

程昌玉,许海波,徐桂荣,等,2026. 基于地物回波的天气雷达性能实时监测方法[J]. 气象,52(6):742-749. Cheng C Y,Xu H B, Xu G R, et al, 2026. Research on weather radar performance monitoring method based on ground clutter[J]. Meteor Mon, 52(6):742-749(in Chinese).

## 基于地物回波的天气雷达性能实时监测方法\*

程昌玉<sup>1</sup> 许海波<sup>2</sup> 徐桂荣<sup>3</sup> 何 菊<sup>1</sup>

1 湖北省气象信息与技术保障中心,武汉 430074

2 湖北省随州市气象局,随州 441130

3 中国气象局武汉暴雨研究所,武汉 430205

**提 要:** 本文提出了一种基于地物回波特征的天气雷达在线性能监测方法,用于评估雷达系统性能状态,以提升测量资料的稳定性与可靠性。该方法首先基于地物回波的时空稳定特性,利用强回波的高出现概率确定了稳定地物回波区域,通过构建经验累积分布函数并提取第 98%分位数作为性能监测指标,引入相对定标偏差指标,以定量表征系统性能偏差的波动。荆州雷达个例检验表明,该方法可在多种天气、不同距离及异常传播条件下有效提取地物回波的稳定特征。湖北省内多部雷达的试验应用进一步验证了其在监测雷达系统性能偏差和观测数据异常等方面的可靠性,表明该方法在天气雷达性能在线监测中具有可行性,可为提高雷达观测的长期稳定性提供有力支持。

**关键词:** 天气雷达,地物回波,相对定标,性能监测

**中图分类号:** P413

**文献标志码:** A

**DOI:** 10.7519/j.issn.1000-0526.2026.022501

## Research on Weather Radar Performance Monitoring Method Based on Ground Clutter

CHENG Changyu<sup>1</sup> XU Haibo<sup>2</sup> XU Guirong<sup>3</sup> HE Ju<sup>1</sup>

1 Hubei Meteorological Information and Technology Support Center, Wuhan 430074

2 Suizhou Meteorological Office of Hubei Province, Suizhou 441130

3 Institute of Heavy Rain, CMA, Wuhan 430205

**Abstract:** This paper proposes an online performance monitoring method for weather radars based on ground clutter characteristics to evaluate radar system status and enhance the stability and reliability of observation data. The method identifies stable ground clutter regions by exploiting the spatiotemporal persistence of clutter and the high occurrence probability of strong echoes. An empirical cumulative distribution function is then constructed, with the 98th percentile extracted as the monitoring indicator, and a relative calibration bias metric introduced to quantitatively characterize system deviations. A case study with the Jingzhou Radar demonstrates that this method can effectively capture stable clutter features under various weather conditions, different ranges, and anomalous propagation scenarios. Further application of the method to multiple radars in Hubei Province verify its reliability in detecting system performance biases and data anomalies, confirming its feasibility for online monitoring of weather radar performance. Therefore, this method is a strong support for improving the long-term stability of radar observations.

\* 湖北省自然科学基金气象创新发展联合基金项目(2023AFD107 和 2023AFD092)共同资助

2024 年 11 月 18 日收稿; 2026 年 4 月 19 日收修定稿

第一作者:程昌玉,主要从事天气雷达数据开发和保障研究. E-mail:ccy269@qq.com

通讯作者:何菊,主要从事天气雷达装备保障研究. E-mail:he\_ju88@qq.com

**Key words:** weather radar, ground clutter, relative calibration, performance monitoring

## 引 言

天气雷达是强对流天气系统监测的重要工具,在短时临近预报和防灾减灾中发挥着不可替代的作用(潘佳文等,2023;龚佃利等,2024;黄旋旋等,2024)。随着雷达技术的不断成熟和广泛应用,雷达数据质量和系统稳定性监测愈发关键。如何及时识别观测数据的系统性偏差,并对随时间产生的系统偏离进行定标和修正,以确保测量精度和资料的可靠性,已成为提升短时临近预报准确性的重要课题(李斐斐等,2020;徐黄飞等,2025)。

为保障雷达探测性能,国内外学者提出并发展了多种雷达定标技术。例如,利用固定目标物进行定标(Atlas and Mossop,1960)、基于太阳噪声定标(Whiton et al,1976)、地物回波定标(Rinehart,1978),以及针对双偏振雷达的偏振变量一致性定标(Gorgucci et al,1992;潘新民等,2010;史朝等,2013)。此外,部分研究通过与星载雷达或邻近雷达的联合对比观测实现雷达系统相对定标(Anagnostou et al,2001;Vukovic et al,2014),而 Vaccarone et al (2016)则提出综合定标策略,通过整合多种定标方法提升雷达定标的全面性与偏差校准的精度。这些方法的应用有效提升了雷达的测量性能和精度。

随着新一代天气雷达在我国的深入应用,建立完善的 CINRAD 雷达的定标体系与技术规范已成为重要任务。围绕天气雷达系统探测性能的定标技术,国内学者开展了大量研究。单偏振雷达方面,王立轩等(2001)使用外部仪器验证了机内自动标校结果的准确性;柴秀梅等(2007)探讨了 CINRAD/CC 雷达的自动标校技术原理并提出改进方案;周红根等(2015)和邵楠等(2018)则借助太阳噪声对雷达接收系统的反射率因子和天线波束指向精度进行了检验,以提升探测资料的准确性。近年来,双偏振雷达的定标研究也逐渐深入。李喆等(2014;2016)综合多种方法对南京大学 C 波段双偏振雷达进行了定标研究,并分析了差分反射率的测量性能;詹棠等(2019)利用小雨和干雪目标对多种标定结果进行了对比评估;张文言等(2014)利用 CINRAD/SA 天气雷达反射率因子资料对 X 波段天气雷达进行强度标定。此外,孙卜郊等(2021)开展了基于无人机外

挂标准金属球的强度标定方法研究。这些方法在提升雷达观测精度方面成效显著,但多数仍依赖于离线操作,难以满足实时性和连续监测的需求。

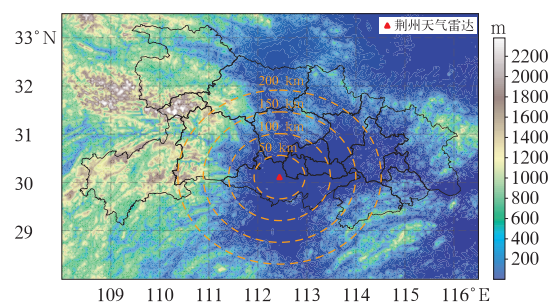
基于此,本文提出一种基于地物回波特征的雷达性能在线监测方法。该方法基于地物回波的时空稳定特性,利用强回波的高出现概率确定稳定地物回波区域,在此基础上构建经验累积分布函数(ECDF),并提取表征性能稳定性的监测指标,实现雷达系统性能变化的在线监测。

## 1 雷达和数据

以湖北荆州天气雷达站作为研究对象,其位于荆州市江陵县,天线馈源高度 127 m,周边地形分布见图 1。该站配备 S 波段新一代天气雷达,并于 2023 年完成双偏振升级,工作体制为双发双收。升级后,雷达的距离分辨率从 1 km 提升至 250 m,观测覆盖范围达到 230 km。

荆州雷达观测要素包括反射率因子、平均径向速度、速度谱宽,以及新增的差分反射率因子、差分传播相移率和原始总回波反射率(dBT)。其中,dBT 为未经地物杂波抑制与滤波处理的全功率观测值,更适用于稳定地物样本的统计建模与分析。本文选取 2023 年 2 月 1 日至 6 月 30 日的 $0.5^\circ$ 仰角 dBT 数据开展天气雷达性能在线监测方法的研究。dBT 经雷达系统标定校正后,可转换为等效反射率因子( $Z_0$ ,单位:dBz),文中的反射率因子如无特指,均为  $Z_0$ 。

本文所用时间均为世界时。



注:圆圈为雷达探测半径。

图 1 研究区域内雷达站点和地形分布  
Fig. 1 Distribution of radar station and terrain in the study area

## 2 监测方法设计

### 2.1 监测基本原理

雷达气象方程是天气雷达强度观测和标定的基础。在目标物粒子满足瑞利散射的条件下,天气雷达气象方程可以表示为:

$$P_r = \frac{\pi^3}{1024 \ln 2} \times |K|^2 \times \frac{P_t G^2 c \tau \theta \varphi}{\lambda^2 R^2} \times Z \quad (1)$$

式中: $Z$ 为反射率因子, $P_r$ 为天线馈源接收到的回波功率, $P_t$ 为发射机峰值功率, $\lambda$ 为雷达发射的波长, $G$ 为天线增益, $\tau$ 为雷达发射的脉冲宽度, $\theta$ 、 $\varphi$ 分别为天线水平方向、垂直方向波束宽度, $R$ 为目标物距雷达天线的距离, $c$ 为光速, $K$ 为复折射指数。用 $C$ 代表雷达常数,式(1)用对数表示:

$$10 \lg Z = 10 \lg P_r + 20 \lg R - 10 \lg C \quad (2)$$

式中: $20 \lg R$ 为目标距离订正因子, $10 \lg C$ 是与雷达系统常数相关的影响因子, $10 \lg P_r$ 为接收回波功率, $10 \lg Z$ 表示目标物反射率因子。对于固定稳定的目标物,接收回波功率 $10 \lg P_r$ 和目标距离订正因子 $20 \lg R$ 是确定的,则有: $\Delta(10 \lg Z) = \Delta(10 \lg C)$ ,即雷达常数 $C$ 的变化或雷达系统性误差,会直接影响雷达探测数据的稳定性。

在天气雷达的低仰角观测中,雷达波束扫过近地表区域时,其接收的回波信号中既包含气象目标的散射回波,也包含来自建筑物、山脉、植被等地物的反射回波。与气象目标不同,地物因其强反射能力及空间位置的固定性,能够产生稳定的高强度回波信号(Doviak and Zrinc, 1993)。基于这一特性,本文利用地物回波的强度变化作为指标,来评估雷达系统性能的稳定性。

### 2.2 稳定地物回波的确定

为获取更加稳定的地物回波,选取荆州雷达多个无降水日的 $0.5^\circ$ 仰角 $Z_0$ 作为研究对象。借鉴Wolff et al(2015)的处理方法,将 $50 \text{ dBz}$ 作为稳定地物的初步判别阈值,以减少副瓣和波束传播效应干扰,同时降低与区域内常见降水回波反射率因子的混淆。随后,统计雷达图像中地物强回波的频繁出现概率,并据此构建稳定地物回波区域。具体步骤包括:

(1)地物标识码初始化:将雷达观测区域划分为

径向分辨率 $0.25 \text{ km}$ 、方位角分辨率 $1^\circ(0^\circ, 1^\circ, 2^\circ, \dots)$ 的极坐标网格单元,并在此生成地物标识码初始数据,以支撑后续地物回波区的识别。

(2)疑似地物点判定:将 $Z_0$ 重采样至上述极坐标网格,对每个网格进行阈值判别。当 $Z_0 \geq 50 \text{ dBz}$ ,赋值为 $1$ ,标记为疑似地物回波点;否则赋值为 $0$ ,由此生成 $1$ 个体扫数据的地物识别矩阵。

(3)多时次数据处理:对全部 $N$ 个体扫数据重复上述判定过程,生成 $N$ 个地物识别矩阵数据。

(4)概率统计:将 $N$ 个地物识别矩阵数据进行逐网格相加,并统计各网格单元疑似地物回波出现概率。

(5)地物回波区定位:为提高地物判别的稳定性与可靠性,采用四分位数法。当网格单元疑似地物回波出现概率 $\geq 75\%$ 时,将其确定为地物回波区。

图2给出了基于荆州天气雷达2024年2月1—15日 $0.5^\circ$ 仰角dBT数据提取的稳定地物回波区分布。结果显示,在雷达站西北、偏西、偏南和东北方向的大范围地物回波区与荆州、松滋、公安、石首、监利、潜江等城区位置高度吻合,其主要由建成区建筑物及东南测的山体造成。此外,周边高速公路对雷达电磁波的反射在图中表现为清晰的曲线特征。总体而言,该方法所确定的地物回波分布与实际情况一致,验证了方法的可靠性与有效性。

### 2.3 雷达性能相对定标偏差值(RCA)计算方法

在借鉴Silberstein et al(2008)研究的基础上,结合雷达系统的技术特点和地形等差异化因素,采用天气雷达低仰角的dBT数据,并对地物回波采样范围和统计参数进行本地化调整,以提高雷达性能



图2 荆州雷达 $100 \text{ km}$ 范围内地物回波(红色填色)分布

Fig. 2 Distribution of ground clutter (red colored) within  $100 \text{ km}$  range of the Jingzhou Radar

监测的可靠性。在此基础上,基于前文确定的稳定地物回波区,对各位置包含的  $N$  个体扫观测数据采用四分位数法,仅保留中间 50% 的样本,并取其中位数作为代表值。随后,构建 ECDF,并提取其分位数点以表征雷达性能的长期变化。

假设数据集有  $n$  个观测值  $\{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ , 其 ECDF 定义为:

$$F_n(x) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n I \quad (3)$$

式中:  $F_n(x)$  表示样本中不大于  $x$  的观测值所占比例,  $I$  为指示函数,当  $x_i \leq x$  时取 1, 否则取 0。由此可得第  $p$  分位数值  $x_p$ :

$$x_p = F_n^{-1}(p) = \inf\{x \in R: F_n(x) \geq p\} \quad (4)$$

即样本中有比例为  $p$  的观测值不超过该数值。本文将  $x_p$  定义为地物回波表征指标,用于反映雷达性能的缓变特征。经多次试验表明,当  $p = 98\%$  时,所得监测指标较其他分位数更为稳定。

为进一步评估雷达性能相对于基准值的变化,本文引入相对定标偏差值(RCA),其表示为:

$$RCA_p(t) = dB T_p(t) - dB T_p^{ref} \quad (5)$$

式中:  $dB T_p(t)$  表示第  $t$  日地物回波样本 ECDF 的第  $p$  分位数值,作为该日地物回波的代表性指标。 $dB T_p^{ref}$  为雷达定标后连续 14 d 无降水观测样本的 ECDF 的第  $p$  分位数值,作为地物回波基准参考值。 $RCA > 0$  时,观测值高于基准值;  $RCA < 0$  时,观测值低于基准值。

### 3 RCA 方法的影响因素分析

已有研究表明,普通地物回波、异常传播(超折射)回波以及电磁干扰引发的回波,会对雷达数据的客观应用产生显著误差(Steiner and Smith, 2002; 刁秀广等, 2006; 吴涛等, 2013)。针对这一问题,本文评估了 RCA 方法在不同天气背景、距离条件以及超折射情形下的稳定性和可靠性,并探讨其对这些因素的敏感性。

#### 3.1 不同天气背景的影响

为分析不同天气条件下地物回波的差异,选取荆州雷达在 2024 年 6 月 15 日(晴天)和 7 月 1 日(大范围降水)的探测数据对比,相应  $Z_0$  如图 3a, 3b 所示。可以看出,降水条件下  $Z_0$  整体显著高于晴空,但两种天气背景下地物强回波的空间分布和强

度基本保持一致。

为了进一步研究降水对地物回波分布稳定性的影响,结合地物回波的空间分布(图 2),图 3c 给出了晴天和降水条件下地物回波  $Z_0$  的概率密度和累计概率分布。尽管天气条件不同,但二者整体分布较为一致。与晴天相比,降水时地物回波的分布更为均匀,低值区的  $Z_0$  稍有增强。但在高值区相对稳定,表明降水对地物回波  $Z_0$  分布的高值区影响较小,这主要是因为杂波区域中的降水回波通常远低于 80 dBz。综上所述,地物强回波在不同天气背景下具有较好的稳定性。

#### 3.2 地物距离的影响

为了研究雷达系统在不同距离下探测地物回波的稳定性,图 4 利用 2024 年 3 月 23 日荆州雷达观测数据,给出了 25 km、50 km 典型距离圈层内地物回波各分位数的  $Z_0$  时间序列。可以看出,25 km 范围内的回波数据波动较小,而 50 km 范围内的回波则存在较大的波动性。

为进一步量化地物回波稳定性,采用了标准差作为评估指标。在 25 km 范围内,地物回波反射率因子的 ECDF 取第 50%、98% 和 100% 分位数时,其对应的标准差分别为 1.4、0.7 和 0.4 dBz; 而在 50 km 范围内,这些统计值的标准差分别为 1.5、1.3 和 1.8 dBz。从统计数据可以看出,25 km 范围内的回波比 50 km 范围内更加稳定。50 km 范围内较大的波动性可能与探测距离较远受到更多环境因素影响有关,如大气条件的变化、地球曲率等。此外,较近距离内的回波可能受到少数强大且稳定的目标的主导,从而提高了其稳定性(Silberstein et al, 2008)。

综上所述,近距离的地物目标回波表现出更高的稳定性,而在较远距离内,由于环境干扰因素增多,地物回波的稳定性会受一定影响。

#### 3.3 异常传播的影响

大气中折射率的垂直梯度受水汽压、气压和温度变化的影响,当其低于正常值时,可能引发超折射现象(Rinehart, 1997)。超折射会使雷达波束向下弯曲,导致回波出现异常传播,表现为地物回波范围扩大。此类回波在低仰角产品上尤为常见,多发生在晴朗夜晚或清晨的逆温条件下,近地面气层的温度、湿度显著波动形成。

为了研究异常传播对 RCA 方法的影响,图 5 给出了 2024 年 6 月 20—23 日地物回波第 98% 分位数的  $Z_0$  时间序列。由图可见,该时段内地物回波整体较为稳定, $Z_0$  主要分布在 80~81 dBz,且白天

的波动幅度显著小于夜间。此外,在 00:00 和 12:00 前后, $Z_0$  呈现先上升后逐渐回落的趋势,其变化幅度超过 1 dBz。这种现象与超折射现象的发生时间较为一致,表明超折射现象会对单个体扫雷达地物

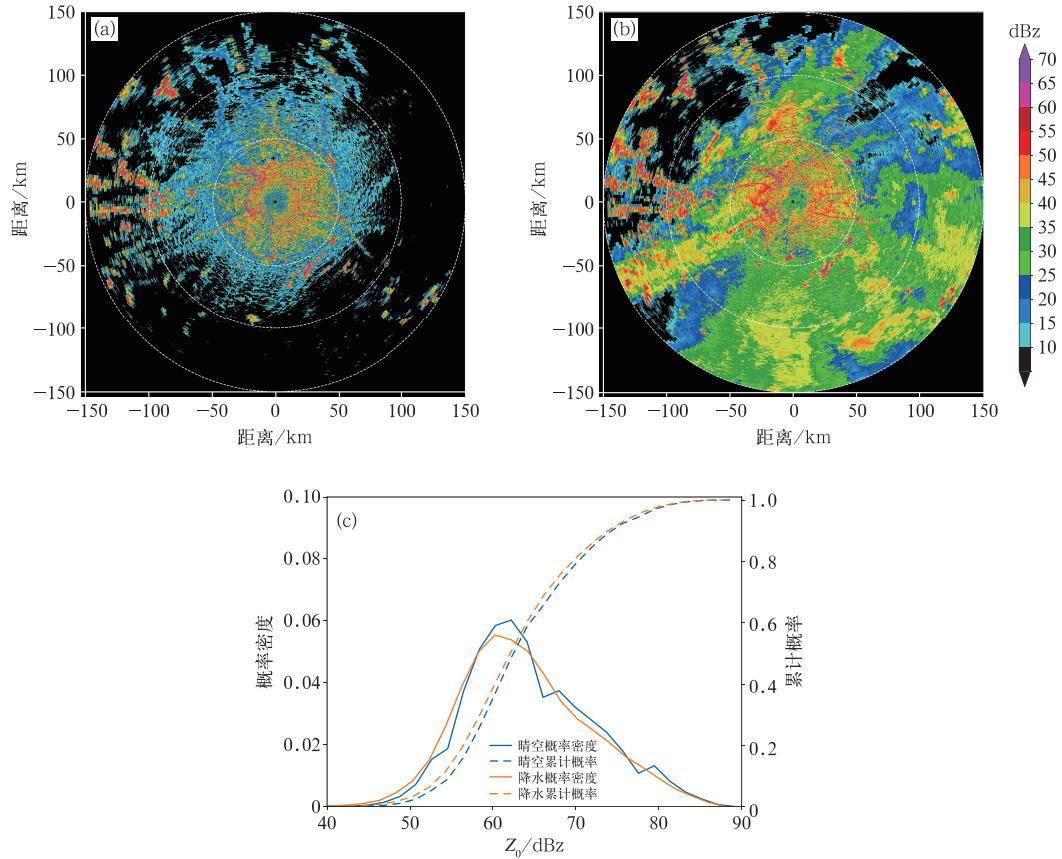


图 3 (a)晴天,(b)降水条件下荆州雷达地物回波  $Z_0$  及其(c)概率密度和累计概率分布

Fig. 3  $Z_0$  of ground clutter of Jingzhou Radar under (a) clear sky and (b) precipitation conditions, and (c) its probability density and cumulative probability distributions

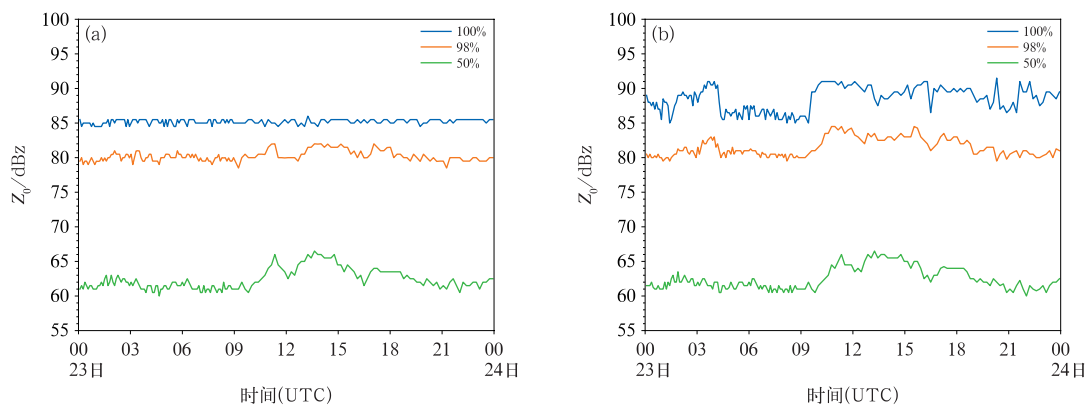


图 4 2024 年 3 月 23 日荆州雷达地物回波不同分位数的  $Z_0$  时间序列

(a)25 km 范围,(b)50 km 范围

Fig. 4 Time-series of  $Z_0$  at different typical quantiles for ground clutter in the ranges of (a) 25 km and (b) 50 km of Jingzhou Radar on 23 March 2024

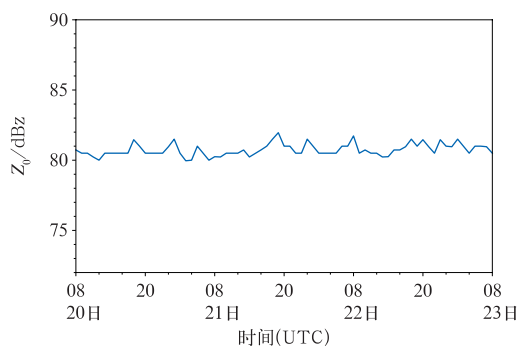


图 5 2024 年 6 月 20—23 日荆州雷达地物回波第 98%分位数的  $Z_0$  时间序列

Fig. 5 Time-series of  $Z_0$  at the 98th percentile for ground clutter of Jingzhou Radar during 20—23 June 2024

反射率因子产生显著影响。

尽管超折射现象会在短时间内引起地物反射率因子的波动,但由于其持续时间较短,对每日地物回波特征值  $dB T_p(t)$  的整体统计影响有限。其中,6 月 20—22 日的  $dB T_p(t)$  值分别为 80.7、80.6、80.8 dBz。因此,尽管存在超折射等异常传播干扰,地物回波的稳定性受到一定干扰,但对于雷达系统的相对校准,RCA 方法依然有效。

#### 4 RCA 方法实际应用效果分析

为了更全面地评估 RCA 方法在雷达性能监测中的应用效果,本文结合荆州和随州的长时间序列数据进行实际应用案例分析。

##### 4.1 雷达探测数据异常监测

2024 年 4 月 10 日至 6 月 19 日荆州雷达 RCA 逐日演变如图 6 所示。整体而言,雷达性能较为稳定,

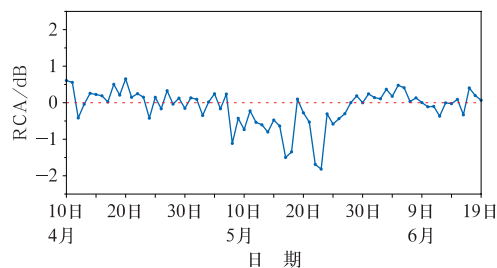


图 6 2024 年 4 月 10 日至 6 月 19 日荆州雷达 RCA 逐日演变

Fig. 6 Daily evolution of RCA for Jingzhou Radar from 10 April to 19 June 2024

RCA 维持在零值附近小幅波动,标准差为 0.5 dB。然而,5 月雷达反射率因子定标偏差发生显著异常负漂移,RCA 最低至  $-1.8$  dB,表明雷达性能发生了显著波动。

为分析其原因,检查了 5 月 22 日荆州雷达  $0.5^\circ$  仰角连续体扫数据。结果显示,08:42—08:50,雷达的观测模式由 VCP21(降水模式)切换为 VCP31(晴空模式),切换前后反射率因子强度发生显著变化,且 VCP31 模式下强回波的覆盖范围扩大。然而,在 VCP31 模式下地物回波最大值(82.0 dBz)低于 VCP21 模式(85.5 dBz)。进一步检查雷达反射率因子标定日志发现,切换至 VCP31 模式后反射率因子测量值与期望值相差近 3 dB,且雷达系统标定系数也出现 3 dB 的负偏差。重新对 VCP31 模式雷达常数进行标定后,相关监测指标随之恢复正常,所探测得到地物杂波反射率因子和 VCP21 模式基本一致。上述结果表明,VCP31 模式主要用于晴空条件,因气象回波较少,回波强度出现偏差时往往难以被识别发现。而 RCA 方法通过地物回波的监测有效反映了雷达探测数据的变化趋势及雷达性能异常,验证了该方法在雷达性能监测中的可靠性和敏感性。

##### 4.2 雷达系统性偏差监测

为了进一步验证 RCA 方法在系统性偏移监测中的有效性,图 7 给出了 2022 年 4 月 1 日至 5 月 16 日随州雷达 RCA 逐日演变。结果显示,监测前期 RCA 围绕定标零基准小幅波动,整体波动标准差为 0.6 dB。然而,在区间中段雷达性能出现了显著突变变化:4 月 23 日 RCA 从由零基准附近快速正向抬升,最大正向偏移幅度达 1.6 dB,且偏差在监测时段内未出现明显收敛回落,表明雷达反射率因子

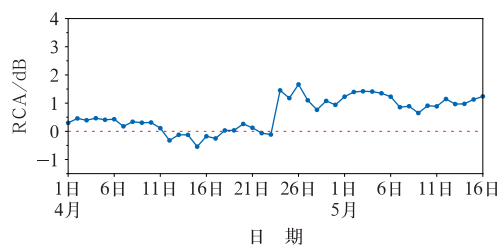


图 7 2022 年 4 月 1 日至 5 月 16 日随州雷达 RCA 逐日演变

Fig. 7 Daily evolution of RCA for Suizhou Radar from 1 April to 16 May 2022

定标状态出现系统性正向偏离。

进一步分析确认,随州雷达这一系统性偏差主要与该站年巡检工作有关。巡检期间在雷达强度定标环节,调整了接收机通道插损,导致了地物回波监测指标出现非连续变化。由此可见,该方法能够在雷达业务运行中捕捉此类由维护定标操作引发的系统增益改动导致的系统性偏差,验证其在雷达系统性能变动监测方面的有效性,同时对现有定标技术具有辅助与补充作用。

## 5 结论和讨论

本文针对天气雷达性能稳定性在线监测手段不足的问题,提出了一种基于地物回波特征的雷达系统性能在线监测方法。该方法利用稳定地物回波区的地物反射率因子,构建经验累积分布函数,并提取特定分位数作为性能监测指标,通过多情景验证与案例分析,验证了该方法的有效性及应用性,主要结论如下:

(1)基于经验累积分布函数提取第 98%分位数构建相对定标偏差指标(RCA),能够有效表征雷达系统性能长期变化趋势。地物回波在不同天气条件下均表现出良好的稳定性,且近距离地物回波的稳定性优于远距离。

(2)RCA 方法基于实时观测数据,能有效识别观测模式切换、系统维护等引起的性能波动与观测数据异常,准确捕捉系统性偏差,可靠性和适用性均得到个例与多站应用的验证。

(3)RCA 方法具备实时性和稳健性,可用于雷达长期稳定性评估,数据质量保障及故障预警,并可作为现有雷达定标技术的重要补充。

需要指出的是,RCA 方法并非为绝对定标手段,无法完全量化雷达探测数据的绝对偏差。未来可将 RCA 方法与绝对定标技术(如金属球定标)(李兆明等,2018)结合,进一步提升监测精度与可靠性。同时,已有研究表明,天线方位角和俯仰角精度的波动可能影响地物回波的准确性(Silberstein et al,2008;Wolff et al,2015),进而影响雷达测量偏差。因此,在业务应用中应密切关注雷达天线系统及伺服系统的定标精度。

## 参考文献

柴秀梅,黄晓,黄兴玉,2007.新一代天气雷达回波强度自动标校技术

[J].气象科技,35(3):418-422. Chai X M, Huang X, Huang X Y,2007. Method for automatically calibrating echo intensity of CINRAD system[J]. Meteor Sci Technol, 35(3): 418-422 (in Chinese).

刁秀广,朱君鉴,杨传凤,等,2006. CINRAD/SA 雷达超折射回波抑制技术分析与应用[J].气象科技,34(5):620-623. Diao X G, Zhu J J, Yang C F, et al,2006. Analysis and application of AP clutter suppression technique for CINRAD/SA radar[J]. Meteor Sci Technol, 34(5):620-623(in Chinese).

龚佃利,朱君鉴,林曲凤,等,2024.一次超级单体引发的秋季特大冰雹和龙卷雷达探测分析[J].气象,50(5):561-576. Gong D L, Zhu J J, Lin Q F, et al,2024. Radar observation analysis of severe hailstorm and tornado caused by a supercell in autumn [J]. Meteor Mon,50(5):561-576(in Chinese).

黄旋旋,陈刚,赵坤,等,2024.基于双偏振雷达变量垂直廓线特征的短时强降水和雷暴大风短时临近预报方法[J].气象,50(12):1519-1530. Huang X X, Chen G, Zhao K, et al,2024. Improved nowcasting of short-time heavy precipitation and thunderstorm gale based on vertical profile characteristics of dual-polarization radar[J]. Meteor Mon,50(12):1519-1530(in Chinese).

李斐斐,邵楠,虞海锋,等,2020.双偏振天气雷达双通道一致性分析与校准[J].科学技术与工程,20(3):1076-1080. Li F F, Shao N, Yu H F, et al,2020. Analysis and calibration of dual-channel consistency for dual-polarization weather radar[J]. Sci Technol Eng,20(3):1076-1080(in Chinese).

李兆明,陈洪滨,毕永恒,等,2018.使用金属球定标 X 波段固态天气雷达[J].遥感技术与应用,33(2):259-266. Li Z M, Chen H B, Bi Y H, et al,2018. Calibration for X-band solid-state weather radar with metal sphere[J]. Remote Sens Technol Appl,33(2): 259-266(in Chinese).

李喆,李柏,赵坤,等,2016.国产双偏振天气雷达差分反射率测量性能分析[J].气象科技,44(6):855-859,895. Li Z, Li B, Zhao K, et al,2016. Measurement performance analysis of differential reflectivity for dual-polarization weather radar made in China[J]. Meteor Sci Technol,44(6):855-859,895(in Chinese).

李喆,王崇文,李春化,等,2014.双发双收双偏振天气雷达差分反射率工程标定方法[J].气象科技,42(6):951-956. Li Z, Wang C W, Li C H, et al,2014. Engineering calibration methods for differential reflectivity of dual polarization weather radar in simultaneous transmission and reception mode[J]. Meteor Sci Technol,42(6):951-956(in Chinese).

潘佳文,徐鸣一,吴举秀,等,2023.基于对流风暴结构的双偏振雷达 Z<sub>DR</sub>柱识别及应用研究[J].气象学报,81(6):943-957. Pan J W, Xu M Y, Wu J X, et al,2023. Identification of the Z<sub>DR</sub> column in dual polarization radar observations based on convective storm structure and related applications[J]. Acta Meteor Sin,81(6): 943-957(in Chinese).

潘新民,柴秀梅,崔柄俭,等,2010. CINRAD/SB 雷达回波强度定标调校方法[J].应用气象学报,21(6):739-746. Pan X M, Chai X M, Cui B J, et al,2010. The method of CINRAD/SB radar echo intensity calibration and adjustment[J]. J Appl Meteor Sci, 21

- (6):739-746(in Chinese).
- 邵楠,潘新民,陈玉宝,等,2018.利用太阳法提高新一代天气雷达探测精度[J].气象科技,46(6):1065-1072. Shao N, Pan X M, Chen Y B, et al, 2018. Using solar method to improve detection accuracy of new-generation weather radar[J]. Meteor Sci Technol, 46(6):1065-1072(in Chinese).
- 史朝,史万里,何建新,等,2013.双极化天气雷达差分反射率的标定[J].现代雷达,35(1):6-10. Shi Z, Shi W L, He J X, et al, 2013. Differential reflectivity calibration of dual-polarization weather radar[J]. Modern Radar, 35(1):6-10(in Chinese).
- 孙卜郊,魏加华,翁燕章,等,2021.利用无人机平台标定气象雷达[J].现代雷达,43(10):33-40. Sun P J, Wei J H, Weng Y Z, et al, 2021. Calibration of weather radar using UAV platform[J]. Modern Radar, 43(10):33-40(in Chinese).
- 王立轩,葛润生,王顺生,等,2001.新一代天气雷达的自动标校技术[J].气象科技,29(3):26-29. Wang L X, Ge R S, Wang S S, et al, 2001. Method for automatically calibrating echo intensity of CINRAD system[J]. Meteor Sci Technol, 29(3):26-29(in Chinese).
- 吴涛,万玉发,沃伟锋,等,2013. SWAN 系统中雷达反射率因子质量控制算法及其应用[J].气象科技,41(5):809-817. Wu T, Wan Y F, Wo W F, et al, 2013. Design and application of radar reflectivity quality control algorithm in SWAN[J]. Meteor Sci Technol, 41(5):809-817(in Chinese).
- 徐黄飞,余洋,胡东明,等,2025.影响天气雷达反射率因子准确测量的关键因素分析及其标定效果检验[J].气象,51(6):735-743. Xu H F, Yu Y, Hu D M, et al, 2025. Analysis of key factors affecting accurate measurement of weather radar reflectivity factor and the verification of their calibration effectiveness[J]. Meteor Mon, 51(6):735-743(in Chinese).
- 詹棠,龚志鹏,郑浩阳,等,2019.使用气象目标物验证珠海-澳门双偏振雷达的差分反射率标定[J].气象科技,47(1):10-18. Zhan T, Gong Z P, Zheng H Y, et al, 2019. Differential reflectivity calibration of Zhuhai-Macao polarimetric radar using meteorological echoes[J]. Meteor Sci Technol, 47(1):10-18(in Chinese).
- 张文言,陈钟荣,罗志薇,等,2014. X波段天气雷达回波强度信号标定方法[J].科学技术与工程,14(25):12-17. Zhang W Y, Chen Z R, Luo Z W, et al, 2014. Calibration method of echo intensity of X-band weather radar[J]. Sci Technol Eng, 14(25):12-17(in Chinese).
- 周红根,吴艳峰,曹德煜,等,2015.基于太阳噪声气象雷达接收系统标定检验[J].现代雷达,37(9):18-21,32. Zhou H G, Wu Y F, Cao D Y, et al, 2015. Calibration test of meteorological radar receiving system based on solar noise[J]. Modern Radar, 37(9):18-21,32(in Chinese).
- Anagnostou E N, Morales C A, Dinku T, 2001. The use of TRMM precipitation radar observations in determining ground radar calibration biases[J]. J Atmos Oceanic Technol, 18(4):616-628.
- Atlas D, Mossop S C, 1960. Calibration of a weather radar by using a standard target[J]. Bull Amer Meteor Soc, 41(7):377-382.
- Doviak R J, Zrinc D S, 1993. Doppler Radar and Weather Observations[M]. Pittsburgh:Academic Press.
- Gorgucci E, Scarchilli G, Chandrasekar V, 1992. Calibration of radars using polarimetric techniques[J]. IEEE Trans Geosci Remote Sens, 30(5):853-858.
- Rinehart R E, 1978. On the use of ground return targets for radar reflectivity factor calibration checks[J]. J Appl Meteor Climatol, 17(9):1342-1350.
- Rinehart R E, 1997. Radar for Meteorologists[M]. 3rd ed. New York:Rinehart Publications.
- Silberstein D S, Wolff D B, Marks D A, et al, 2008. Ground clutter as a monitor of radar stability at Kwajalein, RMI[J]. J Atmos Oceanic Technol, 25(11):2037-2045.
- Steiner M, Smith J A, 2002. Use of three-dimensional reflectivity structure for automated detection and removal of nonprecipitating echoes in radar data[J]. J Atmos Oceanic Technol, 19(5):673-686.
- Vaccarone M, Bechini R, Chandrasekar C V, et al, 2016. An integrated approach to monitoring the calibration stability of operational dual-polarization radars[J]. Atmos Meas Tech, 9(11):5367-5383.
- Vukovic Z R, Young J M C, Donaldson N, 2014. Inter-radar comparison accounting for partially overlapping volumes[C]//Proceedings of the 8th European Conference on Radar in Meteorology and Hydrology. Garmisch-Partenkirchen: DWD and DLR.
- Whiton R C, Smith P L Jr, Harbuck A C, 1976. Calibration of weather radar systems using the sun as a radio source[C]//Proceedings of the 17th Conference on Radar Meteorology. Seattle: American Meteorological Society:60-65.
- Wolff D B, Marks D A, Petersen W A, 2015. General application of the relative calibration adjustment (RCA) technique for monitoring and correcting radar reflectivity calibration[J]. J Atmos Oceanic Technol, 32(3):496-506.

(本文责编:张芳)