位置反演气溶胶和云滴粒子回波信号的多普勒频移。大气分子的后向散射信号会进入到 Rayleigh 通道鉴频器中，Rayleigh 通道鉴频器由 2 个 F-P 标准具组成。回波信号一部分进入

F-P 标准具 1，并在相应位置处的 CCD 探测器上形成亮斑，另外一部分信号反射进入到 F-P 标准具 2 中，在 CCD 探测器上形成另外一个亮斑。不同频率的信号产生的两个亮斑的相对亮度会产生变化，鉴频系统通过两个亮斑之间的相对亮度差异反演大气分子回波信号的多普勒频移。欧洲空间局完成了星载激光测风雷达关键部件，包括激光二极管、发射系统以及光子探测器等的主要技术攻关工作，并为星载激光雷达部件设定了相应的技术标准 (Zahir 和 Durand, 2011)。

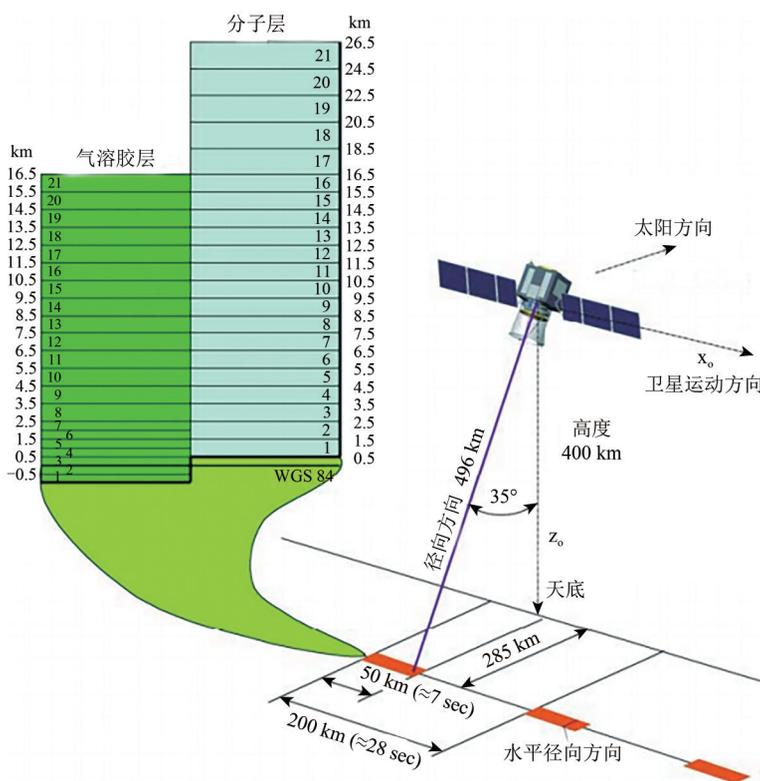


图 1 Aeolus 激光测风技术体制 (Reitebuch 等, 2006)

Fig. 1 The technical system of spaceborne DWL Aeolus (Reitebuch et al., 2006)

表 1 欧洲空间局对星载激光雷达测风不确定度的要求
Table 1 The observation accuracy expectation of ESA for spaceborne DWL

关键参数	观测要求		
	边界层	对流层	平流层
高度范围/km	0—2	2—16	16—20
垂直分辨率/km	0.5	1	2
不确定度/(m·s ⁻¹)	1	2	3

2.2 美国 HDWL 技术体制

在美国 HDWL 技术体制中，卫星拟运行于 400 km 高度的太阳同步晨昏轨道。该技术体制采

用相干探测技术和非相干探测技术相结合的混合多普勒激光测风雷达方案 (Emmitt, 2004)，其相干探测技术采用的波长为 2 μm，非相干探测技术采用的波长为 355 nm。与 Aeolus 不同的是，HDWL 可探测多个方向的径向风速值。在不采用望远镜扫描技术的情况下，一个望远镜只能探测一个方向的径向风速值。而望远镜的体积一般较大，以 Aeolus 为例，其望远镜直径达 1.5 m，如果采用扫描技术的话，会给卫星的姿态控制带来新的挑战。为了探测多个方向的径向风速值，HDWL 拟安装 4 个不同观测方向的望远镜，其方位角分别为 45°、

135°、225°和315°，其观测天顶角为45°，如图3所示。Marx等(2013)已经在实验室研制出来由4个望远镜组成的简洁、轻量化的星载激光测风雷达发射接收系统，并且每个望远镜都可以接收355 nm和2 μm的后向散射回波信号。Masutani等(2010)基于卫星轨道仿真软件对HDWL轨道进行了模拟，

得到了激光束与地表的交叉点轨迹。模拟结果表示这种观测方式保证了每个探测点都会以不同的观测角度被先后探测两次，从而实现了不同方向径向风速的探测。在进行风速合成时，假设垂直方向的风速分量为0 m·s⁻¹，即可实现二维水平风矢量的探测。

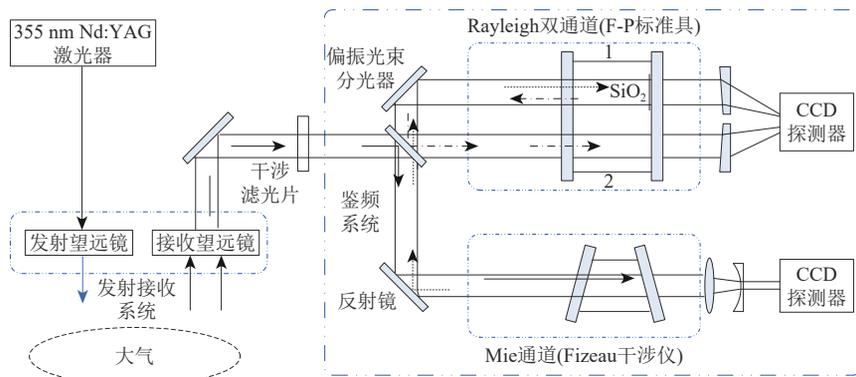


图2 星载激光多普勒测风雷达系统结构图(张日伟等,2014)

Fig. 2 The system structure diagram of spaceborne DWL(Zhang et al., 2014)

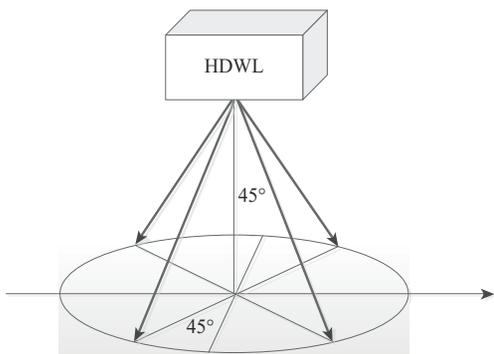


图3 HDWL观测体制示意图(Masutani等,2010)

Fig. 3 The observation geometry of HDWL (Masutani et al., 2010)

2.3 日本CDWL技术体制

日本CDWL计划是从ISS/JE计划发展而来，二者技术体制比较相似，CDWL计划在ISS/JE计划的基础上进行了部分改动。ISS/JE星载激光测风雷达观测方式示意图如图4所示(Ishii等,2012)。ISS/JE拟在国际空间站上运行，采用相干探测体制，该激光雷达包含两个望远镜，其方位角分别为45°和135°，观测天顶角为30°。CDWL运行于独立轨道，轨道高度为220 km，并将两个望远镜的观测天顶角调整为35°。其观测方式与美国HDWL观测方式类似，其前向望远镜和后向望远镜将分别探测同一探测点的径向风场，如图5所示。假设垂

直风速为0 m·s⁻¹，可反演大气风场的二维水平风矢量。

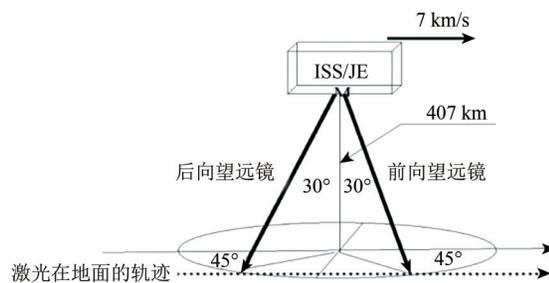


图4 ISS/JE观测体制示意图(Ishii等,2012)

Fig. 4 The observation geometry of ISS/JE(Ishii et al., 2012)

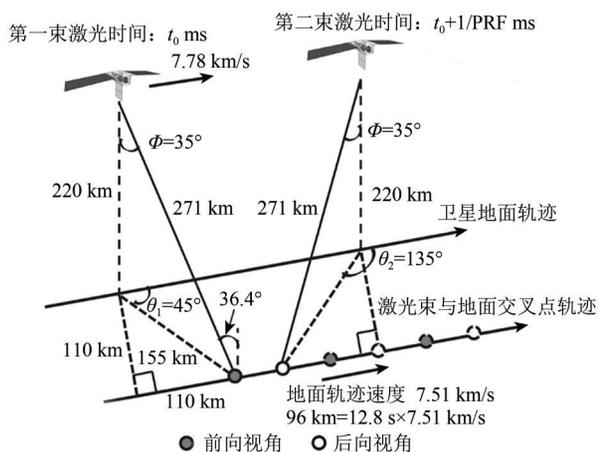


图5 CDWL观测方式示意图(Ishii等,2017)

Fig. 5 The observation geometry of CDWL(Ishii et al., 2017)

3 星载激光测风雷达技术体制的评估

星载激光测风雷达研发费用比较高昂,所以在发射之前必须对采用的技术体制进行充分论证。针对不同的目的,需要从不同方面进行论证。目前对于星载激光测风雷达主要的评估方法有基于数据获取率和获取量的评估、基于测风精度的评估以及基于对数值预报系统改善效果的评估,本节将对以上3种评估方法进行分别论述。

3.1 基于数据获取率和获取量的评估

全球云的分布是影响星载激光测风雷达数据获取率的关键因素,云滴粒子是星载激光测风雷达探测云内风场的主要示踪物,但由于激光在云中的穿透能力有限,云也是限制星载激光测风雷达对云层以下大气探测能力的重要因子。

目前的星载激光测风雷达可利用分子的Rayleigh散射信号进行大气风场的探测,也可利用云和气溶胶粒子的Mie散射信号对大气风场进行探测。在晴空大气下,在大部分高度层,星载激光测风雷达主要以分子为示踪物进行大气风场的探测,在边界层,气溶胶数密度较大,星载激光测风雷达主要以气溶胶为示踪物进行大气风场的探测。在有云大气下,星载激光测风雷达可利用云粒子的Mie散射信号探测云内风场,云粒子数密度越大,Mie散射信号越强,探测的风速越准确,但云粒子同时对激光具有较强的衰减作用,激光在云中的穿透能力取决于单束激光能量和云的光学厚度,如果云的光学厚度较大,星载激光测风雷达则无法探测云层底部以及云层以下的大气风场,所以星载激光测风雷达的数据获取率与云场的分布情况有关。在评估过程中,全球云场模型是否能够代表真实的大气状况至关重要。另外,由于云的分布具有明显的日变化特征(Wood等,2002; Eastman和Warren,2014; Min和Zhang,2014),所以星载激光测风雷达的数据获取率还与卫星轨道的升交点有关。同时,数据获取率还与激光测风雷达的探测技术有关,以气溶胶和云粒子为示踪物的相干探测技术可获取约30%的全球风场数据,以分子为示踪物的直接探测技术可获取约70%的全球风场数据(Masutani等,2010)。

与数据获取率相关的量为数据获取量,本文中的数据获取量是指是指径向风速的探测量。假设HDWL和CDWL每个望远镜都对应一套独立的

激光发射与接收单元,则在激光发射频率一致条件下,HDWL和CDWL测得的径向风速廓线的数量应该分别是Aeolus的4倍和2倍。Masutani等(2010)的评估实验也验证了这一点,他们基于ISCCP(International Satellite Cloud Climatology Project)全球云场的分布数据库,在相同的轨道参数下,即高度为400 km的太阳同步晨昏轨道,分别模拟了基于Aeolus、HDWL以及CDWL星载激光测风雷达技术体制的卫星运行情况,并统计了一个月内探测到的measurement数据量情况,如图6所示。由图可得,3种技术体制的星载激光测风雷达数据获取量存在较大的差异。其中以分子和气溶胶/云滴粒子为示踪物进行大气风场探测的Aeolus和HDWL能够探测边界层至对流层的大气风场。美国HDWL体制探测的数据量最多,其数据获取量约为Aeolus的4倍,在对流层中下层大气约为日本CDWL体制的2倍;由于使用相干探测技术,CDWL体制无法探测对流层上层大气风场情况,只能获取边界层至对流层下层的大气风场,在该高度层内,其数据获取量约为Aeolus的2倍。

3.2 基于风场探测精度的评估

影响星载激光测风雷达测风精度的主要因素包括泊松噪声和大气不均匀性。泊松噪声,也被称为光子噪声,主要由于光学探测器的量子特性导致的,在星载激光测风雷达探测器将回波信号的能量转化为电子的过程中,探测器上产生的电子数并不等于回波信号的能量所能激发的电子数,而是服从泊松分布(Liu等,2006; Hasinoff等,2010; Zhang等,2018)。按照泊松分布的特性,方差等于平均值。如果回波信号的能量等于10000个电子对应的能量,则探测器上产生的电子数的标准差为100个,其引起的相对不确定度为1%;如果回波信号的能量等于100个电子对应的能量,则探测器上产生电子数的标准差为10个,其引起的相对不确定度为10%。所以回波信号能量越大,CCD上产生电子数的相对不确定度就越小,反演的测风不确定度也就越小。由于Mie后向散射回波的能量一般高于Rayleigh后向散射回波,所以利用Mie后向散射回波的测风精度一般高于Rayleigh后向散射回波的测风精度。一般来说,降低泊松噪声对测风精度的影响的方法包括增加激光的发射能量或在探测器上将回波信号能量转化为电子之前累积更多的信号能量,这即是Aeolus的一个“测

量值”累积了20个激光束原因。激光发射能量的降低会增加测风的不确定度, Aeolus激光器单束激光能量原计划为80 mJ, 发射升空之后由于散热不理想的原因, 其最大能量为65 mJ, 逐渐降低并最终稳定至50 mJ, 导致其Rayleigh通道测风不确定度约为

$4.75 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 相比欧洲空间局预期(如表1所示)存在一定差距(Kanitz等, 2019; Reitebuch等, 2019), 但数值预报系统实验表明, 该风场探测结果仍然能够较好地改善预报精度(Straume等, 2019)。

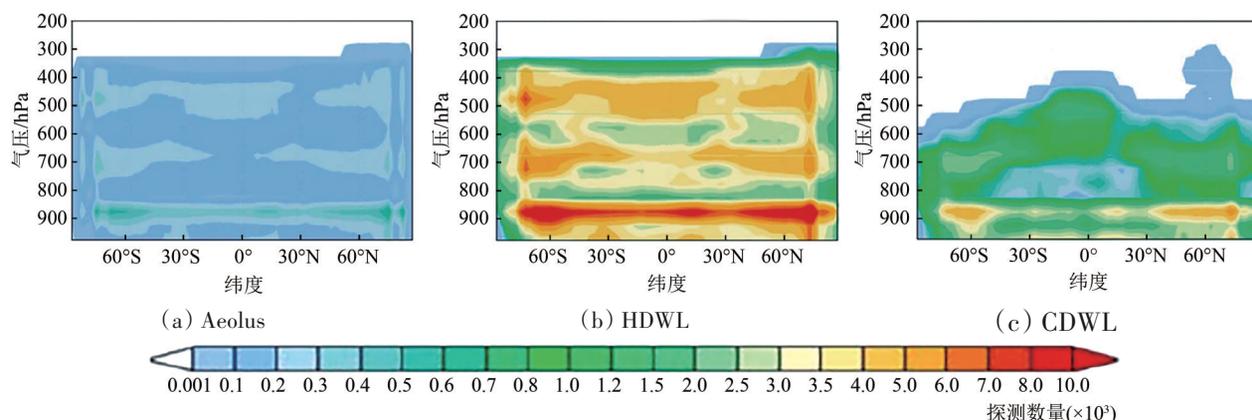


图6 1个月内3种星载激光测风雷达体制的有效探测数量格点分辨率为 $2.5^\circ \times 2.5^\circ$ (Masutani等, 2010)

Fig. 6 The number of measurements obtained from the three technical systems of spaceborne DWLs in a 2.5° grid box (Masutani et al., 2010)

影响Aeolus测风不确定度最直接的因素是信噪比, Marseille和Stoffelen(2003)在计算Aeolus的信噪比时, 考虑了泊松噪声的特点, 计算公式为

$$SNR_{Mie}(z) = 10 \log \left(\frac{N_{Mie}}{\sqrt{N_{Mie} + N_{B_Ray} + N_{B_BKG} + N \times N_{noise}^2}} \right) \quad (1)$$

$$SNR_{Ray}(z) = \frac{N_{FP}(z,1) + N_{FP}(z,2)}{\sqrt{\tilde{N}'_{tot}(z,1) + \tilde{N}'_{tot}(z,2)}} \quad (2)$$

式中, $SNR_{Mie}(z)$ 和 $SNR_{Ray}(z)$ 分别代表在高度 z 处Mie通道和Rayleigh通道的信噪比。对于Mie通道, N_{Mie} 为Mie通道探测器探测到的总的电子数, N_{B_Ray} 为由于串扰作用, Mie通道接收到的Rayleigh回波信号激发的电子数, N_{B_BKG} 为由太阳背景辐射能量所激发的电子数, N 为探测器像元数, 对于Aeolus来说, $N = 16$, N_{noise} 为探测器暗电流激发的电子数。对于Rayleigh通道, $N_{FP}(z, 1)$ 和 $N_{FP}(z, 2)$ 分别为F-P标准具1和2所接收到的Rayleigh光谱能量激发的电子数, $\tilde{N}'_{tot}(z, 1)$ 和 $\tilde{N}'_{tot}(z, 2)$ 分别为F-P标准具1和2接收到的总信号的能量激发的电子数。

大气不均匀性也会对测风不确定度产生重要影响(Baars等, 2019; Sun等, 2014)。星载激光测风雷达探测到的风速的垂直分辨率较低, 介于250 m—2 km。在数据处理时, 默认探测到的风

速数据为该高度层几何中心位置的风速, 而实际上探测的风速为该高度层的光学重心位置的风速。当大气垂直均匀时, 几何中心位置与光学重心位置重合, 此时探测到风速的位置是准确的。但是由于大气的垂直不均匀性, 该高度层的几何中心与光学重心往往不重合。而且由于垂直风切变是普遍存在的, 从而导致了测风误差的产生, 统计表明, 大气垂直风切变的平均值约为 0.01 s^{-1} 。Sun等(2014)的研究表明, 对于Rayleigh通道而言, 垂直不均匀性导致的Rayleigh通道测风误差约为 $0.5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 对于Mie通道而言, 垂直不均匀性导致的测风误差约为 $0.4 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。一般来说, 垂直不均匀性导致的测风误差在Rayleigh通道可进行修正, 但是在Mie通道难以修正。

基于Aeolus、HDWL和CDWL的系统结构, 并利用大气光学特性数据库, 考虑泊松噪声和大气不均匀性对测风精度的影响, 欧洲空间局、美国和日本分别模拟了不同高度处不同质量的风速探测结果所占百分比情况, 其中欧洲空间局Aeolus体制测风质量模拟仿真结果如图7所示(Stoffelen等, 2005), 美国HDWL体制测风质量的模拟结果如图8所示(Masutani等, 2010), 日本CDWL测风质量模拟结果如图9所示(Baron等, 2017)。

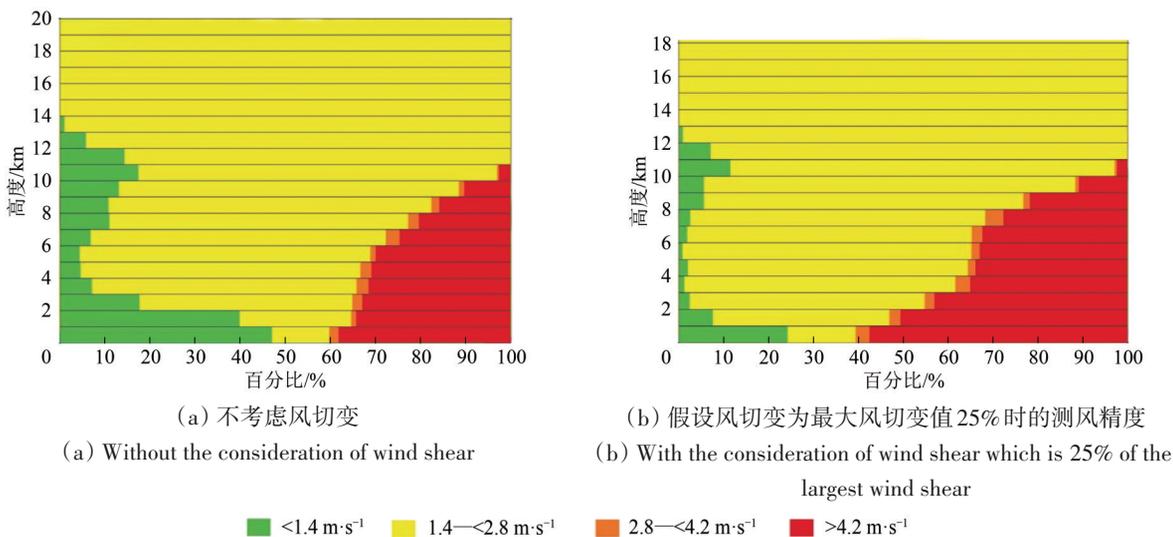


图7 Aeolus测风质量的模拟仿真结果(Stoffelen等,2005)

Fig. 7 The simulated wind observation accuracy of Aeolus (Stoffelen et al., 2005)

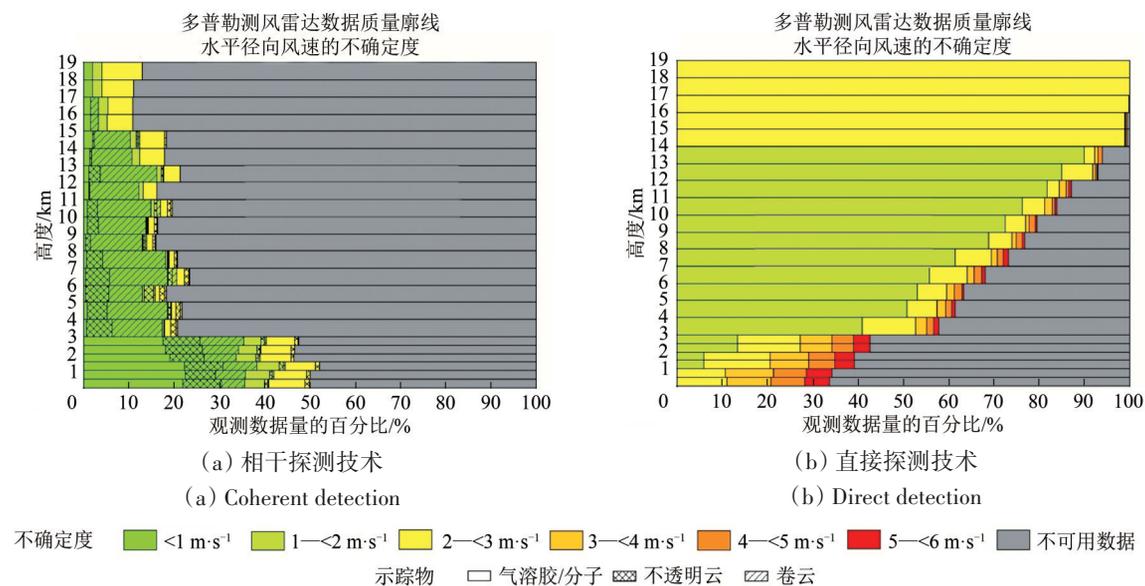


图8 HDWL测风质量的模拟仿真结果(Masutani等,2010)

Fig. 8 The simulated wind observation accuracy of HDWL (Masutani et al., 2010)

由图7可得，在欧洲空间局Aeolus测风体制下大部分的风速测量值的精度介于 $1.4\text{--}2.8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ，其高度范围多位于对流层的中高层，主要是Rayleigh通道的探测结果。质量较好的风速探测结果多集中在边界层和对流层底部，主要为Mie通道的探测结果。质量较差的风速测量结果也多集中在在边界层和对流层底部。这主要是由于光学厚度较厚的云的存在，导致激光穿透云层后能量较弱，风场探测结果具有较大的不确定度。对比图7 (a) (b)可知，当考虑风切变时，质量较差的风速探测值所占比例明显增加，说明风切变对星载激光雷达

的测风质量具有较大影响，这部分测风不确定度主要是由于大气不均匀性导致的。

由图8 (a)可得，美国HDWL技术体制下，相干探测测得的风场数据约占观测到总数据的30%，测风精度较高，测风不确定度多介于 $0\text{--}2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ，少部分测风不确定度介于 $2\text{--}3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。其中15 km以上高度层的探测示踪物主要是气溶胶；3—15 km高度层探测示踪物多为卷云和不透明云；0—3 km高度层的探测示踪物主要是气溶胶。由图8 (b)可得，直接探测测得的风场数据约占总数据的70%，其中14 km以上高度层的测风不确定度多介

于 $2\text{--}3\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, $3\text{--}14\text{ km}$ 高度层测风不确定度多介于 $1\text{--}2\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, $0\text{--}3\text{ km}$ 测风不确定度较大, 且不可用数据所占比例较大, 这主要是由于激光穿透能力有限所致。结合图 8 (a) (b) 可得, 相干探

测测风精度较高, 但探测范围小, 直接探测测风精度低, 但覆盖范围广, 二者结合可以较好地实现全球风场的探测。

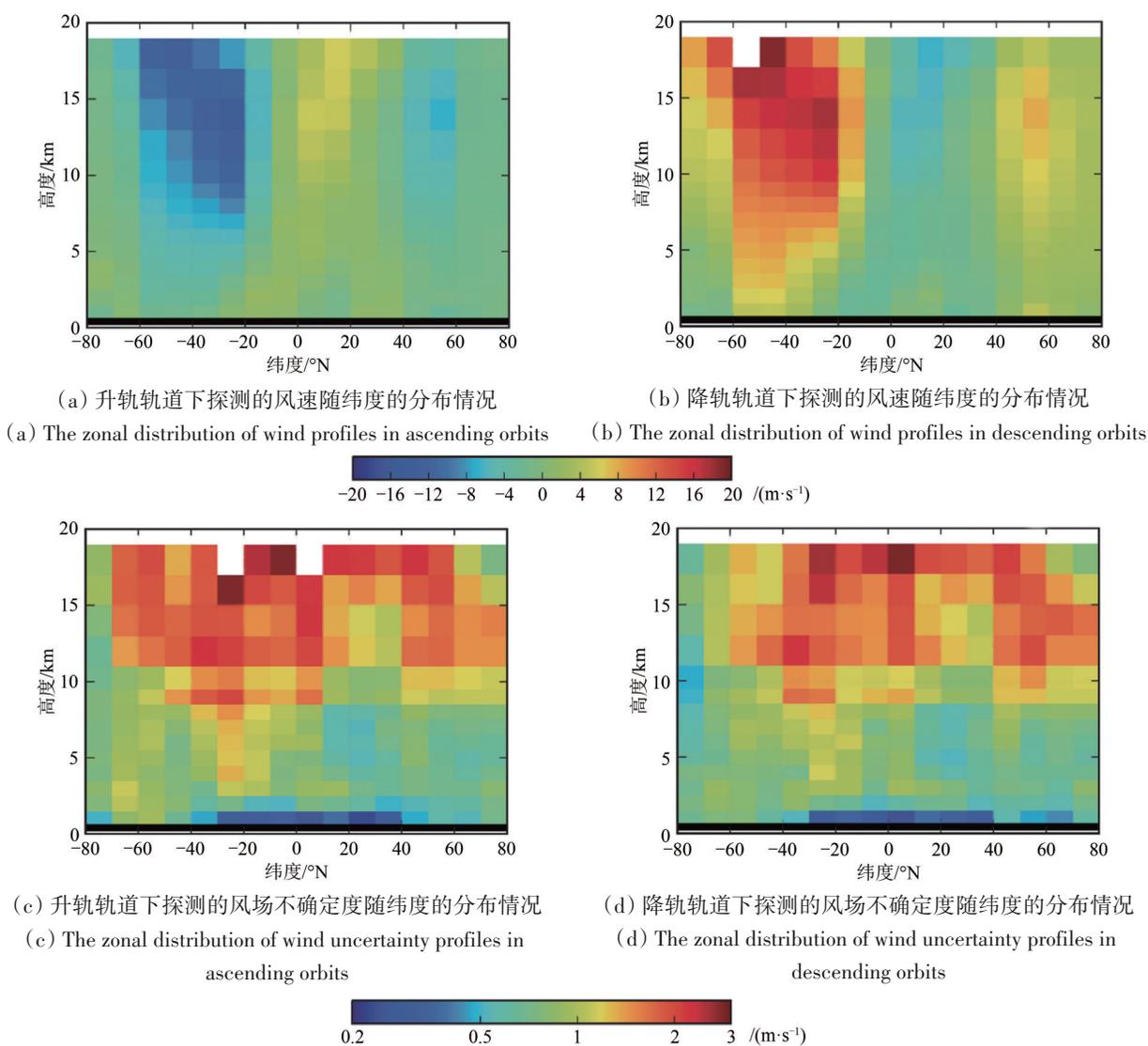


Fig. 9 The simulated wind observation accuracy of CDWL (Baron et al., 2017)

由图 9 可得, 卫星升轨轨道和降轨轨道对应的平均风速大小相近, 但是方向相反, 存在着互为镜像的关系; 在日本 CDWL 测风体制下, 升轨轨道和降轨轨道测风不确定度的全球分布也比较相似; 对于相干测风来说, 由于低层气溶胶数密度相对较大, 测风精度较高, 在中高层大气中, 云滴粒子或气溶胶粒子数密度相对较小, 测风精度较低, 该仿真结果与图 8 (a) 具有一定的相似之处。Baron 等 (2017) 和 Okamoto 等 (2018) 的研究表明, 对于星载相干激光测风雷达而言, 测风不

确定度主要与大气不均匀性有关。

3.3 基于对数值预报系统改进作用的评估

OSSE (Observing System Simulation Experiments) 系统是评估某个新引入的观测量能否有助于改善数值预报系统精度的有力工具。Rohaly 和 Krishnamurti (1993) 最早使用了 OSSE 系统评估了全球风场探测数据是否能够改善数值预报系统的预报结果。OSSE 运行时主要分两步进行, 首先利用现有的数值预报系统进行预报, 然后将新的观测量同化到

预报系统的观测场中,再次进行预报,最后将两次预报结果进行对比,即可评估该观测量对数值预报系统的改善作用(Lahoz等,2005)。在运行OSSE之前,为了同化新的观测量,需要对数据同化系统进行重构。另外在同化数据时,观测量的不确定度是一个不可或缺的量,还需建立新观测量的模拟仿真系统以计算其不确定度。所以OSSE实验需要消耗较大的人力和计算力,但相比建立新的观测系统,这些消耗只是其中一小部分。

Stoffelen等(2006)利用OSSE系统对星载激光测风雷达能否改善数值预报产品精度进行了评估。在评估时分别使用了两种资料作为观测场,一是无星载激光雷达风场的模式预报资料,二是使用了模式预报资料加模拟的星载激光雷达观测风场资料(Marseille和Stoffelen,2003;Reitebuch等,2017)。将上述两种资料分别利用4D-Var技术同化到观测场中进行预报。结果表明,增加了星载激光雷达风场观测资料后,预报模式的结果得到了明显的改善,但是当星载激光雷达测风结果精度较低时,对预报结果产生了副作用。Tan等(2007)的研究也验证了这一点,而且其结果表明,现在的数值同化系统可从Aeolus探测的径向风场中提取有用信息,能够减小预报的误差和再分析风场的不确定度。

Masutani等(2010)使用了OSSE评估了HDWL获取的风场资料对预报系统的改善作用,在实验过程中使用的风场、温度、气压和湿度等数据取自NCEP的再分析资料,其中模拟风场资料的系统误差和不确定度是由DLSM(Defense Lidar Simulation Model)基于泊松噪声的原理产生的。实验结果表明,HDWL对预报系统改善作用的置信度达到95%以上,尤其是在热带地区的高层大气下,改善作用更加明显。

Okamoto等(2018)评估了CDWL对预报系统的改善作用,在将风场资料加入到观测场之前,首先利用仿真系统基于气溶胶和云场的观测资料模拟了风场观测量的信噪比、不确定度以及误差,并且评估了极地轨道和热带轨道对预报系统的改善作用,结果表明两种轨道都能较好地改善天气预报的结果。在热带地区,加入星载激光测风雷达全球风场观测资料后,预报相对误差能够减小2%左右。另外该研究表明,低估CDWL对预报系

统改善作用的很大一部分原因是因为不能较好地模拟观测风场的不确定度。

美国和日本的星载激光雷达技术体制通过在一颗卫星上安装多个望远镜的方法实现水平风场矢量的探测,这种技术体制也可通过多颗卫星联合探测来实现。Marseille等(2008)评估了5种联合探测体制对预报系统的改善作用,这5种联合探测体制如图10所示,分别为:图10(a)Aeolus单颗卫星探测;图10(b)Dual-perspective:其轨道与Aeolus轨道一致,前后两颗星载激光测风雷达的探测方位角相差 90° ,可实现水平二维风场的探测;图10(c)Tandem-Aeolus:一颗卫星运行在Aeolus的轨道,另一颗卫星轨道的升交点与Aeolus轨道升交点相差50 min左右,其他参数与Aeolus轨道一致,两颗星载激光测风雷达的技术体制与Aeolus相同,探测时,两颗卫星基本上位于相同纬度面上;图10(d)Triple-Aeolus:与Tandem-Aeolus类似,3颗采用Aeolus技术体制的星载激光测风雷达进行联合探测,其轨道升交点相差30 min左右;图10(e)Dual-inclination:两颗卫星运行于不同倾角的轨道,其倾角分别为 97.2° 和 70° ,第二颗卫星主要用于探测中低纬风暴多发地区的大气风场。

Marseille等(2008)评估结果表明:(1)联合探测技术体制对数值预报系统的改善作用要明显优于单颗星载激光测风雷达;(2)提高探测风场的覆盖面更有助于提高预报系统的精度,如Tandem-Aeolus体制、Dual-perspective体制和Dual-inclination体制探测到的径向风速数量都是Aeolus的两倍,但从对预报系统的改善作用来说,Tandem-Aeolus体制的改善效果在三者中最好,后两种技术体制在特定情况下对数值预报系统的改善效果好,如Dual-inclination体制的探测结果有助于改善中低纬地区,尤其是大西洋地区风暴的预测结果,在Dual-perspective体制下,卫星星下点附近的数值预报结果改善作用明显,对比其他4种探测体制,该体制其改善效果最佳,但是由于探测覆盖面较低,从全球整体来看,其对数值预报系统的改善作用比Tandem-Aeolus体制低;(3)Triple-Aeolus体制相比Tandem-Aeolus体制,对数值预报系统有一定的改善作用,Tandem-Aeolus体制相比Aeolus,其改善作用大约增加了

66%，增加第3颗卫星之后，相比两颗卫星，其增加的改善作用约为20%，该结果表明，3颗以上星

载激光测风雷达对预报系统的改善作用有限，太多的卫星可能带来数据冗余。

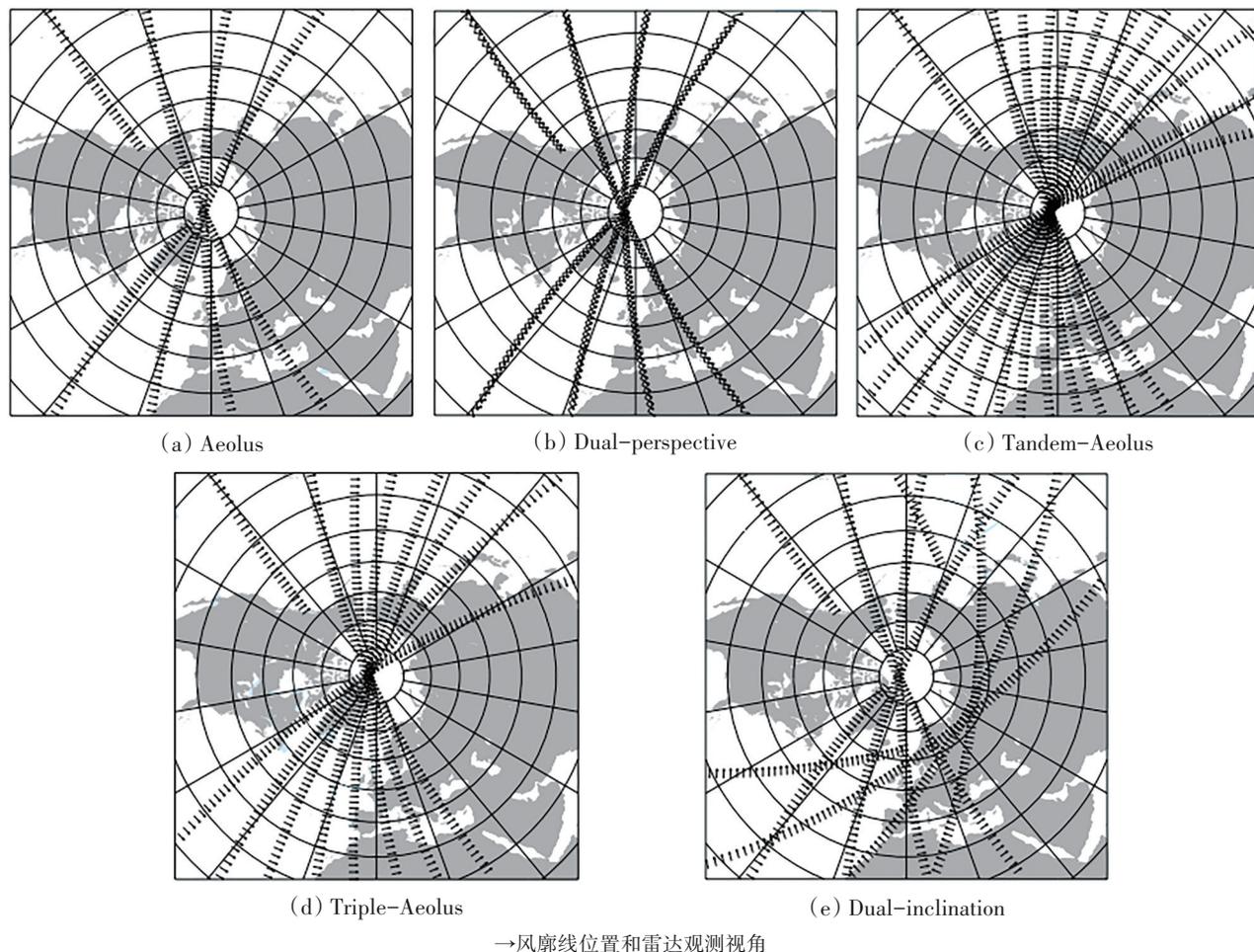


图 10 5种星载激光雷达联合测风技术方案探测数据覆盖情况示意图(Marseille等,2008)

Fig. 10 The data coverage of five observation scenarios of spaceborne DWLs (Marseille et al., 2008)

OSSE结果表明，3种星载激光雷达测风技术体制都能有效地改善数值预报系统的预报结果。水平二维风场的探测与径向风场的探测相比，改善星下点附近数值预报结果的作用更加明显。从对全球预报的整体改善效果来看，更广泛的探测覆盖面相比水平二维风场的探测，其效果更好。另外在运行OSSE实验时，需要通过星载激光测风雷达仿真系统对观测风场的不确定度进行模拟，否则可能无法准确评估其对数值预报系统的改善效果。

通过Aeolus、HDWL和CDWL这3种星载激光测风雷达技术体制的数据获取率和获取量、风场探测精度以及对数值预报系统的改进作用方面的对比可得，美国HDWL技术体制可以探测平行于星下点轨迹上两条路径的风场数据，而Aeolus和

CDWL只能探测一条路径的风场数据，故HDWL具有更广的数据覆盖面，其测风精度也相对较高，而且HDWL可以实现水平二维风场的探测，日本CDWL虽然能实现水平二维风场探测，但其数据获取率较低，结合Marseille等(2008)对5种多星联合探测技术体制的评估结论可以预估，HDWL技术体制对数值预报系统的改善作用相比其他两种体制较明显。但上述结论主要是通过前人所做实验的结论进行推理的，目前缺乏将3种技术体制置于完全相同的大气环境中进行模拟评估的实验，而且美国和日本的星载激光测风雷达目前仍处于论证阶段，其参数还在调整中，参数的调整会对测风精度产生较大的影响，并且雷达在太空运行后，由于环境的改变，其发挥的性能还有待评估。所以这两种技术体制的激光雷达测风精度以及对

预报系统的改善效果还有待进一步研究。

4 结 论

2018 年全球首颗星载激光测风雷达卫星 Aeolus 的成功发射标志着人类在全球风场的探测方面迈入了新的阶段。目前, 美国和日本也在积极论证和研制 HDWL 和 CDWL 星载激光测风雷达技术体制, 中国也在开展相关研究工作。不同星载激光测风雷达技术体制决定了研制成本和发挥的作用。目前的评估结果表明星载激光测风雷达对数值预报系统具有较好地改善作用, 使用单颗卫星进行全球风场探测时, 美国 HDWL 技术体制相比欧洲空间局 Aeolus 和日本 CDWL 技术体制能够获得更多的风场探测数据, 其测风精度较高, 将更有助于数值预报系统结果的改善。使用多颗卫星进行联合探测时, 更广泛的探测覆盖面相比水平二维风场的探测, 更有助于改善全球数值预报系统的预报效果。水平二维风场的探测, 对改善卫星轨道附近的数值预报系统结果效果最佳。

星载激光测风资料对全球数值天气预报效果改善作用的评估是一项复杂的工作, 其中牵涉到对测风不确定度的评估, 而星载激光测风资料的不确定度不仅与激光雷达技术参数有关, 还与卫星轨道参数和大气不均匀性有关。因此, 开展星载激光测风技术体制的论证还需要做深入的研究, 以便获得最优的技术方案。

参考文献 (References)

Abreu V J. 1979. Wind measurements from an orbital platform using a lidar system with incoherent detection: an analysis. *Applied Optics*, 18(17): 2992-2997 [DOI: 10.1364/AO.18.002992]

Atlas R, Kalnay E and Halem M. 1985. Impact of satellite temperature sounding and wind data on numerical weather prediction. *Optical Engineering*, 24(2): 242341 [DOI: 10.1117/12.7973481]

Baars H, Geiß A, Wandinger U, Herzog A, Engelmann R, Bühl J, Radenz M, Seifert P, Ansmann A, Martin A, Leinweber R, Lehmann V, Weissmann M, Cress A, Filioglou M, Komppula M and Reitebuch O. 2019. First results from the German CAL/VAL activities for Aeolus//The 29th International Laser Radar Conference. Hefei, China: EDP Sciences: 01008 [DOI: 10.1051/epjconf/202023701008]

Baker W. 2008. Doppler wind lidar: current activities and future plans// Winter T-PARC Workshop. [s.l.]: NOAA/NASA/DoD Joint Cen-

ter for Satellite Data Assimilation

Baker W E, Emmitt G D, Robertson F, Atlas R M, Molinari J E, Bowdle D A, Paegle J, Hardesty R M, Menzies R T, Krishnamurti T N, Brown R A, Post M J, Anderson J R, Lorenc A C and Mcelroy J. 1995. Lidar-measured winds from space: a key component for weather and climate prediction. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 76(6): 869-888 [DOI: 10.1175/1520-0477(1995)076<0869:LMWFSA>2.0.CO;2]

Baron P, Ishii S, Okamoto K, Gamo K, Mizutani K, Takahashi C, Itabe T, Iwasaki T, Kubota T, Maki T, Oki R, Ochiai S, Sakaizawa D, Satoh M, Satoh Y, Tanaka T Y and Yasui M. 2017. Feasibility study for future spaceborne coherent Doppler wind lidar, part 2: measurement simulation algorithms and retrieval error characterization. *Journal of the Meteorological Society of Japan*, 95(5): 319-342 [DOI: 10.2151/jmsj.2017-018]

Barre H M J P, Duesmann B and Kerr Y H. 2008. SMOS: the mission and the system. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 46(3): 587-593 [DOI: 10.1109/TGRS.2008.916264]

Beranek R G, Bilbro J W, Fitzjarrald D E, Jones W D, Keller V W and Perrine B S. 1989. Laser atmospheric wind sounder (LAWS)//Proceedings of SPIE 1062, Laser Applications in Meteorology and Earth and Atmospheric Remote Sensing. Los Angeles: SPIE: 234-248 [DOI: 10.1117/12.951882]

Eastman R and Warren S G. 2014. Diurnal cycles of cumulus, cumulonimbus, stratus, stratocumulus, and fog from surface observations over land and ocean. *Journal of Climate*, 27(6): 2386-2404 [DOI: 10.1175/JCLI-D-13-00352.1]

Emmitt G D. 2004. Combining direct and coherent detection for Doppler wind lidar//Proceedings of SPIE 5575, Laser Radar Techniques for Atmospheric Sensing. Maspalomas: SPIE: 31-37 [DOI: 10.1117/12.576539]

Endlich R M, Wolf D E, Hall D J and Brain A E. 1971. Use of a pattern recognition technique for determining cloud motions from sequences of satellite photographs. *Journal of Applied Meteorology*, 10(1): 105-117 [DOI: 10.1175/1520-0450(1971)010<0105:UOAPRT>2.0.CO;2]

Gaiser P W, St Germain K M, Twarog E M, Poe G A, Purdy W, Richardson D, Grossman W, Jones W L, Spencer D, Golba G, Cleveland J, Choy L, Bevilacqua R M and Chang P S. 2004. The WindSat spaceborne polarimetric microwave radiometer: sensor description and early orbit performance. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 42(11): 2347-2361 [DOI: 10.1109/TGRS.2004.836867]

Hasinoff S W, Durand F and Freeman W T. 2010. Noise-optimal capture for high dynamic range photography//IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. San Francisco: IEEE: 553-560 [DOI: 10.1109/CVPR.2010.5540167]

Ishii S, Baron P, Aoki M, Mizutani K, Yasui M, Ochiai S, Sato A, Satoh Y, Kubota T, Sakaizawa D, Oki R, Okamoto K, Ishibashi T,

- Tanaka T Y, Sekiyama T T, Maki T, Yamashita K, Nishizawa T, Satoh M and Iwasaki T. 2017. Feasibility study for future space-borne coherent Doppler wind lidar, part 1: instrumental overview for global wind profile observation. *Journal of the Meteorological Society of Japan*, 95(5): 301-317 [DOI: 10.2151/jmsj.2017-017]
- Ishii S, Iwasaki T, Sato M, Oki R, Okamoto K, Ishibashi T, Baron P and Nishizawa T. 2012. Future Doppler lidar wind measurement from space in Japan//Proceedings of SPIE 8529, Remote Sensing and Modeling of the Atmosphere, Oceans, and Interactions IV. Kyoto, Japan: SPIE: 85290A [DOI: 10.1117/12.977283]
- Itabe T, Mizutani K, Ishizu M and Asai K. 2001. ISS/JEM-borne coherent Doppler lidar program to Measure the Wind from space//Proceedings of SPIE 4153, Lidar Remote Sensing for Industry and Environment Monitoring. Sendai, Japan: SPIE: 412-419 [DOI: 10.1117/12.417026]
- Kanitz T, Ciapponi A, Mondello A, D'Ottavi A, Mateo A B, Straume A G, Volland C, Bon D, Checa E, Alvarez E, Bellucci I, Do Carmo J P, Brewster J, Marshall J, Schillinger M, Hannington M, Rennie M, Reitebuch O, Lecrenier O, Bravetti P, Sacchieri V, De Sanctis V, Lefebvre A, Parrinello T and Wernham D. 2019. ESA's lidar missions Aeolus and EarthCare//The 29th International Laser Radar Conference. Hefei, China: EDP Sciences: 01006 [DOI: 10.1051/epjconf/202023701006]
- Lahoz W A, Brugge R, Jackson D R, Migliorini S, Swinbank R, Lary D and Lee A. 2005. An observing system simulation experiment to evaluate the scientific merit of wind and ozone measurements from the future SWIFT instrument. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 131(606): 503-523 [DOI: 10.1256/qj.03.109]
- Leese J A, Novak C S and Clark B B. 1971. An automated technique for obtaining cloud motion from geosynchronous satellite data using cross correlation. *Journal of Applied Meteorology*, 10(1): 118-132 [DOI: 10.1175/1520-0450(1971)010<0118:AATFOC>2.0.CO;2]
- Liu Z Y, Hunt W, Vaughan M, Hostetler C, McGill M, Powell K, Winker D and Hu Y X. 2006. Estimating random errors due to shot noise in backscatter lidar observations. *Applied Optics*, 45(18): 4437-4447 [DOI: 10.1364/AO.45.004437]
- Long Z W, Shi H Q and Huang S X. 2010. A new idea of cloud motion wind derived from satellite images. *Acta Physica Sinica*, 60(5): 059202 (龙智勇, 石汉青, 黄思训. 2011. 利用卫星云图反演云导风的新思路. *物理学报*, 60(5): 059202) [DOI: 10.7498/aps.60.059202]
- Lu W, Yan W, Shi J K and Ren J Q. 2010. A geolocation algorithm for WindSat. *Remote Sensing Technology and Application*, 25(1): 126-131 (陆文, 严卫, 施健康, 任建奇. 2010. 一种适用于 WindSat 的地理定位方法. *遥感技术与应用*, 25(1): 126-131) [DOI: 10.11873/j.issn.1004-0323.2010.1.126]
- Ma X L, Luo P, Chen Z B and Cai M. 2014. A method for cloud motion wind vector prediction based on scale-invariant feature transform. *Meteorological Science and Technology*, 42(3): 391-396 (马侠霖, 罗鹏, 陈志斌, 蔡铭. 2014. 基于尺度不变特征变换的云导风计算方法. *气象科技*, 42(3): 391-396) [DOI: 10.3969/j.issn.1671-6345.2014.03.006]
- Marseille G J and Stoffelen A. 2003. Simulation of wind profiles from a space-borne Doppler wind lidar. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 129(594): 3079-3098 [DOI: 10.1256/qj.02.96]
- Marseille G J, Stoffelen A and Barkmeijer J. 2008. Impact assessment of prospective spaceborne Doppler wind lidar observation scenarios. *Tellus A: Dynamic Meteorology and Oceanography*, 60(2): 234-248 [DOI: 10.1111/j.1600-0870.2007.00289.x]
- Marx C T, Gentry B, Jordan P, Dogoda P, Faust E and Kavaya M. 2013. Lab demonstration of the hybrid Doppler wind lidar (HD-WL) transceiver//Proceedings OF SPIE 8872, Lidar Remote Sensing for Environmental Monitoring XIV. San Diego: SPIE: 887207 [DOI: 10.1117/12.2029649]
- Masutani M, Woollen J S, Lord S J, Emmitt G D, Kleespies T J, Wood S A, Greco S, Sun H B, Terry J, Kapoor V, Treadon R and Campana K A. 2010. Observing system simulation experiments at the National Centers for Environmental Prediction. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 115(D7): D07101 [DOI: 10.1029/2009JD012528]
- Min M and Zhang Z B. 2014. On the influence of cloud fraction diurnal cycle and sub-grid cloud optical thickness variability on all-sky direct aerosol radiative forcing. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 142: 25-36 [DOI: 10.1016/j.jqsrt.2014.03.014]
- Njoku E, Christensen E and Cofield R. 1980. The Seasat scanning multichannel microwave radiometer (SMMR): antenna pattern corrections-Development and implementation. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 5(2): 125-137 [DOI: 10.1109/JOE.1980.1145460]
- Okamoto K, Ishibashi T, Ishii S, Baron P, Gamo K, Tanaka T Y, Yamashita K and Kubota T. 2018. feasibility study for future space-borne coherent Doppler wind lidar, part 3: impact assessment using sensitivity observing system simulation experiments. *Journal of the Meteorological Society of Japan*, 96(2): 179-199 [DOI: 10.2151/jmsj.2018-024]
- Reitebuch O, Lemmerz C, Lux O, Marksteiner U, Rahm S, Weiler F, Witschas B, Meringer M, Schmidt K, Huber D, Nikolaus I, Geiss A, Vaughan M, Dabas A, Flament T, Stieglitz H, Isaksen L, Rennie M, de Kloe J, Marseille G J, Stoffelen A, Wernham D, Kanitz T, Straume A G, Fehr T, von Bismarck J, Floberghagen R and Parrinello T. 2019. Initial assessment of the performance of the first wind lidar in space on Aeolus//The 29th International Laser Radar Conference. Hefei, China: EDP Sciences: 01010 [DOI: 10.1051/epjconf/202023701010]
- Reitebuch O, Marksteiner U, Rompel M, Meringer M, Schmidt K, Huber D, Nikolaus I, Dabas A, Marshall J, de Bruin F, Kanitz T and Straume A G. 2017. Aeolus end-to-end simulator and wind retriev-

- al algorithms up to level 1B//The 28th International Laser Radar Conference (ILRC 28). Bucharest: EDP Sciences: 02010 [DOI: 10.1051/epjconf/201817602010]
- Reitebuch O, Paffrath U and Leike I. 2006. ATBD: ADM-Aeolus Level 1B Product. European Space Research and Technology Centre. https://earth.esa.int/files/Aeolus_L1B_Algorithm_TBD.
- Rohaly G D and Krishnamurti T N. 1993. An observing system simulation experiment for the laser atmospheric wind sounder (LAWS). *Journal of Applied Meteorology*, 32(9): 1453-1471 [DOI: 10.1175/1520-0450(1993)032<1453:AOSSEF>2.0.CO;2]
- Shi J K, Yan W, Han Y J and Chen L. 2009. Studies on faraday rotation correction for fully polarimetric microwave radiometer at 10.7 GHz. *Journal of Microwaves*, 25(6): 79-83, 96 (施健康, 严卫, 韩有君, 陈磊). 2009. 全极化微波辐射计 10.7GHz 极化通道法拉第旋转校正分析. *微波学报*, 25(6): 79-83, 96
- Stoffelen A, Marseille G J, Bouttier F, Vasiljevic D, de Haan S and Cardinali C. 2006. ADM-Aeolus Doppler wind lidar observing system simulation experiment. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 132(619): 1927-1947 [DOI: 10.1256/qj.05.83]
- Stoffelen A, Pailleux J, Källén E, Vaughan J M, Isaksen L, Flamant P, Wergen W, Andersson E, Schyberg H, Culoma A, Meynard R, Endemann M and Ingmann P. 2005. The atmospheric dynamics mission for global wind field measurement. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 86(1): 73-88 [DOI: 10.1175/BAMS-86-1-73]
- Straume A G, Rennie M, Isaksen L, de Kloe J, Marseille G J, Stoffelen A, Flamant T, Stieglitz H, Dabas A, Huber D, Reitebuch O, Lemmerz C, Lux O, Marksteiner U, Weiler F, Witschas B, Meringer M, Schmidt K, Nikolaus I, Geiss A, Flamant P, Kanitz T, Wernham D, von Bismarck J, Bley S, Fehr T, Floberghagen R and Parinello T. 2019. ESA's space-based Doppler wind lidar mission Aeolus - First wind and aerosol product assessment results//The 29th International Laser Radar Conference. Hefei, China: EDP Sciences: 01007 [DOI: 10.1051/epjconf/202023701007]
- Sun X J, Zhang R W, Marseille G J, Stoffelen A, Donovan D, Liu L and Zhao J. 2014. The performance of Aeolus in heterogeneous atmospheric conditions using high-resolution radiosonde data. *Atmospheric Measurement Techniques*, 7(8): 2695-2717 [DOI: 10.5194/amt-7-2695-2014]
- Tan D G H, Andersson E, Fisher M and Isaksen L. 2007. Observing-system impact assessment using a data assimilation ensemble technique: application to the ADM-Aeolus wind profiling mission. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 133(623): 381-390 [DOI: 10.1002/qj.43]
- Wang Z H and Zeng W L. 1996. A PC-based objective inferring system for cloud motion winds from geostationary satellite images. *Journal of Nanjing Institute of Meteorology*, 19(1): 69-75 (王振会, 曾维麟). 1996. 卫星云迹风微机客观导出系统. *南京气象学院学报*, 19(1):69-75 [DOI: 10.13878/j.cnki.dqkxxb.1996.01.010]
- Wernham D, Ciapponi A, Riede W, Allenspacher P, Era F, D'Ottavi A and Thibault D. 2016. Verification for robustness to laser-induced damage for the Aladin instrument on the ADM-Aeolus satellite//Proceedings of SPIE 10014, Laser-Induced Damage in Optical Materials 2016. Boulder: SPIE: 1001408 [DOI: 10.1117/12.2245545]
- WMO. 2001. Statement of Guidance Regarding How Well Satellite and in Situ Sensor Capabilities Meet WMO User Requirements in Several Application Areas. WMO Sat-26, WMO/TD-1052. World Meteorological Organization
- Wood R, Bretherton C S and Hartmann D L. 2002. Diurnal cycle of liquid water path over the subtropical and tropical oceans. *Geophysical Research Letters*, 29(23): 2092 [DOI: 10.1029/2002GL015371]
- Xu J M, Zhang Q S, Wang D C and Fan C Y. 1997. Two Geometrical problems in cloud motion wind algorithm. *Quarterly Journal of Applied Meteorology*, 8(1): 11-18 (许健民, 张其松, 王大昌, 樊昌尧). 1997. 云迹风计算中的两个几何问题. *应用气象学报*, 8(1): 11-18)
- Yan W, Shi J K and Lu W. 2010. Improving the correction accuracy of faraday rotation by using TEC data released by IGS. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 29(3): 225-229 (严卫, 施健康, 陆文). 2010. 用 IGS 发布的 TEC 数据提高法拉第旋转校正精度. *红外与毫米波学报*, 29(3): 225-229)
- Zahir M and Durand Y. 2011. Critical laser technology developments and ESA space qualification approach in support of ESA's earth observation missions//Proceedings of SPIE 8159, Lidar Remote Sensing for Environmental Monitoring XII. San Diego: SPIE: 815904 [DOI: 10.1117/12.893587]
- Zhang C L, Sun X J, Zhang R W and Liu Y W. 2018. Simulation and assessment of solar background noise for spaceborne lidar. *Applied Optics*, 57(31): 9471-9479 [DOI: 10.1364/AO.57.009471]
- Zhang C L, Sun X J, Zhang R W, Zhao S J, Lu W, Liu Y W and Fan Z Q. Impact of solar background radiation on the accuracy of wind observations of spaceborne Doppler wind lidars based on their orbits and optical parameters. 2019. *Optics Express*, 27(12): A936-A952 [DOI: 10.1364/OE.27.00A936]
- Zhang R W, Sun X J, Yan W, Liu L, Li Y, Zhao J, Yan W X and Li H R. 2014. Simulation of frequency discrimination for spaceborne Doppler wind lidar (I): study on the retrieval of atmospheric wind speed for Mie channel based on Fizeau interferometer. *Acta Physica Sinica*, 63(14): 136-146 (张日伟, 孙学金, 严卫, 刘磊, 李岩, 赵剑, 颜万祥, 李浩然). 2014. 星载激光多普勒测风雷达鉴频系统仿真(I): 基于 Fizeau 干涉仪的 Mie 通道大气风速反演研究. *物理学报*, 63(14): 136-146 [DOI: 10.7498/aps.63.140702]
- Zhu P, Wang Z H and Xu J M. 2007. Introduction to TCFM technique for tracking cloud and a preliminary experiment. *Journal of Remote Sensing*, 11(4): 538-544 (朱平, 王振会, 许建明). 2007. TCFM 导风技术介绍及其初步试验研究. *遥感学报*, 11(4): 538-544)
- Wang X H and Li H. 2005. The application status and future development trend of foreign spaceborne microwave radiometers. *Aerospace China*, (4):16-20 (王晓海, 李浩). 2005. 国外星载微波辐射计应用现状及未来发展趋势. *中国航天*, (4): 16-20)

A review of the technical system of spaceborne Doppler wind lidar and its assessment method

SUN Xuejin¹, ZHANG Chuanliang^{1,2}, FANG Le², LU Wen¹, ZHAO Shijun¹, YE Song¹

1. College of Meteorology and Oceanography, National University of Defense Technology, Nanjing 211101, China;

2. Military unit 61741 of Chinese People's Liberation Army, Beijing 100081, China

Abstract: Spaceborne Doppler Wind Lidars (DWL) are powerful tools in global wind observations. The first spaceborne Doppler wind lidar designed by European Space Agency (ESA) was launched successfully in August 2018. Meanwhile, the US and Japan provide huge resources in the demonstration and development of new technical systems of spaceborne DWLs, which are Hybrid DWL (HDWL) and Coherent DWL (CDWL), respectively. The technical systems of Aeolus, HDWL, and CDWL were assessed from three aspects, including the data acquisition rate or measurement number, the accuracy of wind observations, and the role played in improving the Numerical Weather Prediction (NWP) results to provide reference for our country to develop our own spaceborne DWL.

We introduced the three technical systems briefly because the three technical systems of spaceborne DWLs are relatively different. These technical systems were assessed from the three aspects using previous research results.

The three technical systems, which consist of Aeolus, HDWL, and CDWL, were assessed through the data acquisition rate or measurement number. Previous studies illustrated that the profiles of measurements obtained by HDWL is twice as much that of CDWL, and four times as much that of Aeolus. The data acquisition rate of CDWL is low due to its coherent-detection technology.

The three technical systems are also assessed through the accuracy of wind observations. The main factors, which affect the accuracy of wind observations, are Poisson noise and atmospheric heterogeneity. Previous studies demonstrated that wind observations obtained by coherent-detection technology or the Mie channel of Aeolus has high accuracy (about 0—2 m/s) and traced by aerosol or cloud particles. However, its observations only cover about 30% of the total observations. The accuracy of wind observations obtained by direct detection is relatively low (about 1—3 m/s) and traced by molecules. Its observations can cover about 70% of the total observations. Generally, the global wind distributions can be well detected by combining coherent and direct detection.

Observing System Simulation Experiments (OSSEs) provide a quantitative evaluation of new observing systems for the improvement of NWP. ESA, the US, and Japan verified the positive impact of Aeolus, HDWL, and CDWL on NWP results through OSSEs. Studies also indicate that uniform spaceborne DWL profile coverage is more important than the observations of horizontal vector wind using joint observations with two Aeolus-type spaceborne DWLs. Meanwhile, the observations of horizontal vector wind perform better in the improvement of the forecast results close to the satellite tracks than the observations of line-of-sight wind observations.

HDWL is expected to achieve more favorable improvement of NWP forecast due to its larger data coverage and ability to observe the horizontal vector wind. The conclusions are drawn based on previous studies. Furthermore, HDWL and CDWL are still on the demonstration phase. Their parameters may be justified in the future, affecting the accuracy of wind observations. Future research on the comparison of the technical systems of spaceborne DWLs should be developed.

Key words: remote sensing, spaceborne Doppler wind lidar, Aeolus, HDWL, CDWL, data acquisition rate, accuracy of wind observations, NWP
Supported by National Natural Science Foundation of China (No.41575020, 41406107)