

# 欧洲空间局 Aeolus (风、气溶胶) 卫星任务和中国 ACDL (气溶胶、二氧化碳) 卫星任务的激光雷达观测: 验证与算法改进以提高数据质量

吴松华<sup>1</sup>, Oliver Reitebuch<sup>2</sup>, 陈卫标<sup>3</sup>, 张兴赢<sup>4</sup>, 戴光耀<sup>1</sup>, 孙康闻<sup>1</sup>, 刘晓英<sup>1</sup>,  
Oliver Lux<sup>2</sup>, 翟晓春<sup>4</sup>

<sup>1</sup> 中国海洋大学海洋技术学院, 青岛, 中国

<sup>2</sup> 德国宇航中心大气物理研究所, 韦斯灵, 德国

<sup>3</sup> 中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海, 中国

<sup>4</sup> 中国气象局国家气象卫星中心, 北京, 中国

2018年8月, 欧空局的地球探测任务 Aeolus 卫星成功发射, 该卫星部署了全球第一个星载测风激光雷达系统 ALADIN (Atmospheric Laser Doppler Instrument)。自该卫星发射以来, 证实了其具备在全球范围内准确测量从地面到平流层下部大气风廓线的能力。为了识别并校正 ALADIN 的系统误差, 保证并提高 ALADIN 的性能和风产品的数据质量, 陆续开展了若干定标和验证活动。

在对 ALADIN 的定标方面, 评估了 ALADIN 激光频率的稳定性及其对风速测量的影响, 并利用望远镜温度对 ALADIN 的风速偏差进行了修正。对 ALADIN 在轨运行中超过 2 年的激光频率监测表明, 尽管偶尔存在显著增强的频率噪声 (>30MHz), 但大多数情况下, 激光器具有良好的频率稳定性, 激光频率的均方根为约 10MHz。应用欧洲中尺度天气预报中心 (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, ECMWF) 的模式风场数据对 Aeolus 测量的风速误差进行分析表明, 由于在激光频率波动增大情况下进行风速测量的占比很小, 因此 ALADIN 激光器稳定性的偶尔下降对全球范围内风速数据质量的影响十分有限。另一个系统误差源与直径 1.5m 望远镜主镜上的小幅温度波动有关, 主镜的温度波动导致沿轨测量的风速偏差能够达到 8m/s。研究表明, 望远镜温度沿轨道的变化是由于大气层顶部反射的短波辐射和地球出射的长波辐射的变化以及与望远镜热控系统相关的响应。为了校正这种影响, 以 ECMWF 模式的等效风速作为参考, 应用以位于主望远镜上的各种温度传感器为自变量的多元线性回归模型作为函数来表示风速偏差。在温度变化的影响较大的情况下, 望远镜温度校正可以减小 53% 的沿轨风速测量偏差。

Aeolus 发射后不久, 于欧洲中部开展了与 Aeolus 时空同步的机载测风激光雷达验证实验, 该实验应用了 ALADIN 的机载原型样机—A2D (Atmospheric LASer Doppler INstrument)。同时, 在中国境内建立了地基相干多普勒测风激光雷达网, 用于开展对 Aeolus 风速数据的验证活动。2018 年秋末开展了 Aeolus 发射后的首次机载验证活动, 此时仍处于该卫星任务的调试阶段。此次实验中, 进行了四次沿卫星轨迹的同步飞行, 得到了高数据获取率的对流层 Rayleigh 通道风速数据。由于 ALADIN 和 A2D 的测量网格和 LOS 观测方向不同, 在 A2D 与 Aeolus 风速数据的对比验证之前, 进行了数据平均以及投影关系转化, 将 A2D 测得的 LOS 风速转换为 Aeolus 的 LOS\*风速。两设备的数据统计对比结果显示, 相比于 A2D 的 Rayleigh 通道风速, Aeolus 的 Rayleigh 风速存在 2.6m/s 的正偏差以及 3.6m/s 的标准偏差。在中国境内的验证活动中, 部署了 17 台自主研发的相干测风激光雷达, 并联合 ALADIN/Aeolus 完成了大气边界层和对流层底层的同

步风场观测。通过对观测数据进行严格的质量控制，共获得 52 对 Mie-cloudy 和 387 对 Rayleigh-clear 数据并完成了比对分析。结果表明，ALADIN/Aeolus 升轨观测数据的标准差、标度平均绝对偏差和残差均小于降轨观测数据。在大气边界层和对流层低层内，ALADIN/Aeolus Baseline 07/08 的水平径向风速与相干测风激光雷达的观测差别较大。随着 Aeolus 数据产品持续校正（如 M1 反射镜温度校正）以及处理算法更新迭代（如 Rayleigh 通道阈值更新），Baseline 09/10/11 下的水平径向风速数据质量得到了显著改善。此外，提出了一种垂直速度校正方法，评估了大气垂直速度对 ALADIN/Aeolus 数据反演引入的误差。

Aeolus 能够同步测量风速廓线和气溶胶光学特性廓线，这为研究气溶胶的风驱动演化提供了可能。

应用星载激光雷达 ALADIN 的观测结果和其他星载遥感设备的数据，结合数值天气预报模型，分别讨论了风驱动沙尘气溶胶的传输和风驱动海洋气溶胶的产生。基于 ALADIN 的观测，结合 CALIOP、AIRS、ECMWF 和 HYSPLIT 的数据，追踪了发生在 2020 年 6 月 14 日至 27 日的长期大规模撒哈拉沙尘传输事件，并探讨了计算沙尘质量平流量的可能性。通过 ALADIN 和 CALIOP 的准同步观测，捕捉到了 6 月 15、16、19、24 和 27 日沙尘事件的排放阶段、发展阶段、传输阶段、下降阶段和沉积阶段，并通过 AIRS 沙尘指数数据和 HYSPLIT 的轨迹进行了验证。计算了每个传输阶段的沙尘质量平流量。

应用星载激光雷达 ALADIN/Aeolus、CALIOP/CALIPSO，结合 MODIS 传感器、MERRA-2 再分析模型、HYSPLIT 轨迹传输模型，捕捉并分析了 2020 年 9 月 11 日至 21 日期间从美国西部到欧洲北部的大规模烟尘气溶胶传输事件。辅助以 MODIS 提供的 550nm AOD、CALIOP 提供的气溶胶分类数据以及 HYSPLIT 模型，使用 ALADIN 的观测识别了不同传输阶段的烟尘层。基于 355 nm 波长消光系数和 MERRA-2 提供的烟尘质量浓度，提出了一种星载激光雷达估算烟尘质量浓度的新方法。获取了 ALADIN 六个观测截面的消光系数、激光雷达比和质量浓度，以描述整个传输过程中的气溶胶特性。根据 ALADIN 提供的风矢量廓线观测，发现了一条从美洲西部到欧洲北部的烟尘传输通道。结合质量浓度和风场信息，计算了每个观测截面的烟尘气溶胶传输通量，从而定量评估传输强度。

根据 ALADIN 和 CALIOP 的观测结果，结合 ECMWF 的数据，选择了三个大洋区域，得出了纯海洋气溶胶在 355nm 处的光学特性，结合风速对其光学特性进行了分析和讨论。最后，在两个不同的垂直大气层（0-1 公里和 1-2 公里，对应于海洋大气边界层以内和边界层以上）探讨了海洋气溶胶光学特性和风速之间的关系，揭示了海洋气溶胶相关的大气背景状态。在所有分析案例下，光学特性随风速增加呈现上升趋势，并可以用幂函数来拟合，这意味着两个垂直层的大气均能接收到由风、湍流产生和输送的海洋气溶胶输入。此外，计算得到了海洋气溶胶光学厚度（AOD）和激光雷达比（LR），讨论了二者与风速的关系。

实现二氧化碳柱浓度和气溶胶光学特性廓线的全球观测对气候研究和环境监测非常重要，因此中国实施了激光雷达任务 ACDL（Aerosol and Carbon dioxide Detection Lidar），依托卫星平台实现二氧化碳和气溶胶的观测——该卫星已于 2022 年 4 月 16 日成功发射。ACDL 的调试阶段计划为 6 个月，在此期间将开展定标与验证活动，并将不断改进二氧化碳柱浓度和气溶胶光学特性曲线的反演算法。随着 ACDL 的定标和验证以及反演算法的不断更新，准确、稳定的 ACDL 的数据产品将在气候研究和环境监测等方面发挥重要作用。