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).

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*

徐黄飞[1] 余 洋[2] 胡东明[1] 刘艳中[1] 扬朝晖[3] 周嘉健[1] 曾慧明[1]

1 广东省气象数据中心,广州 510060
2 华云敏视达雷达(北京)有限公司,北京 100085
3 广东省阳江市气象局,阳江 529500

提 要:雷达反射率因子测量准确性与多个关键因素相关,其中雷达发射功率是波动最大的关键因素,影响反射率因子测量精确性;接收机动态范围是衡量接收通道稳定性的关键指标,影响反射率因子测量稳定性。优秀的天气雷达系统,具备关键性能参数的机内监测、在线标定和自动校正等功能。文章统计分析了广东 12 部组网双极化天气雷达(CINRAD/SA-D) 2020—2024 年的数据,检验了双极化天气雷达反射率因子在线标定和自动校正的有效性;通过关键因素的对比及稳定性分析,验证组网雷达离线标定的必要性。分析发现雷达冷机启动后采集的第 1 个体扫数据易出现数据质量问题,在雷达保障和资料应用时需引起相关人员的注意,建议相控阵雷达参考借鉴此种天气雷达反射率因子标定的机制和流程。

关键词:CINRAD/SA-D 雷达,雷达气象方程,反射率因子标定,发射功率,动态范围

中图分类号:P412 **文献标志码**:A **DOI**:10.7519/j.issn.1000-0526.2025.021401

Analysis of Key Factors Affecting Accurate Measurement of Weather Radar Reflectivity Factor and the Verification of Their Calibration Effectiveness

XU Huangfei[1] YU Yang[2] HU Dongming[1] LIU Yanzhong[1] YANG Chaohui[3]
ZHOU Jiajian[1] ZENG Huiming[1]

1 Guangdong Meteorological Data Center, Guangzhou 510060
2 Huayun Metstar Radar (Beijing) Co., Ltd., Beijing 100085
3 Yangjiang Meteorological Office of Guangdong Province, Yangjiang 529500

Abstract: Multiple key factors affect the accuracy of weather radar reflectivity factor measurement. Among them, radar transmission power is the key variable that is most prone to fluctuation in radar performance parameters, affecting the accuracy of radar measurement. The dynamic range of the receiver is a key indicator for measuring the stability of the receiving channel, and directly impacts the measurement results of reflectivity factor. An excellent weather radar system should have functions such as online monitoring, calibration and correction of key performance parameters. This paper statistically analyzes data samples collected over the years 2020－2024 from 12 networked CINRAD/SA-D radars in Guangdong, and tests the effectiveness of CINRAD/SA-D radar reflectivity factor calibration and online correction. The necessity

* 广东省重点领域研发计划项目(2020B1111200001)、国家自然科学基金项目(42075190)、广东省基础与应用基础研究基金项目(2021B1515310001)和中国气象局创新发展专项(CXFZ2024J058)共同资助
2024 年 7 月 3 日收稿; 2025 年 2 月 14 日收修定稿
第一作者:徐黄飞,主要从事大气探测装备建设和保障工作. E-mail:1138835292@qq.com
通讯作者:胡东明,主要从事大气探测技术及应用研究. E-mail:dongminghu@sohu.com

of offline calibration of networked radar is demonstrated through the comparison and stability analysis of key performance parameters. Additionally, the first volume scan data collected when the radar is powered on can easily have quality problems, which should be paid attention to in radar maintenance and data application. So, we recommend that the mechanism and flow of this kind of weather radar reflectivity factor calibration be used for the phased array weather radars.

Key words: CINRAD/SA-D radar, weather radar equation, reflectivity factor calibration, transmission power, dynamic range

引 言

现今气象业务中,天气雷达对天气实况监测和预报预警发挥着极其重要的作用。早期天气雷达通过无线电探测获取降水云团的位置和距离(张培昌等,1988)。多普勒天气雷达借助多普勒效应(相对运动导致频率或相移变化),不仅能得到降水强度,还能获取降水云团相对于雷达的径向运动速度(俞小鼎等,2006)。通过对天气雷达资料总结分析,可判断出冰雹、雷暴大风等强对流天气(郑媛媛等,2004;胡胜等,2015;竹利和康岚,2021)。天气雷达经过双极化升级后,通过发射水平和垂直两种极化的电磁波,除了可以探测到云团的反射率因子 Z、径向速度 V、速度谱宽 W 等信息,还可以通过水平和垂直通道的测量结果及其差异,进一步得到差分反射率 Z_{DR}、差分传播相移 φ_{PR} 以及相关系数 ρ 等偏振参量(张贵付,2018)。对上述参量进行分析处理,可以进一步识别降水粒子的形状大小、空间取向、相态分布以及降水类型等更为详细的信息(潘佳文等,2023;汤兴芝等,2023;郭飞燕等,2023)。天气雷达资料的应用,极大提高了天气实况监测、灾害天气预警及短时临近预报的水平。

为保证天气雷达反射率因子测量结果的准确可靠,定期标校非常必要。伴随着雷达技术发展,天气雷达从最初的模拟信号雷达(无线电探测和测距),经历了数字化、多普勒、双极化和相控阵等技术加持(刘黎平等,2016),其标定的项目和内容越来越多,方法也越来越完善(张沛源等,2001)。其中,反射率因子标定技术直接关系到雷达定量测量的准确度,是雷达组网观测的基础。通过对天气雷达系统发射参数、接收特性的检测,运用雷达气象方程可对反射率因子进行准确标定(柴秀梅等,2007)。对于组网观测的天气雷达,除实时进行反射率因子标定,一致性检查也非常必要(肖艳姣和刘黎平,2006;张志强等,2007;吴翀等,2021)。多普勒天气雷达增加了测速和速度谱宽的标定(潘新民等,2010b)。双极化天气雷达进一步增加了差分反射率、差分传播相移等偏振量的标定,包括双通道一致性检查(胡东明等,2019)。

广东组网观测的新一代天气雷达均由敏视达公司生产,具备在线自动标定功能(潘新民等,2010a),每年汛期前、后会组织两次离线标定,用于检验系统在线标定的准确性。本文利用近5年广东组网的天气雷达标定数据,通过单站和多站数据对比的方法,分析各个雷达的性能稳定性及性能差异,以保证测量数据的可靠性,并掌握数据差异的原因。

1 数据与方法

本文共分析了广东12部CINRAD/SA-D雷达,其中广州、韶关、阳江、梅州、汕头、湛江、河源、汕尾、肇庆等9部雷达是由CINRAD/SA雷达经过双极化改造的CINRAD/SA-D雷达;清远和深圳求雨坛是直接建设的2部CINRAD/SA-D雷达;江门上川岛为敏视达公司新研发的1部速调管发射机和全固态发射机双机热备份CINRAD/SA-D雷达。

CINRAD/SA-D雷达设计有在线标定功能,在每个体扫周期的间隔(约每6 min)做一次在线标定,标定内容包括发射功率、线性通道增益标定目标常数(SYSCAL)、测试信号(分为连续波CW和射频激励RFD)等。天气雷达冷机启动时,部分参数的冷态启动数据(如发射功率)与稳定运行状态下的热态数据存在差异,因此本文分析时剔除了这些异常值。雷达接收机的动态范围曲线采用最小二乘法进行拟合,拟合直线的斜率在1±0.015范围内,线性拟合的均方根误差≤0.5 dB;用实测曲线与拟合直线对应点的输出数据差值>1.0 dB来确定低端下拐点和高端上拐点,上、下拐点之间所对应的输入信号功率值的差即为动态范围。

2　雷达反射率因子测量及其标定

2.1　反射率因子测量原理

天气雷达反射率因子与雷达系统性能、降水粒子相态、目标物距离及周围大气环境相关。若降水粒子满足瑞利散射条件,反射率因子可通过 Probert-Jones 雷达方程计算得到:

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

式中:Z 为雷达反射率因子,R 为目标距离雷达天线喷口处的距离(单位:km),P_r 为雷达天线喷口处的接收功率(单位:kW),P_t 为雷达天线喷口处的发射功率(单位:kW),λ 为雷达发射脉冲波长(单位:cm),τ 为雷达发射脉冲宽度(单位:μs),θ 为雷达垂直方向波束宽度(单位:°),φ 为雷达水平方向波束宽度(单位:°),G_e 为雷达天线增益(单位:dB),c 为光速(单位:$m \cdot s^{-1}$),K^2 是与目标物散射特性有关的量,当满足瑞利散射条件,即粒子尺度远小于电磁波波长的情况下,液态降水粒子其为 0.93。

为方便表达,将表征雷达系统性能的参数定义为雷达常数 C,则式(1)可简化为:

$$Z = CR^2 P_r \qquad (2)$$

$$C = \frac{2.69 \times 10^{16} \lambda^2}{P_t G_e^2 \tau\theta\varphi} \qquad (3)$$

由于不同类型降水的 Z 的变化区间很大,会跨越几个数量级,因此常用 Z_{dB} 来表达反射率因子的数值大小,即:

$$Z_{dB} = 10\lg(Z/Z_0) \quad (Z_0 = 1\ mm^6 \cdot m^3) \qquad (4)$$

将式(2)代入式(4),则得:

$$Z_{dB} = 20\lg R + P_{r_{dB}} + C_0 \qquad (5)$$

式(5)右端第一项称为距离订正项;第二项 $P_{r_{dB}} = 10\lg \frac{P_r}{P_{min}}$,是接收功率(也称为回波功率)与雷达最小可测功率之比的分贝数;第三项 $C_0 = 10\lg C$,是与雷达系统性能有关的常数,取决于雷达系统本身特性。

2.2　反射率因子标定及其检验

将式(3)代入式(5),则得:

$$Z_{dB} = 20\lg R + P_{r_{dB}} + 164.3 + 20\lg\lambda - P_{t_{dB}} - 20\lg G_e - 10\lg\tau - 10\lg\theta - 10\lg\varphi \qquad (6)$$

根据式(6)可知,反射率因子与多个变量因素有关。其中 G_e、θ 和 φ 取决于雷达天线本身,天线不发生明显形变的情况下这些参数的变化可忽略不计。λ、τ 是发射机固有的性能参数,相对稳定。P_t 是天线喷口处的功率,如果基于发射机输出功率计算 P_t,需要准确测量发射机输出口到天线喷口的发射支路损耗 L_t,双极化雷达应区分水平和垂直发射支路损耗。P_r 为天线喷口处的接收功率,如果基于接收机接收功率计算 P_r,需要考虑接收支路损耗 L_r,双极化雷达应区分水平和垂直接收支路损耗。另外,理论计算还需考虑大气衰减(双程)RL_{at}、天线罩损耗(双程)L_p 以及使用的线缆(含匹配滤波器和连接头)损耗 L_o。综上分析,可得到天气雷达反射率因子标定公式为:

$$Z_{dB} = 20\lg R + P_{r_{dB}} + 164.3 + 20\lg\lambda - P_{t_{dB}} - 20\lg G_e - 10\lg\tau - 10\lg\theta - 10\lg\varphi + RL_{at} + L_p + L_t + L_r + L_o \qquad (7)$$

式中天线罩损耗、发射支路损耗、接收支路损耗和线缆损耗经常被归并为系统损耗 $L_\sum$ ($L_p + L_t + L_r + L_o$),则式(7)可简化为:

$$Z_{dB} = 20\lg R + P_{r_{dB}} + C_0 + RL_{at} + L_\sum \qquad (8)$$

可以看出,影响反射率因子测量准确性的关键因素有两个:一是雷达常数 C_0(与雷达系统参数和雷达发射功率 P_t 有关),二是回波接收功率 P_r。通常 λ、τ、θ、φ、G_e 等雷达系统参数相对稳定,雷达常数 C_0 的波动主要由雷达发射功率的变化引起,回波接收功率 P_r 的波动主要由接收机动态范围的变化引起。因此,影响反射率因子测量准确性的关键因素可以追溯为雷达发射功率和接收机动态范围,实时准确地监测雷达发射功率和接收机动态范围,并在两者发生偏差时及时修正,对保证天气雷达反射率因子测量的准确性极其重要。

3　影响雷达反射率因子测量关键因素

3.1　接收机动态范围对比与稳定性影响

雷达回波接收功率 P_r 主要受接收机动态范围的影响。雷达长时间工作,接收机动态范围会随接收机噪声系数、通道增益等参数的变化而变化,进而引起反射率因子的测量误差。在使用机内法测量接收机动态范围时,雷达一般处于停止观测的状态,因此 CINRAD/SA-D 雷达采用 CW 测试信号模拟回波信号,从接收机前端注入,经接收通道和信号处理

系统处理后，通过终端实时采集对应距离的输出功率，控制 CW 测试信号注入功率在一定范围内变化，从而对回波接收功率和测试信号注入功率的对应特性曲线（即动态范围）进行测量。采用机外法测量接收机动态范围时，一般采用机外信号源发出的信号来模拟回波信号。

图 1a 是 2024 年广东雷达巡检时，采用机外信号源人工测试广州、梅州、汕头和汕尾 4 个雷达站的接收机动态范围，每个站利用窄脉冲宽度信号（广东 CINRAD/SA-D 雷达体扫模式普遍采用 VCP21 降水模式）分别测试了水平和垂直通道，采用最小二乘法拟合直线的斜率。由图 1 可见，4 个站的动态范围非常接近，分布于 97～99 dB（表 1）。对比各站水平和垂直通道动态范围曲线可知，水平和垂直通道的一致性较好。观察动态范围曲线的下拐点和上拐点可看出细微差别（图 1b，1c），汕尾站的下拐点最小，说明该站对弱信号的探测能力最强；梅州站水平和垂直通道在下拐点附近略有偏离。

表 1 列出了 2023 年广东 12 部 CINRAD/SA-D 雷达窄脉冲信号下的水平和垂直通道动态范围，集中在 96～99 dB，其中拟合直线斜率最小的是汕尾站的水平通道（0.9851），均方根误差最大的是梅州站的水平通道（0.4110 dB），可知通过单极化雷达改造而成的和直接建设的双极化雷达，动态范围差异不大。检验双通道一致性发现，水平和垂直通道动态范围拟合直线斜率差（ΔS_{lope}）最大的是湛江站，为 0.0114。ΔS_{lope} 引起的差分反射率 Z_{DR} 偏差值可表示为 $\Delta Z_{DR}=Z_H \cdot \Delta S_{lope}$（$Z_H$ 为水平通道反射率因子）。在 50～70 dB 强回波范围，计算得到窄脉冲 ΔZ_{DR} 为 0.570～0.798 dB，此时标准方差为 0.032 dB，虽然符合≤0.2 dB 的指标要求，但在细致分析雷达数据质量时则需要留意双通道差异造成的影响。

系统 Z_{DR} 的标定对降水粒子的形态识别准确性尤为重要，在双极化天气雷达业务运行过程中，一般使用微雨法对系统 Z_{DR} 进行校正。根据小雨的形态特性，在下降过程中其 Z_{DR} 趋近于零。用微雨法校正系统 Z_{DR} 的具体方法是：在小雨天气条件下运行体扫获取基数据，读取基数据的系统 Z_{DR} 偏差，将该偏差填入适配数据（SP11），然后在合适的小雨天气过程中再运行获取新的基数据，读取基数据的系统 Z_{DR} 偏差，验证适配数据对 Z_{DR} 的校正是否生效。图 2 是湛江雷达在适配数据校正前后，以微雨法读取小雨基数据的 Z_{DR} 偏差对比。校正前，适配数据填入值为 0.0 dB，读取 5 组小雨基数据 Z_{DR} 偏差，变化范围为 0.15～0.25 dB（图略）。选择其中最接近平均值的一组 Z_{DR} 偏差（0.19 dB）为基准，填入适配数

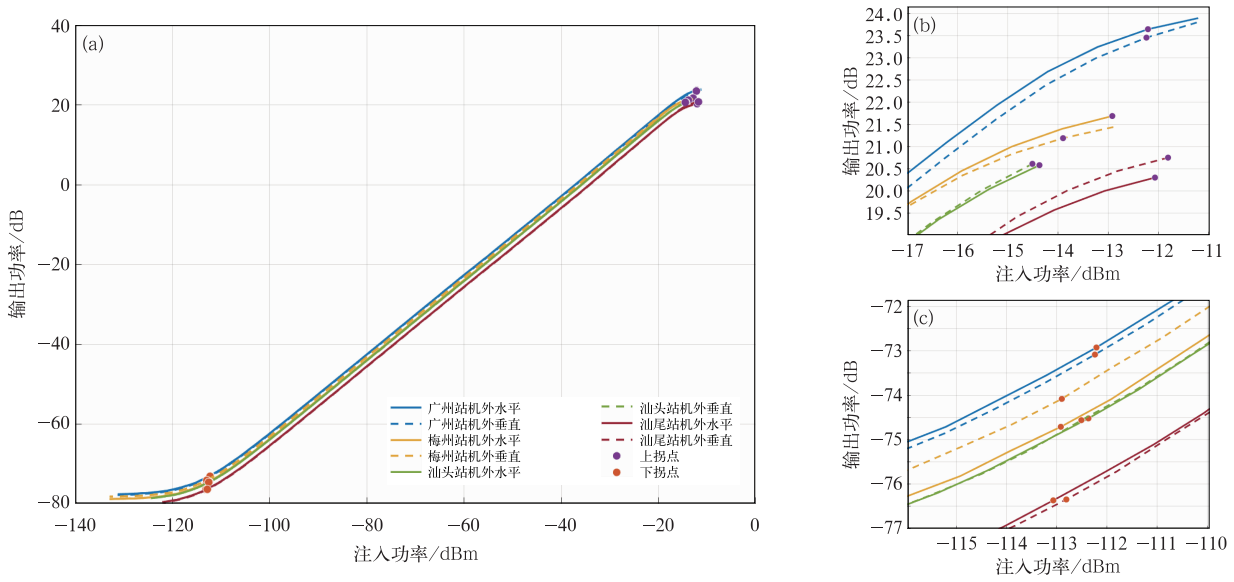


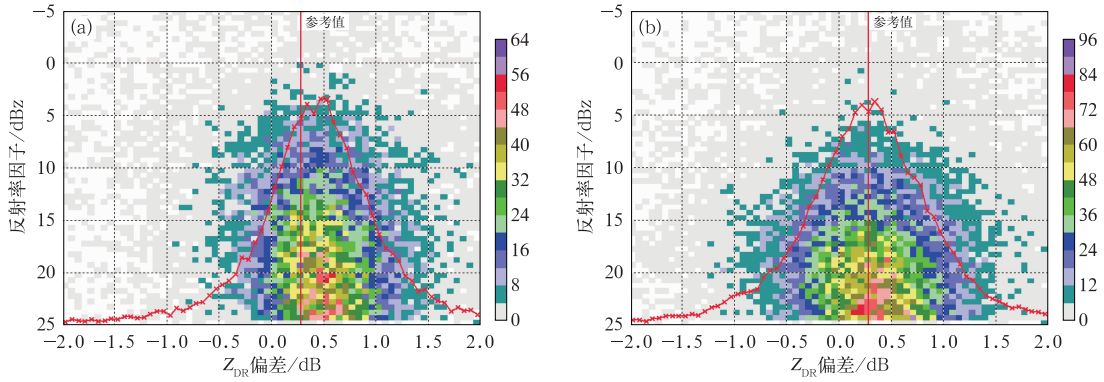
图 1 2024 年广州、梅州、汕头、汕尾 4 个雷达站的接收机(a)动态范围曲线及(b,c)局部放大的(b)上拐点和(c)下拐点

Fig. 1 (a) Dynamic range curves and (b,c) locally enlarged (b) upper inflection point and (c) lower inflection point of receivers at Guangzhou, Meizhou, Shantou and Shanwei stations in 2024

表 1　2023 年广东 CINRAD/SA-D 雷达动态范围统计表

Table 1　Dynamic ranges of CINRAD/SA-D radar in Guangdong in 2023

站点	水平通道			垂直通道			Z_{DR}标准方差/dB
	动态范围/dB	斜率	均方根误差/dB	动态范围/dB	斜率	均方根误差/dB	
广州	99	0.9886	0.2778	99	0.9885	0.2517	0.040
韶关	97	0.9886	0.3253	96	0.9888	0.2786	0.014
阳江	96	0.9912	0.2832	97	0.9851	0.4015	0.015
梅州	98	0.9892	0.4110	97	0.9868	0.3528	0.040
汕头	97	0.9903	0.2667	97	0.9892	0.3235	0.020
湛江	98	0.9979	0.3302	99	0.9865	0.3812	0.032
河源	98	0.9857	0.3000	99	0.9865	0.3144	0.112
汕尾	99	0.9851	0.3881	99	0.9870	0.3498	0.010
肇庆	97	0.9895	0.2774	99	0.9877	0.3754	0.040
清远	98	0.9868	0.3928	99	0.9853	0.4098	0.018
深圳	99	0.9870	0.3238	99	0.9872	0.2689	0.055
上川岛	115	0.9894	0.3054	115	0.9865	0.3537	0.050



注:填色为样本数。

图 2　2024 年 7 月 28 日湛江雷达站适配数据校正(a)前、(b)后小雨基数据的 Z_{DR}偏差对比

Fig. 2　Z_{DR} deviation comparison of adaptation data (a) before and (b) after correction from Zhanjiang Radar Station on 28 July 2024

据的校正值为−0.19 dB,校正后再读取的小雨基数据 Z_{DR}偏差为 0.06 dB,说明对系统 Z_{DR}的校正已生效。

分析 2022 年 4 月至 2024 年 4 月梅州站连续两年动态范围的变化(图 3),红实线是用机内信号源在线检查的水平通道动态范围,机内在线检查每月一次,蓝虚线是用机内信号源在线检查的垂直通道动态范围,两年的监测结果表明动态范围比较稳定,差异最大仅为 2 dB。红色三角形和蓝色正方形是每年两次分别用机外信号源人工测试的水平和垂直通道动态范围,结果表明机内在线自动检查的动态范围结果可靠性高。

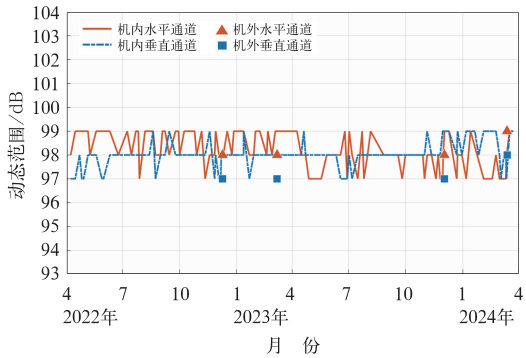


图 3　2022 年 4 月至 2024 年 4 月梅州站连续两年动态范围值的变化

Fig. 3　Variation of dynamic range value of Meizhou Station from April 2022 to April 2024

3.2　发射功率稳定性与影响

雷达发射功率波动较大,是反射率因子测量波动产生的主要来源,既要通过实时机内监测来订正

反射率因子，也要定期用机外仪表对机内测试值加以校准。需要注意的是，雷达发射功率与采用的观测模式有关，如脉冲宽度、脉冲数等，由于广东 CINRAD/SA-D 雷达普遍采用了 VCP21 观测模式，所以本文分析的发射功率均为 VCP21 模式的测量值。

图 4 为 2023 年 4 月 20 日至 9 月 20 日肇庆、韶关、广州 3 个站雷达发射功率连续 5 个月监测结果。肇庆、韶关和广州 3 个站机内监测的发射功率与采用机外功率计测量的广州站发射功率的一致性较高，表明机内监测的功率结果可信。肇庆雷达峰值功率在 710～719 kW 范围，波动为 0.05 dB；韶关雷达峰值功率在 680～700 kW 范围，波动为 0.12 dB；广州雷达峰值功率在 658～670 kW 范围，波动为 0.08 dB。由图 4 的监测结果（36 000 个样本数据）来看，CINRAD/SA-D 雷达的发射功率比较稳定（指标要求输出峰值功率的平均值≥650 kW，机内监测输出峰值功率波动≤0.4 dB）。细致分析 2023 年 6 月 4—9 日广州站的发射功率变化（图 5），最大和最小功率之差为 7 kW。发射功率波动意味着雷达参数发生了变化，这会造成反射率因子测量出现波动。

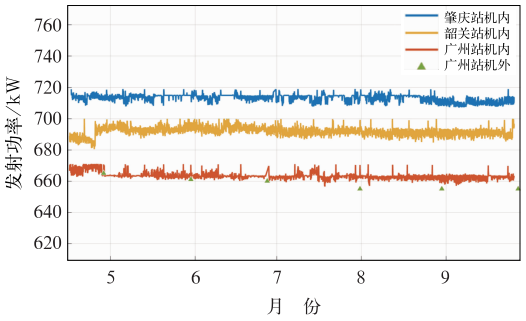


图 4 2023 年 4 月 20 日至 9 月 20 日肇庆、韶关、广州 3 个站雷达发射功率连续 5 个月监测结果

Fig. 4 Monitoring result of transmission power of radar at Zhaoqing, Shaoguan and Guangzhou stations from 20 April to 20 September 2023

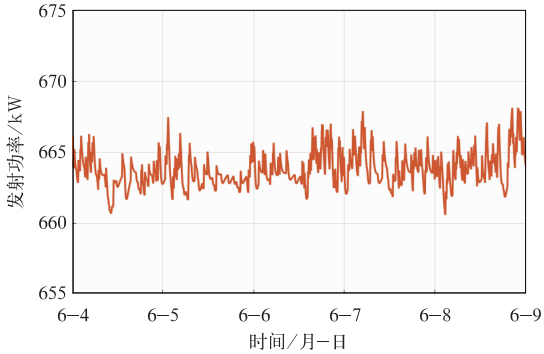


图 5 2023 年 6 月 4—9 日广州站的雷达发射功率

Fig. 5 Transmission power of radar at Guangzhou Station from 4 to 9 June 2023

3.3 反射率因子标定效果检验

CINRAD/SA-D 雷达接收机的主要作用就是对收到的回波小信号进行放大处理。如果接收动态范围发生变化，会导致回波信号的反射率因子测量值和真实值的差值也发生变化，通过标校 SYSCAL 可使反射率因子测量值与目标值的差值减小，同时也可以保证不同雷达的反射率因子测量的一致性。

CINRAD/SA-D 雷达使用 CW 测试信号，通过四位开关和数控衰减器，从－90 dBm 到－40 dBm 区间（间隔 10 dBm）注入接收机，通过 RDASOT 软件依次读取对应的探测距离为 5、50、100、150、200 km 的测量值，并与根据式（8）计算的期望值相比较，通过调整 SYSCAL 使测量值和期望值偏差在±1 dB 以内。标校后的 SYSCAL 会成为雷达反射率因子测量误差校正的基准值，即雷达运行后首个体扫的 SYSCAL。

图 6 为河源雷达站 2024 年 1 月 15 日至 2 月 15 日发射功率和 SYSCAL 的变化曲线，每个体扫周期的间隙做一次标定（即每 6 min 一个样本数据）。可以看出，SYSCAL 和发射功率的波动（门信号）反相“同频共振”，当监测到发射功率发生波动，SYSCAL 给出相应修正量，校正测量结果。另外，SYSCAL 除响应发射功率的波动外，自身也有不规律的变化，说明接收通道本身也需要实时监测和校正。

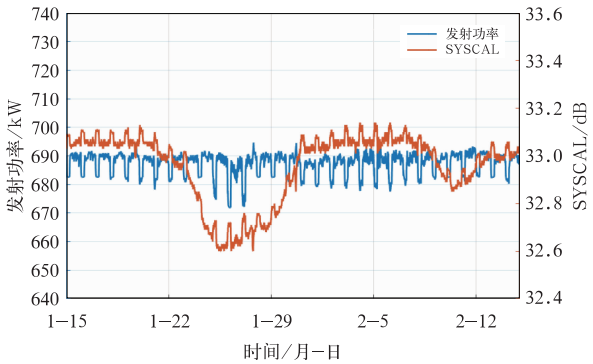


图 6 2024 年 1 月 15 日至 2 月 15 日河源雷达发射功率和 SYSCAL 的变化曲线

Fig. 6 Variation curves of transmission power and SYSCAL of Heyuan Radar from 15 January to 15 February 2024

3.4　SYSCAL 在线标定和实时校正

综上所述,影响雷达反射率因子测量准确性的关键因素有两个:一是雷达发射功率,二是接收机动态范围。当其中任一参数发生变化,必然引起测量值变化,通过计算误差值,修正下个体扫的测量值,从而达到在线标校作用。如果雷达发射功率发生了波动,期望值随之发生变化,通过标校 SYSCAL 可使反射率因子测量值趋于期望值;当动态范围发生变化,SYSCAL 也将变化,需要通过相应的测试信号实时监测并校正,以确保测量结果准确可靠。

CINRAD/SA-D 雷达反射率因子在线自动标校,除了以机内监测的发射机功率来计算期望值之外,在每个体扫开始前,用 3 组 44 km 处的 RFD 信号(3 组信号分别衰减 62、50、32 dB)和 5～145 km 距离范围 CW 信号,从接收机前端注入,通过计算 2 种测试信号测量误差,取平均得到线性通道增益标定目标常数变化量 ΔSYSCAL,用于下个体扫校正反射率因子测量值的 SYSCAL,从而校正反射率因子测量值,以保证反射率因子测量误差在 1 dB 范围内。

图 7 给出了 2024 年 1 月 15 日至 2 月 15 日 CW 信号和 RFD 信号修正 SYSCAL 的效果,当监测到 SYSCAL 出现变化,测试信号 CW 和 RFD 给出相应的反相修正量,及时对 SYSCAL 加以校正。当测试信号出现故障或偏差大到无法校正,则报警“线性通道测试信号变坏”、“线性通道增益标定目标常数超限”,提醒保障人员需要开展维护维修。

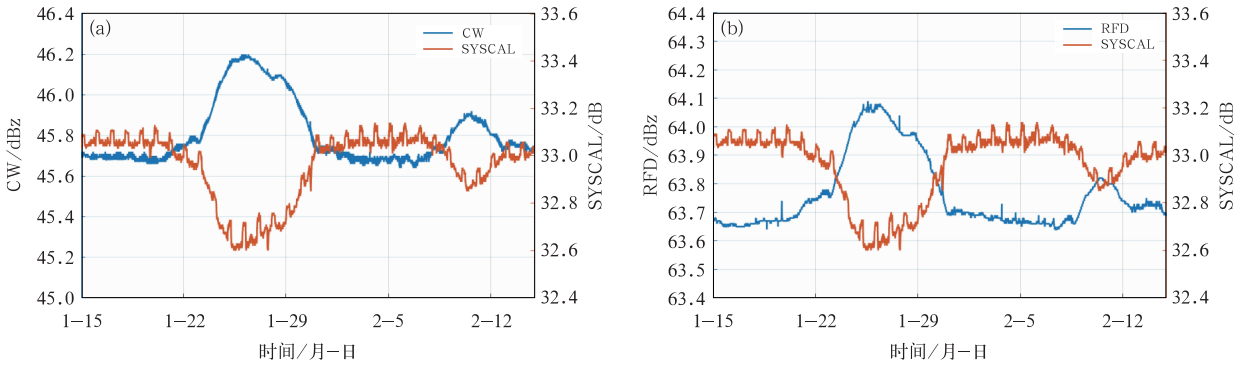


图 7　2024 年 1 月 15 日至 2 月 15 日河源雷达(a)CW 和(b)RFD 测试信号修正 SYSCAL 效果

Fig. 7　Correction effect of SYSCAL in (a) CW and (b) RFD test signals of Heyuan Radar from 15 January to 15 February 2024

双极化天气雷达反射率因子测量增加了差分反射率 Z_{DR},即水平通道反射率因子 Z_H 和垂直通道反射率因子 Z_V 的差值。单极化雷达在升级双极化功能时,以原本存在的 Z_H 为基准,通过机内在线监测 Z_{DR} 在误差允许范围(±1 dB 以内)且波动范围稳定(标准差≤0.2 dB),从而保证 Z_V 的可靠性。一旦出现偏差,且偏差超过报警阈值,则提醒保障人员需要开展维护维修。

通过分析,汕头、湛江、韶关 3 个站连续 7 个月的 Z_{DR}(图 8)分别约为 0.18、−0.20、−0.38 dB,相应的标准差分别为 0.01、0.02、0.01 dB,说明汕头、湛江、韶关 3 个站的水平通道和垂直通道一致性较好。

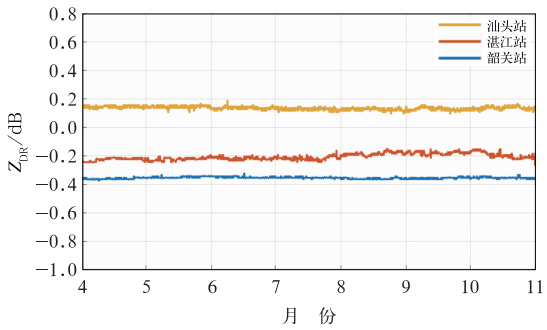


图 8　2023 年 4 月 1 日至 11 月 1 日汕头、湛江、韶关 3 个站连续 7 个月的 Z_{DR} 变化曲线

Fig. 8　Variation curves of Z_{DR} at Shantou, Zhanjiang and Shaoguan stations from 1 April to 1 November 2023

4 结论与讨论

雷达反射率因子作为天气雷达测量的最重要内容，保证其测量结果的准确可靠至关重要。在雷达气象方程中，天线增益、水平波束宽度和垂直波束宽度均取决于雷达天线反射体，由于CINRAD/SA-D雷达采用的是抛物面天线，不容易发生形变，如果没有外力导致天线反射体出现明显形变，天线增益和波束宽度的变化是可以忽略的小项；波长λ、脉冲宽度τ取决于雷达发射机，由于业务雷达使用固定频率，波长λ不变，广东CINRAD/SA-D雷达日常运行的观测模式多数采用VCP21模式，其监测脉冲宽度(1.57 μs)在稳定运行过程中的标准偏差为0.01 μs，即正常业务运行的天气雷达，脉冲宽度的变化也是可以忽略的小项。因此，影响反射率因子测量的关键因素是发射机功率和接收机动态范围。数据分析表明，广东CINRAD/SA-D雷达的发射机功率基本保持稳定；当发射功率出现波动，反射率因子期望值随之变化，雷达通过接收机SYSCAL来修正反射率因子实测值与期望值趋于一致。接收动态范围的变化引起SYSCAL变化，CINRAD/SA-D雷达通过连续波CW信号和射频激励RFD信号来修正；在保证水平通道反射率因子可靠的基础上，通过检查差分反射率Z_{DR}来监测垂直通道反射率因子。

CINRAD/SA-D雷达虽设计有关键性能参数的机内监测、在线标定和自动校正等功能，但也要定期用机外仪表对机内测试值加以校准。例如2024年1月15日至2月15日，河源雷达的CW和RFD测试信号通过修正SYSCAL的变化，进一步修正发射功率的波动，验证了其在线标定和自动校正的有效性。广东每年两次定期巡检，不仅检验机内在线标定的准确性，同时保证组网雷达观测的一致性，得到可靠的组网拼图产品。

通过上述在线定标机制的分析，当CINRAD/SA-D雷达故障或冷机启动后，采集的第1个体扫数据可能出现数据质量问题。因为第1个体扫用的SYSCAL是预设值，等完成第1个体扫后，才会启动在线标定，用于修正下一个体扫的测量结果。在日常业务中，预报员发现某台雷达某个时次的反射率因子异常偏大或异常偏小，可能是反射率因子标定错误的原因。此类信息雷达基数据里也有说明，记录在每个体扫基数据“公共数据块”的“任务配置块”，科研人员在分析雷达数据质量时，可读取其中的雷达性能参数。雷达保障人员需留意雷达系统报警提示信息，如“线性通道测试信号变坏”“线性通道增益标定目标常数超限”，则要及时检查本站雷达反射率因子标定是否异常。

随着相控阵雷达越来越多应用于气象业务观测体系(于明慧等，2019；程元慧等，2020；肖靖宇等，2022)，有必要借鉴CINRAD/SA-D雷达，优化并完善其在线标定功能，只是机制和流程可能更加复杂。雷达参数中有关天线的波束宽度和增益随着偏离阵面法向发生变化，多波束观测时变化更复杂。相控阵雷达的核心模块由多组TR组件构成，且其性能随着环境温度的变化而变化，给机内监测和在线标定带来巨大挑战(张光义和赵玉洁，2006；刘黎平等，2014)。后续将进一步检验评估相控阵雷达的机内监测和在线标定的功能及其效果。

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).

程元慧，傅佩玲，胡东明，等，2020. 广州相控阵天气雷达组网方案设计及其观测试验[J]. 气象，46(6)：823-836. Cheng Y H，Fu P L，Hu D M，et al，2020. The Guangzhou phased-array radar networking scheme set-up and observation test[J]. Meteor Mon，46(6)：823-836(in Chinese).

郭飞燕，刁秀广，褚颖佳，等，2023. 弱垂直风切变环境下强下击暴流双偏振雷达特征[J]. 应用气象学报，34(6)：681-693. Guo F Y，Diao X G，Chu Y J，et al，2023. Dual polarization radar characteristics of severe downburst occurred in weak vertical wind shear[J]. J Appl Meteor Sci，34(6)：681-693(in Chinese).

胡东明，张羽，傅佩玲，等，2019. 广州S波段双线偏振天气雷达双通道一致性测试及分析[J]. 气象科技，47(3)：373-379. Hu D M，Zhang Y，Fu P L，et al，2019. Dual-channel consistency analysis of S-band dual-polarimetric radar[J]. Meteor Sci Technol，47(3)：373-379(in Chinese).

胡胜，罗聪，张羽，等，2015. 广东大冰雹风暴单体的多普勒天气雷达特征[J]. 应用气象学报，26(1)：57-65. Hu S，Luo C，Zhang Y，et al，2015. Doppler radar features of severe hailstorms in Guangdong Province[J]. J Appl Meteor Sci，26(1)：57-65(in Chinese).

刘黎平，胡志群，吴翀，2016. 双线偏振雷达和相控阵天气雷达技术的发展和应用[J]. 气象科技进展，6(3)：28-33. Liu L P，Hu Z Q，Wu C，2016. Development and application of dual linear polarization

radar and phased-array radar[J]. Adv Meteor Sci Technol, 6(3): 28-33(in Chinese).

刘黎平，吴林林，吴翀，等，2014. X 波段相控阵天气雷达对流过程观测外场试验及初步结果分析[J]. 大气科学，38(6)：1079-1094. Liu L P, Wu L L, Wu C, et al, 2014. Field experiment on convective precipitation by X-band phased-array radar and preliminary results[J]. Chin J Atmos Sci, 38(6): 1079-1094(in Chinese).

潘佳文，徐鸣一，吴举秀，等，2023. 基于对流风暴结构的双极化雷达 Z_{DR} 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_{DR} 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，黄跃青，等，2010a. CINRAD/SA&SB 回波强度定标故障的诊断分析和解决方法[J]. 气象，36(12)：122-127. Pan X M, Chai X M, Huang Y Q, et al, 2010a. The fault diagnosis and solution of CINRAD/SA & SB echo intensity calibration[J]. Meteor Mon, 36(12): 122-127(in Chinese).

潘新民，柴秀梅，徐俊领，等，2010b. 新一代天气雷达测速定标精度检查方法[J]. 气象科技，38(2)：214-221. Pan X M, Chai X M, Xu J L, et al, 2010b. Methods for verifying precisions of velocity demarcation of CINRAD[J]. Meteor Sci Technol, 38(2): 214-221(in Chinese).

汤兴芝，俞小鼎，姚瑶，等，2023. 华东一次极端冰雹天气过程雷达回波特征的比较分析[J]. 高原气象，42(4)：1078-1092. Tang X Z, Yu X D, Yao Y, et al, 2023. Comparative analysis of radar echo characteristics of an extreme hail storm process in East China[J]. Plateau Meteor, 42(4): 1078-1092(in Chinese).

吴翀，刘黎平，仰美霖，等，2021. X 波段双偏振雷达相态识别与拼图的关键技术[J]. 应用气象学报，32(2)：200-216. Wu C, Liu L P, Yang M L, et al, 2021. Key technologies of hydrometeor classification and mosaic algorithm for X-band polarimetric radar[J]. J Appl Meteor Sci, 32(2): 200-216(in Chinese).

肖靖宇，杨玲，俞小鼎，等，2022. 佛山相控阵阵列雷达探测 2020 年 9 月 4 日短时强降水天气过程的分析[J]. 气象，48(7)：826-839. Xiao J Y, Yang L, Yu X D, et al, 2022. Analysis of short-time severe rainfall on 4 September 2020 detected by phased array radar in Foshan[J]. Meteor Mon, 48(7): 826-839(in Chinese).

肖艳姣，刘黎平，2006. 新一代天气雷达网资料的三维格点化及拼图方法研究[J]. 气象学报，64(5)：647-657. Xiao Y J, Liu L P, 2006. Study of methods for interpolating data from weather radar network to 3-D grid and mosaics[J]. Acta Meteor Sin, 64(5): 647-657(in Chinese).

于明慧，刘黎平，吴翀，等，2019. 利用相控阵及双偏振雷达对 2016 年 6 月 3 日华南一次强对流过程的分析[J]. 气象，45(3)：330-344. Yu M H, Liu L P, Wu C, et al, 2019. Analysis of severe convective process in South China on 3 June 2016 using phased-array and dual-polarization radar[J]. Meteor Mon, 45(3): 330-344(in Chinese).

俞小鼎，姚秀萍，熊廷南，等，2006. 多普勒天气雷达原理与业务应用[M]. 北京：气象出版社. Yu X D, Yao X P, Xiong T N, et al, 2006. Principle and Business Application of Doppler Weather Radar[M]. Beijing: China Meteorological Press(in Chinese).

张光义，赵玉洁，2006. 相控阵雷达技术[M]. 北京：电子工业出版社. Zhang G Y, Zhao Y J, 2006. Phased Array Radar Technology[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry(in Chinese).

张贵付，2018. 双偏振雷达气象学[M]. 北京：气象出版社. Zhang G F, 2018. Weather Radar Polarimetry[M]. Beijing: China Meteorological Press(in Chinese).

张培昌，杜秉玉，戴铁丕，1988. 雷达气象学[M]. 北京：气象出版社. Zhang P C, Du B Y, Dai T P, 1988. Radar Meteorology[M]. Beijing: China Meteorological Press(in Chinese).

张沛源，周海光，梁海河，等，2001. 数字化天气雷达定标中应注意的一些问题[J]. 气象，27(6)：27-32. Zhang P Y, Zhou H G, Liang H H, et al, 2001. Some problems of the calibrations of digit weather radars[J]. Meteor Mon, 27(6): 27-32(in Chinese).

张志强，刘黎平，谢明元，等，2007. CINRAD 三维拼图产品显示系统[J]. 气象，33(9)：19-24. Zhang Z Q, Liu L P, Xie M Y, et al, 2007. A display system of CINRAD 3D mosaic products[J]. Meteor Mon, 33(9): 19-24(in Chinese).

郑媛媛，俞小鼎，方翀，等，2004. 一次典型超级单体风暴的多普勒天气雷达观测分析[J]. 气象学报，62(3)：317-328. Zheng Y Y, Yu X D, Fang C, et al, 2004. Analysis of a strong classic supercell storm with Doppler weather radar data[J]. Acta Meteor Sin, 62(3): 317-328(in Chinese).

竹利，康岚，2021. 基于相对风暴径向速度场的辐合区自动识别算法[J]. 应用气象学报，32(1)：102-114. Zhu L, Kang L, 2021. Automatic recognition algorithm of convergence region based on relative storm radial velocity field[J]. J Appl Meteor Sci, 32(1): 102-114(in Chinese).

（本文责编：侯翠梅）