

# 大气探测激光雷达组网观测一致性研究

王丽东<sup>1</sup>, 郭 畅<sup>1</sup>, 赵一鸣<sup>1</sup>, 戴学兵<sup>1</sup>, 徐兆鹏<sup>2</sup>, 胡志恒<sup>2</sup>, 商雅楠<sup>1</sup>, 潘 超<sup>1</sup>  
(1 北京遥测技术研究所 北京 100076;  
2 中国资源卫星应用中心 北京 100094)

**摘要:** 通过激光遥感获取气溶胶、云垂直分布情况, 对研究气溶胶、云微物理特性、辐射强迫效应以及污染物传输等具有重大意义。在实际应用中激光雷达受激光器能量、发散角以及透过率等影响, 会导致各雷达面对同一目标物探测数据不一致。随着地基大气探测激光雷达逐步规模化、标准化, 对雷达组网观测一致性开展研究具有重要意义。为保证组网激光雷达数据高质量和高可靠性, 在雷达系统自标定基础上, 利用太阳光度计、大气分子模型获取激光雷达系统常数, 确保各激光雷达回波信号定量可比。通过激光雷达组网观测进行探测目标一致性比对试验, 以验证激光雷达系统探测一致性精度。结果表明: 标定后, 532 nm 距离修正信号在 1~2 km 区间相对偏差从 64.89% 降低到 22.16%, 在 2~5 km 区间相对偏差从 49.26% 降低到 8.90%, 在 9.5~11.5 km 相对偏差从 46.83% 降低到 10.91%; 532 nm 退偏比在 1~2 km 区间相对偏差从 69.68% 降低到 20.68%, 在 2~5 km 区间相对偏差从 71.24% 降低到 6.69%, 在 9.5~11.5 km 相对偏差从 140.24% 降低到 9.02%; 532 nm 后向散射系数在 1~2 km 区间相对偏差从 37.45% 降低到 23.63%, 在 2~5 km 区间相对偏差从 29.15% 降低到 21.45%, 在 9.5~11.5 km 相对偏差从 76.02% 降低到 24.16%。组网激光雷达数据结果一致性较好, 可在多站点进行高精度探测, 在气候变化研究、碳排放监测和环境研究等领域发挥重要作用, 为大规模大气变化规律研究提供高质量、有效数据。

**关键词:** 激光遥感; 大气探测激光雷达; 雷达组网; 一致性; 数据质量

中图分类号: P41; TN958.98 文献标志码: A 文章编号: 2095-1000(2023)06-0072-08

DOI: 10.12347/j.ycyk.20230506001

引用格式: 王丽东, 郭畅, 赵一鸣, 等. 大气探测激光雷达组网观测一致性研究[J]. 遥测遥控, 2023, 44(6): 72-79.

## Consistency research of atmospheric detection lidar network observations

WANG Lidong<sup>1</sup>, GUO Chang<sup>1</sup>, ZHAO Yiming<sup>1</sup>, DAI Xuebing<sup>1</sup>, XU Zhaopeng<sup>2</sup>, HU Zhiheng<sup>2</sup>, SHANG Yanan<sup>1</sup>, PAN Chao<sup>1</sup>  
(1. Beijing Research Institute of Telemetry, Beijing 100076, China;  
2. China Centre For Resources Satellite Data and Application, Beijing 100094, China)

**Abstract:** Laser remote sensing is of great significance for studying aerosol and cloud microphysical properties, radiation forcing effects, and pollutant transport by obtaining vertical distributions of aerosols and clouds. In practical applications, lidar is affected by laser energy, divergence angle and transmittance, which will lead to inconsistent detection data of each radar against the same target. With the gradual scaling-up and normalization of ground-based atmospheric detection lidars, the study of network observation consistency is of great significance. Based on the self-calibration of the lidar system, the solar photometer and atmospheric molecular model are used to ensure that the echo signal of each laser radar is comparable. Through the detection target consistency comparison test by the laser radar network observation, the consistency accuracy of the radar system detection is verified. The results show that: after calibration, the relative deviation of range corrected signal in 532 nm channel is reduced from 64.89% to 22.16% in height range of 1~2 km, from 49.26% to 8.90% in height range of 2~5 km, and from 46.83% to 10.91% in height range of 9.5~11.5 km. The relative deviation of depolarization ratio in 532 nm is reduced from 69.68% to 20.68% in height range of 1~2 km, from 71.24% to 6.69% in height range of 2~5 km, and from 140.24% to 9.02% in height range of 9.5~11.5 km. The relative deviation of backscattering coefficient in 532 nm is reduced from 37.45% to 23.63% in height range of 1~2 km, from 29.15% to 21.45% in height range of 2~5 km, and from 76.02% to 24.16% in height range of 9.5~11.5 km. The networked lidar have good consistency, and can play an important role in the fields of multi-site high-precision detection, climate change research, carbon emission monitoring, and environmental research, which can provide high-quality and effective data for the study of large-scale atmospheric changes.

基金项目: 中国航天科技集团自主研发项目“大气探测激光雷达星地一体化高精度数据定标处理系统技术”

收稿日期: 2023-05-06 修回日期: 2023-09-07

**Keywords:** Laser remote sensing; Atmospheric detection lidar; Lidar network; Consistency; Data quality

**Citation:** WANG Lidong, GUO Chang, ZHAO Yiming, et al. Consistency research of atmospheric detection lidar network observations [J]. Journal of Telemetry, Tracking and Command, 2023, 44(6): 72–79.

## 引言

激光雷达作为一种主动遥感探测工具,能够实时获取大气中云、气溶胶时空垂直分布<sup>[1-3]</sup>情况,具有探测精度高、动态范围大的特点,广泛应用于环境监测、气候变化等领域<sup>[4]</sup>。地基激光雷达组网观测可获取高质量、高精度、长时间云-气溶胶观测数据,是获得大范围空间尺度气溶胶和云的三维空间分布信息的有效手段之一,对沙尘远距离传输和局地大气污染及扩散规律研究,以及校验我国星载激光雷达和星地一体化算法开发具有重要意义<sup>[5-7]</sup>。

目前,欧洲、美国、日本等国家和地区已成功研制多型主被动遥感大气探测设备,建立了较为成熟的大气探测激光雷达组网观测网络<sup>[8]</sup>,具备先进的系统研制、大气数据反演、卫星定标以及多源数据融合处理能力<sup>[9]</sup>。随着国内激光遥感技术快速发展,我国于2022年先后发射了两颗自主研发的大气探测激光雷达——大气环境监测卫星和陆地生态碳监测卫星,重点提升了我国在大气环境综合监测、全球气候变化以及应急减灾等方向的应用保障能力<sup>[10,11]</sup>。近几年来,我国在大气探测激光雷达领域发展迅速,呈现以高校、科研院所自主研发地基大气探测激光雷达的多点散发态势<sup>[12]</sup>,但国内仍未形成统一的、标准的激光雷达观测网和质量控制方案,且硬件水平参差不齐、反演算法不尽相同<sup>[13]</sup>,大部分激光雷达尚未开展过系统的软硬件标定,这一系列客观原因导致了激光雷达获得的观测数据不具备可比性<sup>[14]</sup>,无法有效地在业务中应用,不具备多台大气激光雷达区域组网的技术基础。因此,在我国建立激光雷达标准化、高可靠性的一致性标校十分必要,且具有重大的科研价值和重要的战略意义。

由于激光雷达结构和原理的复杂性与精密性,在研制过程中往往难以保证每台设备之间的一致性,造成对同一目标物表征参数不一致的现象<sup>[15]</sup>。为重点保证探测准确性与精度,在激光雷达研制、外场实验、数据处理等过程减少误差,本研究针对自主研发的9台大气探测激光雷达开展一致性标

定试验,力求保证雷达观测数据及其反演产品的质量能够满足气象、环境监测领域的业务应用需求,同时为建设激光雷达组网观测以及服务我国星载激光雷达提供技术参考。

## 1 系统概况

北京遥测技术研究所自主研发的AMPLE型大气探测激光雷达,采用多波长发射、多通道接收、多模式探测<sup>[16,17]</sup>,可提供光学参数和质量物浓度廓线、边界层高度以及云顶/底高数据产品,能够准确表征气溶胶、云层等目标的精细垂直结构及时空演化过程<sup>[18,19]</sup>。大气探测激光雷达系统由激光发射分系统、接收分系统、光电转换和数据采集分系统、电源分系统、综合控制分系统、外部雷达机柜等组成,大气探测激光雷达原理和实物如图1所示,技术指标如表1所示。

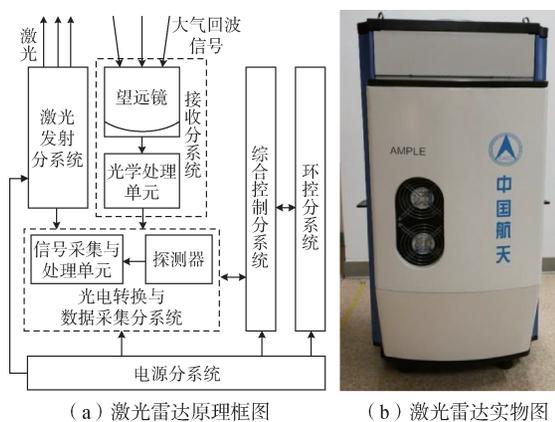


图1 大气探测激光雷达原理图及实物图

Fig. 1 Atmospheric detection lidar principle block diagram and physical picture

## 2 标校方法

激光雷达系统集成光机电于一体,由于各台雷达的激光器发射能量、发散角,探测器噪声、光学中继透过效率不尽相同,导致实际接收回波信号与真实回波信号之间存在差异,为保证探测一致性,需要得到各台激光雷达的系统常数,以消除雷达方程中上述变量引入的不一致性。在计算雷达系统常数前,首先需要对参试的9台雷达进行自标

表 1 大气探测激光雷达系统技术指标  
Table 1 Atmospheric detection lidar system technical indicators

主要单元	指标名称	技术参数
发射单元	输出波长/nm	355 nm、532 nm、1 064 nm
	脉冲频率/kHz	1 kHz
	单脉冲能量/mJ	≥0.3 mJ@355 nm、 ≥0.8 mJ@532 nm/1 064 nm
接收单元	接收口径/mm	≥250 mm
	视场角/mrad	≤1 mrad
探测单元	探测器	PMT/SPCM
采集单元	光子计数率/MHz	≤200 MHz

定, 以保证单台雷达数据准确性。自标定项目主要包括大气瑞利信号拟合、重叠因子校正、暗噪声标定、接收横截面均匀性和系统增益比标定<sup>[20]</sup>。大气探测激光雷达标校方法流程如图 2 所示。

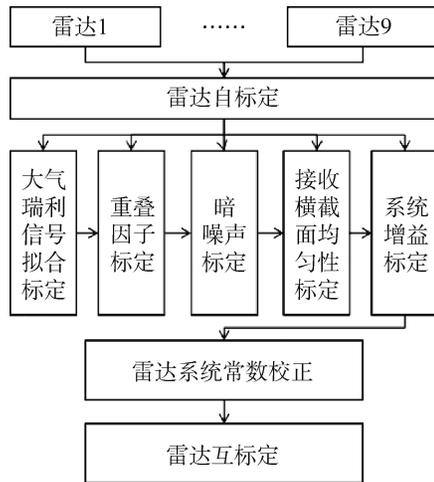


图 2 大气探测激光雷达标校方法流程图

Fig. 2 Flow chart of atmospheric detection lidar calibration method

### 2.1 校正方法

在距离  $z$  处, 激光雷达回波信号可由激光雷达方程表示。

$$P(z) = P_0 \frac{A}{z^2} \frac{c\tau}{2} O(z) \beta(z) e^{-2\int_0^z \alpha(z) dz} \quad (1)$$

式中,  $z$  为探测距离,  $P_0$  为激光脉冲能量;  $A/z^2$  为接收立体角;  $c$  为光速;  $\tau$  为激光脉冲宽度;  $O(z)$  代表重叠因子;  $\beta(z)$  为大气后向散射系数;  $e^{-2\int_0^z \alpha(z) dz}$  为大气双向透过率,  $\alpha(z)$  为大气消光系数。其中, 激光脉冲能量、接收立体角、脉冲宽度、重叠因子

这些参数与激光雷达光机结构、激光器固有属性有关, 为常量, 记为  $C$ 。式(1)可进一步表示为:

$$P(z) = C\beta(z)e^{-2\int_0^z \alpha(z) dz} \quad (2)$$

在晴朗、稳定、能见度较好的天气条件下, 视气溶胶粒子米散射可忽略, 且认定 7 km 高度以上无气溶胶粒子存在, 可利用分子散射对激光雷达系统常数进行标定。在晴朗无云的天气条件下, 利用太阳光度计获得地面 0~7 km 高度对应的光学厚度  $\tau_s$ , 根据太阳光度计与激光雷达波长转换关系, 得到对应激光雷达消光系数在垂直路径上的高度积分式(3), 结合标准大气模型式(4)得到清洁高度对应后向散射系数  $\beta_m(z)$ , 最终利用式(5)得到激光雷达系统常数。

$$\tau_s = \int_0^z \alpha dz \quad (3)$$

$$\beta_m(z) = 1.54 \times 10^{-3} e^{-\frac{z}{7} \times \frac{532^4}{4}} \quad (4)$$

$$C = \frac{P(z)}{\beta_m(z)e^{-2\tau_s}} \quad (5)$$

由此, 利用系统常数可将激光雷达回波信号相对量纲转为绝对量纲, 保证了激光雷达数据可比性。

### 2.2 评价方法

当自研激光雷达与中国气象局标准雷达进行同时、同址连续观测, 硬件指标及数据精度与标准雷达比对达标后, 将作为中间传递的标准源, 对其余自主研发的激光雷达进行互标定, 此方法可保障多台激光雷达测量数据的准确性、一致性。由于标准雷达为 532 nm 单波长, 因此重点比较 532 nm 波长数据的一致性。着重比较了大气探测激光雷达核心产品距离修正信号、退偏比以及光学参数, 以评价各雷达产品数据的一致性。

为了方便分析说明, 对 9 台雷达分别命名为 1~9 号雷达, 其中 8 台参试雷达(1~3 号、5~9 号雷达)和与标准雷达标校后的 4 号雷达进行连续观测试验, 连续采集获得至少 30 min 通道的原始采集数据, 经过波门校正、距离校正等预处理, 以标校后的 4 号雷达的距离修正信号、退偏比以及反演的后向散射系数为比对标准, 根据式(6)~式(8)可分别计算距离修正信号、退偏比以及后向散射系数在一段区间的相对误差的平均值和标准偏差。

$$\delta R_{rel} = \left[ \frac{\sum_{i=1}^n (R_{rel} - \overline{R_{rel}})^2}{n} \right]^{1/2} \quad (6)$$

式中： $\delta R_{rel}$ 为指定距离区间的相对误差的标准偏差； $n$ 为选定的一个确定的高度范围内的测试数据个数； $R_{rel}$ 为相对偏差，根据式(7)计算； $\overline{R_{rel}}$ 为短距离区间内的相对误差的平均值，根据式(8)计算；

$$R_{rel} = \frac{|g_r - g_{ex}|}{g_{ex}} \times 100\% \quad (7)$$

$$\overline{R_{rel}} = \frac{\sum_{i=1}^n R_{rel}}{n} \quad (8)$$

式中， $g_{ex}$ 为参考标准信号， $g_r$ 为参试设备测量信号。

### 3 比对分析

#### 3.1 试验概况

大气探测激光雷达一致性比对试验于2022年3月16日进行，当日天气晴朗，各雷达所在地面高度基本一致，不存在垂直高度上的距离偏移。在参加比对的9台雷达中，任意两台雷达之间的距离保持在100 m左右，在尽可能保证同址观测的基础上，避免同频激光发射源因距离过近带来的接收干扰。外场试验现场的雷达空间分布以及现场工作照如图3所示。



图3 大气探测激光雷达空间分布和现场图

Fig. 3 Atmospheric detection lidar spatial distribution and site maps

#### 3.2 结果分析

2022年3月16日晚19:20~20:00在北京遥测技术研究所开展了9台大气探测激光雷达组网一致性标定试验，雷达实测信号如图4所示。试验期间存在9~12 km的高云和1.8 km左右的低云，近地面有气溶胶层，可有效检验边界层气溶胶、低层云

以及高空云信号。分别计算标校前后数据产品的相对偏差，以验证标校方法对于提升激光雷达数据一致性的有效性。

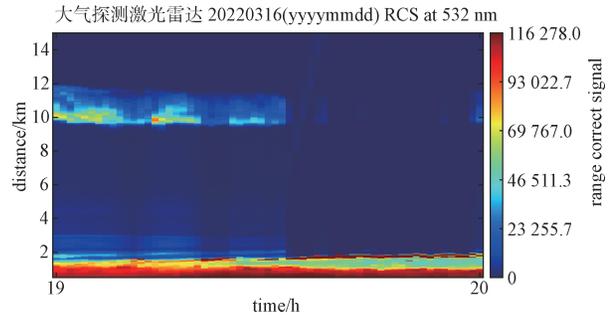


图4 外场比对测试当天激光雷达实测信号

Fig. 4 Measured signal of lidar on the comparison test day

由于不同系统和通道的不同几何重叠不尽相同，在对信号进行比对试验之前，调节每台系统重叠因子使之尽可能距离一致，以保证在近地面观测数据的一致性。数据处理时对信号进行触发延迟、去背景校正，适当进行数据积累以提高信噪比。为减少雷达盲区对计算不同雷达信号区间误差影响，同时考虑当日云-气溶胶目标区间以及雷达信噪比，选定1~2 km、2~5 km以及9.5~11.5 km为计算区间。

以4号雷达为参考标准，利用相同反演算法分别计算不同雷达在校正前后与4号雷达在相同区间内的532 nm距离修正信号、532 nm退偏比、532 nm后向散射系数的相对误差，如图5~图7所示。选取1~2 km、2~5 km以及9.5~11.5 km区间进行相对误差平均值统计分析，见表2~表4。结果表明：校正后1~2 km区间距离修正信号相对误差由64.89%降到22.16%，2~5 km区间距离修正信号相对误差由49.26%降到8.90%，9.5~11.5 km相对误差由46.83%降到10.91%；1~2 km区间退偏比相对误差由69.68%降到20.68%，2~5 km区间退偏比相对误差由71.24%降到6.69%，9.5~11.5 km相对误差由140.24%降到9.02%；1~2 km区间后向散射系数相对误差由37.45%降到23.63%，2~5 km区间后向散射系数相对误差由29.15%降到21.45%，9.5~11.5 km相对误差由76.02%降到24.16%，表明激光雷达信号以及衍生的大气光学参数具有较好的一致性。

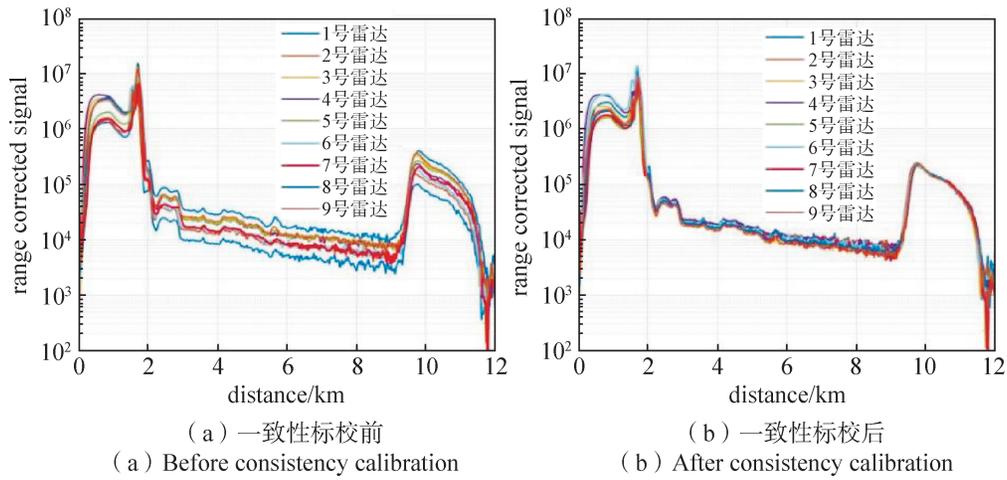


图 5 各雷达 532 nm 通道距离修正信号一致性比对

Fig. 5 Consistency of range correct signals in 532 nm channel of lidar

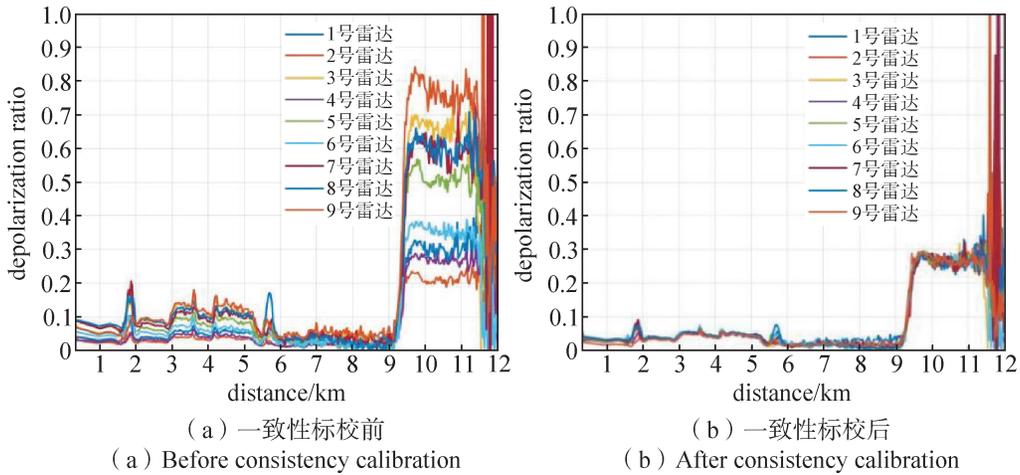


图 6 各雷达 532 nm 通道退偏比一致性比对

Fig. 6 Consistency of depolarization ratios in 532 nm channel of lidar

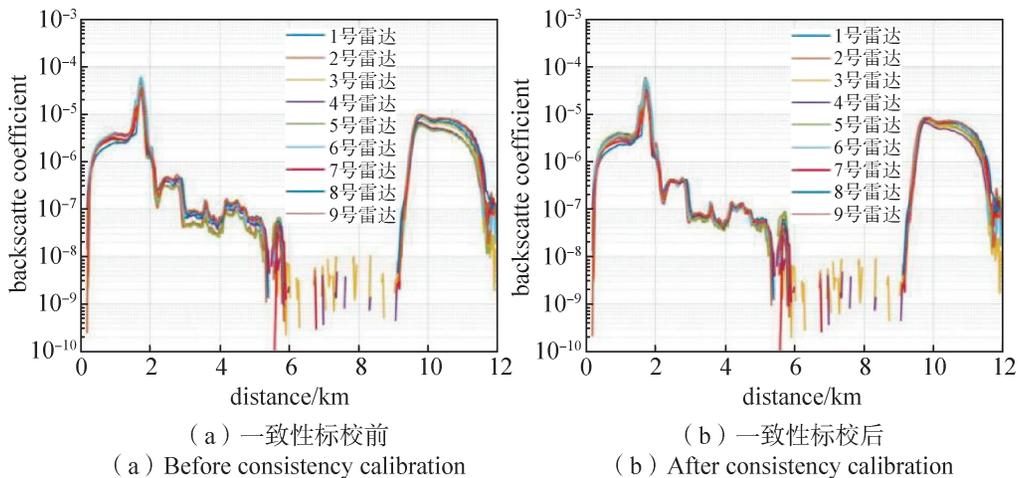


图 7 各雷达 532 nm 通道后向散射系数一致性比对

Fig. 7 Consistency of backscatter coefficient in 532 nm channel of lidar

表2 532 nm距离修正信号相对误差计算结果

Table 2 Calculation results from the relative error of the corrected signal in 532 nm channel

雷达编号	1 km~2 km		2 km~5 km		9.5 km~11.5 km	
	标定前	标定后	标定前	标定后	标定前	标定后
1号	64.89%	18.19%	37.61%	4.92%	46.83%	6.95%
2号	58.54%	19.49%	35.79%	8.90%	44.61%	10.81%
3号	57.01%	16.07%	38.57%	3.67%	34.02%	7.56%
4号	∥	∥	∥	∥	∥	∥
5号	43.32%	22.16%	34.25%	5.73%	33.08%	6.24%
6号	45.27%	20.81%	29.25%	5.38%	27.19%	7.85%
7号	59.78%	14.26%	24.98%	4.87%	32.92%	10.91%
8号	55.04%	14.39%	49.26%	3.43%	33.52%	7.47%
9号	54.51%	13.12%	31.55%	5.47%	35.51%	5.28%

表3 532 nm退偏比相对误差计算结果

Table 3 Calculation results from the relative error of depolarization ratio in 532 nm channel

雷达编号	1 km~2 km		2 km~5 km		9.5 km~11.5 km	
	标定前	标定后	标定前	标定后	标定前	标定后
1号	46.62%	18.33%	42.27%	5.55%	116.45%	9.02%
2号	41.43%	20.41%	51.18%	6.69%	120.02%	6.33%
3号	61.29%	12.10%	43.16%	3.25%	140.24%	4.88%
4号	∥	∥	∥	∥	∥	∥
5号	42.26%	20.68%	39.30%	4.02%	92.08%	5.56%
6号	40.33%	20.64%	55.28%	6.64%	103.72%	5.18%
7号	60.94%	17.70%	68.5%	5.29%	123.77%	6.18%
8号	69.68%	13.45%	71.24%	4.84%	125.55%	5.55%
9号	41.89%	11.63%	63.67%	2.81%	125.70%	3.14%

表4 532 nm后向散射信号相对误差计算结果

Table 4 Calculation results from the relative error of backscatter coefficient in 532 nm channel

雷达编号	1 km~2 km		2 km~5 km		9.5 km~11.5 km	
	标定前	标定后	标定前	标定后	标定前	标定后
1号	25.27%	21.40%	10.16%	9.77%	45.30%	9.39%
2号	37.45%	23.63%	27.40%	19.04%	9.45%	7.34%
3号	17.99%	11.56%	18.70%	5.08%	29.09%	4.38%
4号	∥	∥	∥	∥	∥	∥
5号	30.30%	23.37%	28.63%	12.44%	8.37%	6.40%
6号	31.38%	21.86%	17.96%	11.89%	65.62%	12.69%
7号	23.92%	17.98%	23.36%	12.36%	76.02%	24.16%
8号	36.68%	16.46%	29.15%	21.45%	69.22%	22.80%
9号	14.80%	14.42%	27.94%	13.02%	59.56%	13.26%

#### 4 结束语

一方面,国内大气激光雷达行业统一标准规

范尚未完全建立,加之国内不同系统探测体制、数据质量参差不齐;另一方面,由于光学系统精密性以及同样硬件参数装调所带来的误差,都难

以保证激光雷达系统之间数据的一致性, 因此造成对同一目标物探测结果不一致。而通过系统级设备自标定、一致性标定可最大程度保证数据质量。2022年3月16日于北京遥测技术研究所进行9台大气探测激光雷达一致性比对试验, 结果表明: 9台激光雷达信号以及衍生的大气光学参数一致性较好, 可大幅改善激光雷达观测数据一致性, 后续将在此基础上开展星地定标研究工作。

### 参考文献

- [1] 李峰, 林晶晶, 云杰, 等. 激光雷达组网观测济宁市大气污染变化特征[J]. 光谱学与光谱分析, 2022, 42(11): 3467-3475.  
LI Feng, LIN Jingjing, YUN Jie, et al. Analysis on variation characteristics of air pollution in Jining City based on Lidars networking observation[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2022, 42(11): 3467-3475.
- [2] 李路, 邢昆明, 赵明, 等. 探测气溶胶-水汽的拉曼-米散射激光雷达系统[J]. 红外与激光工程, 2023, 52(4): 161-171.  
LI Lu, XING Kunming, ZHAO Ming, et al. Raman-Mie scattering lidar system for observation of aerosol and water vapor in the atmospheric[J]. Infrared and Laser Engineering, 2023, 52(4): 161-171.
- [3] 狄慧鸽, 华灯鑫. 云探测中的激光雷达技术研究进展[J]. 光学学报, 2022, 42(6): 26-36.  
DI Huige, HUA Dengxin. Research progress of lidar in cloud detection[J]. Acta Optica Sinica, 2022, 42(6): 26-36.
- [4] 杜娟, 宋鹏程. 气溶胶激光雷达在大气环境监测中的应用[J]. 环境保护科学, 2021, 21(2): 107-112.  
DU Juan, SONG Pengcheng. Application of aerosol lidar in atmospheric environment monitoring[J]. Environmental Protection Science, 2021, 21(2): 107-112.
- [5] 陈玉宝, 王箫鹏, 步志超, 等. 超大城市试验气溶胶激光雷达标定及结果分析[J]. 激光技术, 2022, 46(4): 435-443.  
CHEN Yubao, WANG Xiaopeng, BU Zhichao, et al. Calibration and result analysis of aerosol LiDAR in megacity experiment[J]. Laser Technology, 2022, 46(4): 435-443.
- [6] 王天河, 孙梦仙, 黄建平. 中国利用星载激光雷达开展沙尘和污染研究的综述[J]. 大气科学学报, 2020, 43(1): 144-158.  
WANG Tianhe, SUN Mengxian, HUANG Jianping. Research review on dust and pollution using spaceborne lidar in China[J]. Transactions of Atmospheric Sciences, 2020, 43(1): 144-158.
- [7] 毛飞跃, 罗熙, 宋捷, 等. 中国星载气溶胶和云高光谱分辨率激光雷达的模拟和反演[J]. 中国科学: 地球科学, 2022, 52(4): 620-633.  
MAO Feiyue, LUO Xi, SONG Jie, et al. Simulation and retrieval for spaceborne aerosol and cloud high spectral resolution lidar of China[J]. Science China Earth Sciences, 2022, 65(3): 570-583.
- [8] 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.  
TIAN Xiaomin, LIU Dong, XU Jiwei, et al. Review on atmospheric detection lidar network and spaceborne lidar technology[J]. Journal of Atmospheric and Environmental, 2018, 13(6): 401-416.
- [9] PAPPALARDO G, WANDINGER U, MONA L, et al. EARLINET correlative measurements for CALIPSO: First intercomparison results[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 115: D00H19.
- [10] 汪自军, 张扬, 刘东, 等. 新型多波束陆海激光雷达探测卫星技术发展研究[J]. 红外与激光工程, 2021, 50(7): 158-168.  
WANG Zijun, ZHANG Yang, LIU Dong, et al. Research on the development of detection satellite technology in the novel multi-beam land and ocean lidar[J]. Infrared and Laser Engineering, 2021, 50(7): 158-168.
- [11] 刘东, 陈斯婕, 刘群, 等. 星载环境探测激光雷达及其关键技术[J]. 光学学报, 2022, 42(17): 11-37.  
LIU Dong, CHEN Sijie, LIU Qun, et al. Spaceborne environmental detection lidar and its key techniques[J]. Acta Optica Sinica, 2022, 42(17): 11-37.
- [12] 黄忠伟, 王雍恺, 闭建荣, 等. 气溶胶激光雷达的国内外研究进展与展望[J]. 遥感学报, 2022, 26(5): 834-851.  
HUANG Zhongwei, WANG Yongkai, BI Jianrong, et al. An overview of aerosol lidar: Progress and prospect[J]. National Remote Sensing Bulletin, 2022, 26(5): 834-851.
- [13] 郑朝阳. 地基激光雷达网数据质量控制方法的研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学.
- [14] 孙婷婷, 项衍, 罗宇涵, 等. 基于综合立体观测网的京津冀地区污染过程分析[J]. 环境科学研究, 2021, 34(1): 20-27.  
SUN Tingting, XIANG Yan, LUO Yuhan, et al. Pollution process in Beijing-Tianjin-Hebei and its surrounding areas based on comprehensive stereoscopic observation network[J]. Research of Environmental Sciences, 2021, 34(1): 20-27.
- [15] 项衍. 激光雷达区域组网数据的三维同化与综合分析

- 方法研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2018.
- [16] 潘超, 李凉海, 赵一鸣, 等. 多通道高计数率单光子计数系统的设计与实现[J]. 遥测遥控, 2022, 43(5): 89-96.  
PAN Chao, LI Lianghai, ZHAO Yiming, et al. Design and realization of multi-channel high count rate photon counting system[J]. Journal of Telemetry, Tracking and Command, 2022, 43(5): 89-96.
- [17] 赵艳, 潘超, 赵一鸣, 等. 光电倍增管寿命试验研究与系统设计[J]. 遥测遥控, 2021, 42(6): 107-112.  
ZHAO Yan, PAN Chao, ZHAO Yiming, et al. Research on life test and system design for PMT photomultiplier tube[J]. Journal of Telemetry, Tracking and Command, 2021, 42(6): 107-112.
- [18] 赵一鸣, 潘超, 王丽东, 等. 激光雷达探测河北望都气溶胶[J]. 遥测遥控, 2015, 36(4): 64-70.  
ZHAO Yiming, PAN Chao, WANG Lidong, et al. Aerosol monitoring by lidar at Wangdu, Hebei[J]. Journal of Telemetry, Tracking and Command, 2015, 36(4): 64-70.
- [19] 闫庆, 华灯鑫, 李仕春, 等. 微脉冲米散射激光雷达系统的产品化研发及实验观测研究[J]. 量子电子学报, 2013, 30(1): 123-128.  
YAN Qing, HUA Dengxin, LI Shichun, et al. Observation and productization of the micro-pulsed Mie scattering lidar system[J]. Chinese Journal of Quantum Electronics, 2013, 30(1): 123-128.
- [20] 张晋茹. 拉曼-米气溶胶激光雷达的标定技术研究[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2018.

#### [作者简介]

- 王丽东 1987年生, 硕士, 高级工程师。  
郭 畅 1994年生, 硕士, 工程师。  
赵一鸣 1983年生, 博士, 研究员。  
戴学兵 1987年生, 博士, 高级工程师。  
徐兆鹏 1992年生, 硕士, 工程师。  
胡志恒 1995年生, 硕士, 工程师。  
商雅楠 1984年生, 硕士, 工程师。  
潘 超 1981年生, 博士, 研究员。

(本文编辑: 傅 杰)