

DOI:10.16136/j.joel.2022.02.0378

基于REAL气溶胶激光雷达在站比对标定技术研究

王箫鹏^{1*}, 陈玉宝¹, 步志超¹, 李志刚², 周自忠³, 王宣⁴

(1. 中国气象局气象探测中心, 北京 100081; 2. 鲁东大学 山东 烟台 264000; 3. 浙江省大气探测技术保障中心, 浙江 杭州 310018; 4. 遥感信息工程学院 武汉大学 湖北 武汉 430072)

摘要: 2019年3月—11月,利用经过欧洲激光雷达校准中心认证的移动REAL标准气溶胶激光雷达,开展了迄今为止国内最大规模的激光雷达在站比对标定。本文首先介绍了一种组网激光雷达在站比对标定方法,然后将REAL雷达与北京、上海、广州3个城市相关站点的12部气溶胶激光雷达在532 nm波长下开展了首次在站比对标定。根据预先设定的指标对其中按照气象探测中心(meteorological observation center, MOC)要求完成软硬件标定的11部雷达进行了定量评估。结果表明11部雷达基本满足指标要求,其中9部雷达P/S通道2—5 km系统偏差(system deviation, SD)均在±20%以内,超过50%的被标雷达P通道0.5—2 km系统偏差基本满足±10%以内。通过在站比对标定技术可以有效识别P/S通道串扰、探测器饱和等问题,确定了超大城市试验中被标雷达可信数据的范围,为气溶胶激光雷达业务化定量应用提供了技术支撑。

关键词: 气溶胶激光雷达; 在站比对; 标定; 通道串扰**中图分类号:** TN958.98 **文献标识码:** A **文章编号:** 1005-0086(2022)02-133-08

Aerosol lidar intercomparison observation calibration at lidar stations based on REAL lidar

WANG Xiaopeng^{1*}, CHEN Yubao¹, BU Zhichao¹, LI Zhigang², ZHOU Zizong³, WANG Xuan⁴

(1. CMA Meteorological Observation Centre, Beijing 100081, China; 2. Ludong University, Yantai, Shandong 264000, China; 3. The Technical Supporting Center for Meteorological Detection of Zhejiang Province, Hangzhou, Zhejiang 310018, China; 4. School of Remote Sensing and Information Engineering, Wuhan University, Wuhan, Hubei 430072, China)

Abstract: From March to November 2019, the largest on-station comparison observation calibration (OCOC) in China was carried out so far, based on the mobile REAL standard aerosol lidar certified by the European lidar calibration center. In this paper, a method for OCOC is firstly introduced. Then, the first OCOC between REAL lidar and 12 aerosol lidars distributed in Beijing, Shanghai and Guangzhou were carried out separately at 532 nm wavelength. The 11 radars which were calibrated in advance according to method of hardware and software calibration established by the meteorological observation center (MOC) were quantitatively evaluated according to the preset quality criteria, and the results show that the 11 radars basically meet the requirements. The system deviation (SD) of 9 radars P/S channels within a range of 2—5 km was all in ±20%, and the SD of more than 50% of the calibrated radars P channels within a range of 0.5—2 km is basically in ±10%. The main problems are P/S channel crosstalk and detector saturation, etc. This work determines the reliable range of data of calibrated radars and provides support for operational quantitative application of aerosol lidar.

* E-mail: wxpdiscovey@163.com

收稿日期:2021-06-02 修订日期:2021-07-01

基金项目:重大自然灾害监测预警与防范专项(2017YFC1501701)资助项目

Key words: aerosol lidar; on-station comparison; calibration; channel crosstalk

1 引言

人类活动造成大气中气溶胶含量增加,而气溶胶对大气辐射、大气的声、光、电特性、大气化学、气候、天气、环境等影响,使它成为备受关注的重要大气成分^[1,2]。激光雷达由于其高时空分辨率、高灵敏度等独到的优势,被广泛用于气溶胶、云和风场等的观测和研究^[3,4]。国际上近些年来已经陆续建立了一些基于激光雷达探测大气气溶胶分布的观测网,如欧洲气溶胶研究激光雷达观测网(European Lidar Observatory Network for Aerosol Research, EARLINET)、美国微脉冲激光雷达网(Micro Pulse Lidar Network, MPLNET)和全球大气气溶胶激光雷达观测网(Global Aerosol Lidar Observation Network, GALION)^[5,6]。如何对气溶胶激光雷达回波信号进行准确定标,使得观测数据定量可比,是该类雷达在我国气象部门组网业务应用前必须解决的课题。

EARLINET由来自11个欧洲国家的19部欧洲激光雷达系统组成,建立了先进的激光雷达标定中心及较为严格的标定方法和流程^[7]。2016年中国气象局启动了超大城市垂直综合气象观测技术研究及试验(ultra-urban meteorological observation experiment, UMOE),气溶胶廓线观测是该试验5条重要廓线之一。为确保2019年参加试验雷达探测的大气特征参数廓线定量可比,气象探测中心(meteorological observation center, MOC)基于EARLINET先进标定技术,开展了我国气象部门应用的标定体系建设,取得了较好的效果^[8]。将待测激光雷达与标准雷达进行直接的相互比较,被认为是保证气溶胶激光雷达廓线质量的最佳方法^[7],因此本文设计了一种组网激光雷达数据在站比对方法作为MOC气溶胶激光雷达标定体系的重要部分,并在国内开展了迄今为止规模最大的激光雷达在站比对观测。本文主要介绍了2019年3月—11月在北京、广州、上海三地开展的针对12部在网气溶胶激光雷达的外场比对观测标定工作,进而确定长期在站运行的激光雷达系统存在的技术问题。

2 激光雷达系统

2.1 REAL 标准气溶胶激光雷达

REAL雷达是MOC和意大利那不勒斯大学合作研制的一种单波长、六通道标准气溶胶激光雷达,并与欧洲设在意大利Potenza的EARLINET气溶

胶激光雷达标定中心完成了比对标定和认证,REAL雷达主要参数指标如表1所示。图1为REAL雷达与Potenza雷达532 nm偏振P通道信号对比图,其中Molecular signal(MS)为采用美国1976标准大气模式计算的大气分子的回波信号(下同),图1表明2部雷达的一致性较好,1—5 km范围内系统偏差小于-2.1%,相对标准偏差小于5%,REAL雷达在低空对于强信号的探测能力明显高于Potenza标准气溶胶激光雷达,因此REAL可以作为量值传递的标准源,对国内参试雷达进行标定。

表1 REAL雷达主要参数指标

Tab. 1 Main parameters of REAL lidar

Parameter	Value
Wavelength/nm	532
Average power/W	≥2
Divergence full angle/mrad	0.1
Blind zone/m	≤200(Entire-overlapping)
Telescope aperture/mm	250
Detection range/km	0.2—25(cloudless)
Range resolution/m	15
Reception channel	P/S

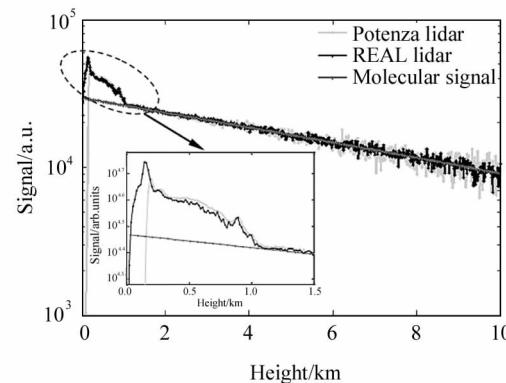


图1 REAL雷达与Potenza雷达532 nm偏振P通道信号对比图

Fig. 1 Comparison of polarization P channel signals between REAL and Potenza with 532 nm

2.2 被标气溶胶激光雷达

参与标定的气溶胶激光雷达共12部,北京10部、上海和广州各1部,分别来自国内外10个生产制造厂家,各系统在技术设计细节上有较大的差异,但均具有532 nm波长通道,表2给出了参与在站比对标定气溶胶激光器信息,激光雷达识别号(Code)可用于区别不同的比对地点,12部雷达均参与UMOE

用于提供所在区域上空气溶胶廓线。因超过一半的激光雷达系统在站飘观测时间超过一年,需利用移

动REAL雷达检验单部激光雷达系统的性能和准确性。

表2 参与在站比对标定气溶胶激光雷达信息

Tab. 2 Information of lidars participating in the intercomparison campaigns

Location of Lidar station	Code	Range resolution/m	Calibrated according to MOC	Overlap correction	Date/Month/day, hour minute
Haidian, Beijing	L01	15	Y	N	03/28, 1509-1703; 1910-1943
Baoshan, Shanghai	L02	15	Y	Y	07/30, 1211-1243; 2000-2032
Observatory, Beijing	L03	7.5	Y	Y	09/05, 1621-1654; 1951-2026
Observatory, Beijing	L04	3.75	Y	N	09/20, 1221-1257; 1901-1936
Miyun, Beijing	L05	15	Y	N	10/18, 1354-1450; 1818-1852
Pinggu, Beijing	L06	15	Y	N	10/19, 1522-1555; 2108-2138
Huairou, Beijing	L07	15	Y	Y	10/20, 1155-1225; 1844-1914
Tongzhou, Beijing	L08	15	Y	N	11/07, 1207-1243; 1852-1926
Xiayunling, Beijing	L09	15	Y	N	11/08, 1255-1329; 1827-1901
Yanqing, Beijing	L10	7.5	Y	N	11/09, 1250-1325; 1903-1923
Observatory, Beijing	L11	7.5	Y	N	11/10, 1259-1335
Guangzhou, Guangdong	L12	7.5	N	N	05/09, 1602-1825

3 在站比对标定方法与要求

MOC 建立的气溶胶激光雷达标定体系主要包括3部分:单部气溶胶激光雷达的硬件标定、软件算法标定及基于标准雷达的比对观测标定,其标定体系流程如图2所示。本文涉及的大部分被标雷达已

在2018年实现了单部雷达软硬件标定(见表2),因此本文重点描述第三项即基于标准雷达观测标定方法、指标计算和要求。探测近似相同体积的目标区域,被认为是保证气溶胶激光雷达精度的最佳方法^[7],为确保气溶胶激光雷达对比结果的准确性,标定比对应在同址(水平距离不大于500 m)、相同时间、相同大气环境条件、相同积分时长等条件下进行,天气状况涵盖晴天、多云、雾霾等,不包含雨天、阴天(云层底部低于800 m)等天气状况。待标定激光雷达与REAL雷达在相同波长下开展比对,由于被标雷达激光功率、光路设计、探测器效率等不同,各雷达信号统计可能会有较大不同^[9],为保证回波信号的信噪比,比对时采用充分累计时间平均以防止统计信号误差产生较大的偏差。

选取超过30 min的累计平均得出原始信号廓线,对其进行去背景、平滑、距离平方校正处理^[10],获得距离平方校正信号(range-corrected lidar signal, RCS),则两部雷达RCS平均值 \bar{P}_R 、平均偏差 ΔP 、标准差 σ 可描述为:

$$\bar{P}_R = \frac{\sum_{i=1}^n [P_R(z_i)]}{n}, \quad (1)$$

$$\Delta P = \frac{\sum_{i=1}^n [P_T(z_i) - P_R(z_i)]}{n}, \quad (2)$$

$$\sigma = \left\{ \frac{\sum_{i=1}^n [P_T(z_i) - P_R(z_i)]^2}{n-1} \right\}^{1/2}, \quad (3)$$

式中, z 为探测高度, n 为选定高度范围内的距离总库数, i 取值 $1 \sim n$, $P_R(z_i)$ 和 $P_T(z_i)$ 分别为REAL雷达

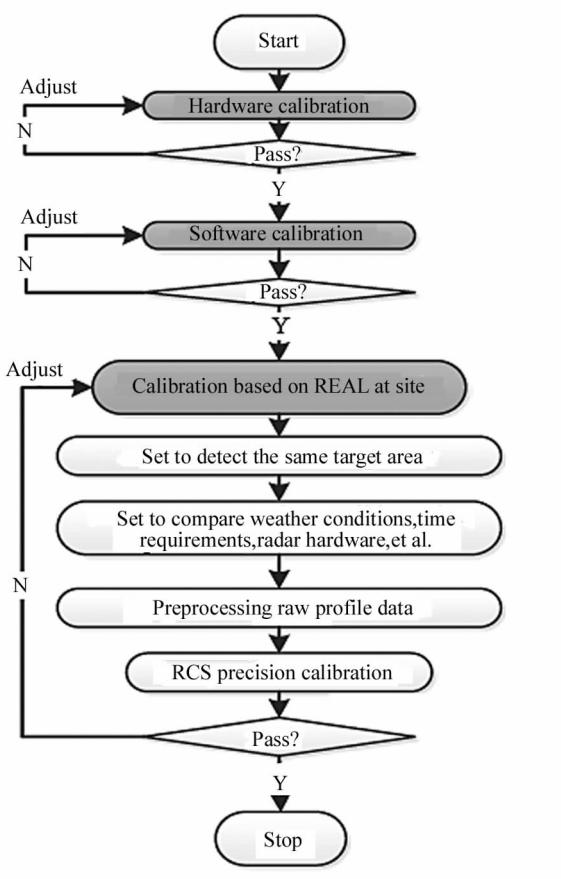


图2 MOC标定体系流程

Fig. 2 Flow chart of MOC calibration system

和被标雷达在 z_i 处的 RCS 值, 则系统偏差(system deviation, SD) R_{sd} 和相对标准偏差(relative standard deviation, RSD) R_{rsd} 可描述为:

$$R_{\text{sd}} = \frac{\Delta P}{\bar{P}_{\text{R}}} \times 100\%, R_{\text{rsd}} = \frac{\sigma}{\bar{P}_{\text{R}}} \times 100\%. \quad (4)$$

按照式(4)分别计算 0.5 km—2 km 和 2 km—5 km 高度范围内 R_{sd} 和 R_{rsd} , 主要技术指标要求如表 3 所示。

表 3 主要技术指标要求

Tab. 3 Main requirements of technical index

Height range/km	Value	
	$R_{\text{sd}}/\%$	$R_{\text{rsd}}/\%$
0.5—2 km	Absolute value $\leq 10\%$	$\leq 10\%$
2—5 km	$\leq 20\%$	$\leq 20\%$

4 标定和结果

在站标定前, 共 11 部雷达按照 MOC 标定要求进行了软硬件标定, 其中 2 部雷达完成了 overlap 自校正, 以使其 0.2—0.5 km 尽可能满足系统偏差小于 50% 指标要求, 详见表 2。使用移动 REAL 标准雷达依次完成了在站比对, 其中 8 部符合白天和晚上各比对一次, 整个比对期间共进行了 29 次比对观测, 除去降水、低层厚云等情况, 获得了 19 组(按次形成组数据)有效比对观测数据, 本文将对一些典型且具有代表性的结果进行详细讨论, 然后对整个在站对比标定情况进行统计分析。

4.1 REAL 与 L05 雷达比对

2019 年 10 月 18 日, 在密云上甸子基准站使用 REAL 雷达对已经过软硬件标定、在站运行超过 1 年的 L05 雷达进行了 2 时次在站比对标定。比对时间为白天 13:54—14:50、晚上 18:18—18:52, 图 3 为晚上 18:18—18:52 REAL 和 L05 雷达 RCS 的 THI(time-height indication)图, 时间分辨率分别为 68 s(REAL)、60 s(L05)。图 3(a)和 3(b)分别为 REAL 和 L05 雷达观测结果, 图中未对两部雷达 RCS 进行归一化处理, 但不影响两部雷达观测结果一致性分析, 可以看出该时次两部雷达云、气溶胶层及边界层等的观测一致性较好。

利用 18:18—18:52 比对数据进行两部雷达 P/S 通道一致性定量分析, 图 4 为 L05 雷达与 REAL 雷达在站比对结果, 归一化处理后在洁净大气处与大气分子曲线拟合较好。P 通道可以明显看出, L05 低空盲区约 0.5 km, REAL 盲区小于 0.2 km, 由于

L05 雷达未进行低空 overlap 区校正, 导致在二者 P 通道数据在第一个峰值之前有一定差异(见图 4(a)), 而且通过 5 km 以上数据能看出 REAL 雷达信噪比更高。表 4 为 L05 雷达与 REAL 雷达在站标定偏差计算结果, P/S 双通道系统偏差和相对标准偏差均满足指标要求, 尤其是 P 通道远优于指标要求, 最大值仅为 3.39%。但两部雷达观测的 P 和 S 通道数据均出现明显的非一致性, 尤其是在 5—7 km 存在云层区间, 说明 L05 雷达 P/S 隔离度较好, 为偏振激光雷达准确探测气溶胶粒子相态提供了基础保证^[11]。REAL 雷达 P/S 通道数据表明, 5—6.5 km

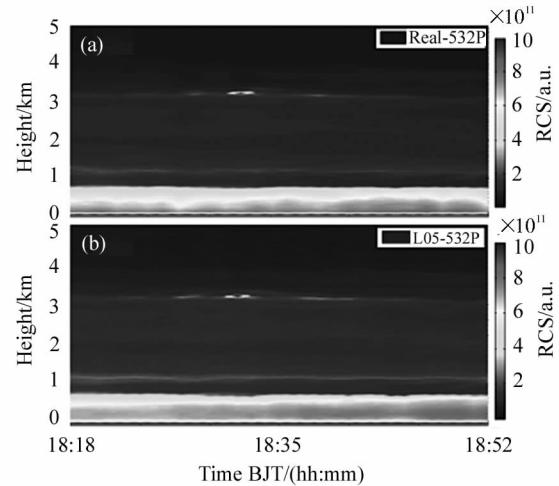


图 3 2019 年 10 月 18 日 REAL 和

L05 雷达 RCS 的 THI 图:

(a) REAL; (b) L05

Fig. 3 THI diagram of RCS detected by REAL and L05 on October 18, 2019: (a) REAL; (b) L05

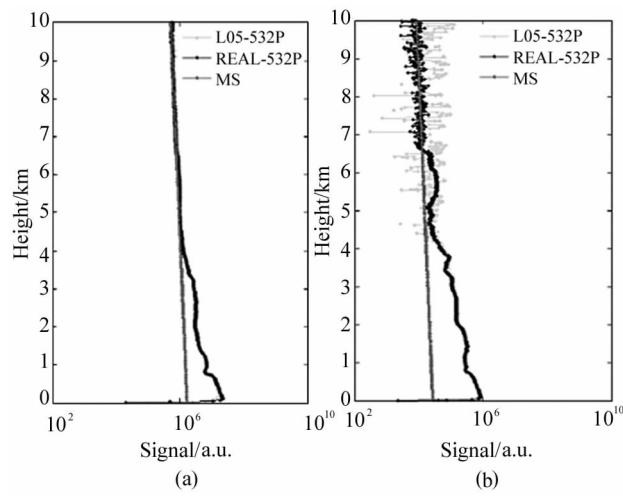


图 4 L05 雷达与 REAL 雷达在站比对结果:

(a) 两部雷达 P 通道比对; (b) 两部雷达 S 通道比对

Fig. 4 Comparison results of L05 and REAL at site:

(a) P channel; (b) S channel

表4 L05雷达与REAL雷达在站标定偏差
Tab. 4 Comparison deviation of P channel
between L05 and REAL at site

Date/ Month/day, hour minute	Channel	Height range /km	$R_{sd}/\%$	$R_{rsd}/\%$
10/18, 18:18-18:52	P	0.5—2	-2.51%	3.39%
		2—5	0.37%	1.55%
	S	0.5—2	-2.69%	3.38%
		2—5	-3.41%	19.7%

高度范围内,存在一层退偏比较大的气溶胶层,分析为冰晶或沙尘,但L05雷达高空信噪比低,几乎反映不出该层结构的存在。图4(b)显示,S通道2—5 km标准差达到18.7%,主要原因可能为信噪比降低引起偏差变大(白天时次相对标准偏差10.2%),此外,还可能由大气垂直结构不均匀引起,气溶胶剖面出现强梯度(18:30左右短暂出现云层),所采用的对两部雷达逐点计算偏差的方法也可能会导致较大偏差。综上,L05雷达在站运行性能较好,532 nm双通道观测数据质量可靠性高。

4.2 REAL与L01雷达比对

2019年3月28日首次使用REAL雷达对UMOE中海公园站L01三波长拉曼气溶胶激光雷达开展了2时次在站对比,L01雷达与REAL雷达在站标定偏差如图5所示。标定时间为白天15:11—15:47和晚上19:10—19:43。表5为上述雷达在站标定偏差。对于波长532 nm的发射信号,瑞利散射下分子的退偏比一般为0.36%—0.37%,而气溶胶的退偏比约4%—5%,图5中REAL信号正常。图5(a)可以得出白天两部雷达P通道低空一致性较好,系统偏差仅为3.39%,但L01雷达高空信噪比相对较弱。图5(b)表明S通道2 km以下一致性较好,但是2—3 km范围REAL雷达的P/S通道差别较大,L01雷达的P/S通道却几乎一致,说明L01雷达的P/S通道存在串扰。结合图5(c)和5(d)晚上比对结果更能发现,至少8 km以下均存在严重串扰,与REAL雷达标准差甚至达到81.77%,会严重影响L01雷达退偏比数据的定量应用,需进一步校准L01雷达系统以确保该雷达数据精度和可用性。在站比对中暴露出来的此类问题,目前只能通过在站比对才能发现。

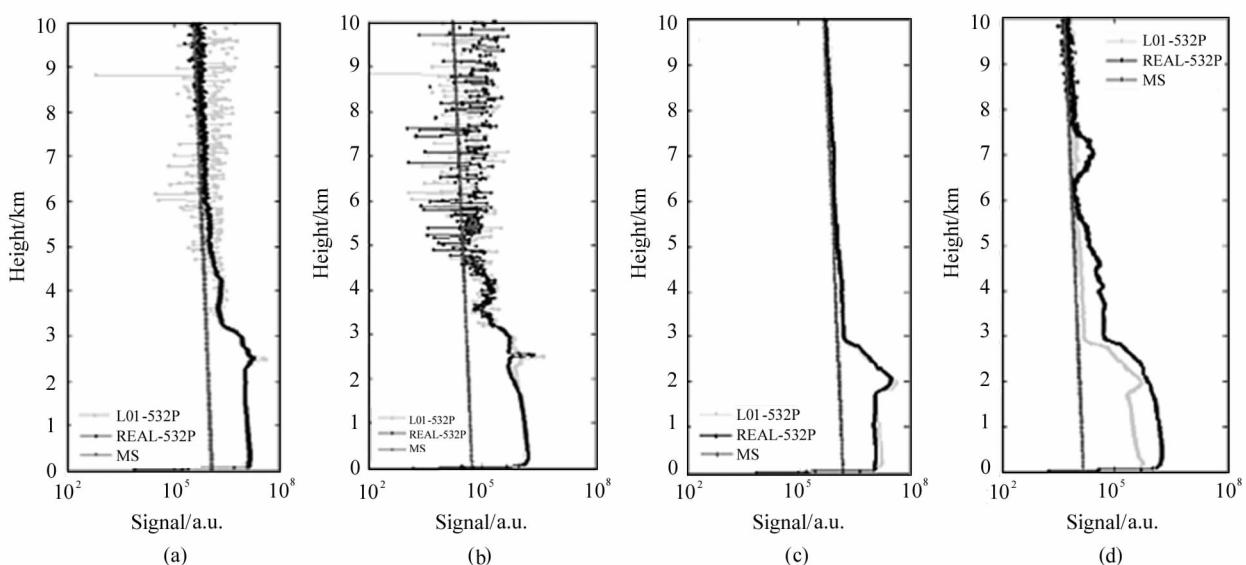


图5 L01雷达与REAL雷达比对结果:(a) 白天P通道比对;(b) 白天S通道比对;
(c) 晚上P通道比对;(d) 晚上S通道比对

Fig. 5 Comparison results of L01 and REAL:(a) P channel in the daytime;
(b) S channel in the daytime; (c) P channel at night; (d) S channel at night

表 5 L01 雷达与 REAL 雷达在站标定偏差

Tab. 5 Comparison deviation between L01 and REAL at site

Date/ Month/day, hour minute	Channel	Height range/km	$R_{sd}/\%$	$R_{rsd}/\%$
03/28, 1510-1542	P	0.5—2	3.39%	4.19%
		2—5	6.25%	42.33%
	S	0.5—2	-4.17%	10.64%
		2—5	39.46%	78.32%
03/28, 1910-1945	P	0.5—2	26.86%	36.84%
		2—5	-4.03%	27.41%
	S	0.5—2	-66.24%	69.93%
		2—5	-49.36%	81.77%

4.3 REAL 与 L12、L02 雷达比对

2019 年 5 月 9 日下午 16:02—16:40 在广州气象局站 REAL 雷达与 L12 和 L02 两部雷达的 P 通道在站比对,上述雷达在站比对标定结果,如图 6 所示。可以得出低空大气不均匀且高低空均存在云层。通过廓线比对发现,4—7 km 高度范围内(虚线圈区域),REAL 雷达与大气分子曲线拟合较好,但 L12 雷达回波信号明显低于分子曲线,说明 L12 雷达的 P 通道存在回波信号明显饱和现象。产生饱和的主要原因是对于对流层大气探测时,激光雷达信号动态范围较大,尤其是低空信号过强,将超出探测器的单脉冲线性输出能力,产生非线性测量误差^[12,13],但 REAL 雷达采用高低空分离探测技术,线

性动态范围大,不易出现饱和。问题解决时,因光子计数限制导致信号饱和,进行死时间校正后即可。输出端阳极饱和,需改变探测器电路设计。光电阴极饱和,需减少接收光信号强度,适当增加衰减片即可解决^[14]。在站比对时可首先尝试增加衰减片,若仍存在饱和现象,则应及时反馈相关厂家解决。若日常严格按照图 3 要求进行软硬件标定,无 REAL 雷达情况下也会发现此类问题。

REAL 雷达通过采用小口径次镜和低 F 数设计^[15],大大降低了激光雷达低空盲区范围,overlap 区小于 0.2 km,因此可以用其检验各在站雷达 overlap 自校正是否准确。图 6(b)和图 6(c)依为 2019 年 7 月 30 日 20:00—20:32 在上海宝山站 REAL 雷达和 L02 雷达 overlap 自校正前后 0—4 km 高度范围内 P 通道探测比对情况,表 6 为 L02 雷达与 REAL 雷达的 P 通道在站标定偏差。比对发现,L02 雷达 overlap 区接近 1.4 km,远大于 REAL 雷达的 0.2 km,且图 6(c)显示 L02 雷达 0.5—1 km 校正得较好,系统偏差仅有 3.93%,但 0.2—0.5 km 的校正明显有问题(虚线圈区域),系统偏差绝对值达到 23.07%,0.2 km 以下区域也未正确校正,说明 L02 雷达在 0.5 km 以下 overlap 曲线存在问题。因此,可以利用 REAL 雷达优异的低空探测能力计算出 L02 的 overlap 曲线,以提高其低空探测能力。

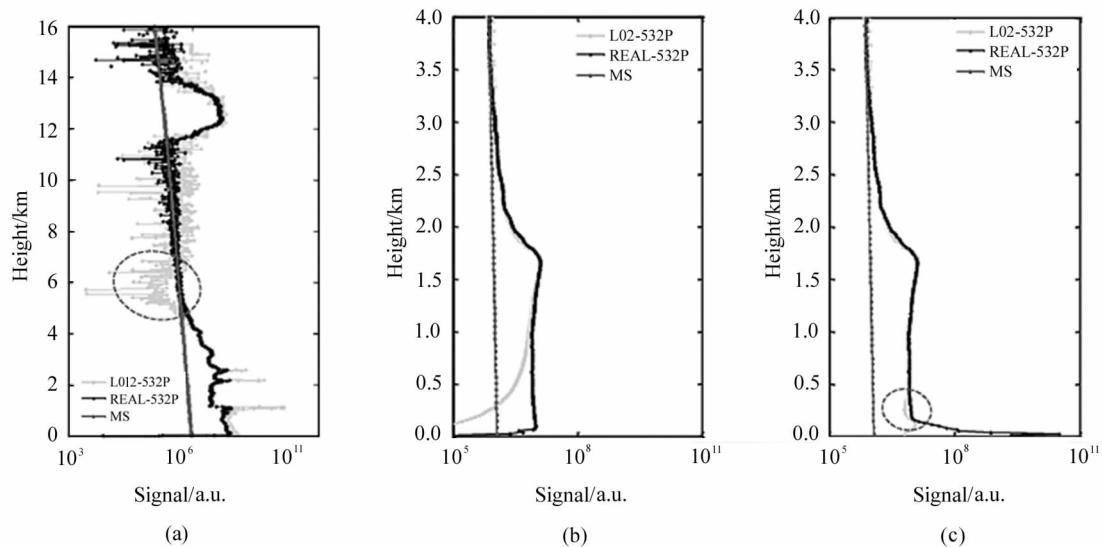


图 6 REAL 雷达分别与 L012 雷达、L02 雷达在站比对标定结果:(a) L012; (b),(c) L02

Fig. 6 Comparison of calibration results between REAL radar and L012 radar and L02 radar at sites respectively: (a) L012; (b),(c) L02

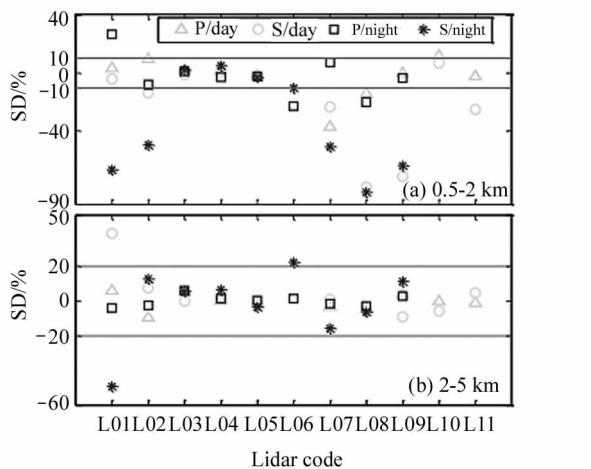
表6 L02雷达与REAL雷达P通道在站标定偏差

Tab. 6 Comparison deviation of P channel between L02 and REAL at site

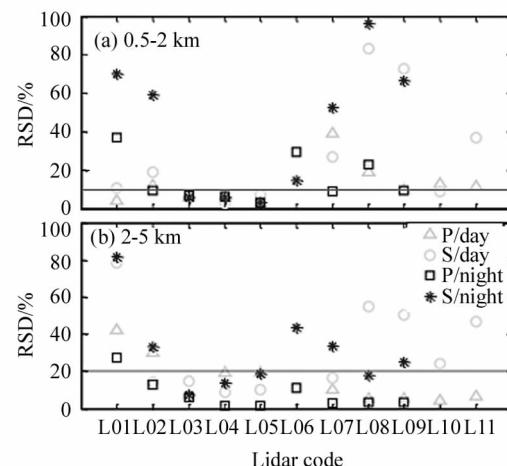
Date/ Month/day, hour minute	Overlap correction	Height range/km	$R_{sd}/\%$	$R_{rsd}/\%$
07/30,2000-2032	N	0.2—0.5	80.07%	18.18%
	N	0.5—1	35.16%	37.3%
	Y	0.2—0.5	23.07%	26.9%
		0.5—1	3.93%	4.02%

4.4 统计分析

由于12部雷达中只有L12雷达未按照MOC要求提前软硬件标定,考虑质量控制标准,L12雷达不参与统计。将REAL雷达的P/S通道分别和被标雷达的P/S通道同步观测数据进行系统偏差和相对标准偏差计算和检验,图7和图8分别为0.5—5 km上述雷达在站比对 R_{sd} 和 R_{rsd} 分布。可以得出,不同时间、不同天气的条件下,11部雷达基本满足指标要求,尤其是图7(b)中显示2—5 km的系统偏差有9部雷达测试的P/S通道均在±20%指标范围内,超过50%的被标雷达的P通道0.5—2 km也基本满足表3的苛刻指标±10%。由于REAL雷达经过严格的overlap校正,但大部分被标雷达没有校正,0.5 km的高度可能仍在被标雷达发射与接收的非完全重叠区,是导致至少有3部(L01/L06/L07)雷达0.5—2 km系统偏差较大的原因之一。图7和图8显示5部雷达的P通道0.5—5 km偏差变化范围明显小于S通道,说明其P通道一致性明显好于S通道,即约45%的被标雷达存在双通道串扰问题。图7

图7 REAL雷达与11部雷达在站比对 R_{sd} 分布:

(a) 0.5—2 km; (b) 2—5 km

Fig. 7 Distribution of R_{sd} between REAL and 11 operating lidar at site:(a) 0.5—2 km; (b) 2—5 km图8 REAL雷达与11部雷达在站比对 R_{rsd} 分布:

(a) 0.5—2 km; (b) 2—5 km

Fig. 8 Distribution of R_{rsd} between REAL and 11 operating lidar at site:(a) 0.5—2km; (b) 2—5 km

(a)和图8(a)显示2部雷达(L01/L07)的P通道白天和晚上偏差差别较大,除上述阐述的气溶胶剖面强梯度变化,还可能与雷达系统自身热稳定性控制有限有关。标定中也发现了2部雷达存在信号饱和、1部雷达存在电子噪声问题,此类问题可通过及时做好日常硬件标定发现解决。

5 结 论

利用MOC研制的移动REAL标准激光雷达,对UMOE期间在站运行的12台气溶胶激光雷达进行了在站比对标定。REAL雷达观测结果表明,REAL雷达的P/S双通道在已有比对天气条件下均保持了高信噪比,在洁净大气区间与分子曲线拟合较好且低空探测能力优异,证明可以作为性能稳定的标准雷达。与11部雷达比对结果表明,经过提前软硬件标定过的11部雷达基本满足指标要求,尤其是有9部雷达的P/S通道2—5 km的系统偏差均在±20%指标范围内,超过50%的被标雷达的P通道0.5—2 km也基本在±10%指标以内,若考虑overlap未校准引入的误差,则个别雷达0.5—1.5 km的偏差可能会进一步降低。标定偏差来源主要为P/S通道串扰(约占45%)、探测器饱和、overlap自校正偏差或可能的系统热不稳定等问题。为了减少非雷达系统造成的偏差,可以利用REAL雷达对在站雷达overlap曲线进行检验和校正,以提高低空数据一致性。标定时应该尽可能涵盖多种天气条件以检验被标雷达系统的稳定性及降低气溶胶强梯度引入的

误差。比对中发现的探测器饱和和电子噪声问题可以通过自身硬件标定发现和解决,因此激光雷达在日常运行过程中,应及时进行定标检查以确保数据质量满足要求。

参考文献:

- [1] MOORE R H,WIGGINS E B,AHERN A T,et al. Sizing response of the ultra-high sensitivity aerosol size spectrometer (UHSAS) and laser aerosol spectrometer (LAS) to changes in submicron aerosol composition and refractive index[J]. Atmospheric Measurement Techniques, 2021, 14(6):4517-4542.
- [2] KLEINMAN L I,III A,ADACHI K,et al. Rapid evolution of aerosol particles and their optical properties downwind of wildfires in the western US[J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2020, 20(21):13319-13341.
- [3] CHEN C,SONG X Q,YAN B D,et al. Case study of tropopause cirrus observed with lidar during 2011 spring in Beijing[J]. Journal of Optoelectronics · Laser, 2012, 23 (11):2142-2148.
陈超,宋小全,闫宝东等.北京春季一次对流层顶卷云的激光雷达观测研究[J].光电子·激光,2012,23(11):2142-2148.
- [4] DONG X,HU Y H,XU S L,et al. Echoing characteristics of coherent lidar in different aerosol environments[J]. Acta Optica Sinica, 2018, 38(1):0101001.
董晓,胡以华,徐世龙,等.不同气溶胶环境中相干激光雷达回波特性[J].光学学报,2018,38(1):0101001.
- [5] LOLLI S,L D' ADDERIO,CAMPBELL J,et al. Vertically resolved precipitation intensity retrieved through a synergy between the ground-based NASA MPLNET lidar network measurements,surface disdrometer datasets and an analytical model solution[J]. Remote Sensing, 2018, 10(7):2-11.
- [6] VIEZEE W,COLLIS R T. Lidar observations of tropospheric aerosols[J]. Atmospheric Environment, 1972, 6 (11):869-869.
- [7] MATTHAIS V ,FREUDENTHALER V ,AMODEO A ,et al . Aerosol lidar intercomparison in the framework of the EARLINET project. 1. Instruments[J]. Applied Optics, 2004,43(4):961-76.
- [8] BU Z C,WANG X,WANG Y,et al. Comparison and analysis of aerosol lidar network in mega city of Beijing using real lidar[C]//2019 International Conference on Meteorology Observations (ICMO), Dec. 28-31, 2019, Chengdu, China. New York:IEEE, 2019,978:1-3.
- [9] BOCKMANN C,WANDINGER U,ANSMANN A,et al. Aerosol lidar intercomparison in the framework of the EARLINET project. 2. Aerosol backscatter algorithms[J]. Applied Optics, 2004,43(4):977-89.
- [10] WANG X P. Automated algorithm for cloud parameter retrieval using Lidar data and its applied research[D]. Qingdao:Ocean university of China,2014:16-21.
王箫鹏.基于激光雷达数据自动反演云参数算法及应用研究[D].青岛:中国海洋大学,2014:16-21.
- [11] SCHOTLAND R M,SASSEN K,STONE R. Observations by lidar of linear depolarization ratios for hydrometeors [J]. Journal of Applied Meteorology, 1971, 10(5):1011-1017.
- [12] INGLE J D,CROUCH S R. Pulse overlap effects on linearity and signal-to-noise ratio in photon counting systems [J]. Analytical Chemistry, 1972, 44(4):777-84.
- [13] OMOTE K. Dead-time effects in photon counting distributions[J]. Nuclear Inst & Methods in Physics Research A, 1990, 293(3):582-588.
- [14] DONOVAN D P,WHITEWAY J A,CARSWELL A I. Correction for nonlinear photon-counting effects in lidar systems[J]. Applied Optics, 1993, 32(33):6742-6753.
- [15] PAN J X,XIE H B,MA J,et al. Design of small F-number receiving optical system for laser ranging[J]. Journal of Applied Optics, 2020, 41(1):18.
潘俊旭,谢洪波,马骏,等.用于激光测距的小F数接收光学系统设计[J].应用光学,2020,41(1):18.

作者简介:

王箫鹏 (1987—),男,硕士,工程师,主要从事激光雷达及天气雷达标定技术方面的研究。