

DOI: 10.13382/j.jemi.B2508143

地杂波反射率因子的天气雷达在线标校方法*

雷永恒^{1,2,3} 王黎明^{2,4,5} 杨亭¹ 傅一原¹ 刘宜萱¹ 叶飞¹

(1. 长沙气象雷达标校中心 长沙 410207; 2. 气象防灾减灾湖南省重点实验室 长沙 410021;

3. 中国气象局高影响天气(专项)重点开放实验室 长沙 410021; 4. 湖南省气象技术装备中心 长沙 410007;

5. 长沙国家综合气象观测试验基地 长沙 410207)

摘要:提出了一种改进的基于地杂波反射率因子天气雷达在线标校方法,旨在及时发现并纠正由于雷达硬件故障或性能退化导致的反射率因子测量误差偏移,提高降水定量估测的准确性。利用 Gabella 天气雷达杂波识别算法,对未滤波的反射率因子数据进行地杂波标记,在此基础上,通过重新采样获得固定维度的地杂波数据矩阵,统计地杂波的出现频次,计算地杂波数据的累计概率密度函数,并选取其 95% 分布对应的反射率因子值作为监测值,以识别稳定的地杂波数据;再利用金属球标校方法得到地杂波反射率因子的基值,最终通过监测值与基值的差值计算雷达的相对校准值。并进行了地杂波数据选取范围、去距离订正以及大范围降水条件下的敏感性试验,优化了筛选阈值,显著提高了雷达系统偏差在线标校的灵敏度和可靠性。长沙莲花山 CINRAD/SA-D 型天气雷达的试验结果表明,2024 年 3 月 28 日,在大范围降水条件下,雷达逐小时相对校准值平均为 0.22 dB,标准偏差为 0.76 dB;3 月逐日相对校准值标准差为 0.75 dB,并在 3 月 8 日~9 日有效监测到雷达标定常数变化约 2 dB;9 月 11 日,金属球定点扫描获得的地杂波反射率因子基值与理论值对比,雷达系统偏差为-0.13 dB,标准差为 0.26 dB。该方法能够有效提升天气雷达系统偏差的在线监测灵敏度和可靠性,为天气雷达的在线标校提供了可行的技术手段。

关键词: 天气雷达;地杂波;反射率因子;在线标校

中图分类号: TN959.4;P412.25

文献标识码: A

国家标准学科分类代码: 170.1520

Research on online calibration method of weather radar based on ground clutter reflectivity

Lei Yongheng^{1,2,3} Wang Liming^{2,4,5} Yang Ting¹ Fu Yiyuan¹ Liu Yixuan¹ Ye Fei¹

(1. Changsha Meteorological Radar Calibration Center, Changsha 410207, China; 2. Key Laboratory of Hunan Meteorological

Disaster and Mitigation, Changsha 410021, China; 3. Laboratory of High Impact Weather(special), China Meteorological

Administration, Changsha 410021, China; 4. Meteorological technology and equipment center of Hunan, Changsha 410007, China;

5. Changsha National Comprehensive Meteorological Observation and Test Base, Changsha 410207, China)

Abstract: An improved online calibration method for weather radar based on ground clutter reflectivity has been proposed, aiming to promptly detect and correct measurement errors in reflectivity caused by radar hardware failures or performance degradation, thereby enhancing the accuracy of quantitative precipitation estimation. Utilizing the Gabella weather radar clutter identification algorithm, the unfiltered reflectivity data is labeled for ground clutter. Based on this, a fixed-dimensional ground clutter data matrix is obtained through resampling, and the frequency of ground clutter occurrence is statistically analyzed. The cumulative probability density function of the ground clutter data is calculated, and the reflectivity value corresponding to its 95% distribution is selected as the monitoring value to identify stable ground clutter data. The baseline value of the ground clutter reflectivity is then obtained using the metal sphere calibration method. Finally, the relative calibration adjustment value of the radar is calculated by the difference between the monitoring value and the baseline value. Sensitivity tests were conducted on the selection range of ground clutter data, range correction, and large-scale

收稿日期: 2025-01-26 Received Date: 2025-01-26

* 基金项目: 中国气象局“天气雷达标校技术”青年创新团队(CMA2024QN12)、国家自然科学基金项目课题(42075001)、湖南省气象局创新发展专项课题(CXFZ2024-ZDZX01, CXFZ2024-FZZX33)、内蒙古气象局科技创新项目(nmqxkjcx202431)资助

precipitation conditions, optimizing the screening threshold and significantly improving the sensitivity and reliability of online radar system bias calibration. Experimental results from the CINRAD/SA-D weather radar at Changsha Lianhuashan showed that on March 28, 2024, under large-scale precipitation conditions, the average hourly relative calibration adjustment value of the radar was 0.22 dB, with a standard deviation of 0.76 dB. The daily relative calibration adjustment value standard deviation in March was 0.75 dB, and a change in radar calibration constant of approximately 2 dB was effectively monitored from March 8 to 9. On September 11, the ground clutter reflectivity baseline value obtained from the metal sphere fixed-point scan was compared with the theoretical value, revealing a radar system bias of -0.13 dB and a standard deviation of 0.26 dB. This method effectively enhances the sensitivity and reliability of online monitoring of weather radar system bias, providing a feasible technical approach for the online calibration of weather radar.

Keywords: weather radar; ground clutter; reflectivity; online calibration

0 引言

随着全球气候变化和极端天气事件的频繁发生,准确监测和预测降水变得尤为重要。天气雷达作为一种重要气象探测设备,能够提供连续、高分辨率的降水监测数据。反射率因子可靠性与准确性对于定量降雨估计、灾害性天气监测和预警以及数值天气模型资料同化起到至关重要的作用^[1]。然而,天气雷达测量准确性受频率漂移,速调管和接收机滤波器失谐退化,以及温度、湿度等多种因素影响,探测的反射率因子经常出现校准误差,因此,天气雷达实时在线校准对生成高质量的数据至关重要,特别在定量降雨估测中。

在线校准一般通过与其他设备相互比对或利用稳定的自然目标物监测来实现,不影响雷达正常运行。早期的相互校准多利用相邻雷达重叠区域的反射率因子对比^[2],然而实际业务中常受制于探测区域非连续覆盖以及需要存在降水条件,造成可用比对数据不足。除地基雷达相互比对外,可利用 TRMM (tropical rainfall measuring mission) 和 GPM (global precipitation measurement) 星载降水雷达与地基开展一致性比对^[3],但该方法对时空同步性要求高,难以满足实时监测需求^[4]。自然目标物校准方法通常利用太阳或地杂波的稳定特性进行校准验证,为业务系统提供了在线实时监测可能^[5]。太阳校准法通过分析太阳作为天然射电源的射电信号来实现接收链灵敏度和天线指向的校验^[6-7],但该方法需要累积数天的扫描数据以确保统计显著性,且对太阳活动变化敏感^[8-10],国内在新一代天气雷达开展了太阳法对回波强度和天线增益标校探究试验^[11-12]。Gabella 等^[13]提出采用空间邻近性滤波和紧凑性检验识别算法识别地杂波,地杂波校准技术由 Rinehart^[14]于 1978 年提出基本理论,后经 Vaccarone 等^[15-16]完善为相对校准调整(RCA)方法,通过统计地杂波回波分布特征实现雷达系统偏差监测。Wolff 等^[17]指出雷达相对校准值(relative calibration adjustment, RCA)方法不确定度在 0.5~1 dB,而 Hunzinger 等^[18]在此基础上提出的 eRCA 技术通过时序稳定性筛选,有效提升了 Ka 波段高频雷达

的校准鲁棒性。在复杂业务场景下构建包括地杂波多源信息的综合监测框架已成为研究热点。Vaccarone 等^[15]提出的四维联合方案(自洽相关+相邻雷达互校验+地杂波+太阳信号)在意大利 C 波段雷达网络中实现了约 2 dB 的系统偏差漂移自动检测。Lee 等^[19]提出融合地杂波特征提取、相邻雷达对比及自洽相关分析的业务化框架,验证了多源业务框架的可靠性。

利用地杂波能够对雷达反射率因子实时全链路校准,但依赖于地杂波的识别算法与高稳定地杂波图的生成,以及地杂波反射率因子基值的精确性;另外,中国天气雷达技术体制与其他国家存在一定的差异,以 CINRAD/SA-D 型为代表的中国新一代天气雷达网采用固定脉冲积累的信号处理方式,扫描方位起始位置随机,可能导致每次扫描采样存储的地物不同,需要进行重采样处理。此外,雷达气象方程中的距离订正项和地杂波样本的筛选方法,可能影响到雷达接收信号特征统计的灵敏性。

本文在 Gabella 地杂波识别算法的基础上,结合中国新一代天气雷达信号处理特点,统计地杂波在连续时间段出现的频次来得到固定维度的稳定地杂波标记。计算稳定地杂波数据的累计概率密度函数(cumulative probability density function, CDF),并选取 CDF 的 95% 分布对应的反射率因子值作为监测值,辅以金属球标校方法来确定地杂波反射率因子基值,得到 RCA,最后分析地杂波 RCA 的选取范围、去距离订正项的敏感性来调整筛选阈值,得到灵敏度和可靠性高的雷达系统偏差在线标校方法。

1 设备

本文采用长沙莲花山 CINRAD/SA-D 双极化天气雷达,如图 1 所示,其技术参数如表 1 所示,所有扫描数据均记录了未滤波反射率因子 dBT 数据,支持配置多种扫描模式,在开展地杂波反射率因子在线标校中,选取其常用的 VCP21D 扫描策略 0.5° 仰角数据,该扫描策略每 6 min 进行一次由 9 个仰角(最低仰角为 0.5°,最高仰角为 19.5°)组成的三维观测,其中在 0.5° 和 1.5° 两个仰角

分别进行两次扫描,获得最大探测距离和最大探测速度。本文分析数据来源该天气雷达 2024 年 2 月至 3 月的未滤波 dBT 观测数据,保留了原始地杂波信号,观测时间统一采用 UTC 时间。

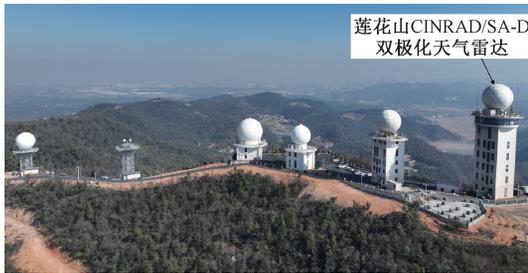


图 1 长沙莲花山 CINRAD/SA-D 双极化天气雷达实景 (拍摄于 2025 年 1 月)

Fig. 1 Realistic image of CINRAD/SA-D dual polarization weather radar in Lianhua Mountain, Changsha (taken in January 2025)

表 1 长沙莲花山天气雷达技术参数

Table 1 Technical parameters of Changsha Lianhua Mountain weather radar

参数名称	参数值
纬度/(°)	28. 13
经度/(°)	112. 79
海拔高度/m	359. 3
频率/MHz	2845
发射峰值功率/kW	705
天线直径/m	8. 51
天线增益/dB	45. 23
方位波束宽度/(°)	0. 91
俯仰波束宽度/(°)	0. 87
脉冲宽度/ μ s	0. 42/0. 83/1. 57/4. 7
重复频率/Hz	322~1 300/300~450
接收机最小可测功率/dBm	-111. 75@ 1. 57us
距离分辨率/m	62. 5/125/250
极化方式	双极化
扫描类型	PPI/RHI/VOL
最大探测距离/km	460

2 标校方法

2.1 地杂波识别

根据降水回波的空间连续性远比地面杂波大,残余杂波和地面杂波相对于降水回波具有不同的面积与周长比特性,运用 Gabella 提出空间邻近性滤波和紧凑型检验识别算法将地杂波从气象回波、非稳定性地杂波和异常传播回波中识别出来。

1) 空间邻近性滤波采用 5×5 大小的滑动窗口,当中心库的反射率因子数值与其 5×5 窗口邻域的差异低于阈

值 tr_1 的个数小于设定的数量 np 时,则认为是非气象回波。

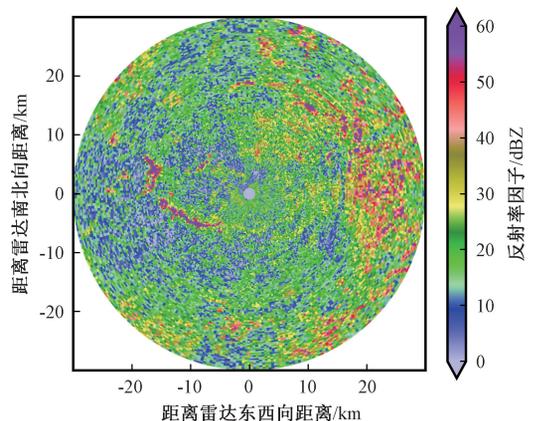
2) 非零或非空的反射率数据采用紧凑型检验识别算法,中心库接触的 8 个可能方向(包括对角线方向)中的任何一个,则分组到同一个组,每组中有效库的总数与其边界的库数比值低于 tr_2 ,则被识别为非气象回波。

3) 满足空间邻近性或紧凑型检验算法识别的非气象回波,均标识为地杂波。本文采用 Gabella 推荐的阈值,其中 tr_1 为 6 dB, np 为 6, tr_2 为 1.3。

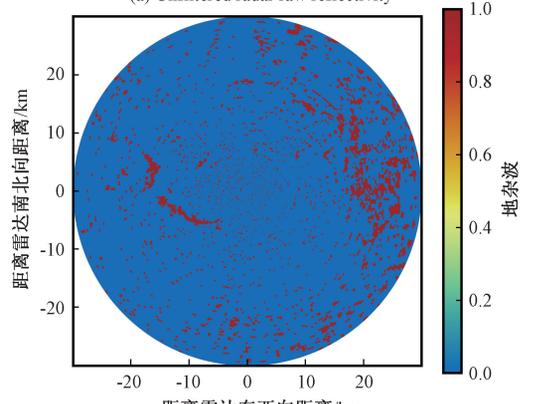
图 2(a) 为长沙莲花山雷达 2024 年 3 月 28 日 15:18 时 0.5° 仰角 30 km 范围内混杂降水的回波图,图 2(b) 为算法标识出的地杂波,可见算法能较好地标记出主要的地杂波,但可能混杂了大量非稳定性地杂波和异常传播回波。图 2(c) 为标识的地杂波反射率因子 PPI 图,图 2(d) 为去掉标识地杂波的天气回波图,可见天气回波空间结构、尺度与实际分布更合理,识别出来的地杂波和孤立点剔除效果明显。

2.2 雷达数据重采样

不同于使用 VISALA RVP 系列处理器(提供包括角度覆盖同步技术和相同脉冲积累数两种方式)的美国 WSR-88D 雷达^[20],以 CINRAD/SA-D 型为代表的中国新



(a) 未滤波雷达原始反射率因子
(a) Unfiltered radar raw reflectivity



(b) 地杂波标记结果
(b) Ground clutter marking results

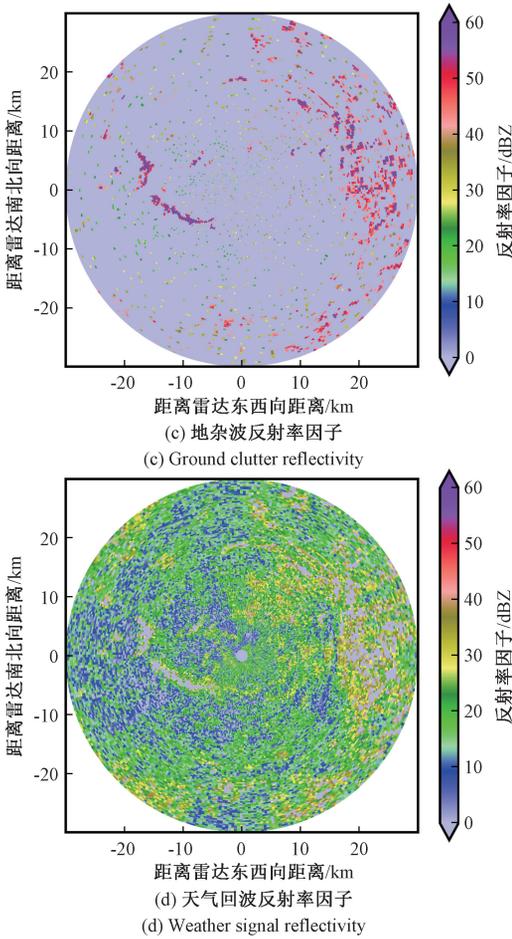


图 2 长沙莲花山雷达 0.5° 仰角地杂波与天气回波标识 PPI 图(2024 年 3 月 28 日 15:18 时)

Fig. 2 PPI map of ground clutter and weather echo identification for Changsha radar at 0.5° elevation angle (15:18, March 28, 2024)

一代天气雷达网,采用固定脉冲积累信号处理方式,导致雷达起始扫描方位不固定,通常方位径向个数>360,但<400,引起雷达反射率因子矩阵大小和索引对应的方位不固定,直接统计分析原始反射率因子,难以得到相同的地杂波数据,需要对反射率因子重采样。通过重采样,将原有数据对应到 0.1° 的方位间隔,3 600 个固定方位的新反射率因子矩阵中。将每个时次生成的重采样后的反射率因子数组进行逐小时累积和平均,得到 1 h 的未滤波反射率因子地物匹配数据。以此方法,可生成逐日未滤波反射率因子地物匹配数据。图 3(a)和(b)分别为 3 600 个径向、360 个径向单个时次雷达体扫数据得到的地杂波反射率因子 PPI 图,可见,以 0.1° 精度重采样数据,采用 3 600 个固定径向能够得到更完整的地杂波数据,而 360 个固定径向丢失了较多的地杂波数据。

2.3 地杂波频次统计

选择雷达一定距离范围内无降水条件下连续 24 h

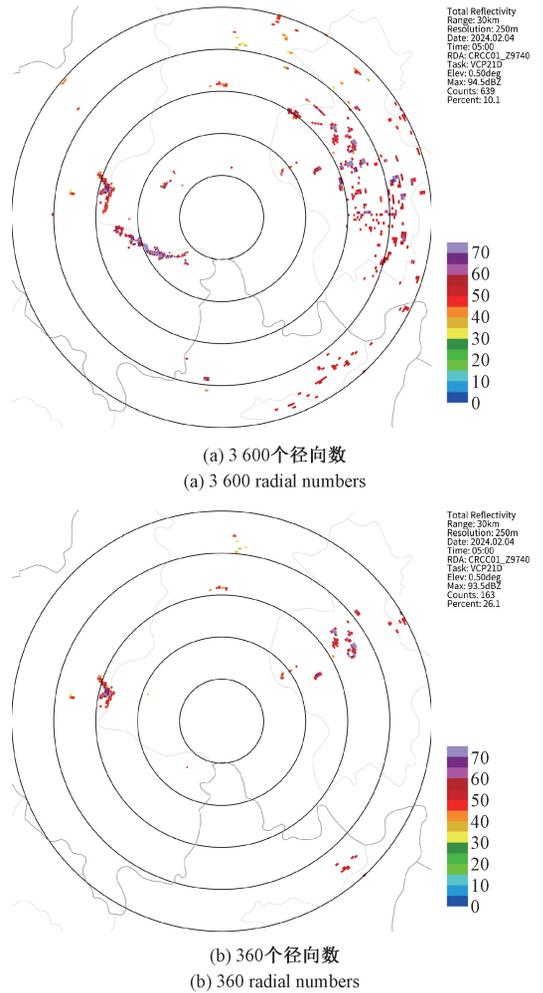


图 3 长沙莲花山雷达 0.5° 仰角稳定地杂波反射率因子 PPI 图(2024 年 2 月 4 日 05:00 时)

Fig. 3 PPI map of clutter reflectivity at a stable elevation angle of 0.5° for Changsha radar (05:00, February 4, 2024)

的低仰角所有的 PPI 未滤波回波数据,创建一个 250 m(为雷达径向分辨率)×0.1° 的固定极坐标网格,构建杂波图掩模,共 3 600 个方位。使用创建的杂波图掩模标记每个 PPI 库(对应雷达方位和距离),反射率因子大于 50 dBZ,则标记为 1,否则标记为 0:

$$M(i, j, k) = \begin{cases} 0, & Z(i, j, k) < 50 \\ 1, & Z(i, j, k) \geq 50 \end{cases} \quad (1)$$

式中: $M(i, j, k)$ 是掩模矩阵; $Z(i, j, k)$ 是反射率因子矩阵; i 为仰角索引; j 为方位索引; k 为距离索引。

对给定日期内所有的雷达数据重复以上操作,统计 24 h 内所有数据,将杂波掩模数组相加并除以 PPI 扫描的次数,得到该杂波掩模制定库反射率因子超过阈值的发生频率:

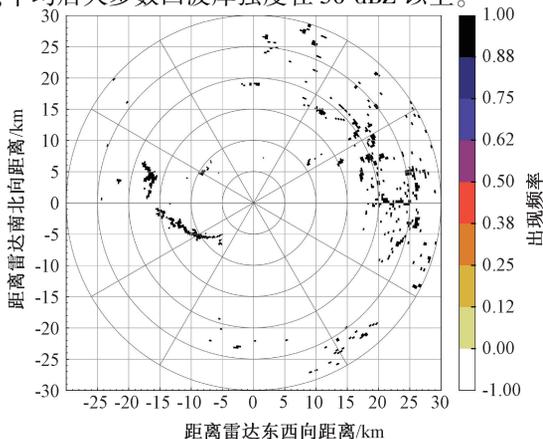
$$F(i, j, k) = \frac{\sum_{s=1}^N M_s(i, j, k)}{N} \quad (2)$$

式中： $F(i, j, k)$ 是在24 h内某个位置的杂波发生频率； N 是PPI扫描的次数； $M_s(i, j, k)$ 是第 s 次扫描的掩模值。

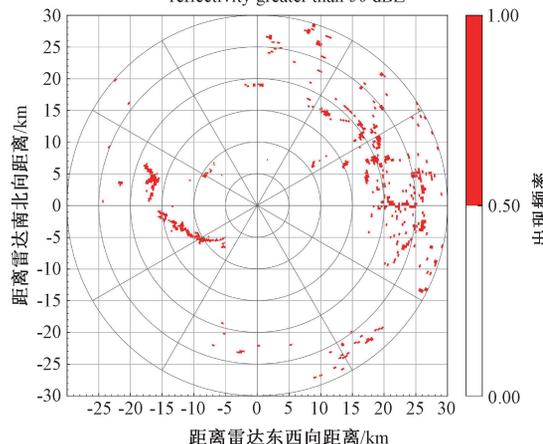
由图2可以看出，算法识别出来的地杂波非常多，部分可能为非稳定性地杂波，为提高标识的地杂波的稳健性，将掩模数组中超过50%的库标记为杂波点，杂波点标记矩阵 $C(i, j, k)$ 为：

$$C(i, j, k) = \begin{cases} 0, & F(i, j, k) < 50 \\ 1, & F(i, j, k) \geq 50 \end{cases} \quad (3)$$

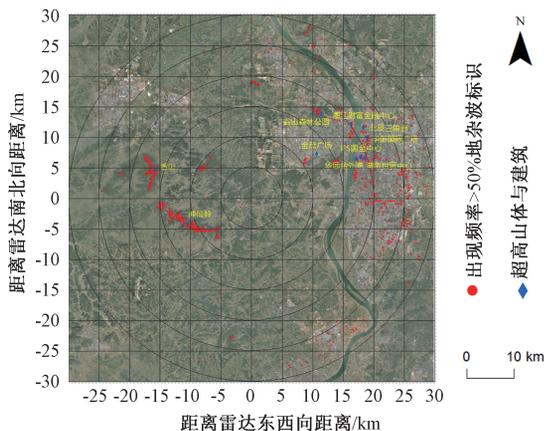
图4所示为长沙莲花山雷达0.5°稳定地杂波反射率因子PPI图，结合图4(a)和(b)，当回波强度大于50 dBZ，地杂波出现频次超过50%，图4(a)和(b)标记区域差异较少。图4(c)为地杂波标记与光学地图叠加图，可以发现稳定地杂波出现位置与周边山脉分布密切相关，如距离在7.5~15 km范围的神仙岭山脉，以及城市高大建筑分布有关，如长沙城区主要超高建筑群位于雷达站东侧及东北方向，距离在15~30 km区间。图4(d)为统计2024年2月1日00:00时莲花山雷达连续10次扫描，地杂波出现频次超过50%库平均反射率因子图，平均后大多数回波库强度在50 dBZ以上。



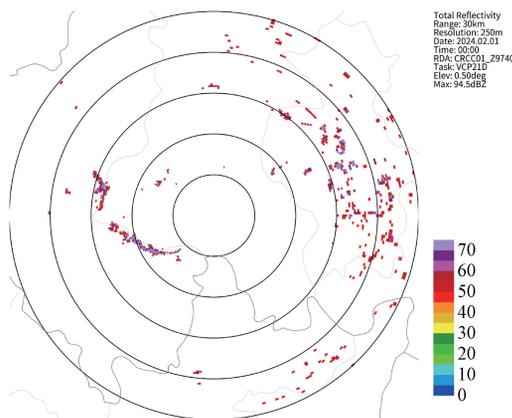
(a) 反射率因子大于50 dBZ地杂波出现频数标记
(a) Frequency map of ground clutter occurrences with reflectivity greater than 50 dBZ



(b) 反射率因子大于50 dBZ且出现频次大于50%地杂波标记
(b) Marked areas where ground clutter with reflectivity greater than 50 dBZ appears more than 50%



(c) 地杂波标记与光学地图叠加
(c) Overlay of ground clutter markers on an optical map



(d) 00:00时地杂波出现频次超过50%库平均反射率因子图
(d) Average reflectivity map for regions where ground clutter occurrence frequency exceeds 50% at 00:00

图4 长沙莲花山雷达0.5°仰角稳定地杂波反射率因子PPI(2024年2月1日)

Fig. 4 Stable clutter reflectivity PPI at 0.5° elevation angle for Changsha radar(February 1, 2024)

2.4 地杂波雷达相对校准原理

雷达信号处理器根据距离和大气衰减对接收到的回波功率进行校正，计算反射率因子如式(4)所示。

$$Z_e = P_r + 20\text{Log}R + 2\alpha R + C \quad (4)$$

式中： R 为距离； α 为单向大气衰减系数(S波段取0.0055 dB/km,C波段取0.008 dB/km)； C 为雷达常数。

从式(4)可以看出，稳定目标反射率因子随时间的任何变化都必须归因于雷达常数的变化(其中 Z_e 是地面杂波反射率因子)。雷达相对校准技术的主要假设是，地面杂波反射率因子的任何变化都是由雷达校准的变化引起。要使用雷达相对校准技术，综上所述，需要找到非气象回波高值反射率因子的位置来生成稳健的距离杂波图。

使用地面杂波反射率因子累计分布的第95个百分点

位数来校准雷达。通过确定地杂波反射率因子 $Z_{c,ref}$ 分布的基值,可以确定相对校准偏移量 RCA:

$$RCA = Z_c [CDF, 95\%] - Z_{c,ref} \quad (5)$$

式中: $Z_c [CDF, 95\%]$ 是地杂波反射率因子的第 95 个百分点数。

2.5 地杂波反射率因子相对校准基值计算

金属球能对雷达产生稳定的强散射回波,其后向散射为恒值,可用于对雷达反射率因子的检测。由于雷达后向散射截面 (radar cross section, RCS) 随球体半径与雷达波长比值呈现震荡趋势,为了得到稳定的 RCS,一般选择处于米散射震荡区域作为金属球半径选择参考。根据 Ye 等^[21] 提出的金属球反射率因子计算方法,来对地杂波反射率因子基线值进行校正:

$$Z_{be} = \frac{16 \ln 2 \lambda^4}{\theta \varphi \tau c \pi^6 |k^2| R^2} r^2 \quad (6)$$

$$dBZ = 10 \text{Log} Z_{be} \quad (7)$$

$$\Delta Z = Z_{bm} - dBZ_{be} \quad (8)$$

$$Z_{c,ref} = Z_c [CDF, 95\%] - \Delta Z \quad (9)$$

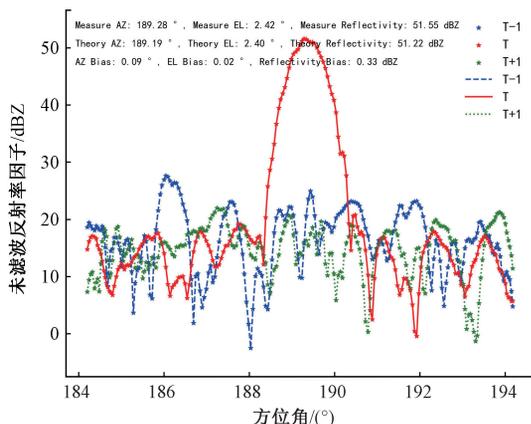
式中: Z_{be} 为金属球理论计算得到的反射率因子; Z_{bm} 为雷达实测金属球反射率因子; Z_c 为地杂波反射率因子; R 为回波距离; λ 为雷达工作波长; r 为标准金属球半径; θ 为水平波束宽度; φ 为垂直波束宽度; τ 为脉冲宽度; $k (|k|^2 = 0.93)$ 为复折射系数; c 为光速。

用金属球对天气雷达反射率因子检验时,球体位置应处在雷达远场探测区域内,且不能太靠近地面杂波主导的区域,也不能离开雷达太远以至于金属球在探测体积内充塞比例太少。为了选择较理想区域,先将长沙莲花山雷达在 0.5° 仰角上进行一次扫描,从获取的 dBZ 数据,选择地杂波较少的距雷达 2 740.19 m、方位 189.19° 位置,作为金属球悬停位置。

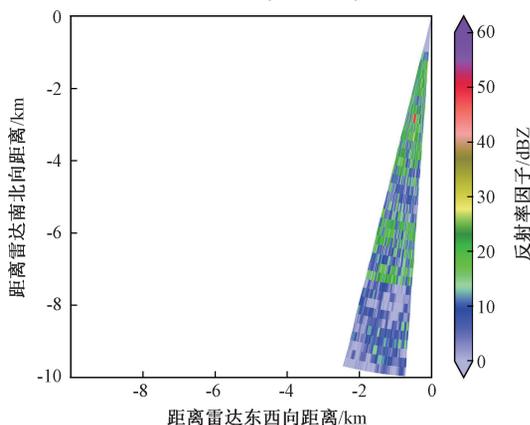
图 5 为 2024 年 9 月 11 日长沙莲花山雷达使用 RHI 和 PPI 扫描无人机悬吊金属球 (半径 15.24 cm) 时的相邻距离库反射率因子随方位和俯仰角变化的回波强度图。图 5(a) 为雷达 2:32 时 PPI 观测到的金属球最大反射率因子位于方位为 189.28° 、俯仰为 2.42° ,该位置的第 11 个库雷达反射率因子 (红色实线) 比第 10 个 (蓝色虚线) 和第 12 个库 (绿色点线) 分别大 26.55 dB 和 33.87 dB,金属球无跨库情况。图 5(b) 为该时次 PPI 扫描时雷达回波强度图,红色标记位置为金属球。图 5(c) 为雷达以 189.18° 的固定方位角 RHI 扫描,可清晰看到第 11 个距离库出现两个峰值,高仰角的峰值对应观测到无人机反射率因子, 2.42° 仰角的峰值对应金属球反射率因子。图 5(d) 为雷达 RHI 扇扫回波图,标记了两个强中心,位置较高点为无人机,较低点为金属球。

对比以上 PPI 和 RHI 扫描得到的金属球反射因子值,期望值与理论值分别相差 0.33 dB 和 -0.79 dB,均

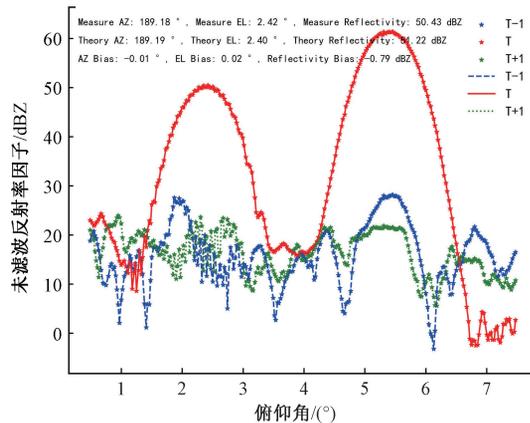
在 ± 1 dB 范围内。两者差异可能是受周边环境变化影响、金属球位置变动以及雷达角码波动等因素引起,为尽可能减少外在因素带来的检验误差,在雷达对准位置进行定点扫描。图 6 为该时次雷达定点指向方位 189.27° 、俯仰 2.42° 时获取的 400 组径向数据,反射率因子平均值 (红色虚线) 为 51.08 dBZ,标准差为 0.26 dB,与理论值系统偏差为 -0.13 dB。采用定点扫描数据得到的系



(a) 雷达 PPI 扫描金属球位置相邻距离库反射率因子折线
(a) Radar PPI scanning metal ball position adjacent distance library reflectivity line chart



(b) 雷达 PPI 扫描反射率因子
(b) Radar PPI scanning reflectivity chart



(c) 雷达 RHI 扫描金属球位置相邻距离库反射率因子折线
(c) Radar RHI scanning metal ball position adjacent distance library reflectivity line chart

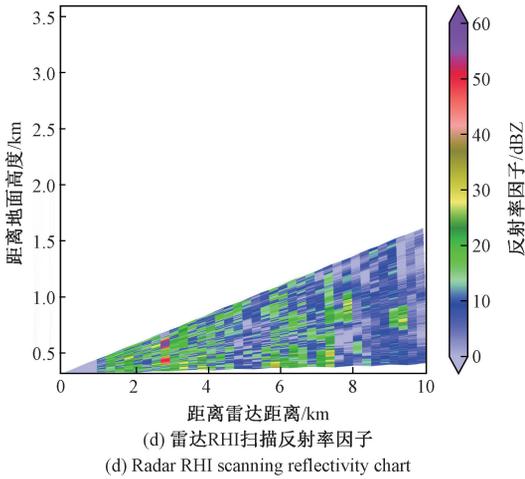


图5 金属球标校雷达反射率因子

Fig. 5 Metal ball calibration radar reflectivity chart

统偏差对当地地杂波反射率因子订正后,可作为地杂波反射率因子检测基值。

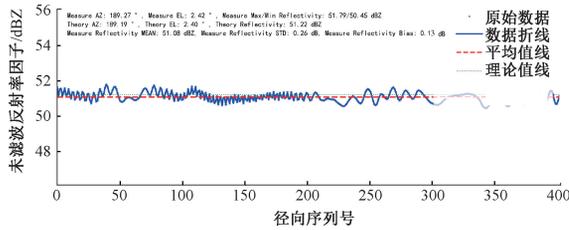


图6 雷达定点扫描金属球反射率因子变化序列图

Fig. 6 Sequence diagram of changes in reflectivity of metal balls scanned by radar at fixed points

3 影响因素分析

3.1 距离选取对地杂波 RCA 值的影响

雷达数据选取距离范围直接影响到地杂波样本的数量,图7实线为2024年3月1~31日期间,长沙莲花山雷达分别在10、20、30和230 km范围内地杂波RCA值变化图。由于长沙莲花山雷达探测环境相对较好,在0.5°仰角范围内稳定地杂波较少,在10、20、30和230 km内标记的稳定地杂波点数分别为65、346、654和4 679个。统计学上,样本点越多,统计得到的结果更合理,图7(a)为10 km统计得到的RCA值标准差最大,为2.79 dB,与雷达标定常数 syscal 值相关性差,图7(b)、(c)分别为20、30 km统计结果,图7(d)中230 km统计得到的RCA值标准差最小,为0.75 dB,与 syscal 值相关性较好,且随着选取距离的增大,RCA值标准差减少。可见,对于探测环境较好的雷达,选取雷达定量探测最大距离,能够有效提高RCA值的稳定性,更好地反映出雷达系统

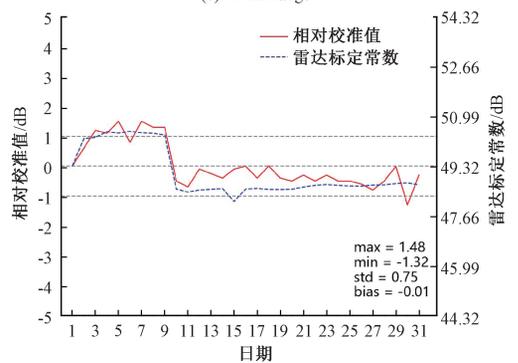
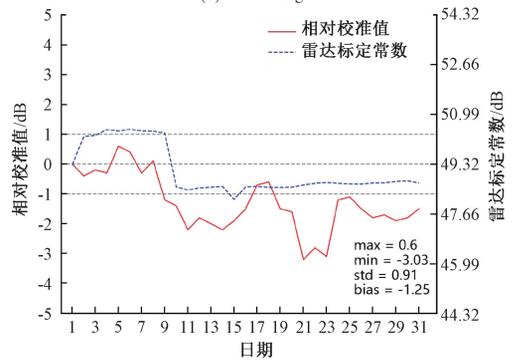
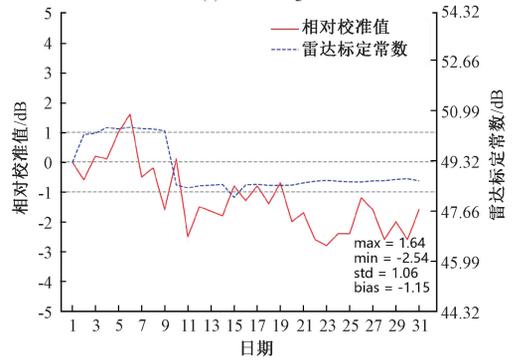
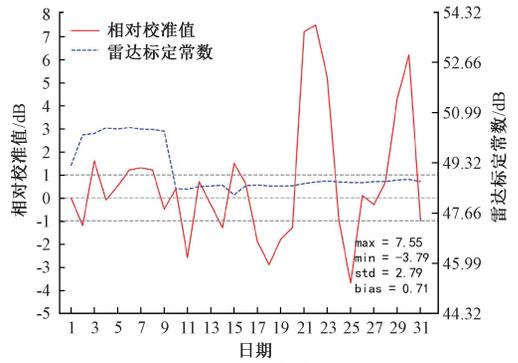


图7 长沙莲花山雷达0.5°仰角地杂波反射率因子不同距离范围内RCA值(2024年3月)

Fig. 7 RCA value of ground clutter reflectivity for Changsha radar at an elevation angle of 0.5° (March 2024)

参数的变化。当然,对于地杂波较多的雷达,由于在 30 km 以内地杂波样本数较多,为节省程序资源的消耗,扩大距离的选择范围带来的性能改善并不是特别重要。

3.2 距离订正对地杂波 RCA 值的影响

从式(4)可知,天气雷达反射率因子理论计算值由天线收到的功率、距离订正项、衰减订正项和与雷达系统参数有关的雷达常数项得到。本文利用稳定的地杂波数据,目标位置相对固定,为减少距离订正项对雷达地杂波校准影响,开展了直接采用反射率因子(含距离订正项)和使用地杂波的接收功率关联值(无距离订正项)进行概率统计,并分析两种情况下 RCA 数据与雷达 syscal 值一致性。图 8(a)红色实线为采用长沙莲花山雷达原始反射率因子(含距离订正),图 8(b)红色实线为采用无距离订正的数据分别得到的地杂波 RCA 变化,可以看到,无距离订正项地杂波 RCA 标准差明显降低,与雷达标定常数 syscal 变化趋势更加接近,更能有效反映雷达系统参数变化状态,且可见在 3 月 8~9 日长沙莲花山雷达系统参数有接近 2 dB 的变化。

3.3 降水对地杂波 RCA 值的影响

2024 年 3 月 28 日 00:00~23:00,长沙莲花山雷达监测区域发生明显降水过程,回波从湖南西北区域移动到西南区域。统计莲花山雷达当天 230 km 范围内、无距离订正项的地杂波强度数据分布,图 9 所示为地杂波反射率因子的每小时和每日的概率密度函数(probability density function, PDF)和经验累计概率密度函数(empirical cumulative density function, ECDF)的变化情况。每条曲线按照小时进行颜色标识,地杂波日 CDF 采用粗灰线标记,每小时 RCA 值列在图 9 左侧文本中,并标记了每日基线、RCA 值(基值设定于 2024 年 3 月 1 日)、样本个数以及文件数。受降水粒子的散射信号与地杂波混合,影响导致反射率因子高值区间的样本比例降低,CDF 累积速率下降。从图 9 可以明显看到反射率因子 CDF 曲线在高值区,斜率明显变得平缓。选取 3 月 1 日地杂波反射率因子为日基线,3 月 28 日地杂波小时 RCA 值平均值为 0.22 dB,标准偏差为 0.76 dB,波动范围为-1.61~1.39 dB 之间,日 RCA 值为-0.52 dB,杂波样本数(平均后)为 4 261 个,占杂波掩码总数的 91.1%,基数据文件数为 239 个。每小时 CDF 在较低百分位数差异较大,但当等于 95%时(虚线水平线和垂直线的交点),小时 CDF 曲线在该点很好地收敛,结果表明即使在降水条件下,RCA 值也具有较好的稳定性。

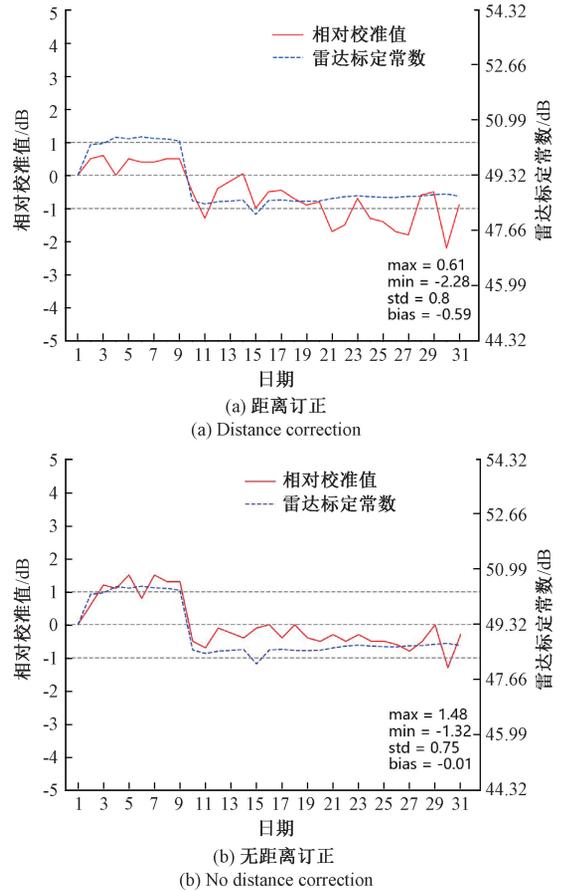


图 8 长沙莲花山雷达 0.5°仰角地杂波反射率因子 RCA 值变化(2024 年 3 月)

Fig. 8 RCA value of ground clutter reflectivity for Changsha radar at an elevation angle of 0.5° (March 2024)

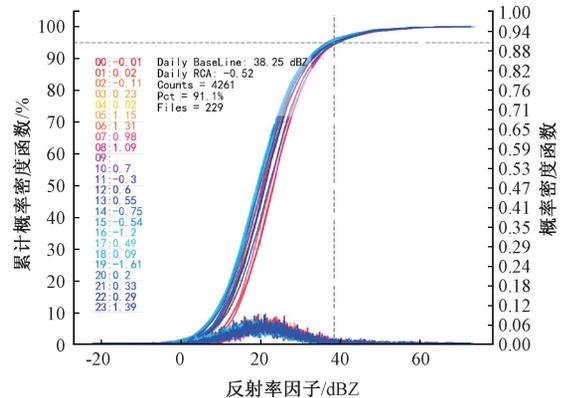


图 9 长沙莲花山雷达 230 km 范围内、无距离订正项逐小时地杂波反射率因子 PDF 和 CDF(2024 年 3 月 28 日)
Fig. 9 Hourly PDF and CDF of ground clutter reflectivity for Changsha Lianhuashan radar within a range of 230 km without distance correction term (March 28, 2024)

4 结 论

本文提出的基于地杂波反射率因子的天气雷达在线标校方法,通过利用金属球标校确定 RCA 基值,采用无距离订正项的地杂波接收功率关联值,并合理选取地杂波样本范围进行概率统计,实现了 24 h 连续在线监测雷达系统参数。试验结果表明,在长沙莲花山 CINRAD/SA-D 双极化天气雷达上,该方法在大范围降水条件下表现出较高的稳定性和灵敏度;2024 年 3 月 28 日逐小时 RCA 值平均为 0.22 dB(标准差 0.76 dB),而逐日 RCA 值为-0.52 dB;同时,在 3 月 8~9 日期间利用 RCA 技术监测到雷达系统反射率因子偏差变化约 2 dB。通过金属球标校实验(2024 年 9 月 11 日),雷达系统偏差为-0.13 dB(标准差 0.26 dB),与理论值高度吻合,验证了基值计算的准确性。

由于不同地区的地形、建筑等地杂波分布、降水特性和雷达型号存在一定的差异,该方法在其他地区或型号的雷达应用时可能需要对地杂波数据采集范围、距离订正、地杂波重采样方法及阈值等参数进行适当调整。

参考文献

- [1] LOUF V, PROTAT A, WARREN R A, et al. An integrated approach to weather radar calibration and monitoring using ground clutter and satellite comparisons [J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2019, 36(1): 17-39.
- [2] 鲁德金, 胡焯, 吴蕾, 等. 天气雷达间一致性评估算法影响因子分析及改进 [J]. *气象*, 2024, 50(4): 475-487.
LU D J, HU H, WU L, et al. Influence factors analysis and improvement of consistency evaluation algorithm between weather radars [J]. *Meteorological Monthly*, 2024, 50(4): 475-487.
- [3] WARREN R A, PROTAT A, SIEMS S T, et al. Calibrating ground-based radars against TRMM and GPM [J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2018, 35(2): 323-346.
- [4] PARK S, JUNG S-H, LEE G. Cross validation of TRMM PR reflectivity profiles using 3D reflectivity composite from the ground-based radar network over the Korean peninsula [J]. *Journal of Hydrometeorology*, 2015, 16(2): 668-687.
- [5] ALTUBE P, BECH J, ARGEMÍ O, et al. Quality control of antenna alignment and receiver calibration using the sun: Adaptation to midrange weather radar observations at low elevation angles [J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2015, 32(5): 927-942.
- [6] FRECH M, HAGEN M, MAMMEN T. Monitoring the absolute calibration of a polarimetric weather radar [J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2017, 34(3): 599-615.
- [7] HOLLEMAN I, HUUSKONEN A, TAYLOR B. Solar monitoring of the NEXRAD WSR-88D network using operational scan data [J]. *Journal of Atmospheric Oceanic Technology*, 2022, 39(1): 125-139.
- [8] HUBBERT J. Differential reflectivity calibration and antenna temperature [J]. *Journal of Atmospheric Oceanic Technology*, 2017, 34(9): 1885-1906.
- [9] FRECH M, MAMMEN T, LANGE B. Pointing accuracy of an operational polarimetric weather radar [J]. *Remote Sensing*, 2019, 11(9): 1115.
- [10] REIMANN J, HAGEN M. Antenna pattern measurements of weather radars using the sun and a point source [J]. *Journal of Atmospheric Oceanic technology*, 2016, 33(5): 891-898.
- [11] 李喆, 邵楠, 高玉春, 等. 中美天气雷达回波强度标定性能分析 [J]. *电子测量技术*, 2016, 39(6): 35-38.
LI ZH, SHAO N, GAO Y CH, et al. Calibration performance analysis of weather radar echo intensity between China and USA [J]. *Electronic Measurement Technology*, 2016, 39(6): 35-38.
- [12] 李喆, 陈大任, 王崇文, 等. 用太阳估测天气雷达天线增益的方法探讨 [J]. *电子测量技术*, 2016, 39(5): 14-17.
LI ZH, CHEN D R, WANG CH W, et al. Discussion on antenna gain measurement for weather radar using the sun [J]. *Electronic Measurement Technology*, 2016, 39(5): 14-17.
- [13] GABELLA M, NOTARPIETRO R. Ground clutter characterization and elimination in mountainous terrain [C]. *Proceedings of Erad*, 2002.
- [14] RINEHART R E. On the use of ground return targets for radar reflectivity factor calibration checks [J]. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 1978, 17(9): 1342-1350.
- [15] VACCARONO M, BECHINI R, CHANDRASEKAR C V, et al. An integrated approach to monitoring the calibration stability of operational dual-polarization radars [J]. *Atmos Meas Tech*, 2016, 9(11): 5367-5383.
- [16] FALCONI M, MONTOPOLI M, MARZANO F, et al. Weather radar performance monitoring using a metallic-

- grid ground-scatterer [J]. 2017, DOI: 10. 1117/12. 2282163.
- [17] WOLFF D B, MARKS D A, PETERSEN W A. General application of the relative calibration adjustment (rca) technique for monitoring and correcting radar reflectivity calibration [J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 2015, 32(3): 496-506.
- [18] HUNZINGER A, HARDIN J C, BHARADWAJ N, et al. An extended radar relative calibration adjustment (eRCA) technique for higher-frequency radars and range-height indicator (RHI) scans [J]. Atmos Meas Tech, 2020, 13(6): 3147-3166.
- [19] LEE J-E, KWON S, JUNG S-H. Real-time calibration and monitoring of radar reflectivity on nationwide dual-polarization weather radar network [J]. Advance of Radar Meteorology and Hydrology, 2021, 13(15): 2936.
- [20] CATE G S, HALL R W. NEXRAD product improvement-current status of WSR-88D open radar data acquisition (orda) program and plans for the future [C]. 21st International Conference on Interactive Information Processing Systems (IIPS) for Meteorology, Oceanography, and Hydrology, AMS, San Diego, CA, 2005.
- [21] YE F, WANG X, LI L, et al. weather radar calibration method based on uav-suspended metal sphere [J]. Sensors, 2024, 24(14): 4611.

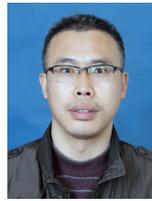
作者简介



雷永恒, 2009 年于成都信息工程大学获得学士学位, 2020 年于成都信息工程大学获得硕士学位, 中国气象局重点创新团队和青年创新团队骨干成员, 现为中国气象局雷达气象中心长沙雷达到校中心高级工程师, 主要研究方向为天气雷达到校业务和技术。

E-mail: 348618952@ qq. com

Lei yongheng received his B. Sc. degree from Chengdu University of Information Technology in 2009 and his M. Sc. degree from the same university in 2020. He is a key member of the Key Innovation Team and Youth Innovation Team of the China Meteorological Administration. He is now a senior engineer at the Changsha Meteorological Radar Calibration Center of the China Meteorological Administration's Radar Meteorological Center. His main research interest includes weather radar calibration technical.



王黎明 (通信作者), 2003 年于南京信息工程大学获得学士学位, 现为湖南省气象技术装备中心综合气象观测正高级工程师, 主要研究方向为大气探测。

E-mail: 234387817@ qq. com

Wang liming (Corresponding author), received his B. Sc. degree from Nanjing University of Information Science & Technology in 2003. He is now a senior engineer of atmospheric detection in Hunan meteorological equipment center. His main research interest includes atmospheric detection.