

Aeolus 星载测风激光雷达进展综述

胡中显^{1,2}, 卜令兵^{1,2*}

(1. 南京信息工程大学 气象灾害预警与评估协同创新中心, 江苏 南京 210044;
2. 南京信息工程大学 大气物理学院, 江苏 南京 210044)

摘要: 大气风场是气象中十分关键的要素之一, 星载多普勒测风激光雷达能够实现大范围、高精度、不间断的风场测量, 对于数值天气预报精度提升、气候研究和环境保护都有重要的意义。星载测风激光雷达的研究自 20 世纪至今已经有近 30 余年, 在这个过程中, Aeolus 是目前唯一成功发射的星载测风卫星。文中从 Aeolus 计划的提出开始, 回顾了 Aeolus 的有效载荷 ALADIN 原理样机的地面试验, 机载原型研发和机载试验的过程; 对卫星发射至今的主要数据验证活动以及结果进行了总结, 阐述了 Aeolus 产品出现误差的原因; 针对 Aeolus 数据产品的实际应用, 总结了星载测风数据对于气象研究的重要性和必要性; 结合 Aeolus 的方案进行优化和模拟仿真, 展示了仿真的结果。最后分析了 Aeolus 的数据特点, 结合我国星载测风研究进程和气象领域的测风需求, 提出了几点可以参考的内容和需要提高的技术, 同时分析了三种不同的星载测风体制, 其中混合体制的星载测风激光雷达具有优势, 可作为我国未来研制星载测风卫星的主要方向。

关键词: 星载; Aeolus; 风场测量; 多普勒测风激光雷达

中图分类号: P414 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA20220691

0 引言

大气风场是大气的主要参数之一, 同时也是全球碳循环、气溶胶输送、能量交换和天气变化的主要动力因素^[1]。世界气象组织 (WMO) 在 1998 年对用户需求和卫星能力的评估中指出, 对于全球气象分析而言, 风廓线的测量仍然是最具挑战性和最重要的一部分^[2]。虽然星基大气观测已经有几十年的历史, 但在全球三维风场的测量方面仍然进展缓慢。改进这一现状的一个明确的需求, 就是建立一个全球覆盖的高分辨率大气风观测系统^[3]。目前对于风廓线的观测方式主要是利用无线电探空仪, 但对于不易于安放和维护仪器的区域, 如海洋、沙漠等地区无法获得相应的探空资料。因此, 这些区域的测风通常利用在航班和船只上携带探空仪器等方法进行探测, 这种方法探测成本高, 探测结果也受到探测条件的影响。星载测风

的优势性体现在可以提供全球范围的高分辨率、高质量、近实时的三维风廓线数据。

对全球风廓线的需求早在 20 世纪 70 年代就已经被认识到, 到 80 年代在太空开展了对激光雷达技术方面的研究^[4]。技术发展最初集中在相干接收技术上, 星载测风的概念最早出现在 1987 年, 由 NASA (National Aeronautics and Space Administration) 提出将在对地观测系统卫星 (EOS) 上搭载的 LAWS (Laser Atmospheric Wind Sounder) 系统, 采用调制 CO₂ 脉冲激光器, 后来由于经费原因, LAWS 在 1994 年被终止了^[5-6]。随后 NASA 在 1998 年提出了利用 SPARCLE (Space Readiness Coherent Lidar Experiment) 系统探测全球三维风场, 但是由于相干探测技术难度大, 探测范围和高度有限等原因, 计划于 1999 年终止。星载多普勒相干测风激光雷达实现技术难度大, 实践验证机会少^[7-8]。90 年代进行的研究表明, 影响天气预测

收稿日期: 2022-09-26; 修订日期: 2023-01-09

基金项目: 国家自然科学基金 (42175145)

作者简介: 胡中显, 女, 硕士生, 主要从事星载测风激光雷达方面的研究。

导师(通讯作者)简介: 卜令兵, 男, 教授, 博士, 主要从事激光大气探测技术与应用、云和气溶胶多源数据分析方面的研究。

的能力主要是由风廓线数据的大小和数据量决定的,几乎和风的方向无关。由此得出结论,在不使用扫描的情况下,在与卫星的地面轨道速度矢量正交的方向上进行测量,可实现测风激光雷达任务的重大简化^[9]。1999 年,ESA 提出了 ADM-Aeolus 计划,搭载名为 ALADIN(Atmospheric Laser Doppler Instrument) 的非相干多普勒测风激光雷达,经过 20 年的研究,于 2018 年 8 月成功发射, Aeolus 可以提供全球范围的 20 km 以下的 HLOS(horizontal line-of-sight) 方向的三维风场信息。

文中从 ADM-Aeolus 计划的提出开始,回顾了 Aeolus 卫星的仪器设计和试验、数据验证、数据以及未来的星载测风计划,从 Aeolus 的设计和实践中总结经验,结合分析我国研究现状,为我国研制和发射星载测风激光雷达提供经验。

1 Aeolus 卫星的发展

1.1 ADM-Aeolus 计划目的

大气动力学计划 (Atmospheric Dynamics Mission, ADM) 是由欧洲航天局 (ESA) 在 1999 年提出执行的四个地球探索者核心计划中的一个,旨在弥补当前全球观测系统 (GOS) 和全球气候观测系统 (GCOS) 在风廓线分析方面存在的缺陷,从而改进全球三维风场分析,帮助众人理解影响大气动力学和全球大气运输、气溶胶、能量、水以及化学物质传播,进一步推动全球数值天气预报精度的提高及气候研究的发展^[3]。由于技术原因,发射时载荷的工作方式和卫星轨道高度等参数设置和最初计划提出有所不同,最初参数设置可参照文献 [3],卫星概念的示意图见图 1。

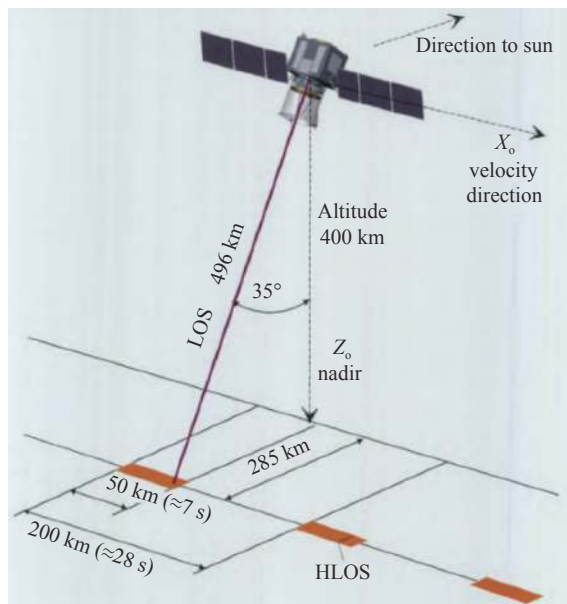


图 1 Aeolus 卫星的概念图^[3]

Fig.1 Concept view of the Aeolus^[3]

1.2 仪器开发

由于卫星的研发工程量和耗资巨大,ESA 在研发过程中主要通过搭建模拟系统进行参数模拟,设计载荷的机载原型 A2D 进行多次机载实,从而模拟在卫星运行过程中可能出现的各种问题。

自 2000 年起,欧洲宇航防务集团下属的阿斯特里姆公司 (EADS-Astrium) 联合欧洲 30 多家公司共同对载荷 ALADIN 进行研发^[10]。为了降低开发风险的同时保证仪器开发的时间规划合理,开发了两种仪器模型: OSTM(Opto-Structure-Thermal Model) 和 PFM (ProtoFlight Model), 同时采用 PDM(Pre Development Model) 进行进行部分测试,主要测试流程见图 2^[11-12]。

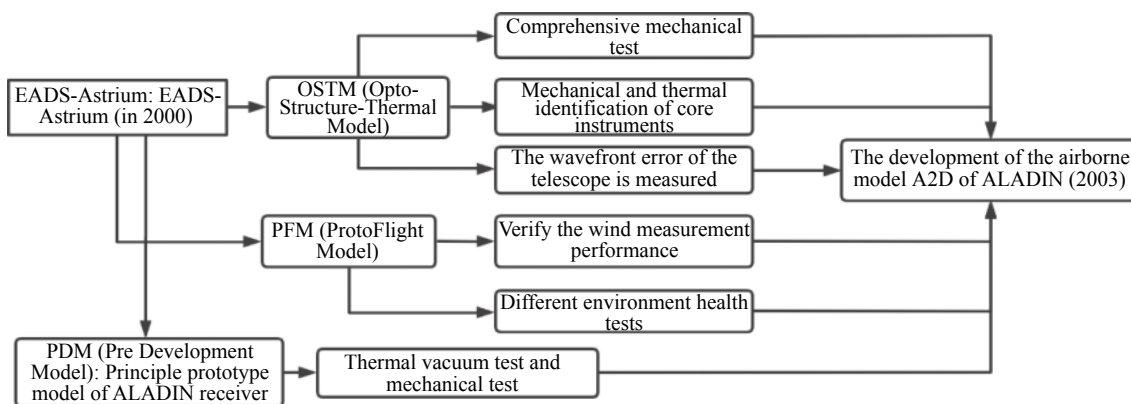


图 2 仪器开发流程图^[11-12]

Fig.2 Flow chart of instrument development^[11-12]

2007 年, Astrium 完成了对望远镜的制作和测试, 并对发射机的激光二极管、接收机中的前置光学元件进行了环境条件测试、稳定性测试等, 具体内容和结果可以参考文献 [13]。

ESA 用于进行机载试验的仪器 A2D 和卫星仪器参数的比较见表 1^[14], 其与卫星载荷的主要区别在于望远镜、发射和接收光学器件以及激光发射器的工作方式。

机载试验还携带了 2 μm 的多普勒测风激光雷达 (Doppler wind Lidar, DWL), 用于对 A2D 的观测结果进行验证。发射前进行的 6 次机载试验 (表 2)^[14-18] 对各种大气场景 (无云晴空、不同云类型或气溶胶、海面和陆地) 进行大气风廓线观测, 以测试、验证、优化观测数据质量的控制算法, 评估视线方向风速的测量误差^[12-13], 得出了解算算法和校准策略的改进, 提出了未来验证活动中对于仪器的操作建议, 优化了响应校准文件, 预测了可能出现的误差来源, 如背景光噪声等^[18]。

2001 年, ESA 开发了 ADM-Aeolus 仪器的直接探

测激光雷达模拟器, 并实时纳入实际的 ALADIN 最新设计, 该模拟器同时用于验证 A2D 仪器^[19]。该模拟器提供了在不同大气环境状态下辐射传输特性、风速测量性能以及风速反演算法改进的依据。该模拟器的特点是具有 15 m 的垂直大气层分辨率^[14-18]。

表 1 ALADIN 和 A2D 仪器差异^[14]

Tab.1 Differences between ALADIN and A2D instruments^[14]

Item	ALADIN	A2D
Transmitter	Nd:YAG, tripled, diode-pumped	
Wavelength/nm	355	
Operation	Burst-mode	Continuous
Repetition rate/Hz	100	50
Energy per pulse/mJ	150	70
Telescope/m	1.5	0.2
Receiver FOV/μrad	15	100
Nadir angle/(°)	35	20
Altitude/km	408(320)	10

表 2 A2D 验证活动

Tab.2 A2D validates the activity

Year	Equipments	Results
October 2005	A2D	Flying at an altitude of 8 to 10 km for about 4 h, the laser single pulse energy is only about 20 mJ and does not provide stable single-frequency operation ^[14-15]
November 2007	A2D and 2 μm DWL	The number of photons in the analog signal on the Rayleigh receiver differs from the measured value by a factor of 2.5 to 4 ^[12]
2008	A2D and 2 μm DWL	At altitudes between 4 and 17 km, the difference in the number of electrons between the simulated signal and the actual measurements is a factor of two ^[13]
2009	A2D and 2 μm DWL	The systematic and random errors of Rayleigh channel are -0.7 m/s and 1.9 m/s, respectively, and those of Mie channel are 1.1 m/s and 1.3 m/s, respectively ^[16]
2015	A2D and 2 μm DWL	Confirm the performance of A2D and the expected calibration applicability of Aeolus satellite, and further improve the satellite wind profile inversion algorithm and correction file ^[17]
2016	A2D and 2 μm DWL	Show the wind observation dataset in dynamic complex scenarios, such as strong wind shear conditions, to prepare for Aeolus data calibration and validation ^[18]

2 Aeolus 探测技术

2.1 Aeolus 系统

2.1.1 系统工作原理

Aeolus 卫星于 2018 年 8 月发射升空, 其携带的大气激光多普勒仪器 ALADIN 是一种在紫外光谱区域 (355 nm) 工作的直接探测多普勒测风激光雷达。回波信号进入接收系统中的鉴频器, 通过检测多普勒

频移量来进行风速反演:

$$v = \frac{\lambda \cdot \Delta f}{2}$$

式中: v 为风速; λ 为发射波长; Δf 为多普勒频移。激光雷达的发射方向与卫星运行轨道最低点的垂线成 35°, 与卫星轨道成 90°, 可以测量沿运行轨道区域刮过的风的东西向水平分量。为了提高信噪比, 卫星最终运行轨道高度为 320 km。轨道升交点选在晨昏轨

道,可以提供最多的太阳照射和最良性的热环境,同时激光雷达指向夜间侧进行测量以减小背景信号噪声。接收器通过分析后向散射信号的多普勒频移和接收时间,从而确定不同高度的风速。ALADIN 仪器整体上由三个主要元件组成:激光发射器、组合的 Mie 和 Rayleigh 后向散射接收器组件和直径 1.5 m 的卡塞格林望远镜^[20-21]。具体的系统示意图见图 3^[22-23]。

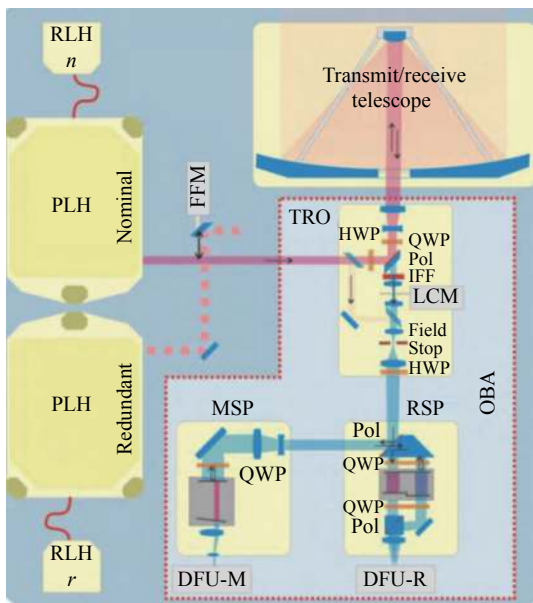


图 3 ALADIN 的光学架构^[22]

Fig.3 Optical architecture of ALADIN^[22]

2.1.2 ALADIN 测风技术

ALADIN 的激光器是二极管泵浦 Nd:YAG 激光器,将 1064 nm 基频光三倍频获得 355 nm 的紫外脉冲激光,单脉冲能量为 80 mJ,具体细节可以参考文献 [24]。与计划不同的一点是,由于激光器技术的进

步,卫星最终确定的工作模式是连续发射脉冲,频率为 50.5 Hz,而不是初始计划提出的 7 s 脉冲发射和 20 s 的突发型工作间隙的方式。

ALADIN 的望远镜直径为 1.5 m,用于收集来自大气的后向散射信号,虽然望远镜体积很大,但它由轻质陶瓷材料制成,因此质量仅为 55 kg^[24]。

ALADIN 的测风技术使用了两种不同的鉴频技术,分别为条纹技术和双 F-P(Fabry-Perot) 鉴频器,用于计算 Mie 散射和 Rayleigh 散射的多普勒频移量。Mie 散射通道的接收机由分辨率为 100 MHz(相当于 18 m/s)的 Fizeau 干涉仪组成。由于 Fizeau 干涉仪里两块带有楔角的平板,当气溶胶回波信号进入接收机,不同频率的光会在楔形平板的不同位置产生干涉,并产生干涉条纹。频率的偏移会导致干涉条纹偏移,干涉条纹在 Mie 散射通道的 ACCD(Accumulation Charge Coupled Device)探测器上成像,接收到的后向散射信号产生一个线性条纹,其位置与风速直接相关,风速由条纹的质心位置决定。

Rayleigh 散射通道的接收机采用一个双通道的 F-P 干涉仪,半高全宽为 2 GHz,自由光谱间距为 5 GHz,大气分子信号进入接收机后,区别于常用的分光方式,回波信号先通过一个 F-P 通道,一部分进入 ACCD,一部分反射并通过另一个 F-P 通道再进入 ACCD,形成连续观测的双 F-P。信号在 ACCD 上成像并进行信号强度的光电转换,不同频率的信号会使两个通道具有不同的信号强度,最后通过差分运算获得两个通道的信号强度比值确定多普勒频移,两个通道的具体工作原理细节可以参考文献 [25]、[26] 的仿真工作。Aeolus 系统的具体参数如表 3 所示^[27]。

表 3 Aeolus 部分参数^[27]

Tab.3 Partial parameters of Aeolus^[27]

Satellite		ALADIN		Telescope/Front optics		Laser transmitter	
Mean altitude/km	Slant angle at satellite	Vertical resolution/km	Primary mirror diameter/m	Receive FOV/ μ rad	Wavelength/nm	Energy per pulse/mJ	Repetition rate/Hz
320	35° off nadir	0.25-2	1.5	1	354.8	80	50.5
Mie spectrometer			Rayleigh spectrometer		Detection unit		
Fizeau useful spectral range/pm	Fizeau FWHM/nm	Filter separation/pm	Filter FWHM/MHz	Quantum efficiency	Dark current/ $e^- \cdot (\text{pixel} \cdot \text{s})^{-1}$		
0.66	67	2.33	1 551/1 531(direct/reflected)	85%	1.9		

3 Aeolus 数据特征及应用

3.1 数据特征

Aeolus 的数据分为 L0 级、L1 级和 L2 级。每级数据包含不同的信息,具体细节可以参考文献 [23]。其中, L1B 数据为已经过充分处理和校准的数据,包括 HLOS 风、地面回波数据和产品质量数据等。L2 级数据包括整合了经纬度信息的 HLOS 风数据,并使用从 ECMWF(European Centre for Medium-Range Wea-

ther Forecasts) 的数值模型中获得的实际压力和温度信息对风速值进行误差修正。L2 C 数据主要包含在 ECMWF 同化 L2 B 产品后获得的风廓线信息,包括 Aeolus 地面轨迹位置上的径向和纬向风矢量剖面, L2 C 产品主要包含来自 NWP 模型的信息 [22], 典型的 Aeolus 的 L2 B 风廓线产品和 L2 A 产品见图 4, 其中从 L2 B 产品可以观察到副热带急流, 从 L2 A 产品中可以观察到低层的尘埃流。

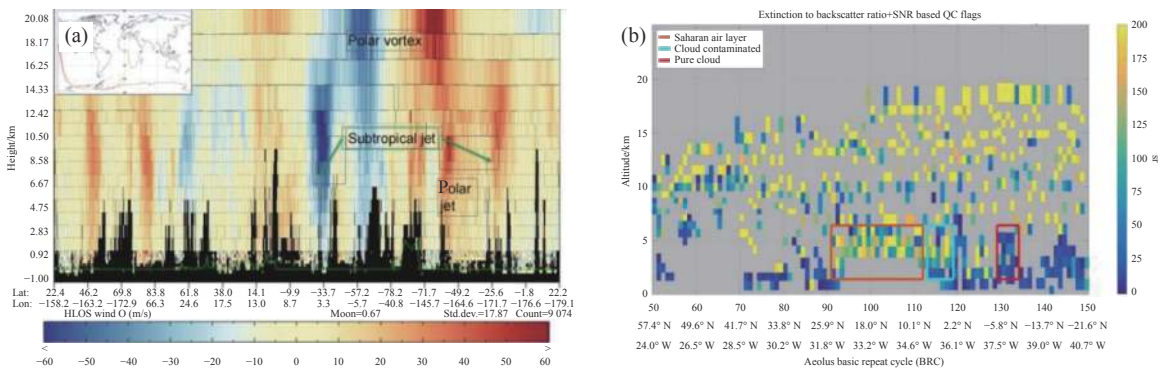


图 4 (a) Aeolus L2 B 产品^[28]; (b) Aeolus L2 A 产品的共极消光后向散射比数据, 2020 年 6 月 19 日观测撒哈拉尘埃跨越大西洋^[29]

Fig.4 (a) Aeolus 2 B product^[28]; (b) Co-polar extinction-to-backscatter ratio data from Aeolus L2 A product, observing Saharan dust across the Atlantic Ocean on June 19, 2020^[29]

3.1.1 L1 B/L2 B 数据特征

在 Aeolus 卫星成功发射后, 作为全球第一颗测风卫星, 需要对其返回的数据质量进行验证, 任务要求如表 4 所示^[23]。同时, 任务要求必须在实际观测 3 h 内被地面站处理并提供给相关机构, 如 ECWMF^[30]。

Aeolus 数据产品自 2018 年到 2022 年已经发布了 14 个数据处理版本。在此期间, 世界多个机构对 Aeolus 的 L1 级和 L2 级数据进行了大量的验证工作^[30-32]。Aeolus 的公开数据中会对数据进行分类, 分为 Rayleigh_clear、Rayleigh_cloud、Mie_clear 和 Mie_cloud, 通常由于 Rayleigh_cloud 和 Mie_clear 的数据质量过低, 在进行数据同化和数据验证时原则上会将这两类数据舍弃。整体上 Rayleigh 通道数据量远大于 Mie 通道数据, 但 Mie 通道数据整体质量更好。在数据未公开前的任务调试阶段, 由于仪器漂移, 校准文件缺乏正确性, Rayleigh 和 Mie 通道之间存在串扰效应, 发射能量低于预期值, 接收器的光阑导致回波信号损失^[33-37]等原因, L2 B 数据的 Rayleigh 通道风数

据的系统误差约为 1.5 m/s, 随机误差约为 4.84 m/s, Mie 通道风数据系统误差约 1 m/s, 随机误差约为 1.58 m/s。数据公开后到 2022 年 4 月, Aeolus 的 L2 B 数据在全球范围内的随机误差为 Rayleigh 通道约 6 m/s, Mie 通道约 3.3 m/s^[36,38], 误差来源包括 Rayleigh 通道的校准缺陷、热像素的波动带来的随机误差等^[39], 部分验证活动及误差见表 5。由于其数据在处理时忽略垂直风速, 因此数据误差随季节、地理位置和升降轨而变化, 同时数据误差也受到云的影响。

针对 Aeolus 的 L2 B 产品早期阶段出现的问题, ESA 对数据集进行重新处理, 同时对算法和处理器进行了改进, 通过对 F-P 干涉仪的传输特性进行优化, 联合地面测风数据以及 ECWMF 的大气信息对产物中的误差进行修正以控制产品质量^[39]。在 2019 年 6 月 ESA 转换了激光发射器为 FM-B, 由 FM-B 激光器发射激光, 将脉冲能量从 40 mJ 提升到 67 mJ^[27]。但之后的数据验证活动表明, 数据质量仍然不够理想^[35,39-40]。2019 年 6 月, 在第二次对 L2 B 数据集进行

再处理时,对四个发射前没有预计到的风速误差来源重新设置了 N/P 的数值,将 Rayleigh 的数据质量提高了 15%^[42]。针对 2021 年的数据误差升高,ESA 进行了修正^[41]。

表 4 Aeolus 数据精度要求^[23]
Tab.4 Aeolus data accuracy requirements^[23]

Parameter	Mission requirements		
	PBL	Troposphere	Stratosphere
Vertical domain/km	0-2	2-16	16-20
Vertical resolution/km	0.5	1	2
Horizontal domain	Global		
Minimum horizontal track data availability (before QC)	95%		
Precision HLOS component/m·s ⁻¹	1	2.5	3(3-5)
Unknown bias (HLOS)/m·s ⁻¹	0.7 (Errors that cannot be eliminated by instrument correction and ground calibration)		
Probability of gross errors	5%		
Data availability, timeliness/h	3		

表 5 验证活动
Tab.5 Validation activities

Activities	Rayleigh/m·s ⁻¹ (SD)	Mie/m·s ⁻¹ (SD)
WindVal III(2 μm DWL), 2018 ^[34]	4.75	2.95
AVATARE, 2019 ^[43]	5.27	3.02
De Haute-Provence, 2019 ^[33]	3.2	-
The Atlantic ocean, 2018 ^[44]	4.84	1.58
RWP network over China, 2020 ^[45]	4.2	6.82
Long-term validation in Japan, 2019-2021 ^[46]	9.19(B12)	5.98(B12)
Ground-based coherent Doppler Lidar network over China, 2022 ^[47]	7.07	3.15
La Réunion Island and the Observatoire de Haute Provence, 2022 ^[48]	6.49	-

3.1.2 L2 A 数据特征

早期的验证结果表明 L2 A 产品虽然能够检测到重要的气溶胶层,如矿物粉尘等,同时在无云条件下能够实现检索激光雷达比进行气溶胶分类,但是数据质量并不理想。L2 A 数据在 3 km 以下会受到较大影响,产品整体上的后向散射系数 β 的值偏小,对于退偏气溶胶颗粒, β 的误差达到 30%^[49-50]。基于检验出现的问题,ESA 对 L2 A 产品算法进行优化,包括对两个通道接收机的辐射传输效率提出了新的校正方案,提出最大似然估计法代替原标准校正算法,对产品进行去噪优化等^[29,51]。在 2021 年的长期试验中,L2 A 产品依然存在 2 km 以下的 β 存在较大误差、数据受到云层干扰严重等问题^[44]。

3.1.3 中国区域的数据特征

Aeolus 数据在中国区域的可用性也得到了验证,2020 年 Aeolus 的 L2 B 数据和我国的地基风廓线雷达网进行了比较,结果显示卫星数据和我国华东地区大部分地区的地基测风数据结果一致性好^[45],同年进行的 Aeolus 数据和 L 波段的探空数据联合 ERA5 数据的对比结果也得到了类似的结果^[52]。利用我国的相干多普勒测风激光雷达,针对卫星产品中边界层和大气低层对流层的数据进行了对比,结果显示上升轨道的整体误差小于下降轨道^[47]。

3.2 数据应用

Aeolus 卫星从成功发射到返回风廓线数据,其数据应用主要于改善数值天气预报、大气动力学研究和

污染物研究。目前 ECMWF、德国气象局、法国气象局以及英国气象局在日常预报业务中同化^[53]。星载数据提供了南半球、海洋、沙漠地区的风廓线数据,推动了对于热带地区、对流层上部和平流层的大气动力学研究^[54-55]。

首先, Aeolus 提供的全球三维风廓线数据为改善数值预报进度做出了很大贡献。ECMWF 将 Aeolus 数据在业务中进行同化后,热带地区的位势风、矢量风的预报误差减少了约 2%,南半球减少了 2%~3%^[56]。2020 年,德国气象局同化数据后,全球范围的 3 h 短时预报效果在热带地区的预报准确度提高了 5%~10%^[57]。NOAA(National Oceanic and Atmospheric Administration)利用 Aeolus 数据对 2019 年预报情况较差的飓风 Dorian 重新进行路径同化预报,10 天的飓风轨迹预报误差明显下降^[58]。中期天气预报中心(NCMRWF)在统一预报模型中加入了 2019 年 8 月—11 月的数据,对飓风 Nisarga 的路径和强度进行了研究,同化数据后模型模拟出的飓风直接位置误差的改善最大达到了 75 km^[59]。

其次, Aeolus 的数据主要应用在大气动力学研究方面。2020 年,德国亥姆霍兹研究协会联合维也纳大学的研究结果显示,卫星风数据改善了模型中关于赤道波相位和振幅的研究缺陷,改善了热带地区的降水和气旋的预报^[60]。同年,能源与气候研究所也证实了 Aeolus 数据能够提供准两年震荡(QBQ)中段的全过程^[61]。2020 年 7 月,ECMWF 联合德国汉堡大学的数据分析表明, Aeolus 数据增强了对流层顶最强垂直切变区的特征,改善了垂直传播赤道波的表现^[62]。

除此之外, Aeolus 的风廓线数据结合 L2 A 的气溶胶产品能够对环境研究提供一定的参考。2020 年, ESA 发布了由 Aeolus 卫星和哥白尼 Sentinel-5 P 卫星联合观测到大西洋上空的沙漠尘埃状况,其中 Aeolus 数据提供了气溶胶层高度和垂直范围的信息,这有助于确定尘埃层行进的高度^[63]。2022 年 1 月, ESA 联合 ECMWF 等机构评估了 Aeolus 风数据同化对撒哈拉沙尘向热带大西洋流出数值模拟的影响,证明了其数据同化对热带地区、地中海东部地区沙尘模拟产生了积极影响^[64]。2021 年 3 月,中国海洋科学院的另一项研究也证明了 Aeolus 数据可以很好地监测灰尘的传输路径和平流值^[65]。

3.3 Aeolus 任务后续

随着 Aeolus 卫星的在轨时间已经接近预计使用寿命, ESA 和欧洲气象卫星组织(EUMETSAT)发布了未来的星载测风计划^[66]。EUMETSAT 的初始计划规划了后续任务为两三颗卫星,总寿命为 10~15 年,并计划在 2029 年发射第一颗卫星。Aeolus-2 卫星的仪器开发的思路是最大限度地利用 ALADIN 的设计,包括保留仪器设计概念,并对于其已经出现的问题进行优化。Aeolus-2 提出了新的任务要求(表 6),目前 ALADIN 的仪器团队正在根据需求进行测试,预计将提高激光发射能量到 125~150 mJ,同时评估望远镜单发和双发的配置以及发射脉冲的频率等^[67]。有学者提出未来还可以考虑沿轨道(向后)或前后测量,从而提供两个水平风分量的信息,也可以考虑在一组星座中实现多个轨道的测量^[68],从而获取更多的风廓线信息。

表 6 Aeolus 和 Aeolus2 任务要求对比^[67]

Tab.6 Comparison of Aeolus and Aeolus2 mission requirements^[67]

	Aeolus	Aeolus-2
Range of observation/km	0-20	0-30
Requirement/m·s ⁻¹	0-2 km: 1 2-16 km: 2.5 16-20 km: 3-5	0-2 km: 2 2-16 km: 2.5 16-30 km: 5
Number of vertical bins	24	75
Vertical resolution/m	0-2 km: 250 2-16 km: 1000 16-20 km: 2 000	0-2 km: 250 2-16 km: 500 16-30 km: 1 000
Horizontal resolution/km	87(Rayleigh)/10(Mie)	1-16:<100(Rayleigh) 10(Mie) 16-30:<200
Wind range/m·s ⁻¹	±100	±150

4 发展与展望

4.1 从 Aeolus 中得到的经验

虽然 Aeolus 是一个较为成功的测风试验卫星, 卫星上采用了几个相对先进的技术, 如连续双 F-P 鉴频系统, 在 Mie 通道上使用 Fizeau 干涉仪作为鉴频器, 使用了 ACCD 实现垂直方向数据分层和累加等, 但其数据质量没有达到预取的效果, 随机误差的均方根远大于原计划的 0.7 m/s。主要的原因是发射后的激光能量只有 50~65 mJ, 远小于预期能量 80 mJ 并持续衰减, 回波信号减弱, 随机误差增大, 虽然 ESA 及时地采取了一系列的应对措施, 但这部分的误差仍然不可忽略。

Aeolus 的成功发射为我国的测风卫星研制提供了新的经验和思考, 其设计方案的成功实施说明直接测风方案可以很好地应用于星载测风。基于这个考虑, 参照 Aeolus 的工作原理, 同时结合国内的研究现状, 将 ACCD 替换为光电倍增管(阵列)(PMT), 以增加

激光雷达的信噪比。笔者对基于 Rayleigh 通道的星载测风方案进行了模拟, 模拟参数和结果如图 5 所示。参照 Aeolus 的方案, 选取大气分子和气溶胶分子灵敏度交叉点的半高全宽值作为双 F-P 鉴频器的模拟参数。图中可以看出, 误差大小在垂直分辨率的高度改变时会有明显的减小(0~3 km 分辨率为 500 m, 3~16 km 分辨率为 1 km, 16~28 km 分辨率为 2 km), 并随累计次数增多, 风速误差整体减小, 可以对 0~30 km 的大气进行探测。但在实际探测中, 低层风速误差会由于气溶胶含量变化产生更大误差。Aeolus 的数据证实了这种方案对于预报的正向影响, 但其数据也有十分明显的缺陷, 首先其数据量比较小, 对于同一个观测点只能提供一个视线方向的风速, 想要反演出完整的二维水平风场需要进行一系列的假设或配合模式预报数据, 这就意味着更大的误差。另外为了保证信噪比, 其数据的垂直分辨率比较粗, 所以不足以描述三维湍流的风, 对于中小尺度的预报研究的参考价值不高^[69]。

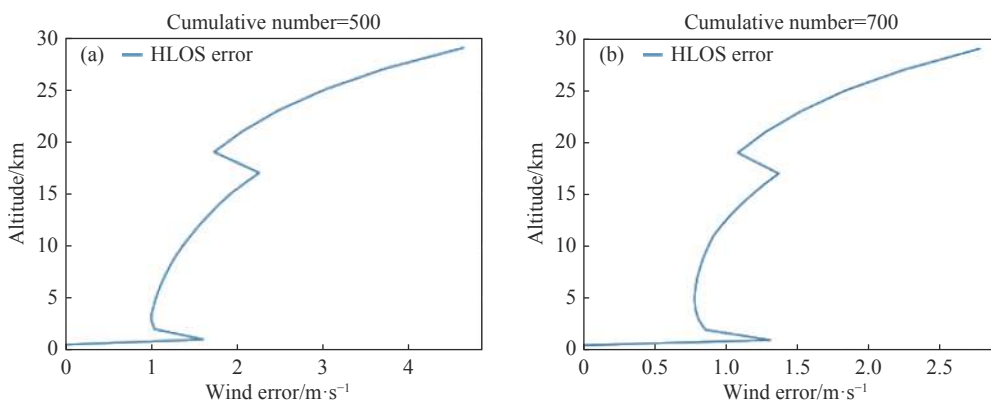


图 5 模拟累计 500 次脉冲和 700 次脉冲的风速误差

Fig.5 Cumulative wind speed errors with 500 pulses and 700 pulses simulation

目前, 国际气象组织提出天气和气候应用所需的垂直分辨率在对流层约为 1 km, 平流层约为 2 km, 其中在规定的 1~6 h 覆盖范围内的水平风矢量精度要求为 2 m/s^[69]。要得到更加全面的风场信息或研究风场的日变化特征, 需要改变激光的发射方向或改变轨道升交点、轨道高度, 而升交点时间越接近 12:00, 背景噪声越大, 想要保证回波信号的信噪比, 就需要更大的激光发射能量^[70]。考虑到风廓线观测要求的不断提高, 以及我国对于星载测风的需求, 未来我国在研

制测风卫星时, 可以从 Aeolus 卫星中得到几点经验:

- (1) 需要高脉冲能量和长期稳定的激光发射器, 以提供更强的回波信号, 实现高精度的风速反演;
- (2) 需要可以满足更高精度风廓线探测的高灵敏度、高响应率鉴频器, 来实现更高的垂直和水平分辨率^[1];
- (3) 需要更完善的激光器散热方案, 这也是 Aeolus 发射一再推迟的原因, 同时配合稳定的热控制系统和更加完善的针对热梯度误差的校正算法, 以避免出现

Aeolus 望远镜上的温度梯度造成的风速误差问题;

(4) 直接测风技术可以实现星载测风, 355 nm 波长对于中高层大气分子测风具有良好的效果;

(5) 研制一套合格的机载原型样机是成功的关键, 同时需要进行大量的试验, 在不同的地表类型、大气环境下进行观测试验, 以完善星载载荷, 尽可能估计发射后会出现的问题并做好预备方案;

(6) Aeolus 的 L1 和 L2 处理器的处理速度很快, 可以实现 3 h 内将数据处理并传输到世界各地的气象组织, 这种高效的数据处理流程也是可以借鉴的内容;

(7) 混合体制的探测方案弥补了单体制探测的不足, 是未来的研究方向。

4.2 国内星载测风现状与研究趋势

将激光雷达应用于星载是一项工程量巨大且耗费巨大的工作, 需要评估最佳的方案, 经过模拟试验、地基的原理样机验证、机载试验以及结合星载环境进行试验一系列流程才能成功发射^[70]。

目前, 国内多家单位都致力地基测风激光雷达的研究, 相关技术已经较为成熟, 为未来星载计划奠定了技术基础。2006 年, 中国科学院安徽光学精密机械研究所报道了基于双 F-P 的 1064 nm 直接探测多普勒测风激光雷达, 在对流层进行了三维风场探测^[71]。2007 年, 中国海洋大学完成了我国第一台车载非相干测风激光雷达^[72]。2010 年, 中原电子技术研究所研制了一套脉冲相干激光雷达, 水平分辨率可以达到 50 m^[53]。2013 年, 中国科学院上海光学精密机械研究所提出了一种峰值功率超过千瓦的全光纤、发射 1540 nm 脉冲光的单频激光器, 用于紧凑型远程相干多普勒测风激光雷达^[73]。2019 年, 中国海洋大学提出了一种新的测风激光雷达数据同化方法, 研究了地物对首都机场风速的影响^[74]。

在星载激光雷达测风模拟工作方面, 国内多家单位也进行了相关工作。其中, 北京理工大学对星载相干测风激光雷达技术和可行性进行了全面分析, 建立了通用型的星载相干测风激光雷达合成水平风速和风向误差计算模型并进行误差评估^[75]; 中国海洋大学团队建立了碘分子测风的车载系统, 设计了一套完整的星载测风激光雷达模拟仿真系统, 对星载测量参数和误差进行评估^[76]。中国科学院上海光学精密机械研究所自行研制直接探测多普勒激光测风雷达

(DWL) 原理样机, 用于搭载临近空间飞行器, 该样机发射波长为 355 nm, 接收信号利用双 F-P 进行鉴频测量多普勒频移, 探测器使用 PMT^[77], 同时持续开展了窄线宽大能量 2 μm 波段全固态激光器技术研究^[78]、优化星载高光谱激光雷达反演气溶胶特性中的分光比设置等工作^[79]。

除了 Aeolus 的直接测风方法, 另外两种主要的方法为美国提出的混合体制测风激光雷达 (Hybrid Doppler Wind Lidar, HDWL)^[80] 和日本提出的相干测风激光雷达 (Coherent Doppler Wind Lidar, CDWL)^[81]。HDWL 体制的探测方案中提出利用 2 μm 的相干探测技术进行低空探测, 高空测量采用 355 nm 的直接探测, 两个通道的观测形成互补, 同时配备四个不同角度的望远镜进行测量, 以保证对同一个探测点进行两次角度不同的测量来实现水平风场的测量。CDWL 体制的探测方法是采用相干探测方法, 配备两个角度不同的望远镜, 对同一点的大气风速进行测量来合成二维水平风场。国防科技大学团队对三种不同的星载测风体制进行了综合的评估, 结果表明, HDWL 体制的方案可以获取最多的风场数据, 其探测高度能够覆盖边界层和对流层, 数据量是 Aeolus 方案的四倍, CDWL 的两倍, 同时保证较好的探测精度^[68]。我国目前的研究方向是混合体制的星载测风技术, 武艳伟等对于 0~6 km 使用相干外差技术, 3~30 km 使用双 F-P 直接测风技术的混合体制测风方案进行了详细的模拟和信号处理, 证明了方案的可行性和先进性^[82]。

5 结束语

文中回顾了国内外测风卫星的研究进程和发展状况, 着重描述了 ADM-Aeolus 任务携带的唯一载荷 ALADIN 的原型机设计、地面测试和机载测试过程以及 ALADIN 的结构和基本工作流程, 总结了 Aeolus 数据的长期验证结果。Aeolus 的成功发射标志着星载测风时代的到来, 它的成功也从实践的方面明确了星载测风的优势和必要性, 证明了直接测风在星载测风方面的可行性。结合 Aeolus 的技术分析和数据特点, 直接参照其方案并不适合我国的星载测风研究方向, 相较之下, 混合体制星载测风的优势更加明显, 是我国未来主要的研究方向。目前, 我国中国科学院上海光学精密机械研究所和北京遥测技术研究所等单位

正在进行星载多普勒测风激光雷达的原理样机研制,相信未来我国的星载测风技术的发展会更加迅速^[83]。

参考文献:

- [1] Chen Binglong, Yang Zhongdong, Min Ming, et al. Application requirements and research progress of spaceborne Doppler wind lidar [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2020, 57(19): 190003. (in Chinese)
- [2] World Meteorological Organization (WMO). Database of User Requirements and Satellite System Capabilities[M]//Preliminary Statement of Guidance Regarding How Well Satellite Capabilities Meet WMO User Requirements in Several Application Areas. Geneva, Switzerland: WMO, 1998.
- [3] Lngmann P, Fuchs J. Global Wind Profile Measurements for Climate and NWP[M]//The Four Candidate Earth Explorer Core Missions-Atmospheric Dynamics. Noordwijk: ESA Publications Division, 1999.
- [4] Huffaker R M. Wind Fields[M]//Feasibility Study of Satellite-borne Lidar Global Wind Monitoring System. Colorado: NOAA Technical Memorandum, 1978.
- [5] Rohaly G, Krishnamurti T. An observing system simulation experiment for the laser atmospheric wind sounder (LAWS) [J]. *Journal of Applied Meteorology*, 1993, 32(9): 1453-1471.
- [6] Hardesty R M, Post M J, Banta R M. Observing atmospheric winds with a Doppler lidar [J]. *Optics and Photonics News*, 1991, 2(10): 12-15.
- [7] Phillips M W, Schnal D L, Hale C P, et al. Design and development of the SPARCLE coherent lidar transceiver[C]//Proc SPIE, 1999, 3707: 256-267.
- [8] 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[C]//Lidar Remote Sensing for Industry and Environment Monitoring, 2001, 4153: 385-393.
- [9] Endemann M. The ADM-Aeolus mission[C]//International Conference on Space Optics-ICSO 2006, 2006, 10567: 1056701.
- [10] Endemann M. ADM-Aeolus: the first spaceborne wind lidar[C]//Lidar Remote Sensing for Environmental Monitoring VII, 2006, 6409: 64090G.
- [11] Morançais D, Fabre F. ALADIN: the first european LIDAR in space[C]//International Society for Optics and Photonics-ICSO 2004, 2017, 10568: 1056802.
- [12] Durand Y, Meynard R, Endemann M. Manufacturing of an airborne demonstrator of ALADIN, the direct detection Doppler wind lidar for ADM-Aeolus[C]//Techniques, and Measurements for Atmospheric Remote Sensing, 2005, 5984: 598401.
- [13] Morançais D, Fabre F, Endemann M. ALADIN Doppler wind lidar: recent advances[C]//Techniques, and Measurements for Atmospheric Remote Sensing, 2007, 6750: 675014.
- [14] Paffrath U, Lemmerz C, Reitebuch O, et al. The airborne demonstrator for the direct-detection Doppler wind lidar ALADIN on ADM-Aeolus. Part II: simulations and Rayleigh receiver radiometric performance [J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2009, 26(12): 2516-2530.
- [15] Paffrath U. Performance assessment of the Aeolus Doppler wind lidar prototype[D]. Munich: Maschinenwesen der Technischen Universität München, 2006.
- [16] Marksteiner U, Reitebuch O, Rahm S, et al. Airborne direct-detection and coherent wind lidar measurements along the east coast of Greenland in 2009 supporting ESA's Aeolus mission [C]//Lidar Technologies, Techniques, and Measurements for Atmospheric Remote Sensing VII, 2011, 8182: 81820J.
- [17] Reitebuch O, Lemmerz C, Lux O, et al. WindVal final report FR joint DLR-ESA-NASA wind validation for aeolus[R]. German: DLR, 2017.
- [18] Reitebuch O, Lux O, Lemmerz C, et al. WindVal II final report (FR) wind validation II for Aeolus[R]. German: DLR, 2018.
- [19] Leike I, Streicher J, Werner C, et al. Virtual Doppler lidar instrument [J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2001, 18(9): 1447-1456.
- [20] Oliver L, Christian L, Fabian W. Retrieval improvements for the ALADIN Airborne Demonstrator in support of the Aeolus wind product validation [J]. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2022, 15(5): 1303-1331.
- [21] Lux O, Lemmerz C, Weiler F, et al. ALADIN laser frequency stability and its impact on the Aeolus wind error [J]. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2021, 14(9): 6305-6333.
- [22] Reitebuch O, Huber D, Nikolaus I. ADM-Aeolus algorithm theoretical basis document ATBD level 1B Products[R]. German: DLR, 2018.
- [23] Lux O, Wernham D, Bravetti P. ADM-Aeolus system requirements document [J]. *Optics Letters*, 2020, 45(6): 1443-1446.
- [24] Davies A, Marshall J, Schillinger M, et al. Aeolus platform & instrument 3 years in space[EB/OL]. (2022-03-28) [2022-09-14]. <https://az659834.vo.msecnd.net/eventsairwesteuprod/production-nikal-public/08bffc4f4a3a41b1b104bfd17602217d>.
- [25] Zhang R W, Sun X J, Yan W, et al. 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 [J]. *Acta Physica Sinica*, 2014, 63(14): 140702. (in Chinese)
- [26] Zhang R W, Sun X J, Yan W, et al. Simulation of frequency discrimination for spaceborne Doppler wind lidar (II): Study on the retrieval of atmospheric wind speed for Rayleigh channel based on Fabry-Perot interferometer [J]. *Acta Physica Sinica*, 2014, 63(14): 140703. (in Chinese)
- [27] Cosentino A, Mondello A, Sapia A, et al. High energy, single frequency, tunable laser source operating in burst mode for space based lidar applications[C]//International Conference on Space Optics-ICSO 2004, 2017, 10568: 1058617.
- [28] Lars I. Aeolus: A scientific success due to excellent collaboration[EB/OL]. (2022-03-28) [2022-09-14]. <https://az659834.vo.msecnd.net/eventsairwesteuprod/production-nikal-public/8197246857c34bbc96b41bb85a3842a9>.
- [29] Flament T, Trapon D, Lacour A, et al. Aeolus L2A aerosol optical properties product: standard correct algorithm and Mie correct algorithm [J]. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2021, 14(12): 7851-7871.
- [30] Fehr T, Amiridis V, von Bismarck J, et al. Aeolus calibration, validation and science post-launch campaigns[C]//EGU General Assembly, 2021: EGU21-12562.
- [31] Hyemin S, Myoung-Hwan A, Jisoo K, et al. Comparison of wind vectors derived from GK2A with Aeolus/ALADIN [J]. *Korean Journal of Remote Sensing*, 2021, 37(61): 1631-1645.
- [32] Reitebuch O, Lemmerz C, Lux O, et al. Initial assessment of the performance of the first wind lidar in space on Aeolus[C]//The 29th International Laser Radar Conference (ILRC 29), 2020, 237: 01010.
- [33] Khaykin S M, Hauchecorne A, Wing R, et al. Doppler lidar at observatoire de Haute-provence for wind profiling up to 75 km altitude: performance evaluation and observations [J]. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2020, 13(3): 1501-1506.
- [34] Lux O, Lemmerz C, Weiler F, et al. Intercomparison of wind observations from the European Space Agency's Aeolus satellite mission and the ALADIN airborne demonstrator [J]. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2020, 13(4): 2075-2097.
- [35] Lemmerz C, Lux O, Witschas B. Aeolus validation with the 2- μm coherent and the ALADIN airborne demonstrator Doppler wind lidars on-board the DLR falcon[EB/OL]. (2020-11-04) [2022-09-19]. https://elib.dlr.de/139262/1/Lemmerz_Christian_Oral_Aeolus-Airborne-Validation_2020-11-04%20-%20Aeolus%20CalVal%20WS.pdf.
- [36] Baars H, Alexander G, Wandinger U. First results from the German Cal/Val activities for Aeolus[C]//The 29th International Laser Radar Conference (ILRC 29), 2020, 237: 01008.
- [37] Baars H, Herzog A, Heese B, et al. Validation of Aeolus wind products above the Atlantic Ocean [J]. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2020, 13(11): 6007-6024.
- [38] Isabell K, Christian L, Oliver L. Assessment of the Aeolus performance and bias correction-results from the Aeolus DISC [EB/OL]. (2022-11-02) [2022-09-16]. https://www.dropbox.com/s/m3kjp540otwm17i/Oliver_Reitebuch_Oral_Assessment-Aeolus-DISC.pdf?dl=0.
- [39] de Kloe J, Rennie M, Marseille G J, et al. Recent and planned improvements to the Aeolus L2B wind processing software[EB/OL]. (2022-11-02) [2022-09-16]. https://www.dropbox.com/s/2otx3zyqem9q7qq/Jos_de_Kloe_Oral_Recent_and_Planned_Improvements.pdf?dl=0.
- [40] Albert H, Aurélien P. First results of the Strateole-2 long-duration balloon campaign in the tropical lower stratosphere[EB/OL]. (2022-11-03) [2022-09-16]. https://www.dropbox.com/s/7btlx4q6hg284t1/Albert_Hertzog_Oral_Strateole_2.pdf?dl=0.
- [41] Isabell K, Christian L, Oliver L. Assessment of the Aeolus performance and bias correction – results from the Aeolus DISC [EB/OL]. (2022-11-02) [2022-09-16]. https://www.dropbox.com/s/m3kjp540otwm17i/Oliver_Reitebuch_Oral_Assessment-Aeolus-DISC.pdf?dl=0.
- [42] Jos de K, Gert-Jan M, Fabian W, et al. NWP monitoring of L2 B product quality at ECMWF[EB/OL]. (2022-03-28) [2022-09-15]. <https://az659834.vo.msecnd.net/eventsairwesteuprod/production-nikal-public/f15539060d4c46b9b8fff61d8c7a303a>.
- [43] Witschas B, Lemmerz C, Geiß A, et al. First validation of Aeolus wind observations by airborne Doppler wind lidar measurements [J]. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2020, 13(5): 2381-2396.
- [44] Holger B, Henriette G, Dietrich A. The performance of Aeolus L2A products in the vicinity of mineral dust[EB/OL]. (2022-03-29) [2022-09-15]. <https://az659834.vo.msecnd.net/eventsairwesteuprod/production-nikal-public/625816426a364a20b5f3900249928361>.
- [45] Guo J, Liu B, Gong W, et al. Technical note: First comparison of wind observations from ESA's satellite mission Aeolus and ground-based radar wind profiler network of China [J]. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2021, 21(4): 2945-2958.
- [46] Ishii S, Iwai H, Aoki M, et al. Validation experiment for Aeolus Level 2A and 2B products in Japan[EB/OL]. (2022-03-29) [2022-09-15]. <https://az659834.vo.msecnd.net/eventsairwesteuprod/production-nikal-public/625816426a364a20b5f3900249928361>.

- [prod/production-nikal-public/2a3c58e101dd4890aef7d35819143e9](#).
- [47] Wu S, Sun K, Dai G, et al. Inter-comparison of wind measurements in the atmospheric boundary layer and the lower troposphere with Aeolus and a ground-based coherent Doppler lidar network over China [J]. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2022, 15(1): 131-148.
- [48] Ratynski M, Khaykin S, Hauchecorne A, et al. Validation of Aeolus wind profiles using ground-based lidar and radiosonde observations at La Réunion Island and the Observatoire de Haute Provence, EGU sphere [J]. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2022, Preprint egusphere-2022-822.
- [49] Gago J A, Costa M J, Aranda J A B. Validation of ADM-Aeolus particle backscatter retrievals under SCA algorithm over 21 months at Spain and Portugal [EB/OL]. (2022-11-03) [2022-09-16]. https://www.dropbox.com/s/wu1fcf52nfs51yk/Jesus_AbrilGago_Oral_ValidationOfADMAeolus.pdf?dl=0.
- [50] Holger B, Frithjof E, Ulla W. Validation of Aeolus L2A data with ground-based lidar in Israel for the aerosol-optimized range-bin setting in the Eastern Mediterranean (MARS) [EB/OL]. (2022-11-03) [2022-09-16]. https://www.dropbox.com/s/rli4qvybbzqglx8/Holger_Baars_Oral_L2_A_MARS.pdf?dl=0.
- [51] Ehlers F, Flament T, Dabas A, et al. Optimization of Aeolus' aerosol optical properties by maximum-likelihood estimation [J]. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2021, 15(1): 185-203.
- [52] Chen S, Cao R, Xie Y, et al. Study of the seasonal variation in Aeolus wind product performance over China using ERA5 and radiosonde data [J]. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2021, 21(15): 11489-11504.
- [53] Zhang F, Xue H, Liu Z, et al. High performance China-made coherent Doppler wind lidar prototype[C]//Proceedings of SPIE, 2011, 8192: 81920Y.
- [54] Banyard T, Wright C, Hindley N, et al. Longitudinal variations of tropical winds in the UTLS: Aeolus and stratospheric measurements of equatorial waves and the Walker circulation[R]. Austria: EGU, 2023.
- [55] Gerhard A, Alexander C. The needs for wind observations in the global observing system [EB/OL]. (2022-11-02) [2022-09-16]. https://www.dropbox.com/s/tsce0i84pa9f1k9/Gerhard_Adrian_wind_observations.pdf?dl=0.
- [56] Michael P R, Lars I, Fabian W, et al. The impact of Aeolus wind retrievals on ECMWF global weather forecasts [J]. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 2021, 2021(A): 3555-3586.
- [57] Alexander C, Deutscher W. Validation and impact assessment of Aeolus observations in the DWD modelling system [EB/OL]. (2022-11-02) [2022-09-16]. https://www.dropbox.com/s/ulpv2b013c08dlm/alexander_cress_oral_validation_and_impact.pdf?dl=0.
- [58] Josef A. Earth explorer Aeolus [EB/OL]. (2022-11-02) [2022-09-16]. <https://www.dropbox.com/s/o5inxg0dda4t3y8/J.%20Aschbacher%20Aeolus%20Workshop.pdf?dl=0>.
- [59] National Centre for Medium Range Weather Forecasting. Impact of Aeolus HLOS winds on the simulation of Nisarga severe cyclonic storm over the Arabian sea[EB/OL]. (2022-11-02) [2022-09-16]. https://www.dropbox.com/s/apjmnv7z6daucvj/Gibies_George_Oral_Impact_of_Aeolus_HLOS_Wind_on_Nisarga.pdf?dl=0.
- [60] Peter K, Maurus B, Andreas H, et al. Equatorial waves as a key element for weather prediction in the tropics[EB/OL]. (2022-11-02) [2022-09-16]. https://www.dropbox.com/s/9mz0w8v4wj6eb9/Knippertzetal_ESA_Aeolus.pdf?dl=0.
- [61] Preusse P, Ern M. Forcing of the quasi-biennial oscillation by different wave modes [EB/OL]. (2022-11-05) [2022-09-16]. https://www.dropbox.com/s/zn5u4jzy7nblkh/preusse_ern_esa_aeolus_QBO_2020.pdf?dl=0.
- [62] Žagar N. Equatorial wave dynamics: initial insights from Aeolus [EB/OL]. (2022-11-04) [2022-09-16]. https://www.dropbox.com/s/48qtpyfgfbai8id/N%20Zagar_Aeolus_CALVAL_3Nov2020_.pdf?dl=0.
- [63] ESA. Satellites track unusual Saharan dust plume[EB/OL]. (2020-07-09) [2022-09-15]. https://www.esa.int/Applications/Observing_the_Earth/Satellites_track_unusual_Saharan_dust_plume.
- [64] Antonis G, Georgios P, Eleni D, et al. Assessing the impact of Aeolus wind data assimilation on the Saharan dust simulations in the framework of the JATAC campaign[C]//EGU General Assembly 2022, 2022, EGU22: 3586.
- [65] Dai G, Sun K, Wang X, et al. Dust transport and advection measurement with spaceborne lidars ALADIN and CALIOP and model reanalysis data [J]. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2022, 22(12): 7975-7993.
- [66] Wernham D, Helier A, Mason G. Status of the AEOLUS-2 pre-development activities[EB/OL]. (2022-03-29) [2022-09-15]. <https://az659834.vo.msecnd.net/eventsairwesteuprod/production-nikal-public/dbbbee3889044d43b69d5a68ed9b1c8d>.
- [67] Wernham D, Heliere A, Mason G, et al. Aeolus-2 mission pre-development status[C]//2021 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium IGARSS, 2021, 2021: 767-770.
- [68] Sun X J, Zhang C L, Fang L, et al. A review of the technical

- system of spaceborne Doppler wind lidar and its assessment method [J]. *National Remote Sensing Bulletin*, 2022, 26(6): 1260-1273. (in Chinese)
- [69] Stoffelen A, Angela B, Régis B, et al. Wind profile satellite observation requirements and capabilities [J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2020, 101(11): 2005-2021.
- [70] 李黄, 郭金家. 星载激光多普勒测风雷达发展研究[C]//中国气象学会2006年年会“气象雷达及其应用”分会场论文集, 2006: 466-484.
- [71] 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. (in Chinese)
- [72] Guo Jinjia, Liu Zhishen, Sun Dapeng, et al. Comparison between high spectral iodine filter and double-edge doppler wind lidar techniques [J]. *Periodical of Ocean University of China*, 2004, 34(3): 489-496. (in Chinese)
- [73] Xin Z, Diao W, Yuan L, et al. Single-frequency polarized eye-safe all-fiber laser with peak power over kilowatt [J]. *Applied Physics B*, 2014, 115(1): 123-127.
- [74] 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. (in Chinese)
- [75] Wu Yanwei. Simulation design and data processing for the satellite hybrid Doppler wind lidar[D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2018. (in Chinese)
- [76] Liu Zhishen, Zhen Chen, Yu Cuirong, et al. Doppler wind lidar: from vehicle-mounted to space-borne [J]. *Journal of Atmospheric Environmental Optics*, 2015, 10(2): 126-138. (in Chinese)
- [77] Liu Feifei, Bi Decang, Liu Heng, et al. Principle prototype and experimental progress of wind lidar in near space [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2020, 47(8): 0810003. (in Chinese)
- [78] Chen Yilan, Zhu Xiaolei, Zhang Junxuan, et al. Development of pulsed single-frequency 2 μm all-solid-state laser [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2020, 57(5): 050006. (in Chinese)
- [79] Yuan Lucheng, Liu Heng, Liu Jiqiao, et al. Wind vector estimation of coherent Doppler wind lidar based on genetic algorithm [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2020, 47(8): 0810004. (in Chinese)
- [80] Singh U K, 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 System and Applications 2014, 2014: S5-1.
- [81] Baron P, Ishii S, Okamoto K, et al. Feasibility study for future spaceborne coherent Doppler wind lidar, part 2: measurement simulation algorithms and retrieval error characterization [J]. *Journal of the Meteorological Society of Japan*, 2017, 95(5): 319-342.
- [82] Zhang C, Sun X, Lu W, et al. Relationship between wind observation accuracy and the ascending node of the sun-synchronous orbit for the Aeolus-type spaceborne Doppler wind lidar [J]. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2021, 14(7): 4787-4803.
- [83] Schillinger M, Morancas D, Fabre F, et al. ALADIN: the lidar instrument for the AEOLUS mission[C]//International Society for Optics and Photonics, 2003, 4118: 40-51.

Review of the progress of Aeolus space-borne wind measurement lidar

Hu Zhongyu^{1,2}, Bu Lingbing^{1,2*}

(1. Collaborative Innovation Center on Forecast and Evaluation of Meteorological Disasters, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China;

2. School of Atmospheric Physics, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China)

Abstract:

Significance Atmospheric wind field is a crucial element in meteorology and a primary driving factor for global carbon cycling, aerosol transport, energy exchange, and weather changes. Although satellite-based atmospheric observations have a history of several decades, progress in measuring the global 3D wind field has been slow. A clear need for improving this situation is to establish a globally covered, high-resolution atmospheric wind observation system. Currently, the primary observation method for wind profiles is by using radiosondes, but it is impossible to obtain corresponding sounding data for regions where instruments are difficult to install and

maintain, such as oceans or deserts. Therefore, wind measurement in these regions is usually performed by carrying sounding instruments on flights or ships, which is costly and subject to the conditions of detection. Satellite-based Doppler wind lidars can achieve wide-range, high-precision, and uninterrupted wind field measurements, which are not affected by terrain and time compared with ground-based and airborne detection. Satellite-based wind measurement is of great significance for improving numerical weather forecast accuracy, long-term climate research, pollutant transport, and environmental protection. Research on satellite-based Doppler wind lidars has been underway for nearly 30 years since the last century, and Aeolus is currently the only successfully launched satellite for satellite-based wind measurement.

Progress In the 1980s, research on laser radar technology was conducted in space, followed by some research on coherent wind measurement in the 1990s. However, due to its technical difficulty, it has not been successfully applied so far. In the 1990s, the ADM-Aeolus project was proposed. Starting in 2000, EADS-Astrium, a subsidiary of the European Aerospace and Defense Group, and more than 30 European companies jointly conducted research and development on the ALADIN payload principle prototype (Fig.2). In 2001, ESA developed a direct-detection lidar simulator for the ADM-Aeolus instrument. The simulator has a resolution of 15 m and incorporates the latest design of ALADIN in real-time. Before the official launch, ESA conducted six airborne testing activities to observe atmospheric wind profiles for various atmospheric scenarios (Tab.2) and to test, verify, optimize the data quality control algorithm, evaluate the measurement error of line-of-sight wind speed, and propose a series of data inversion optimization schemes for different situations. Aeolus was successfully launched in France in August 2018.

Conclusions and Prospects This paper summarizes the main data verification activities and results of the Aeolus satellite since its launch. Until April 2022, the global random error of the L2 B data product for the Rayleigh channel is about 6 m/s and for the Mie channel is about 3.3 m/s. However, in long-term experiments, the L2 A product has significant errors in the backscatter coefficient under 2 km due to cloud interference and other factors including but not limited to low laser emission energy, calibration defects, and fluctuations in thermal pixels. This paper focuses on the practical application of the Aeolus data product and quantifies the improvement of numerical weather forecast accuracy, advancement of atmospheric dynamics research, and progress on pollutant and environmental research. Based on the Aeolus design, parameter optimization and simulation were conducted, and the simulation results were presented. Finally, the data characteristics of Aeolus were analyzed, and seven factors that need improvement were proposed based on China's research progress in satellite-based wind measurement and wind measurement requirements in the meteorological field, including laser emission energy, data inversion, and equipment development. The paper also analyzed the characteristics of coherent lidar wind measurement and hybrid lidar wind measurement schemes. Among them, the hybrid lidar wind measurement scheme has advantages in the accuracy and quantity of the detection data, and can be considered as the main direction for China's future development of satellite-based wind measurement.

Key words: spaceborne; Aeolus; wind field measurement; Doppler wind lidar

Funding projects: National Natural Science Foundation of China (42175145)