

中美天气雷达回波强度标定性能分析*

李喆 邵楠 高玉春 王崇文

(中国气象局气象探测中心 北京 100081)

摘要: 天气雷达回波强度的测量误差主要由雷达系统硬件造成,会直接影响定量降水估测精度。介绍了中美业务化天气雷达回波强度的标定原理,比较了以 Syscal 和 dBZ_0 作为标定常数的雷达气象方程的两种表达形式,分析了影响回波强度测量精度的因素,即发射机功率和接收机增益的变化;并以我国新一代天气雷达(北京 CINRAD/SA 及杭州 CINRAD/CA)和美国 WSR-88D 天气雷达(KTLX 和 KICT)为例,给出了标定常数的实际变化曲线和分析结果。对比发现,以 dBZ_0 作为标定常数的标定过程更稳定,有助于提高雷达数据质量。

关键词: 天气雷达; 雷达气象方程; 回波强度; 接收机增益

中图分类号: TN959.4 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.70

Calibration performance analysis on weather radar echo intensity between China and USA

Li Zhe Shao Nan Gao Yuchun Wang Chongwen

(Meteorological Observation Centre of China Meteorological Administration, Beijing 100081, China)

Abstract: Measurement error for echo intensity of weather radar mainly results from radar hardware and will have a direct influence on the accuracy of quantitative precipitation estimation. This paper introduces calibration principles for operational weather radars of China and USA. In addition, it compares two expression forms for weather radar equation using Syscal and dBZ_0 as calibration constant respectively. Moreover, it analyzes factors that affect measurement accuracy of echo intensity, namely, variations in transmitter power and receiver gain. What is more, taking CINRAD radars(Beijing CINRAD/SA and Hangzhou CINRAD/CA) and WSR-88D(KTLX and KICT) radars as examples, it presents practical variation curves and analysis results for calibration constants. By comparison, it can be found that calibration process using dBZ_0 as calibration constant is more stable and hence is helpful for improving radar data quality.

Keywords: weather radar; weather radar equation; echo intensity; receiver gain

1 引言

自 20 世纪 90 年代以来,我国开展大规模新一代天气雷达建设以来,已初步形成一个对大、中、小尺度灾害性天气监测的天气雷达业务网,并在防灾减灾中发挥了重要作用^[1-5]。天气雷达回波强度的测量误差会极大地影响短时灾害性天气监测和预报水平,尤其是对降水定量估测和降水性质判断。目前,根据定量降水估计的精度要求,天气雷达回波强度的测量误差必须控制在 1 dB 之内。回波强度的测量误差主要来自于雷达系统,即由雷达硬件造成的误差^[6-8]。提高回波强度的测量精度,一直是雷达气象学界关注的焦点。

为了减小由于天气雷达硬件参数变化引起的回波强度测量误差,近年来雷达技术人员进行了相关研究。张沛源等人^[9]讨论了数字化天气雷达定标中应注意的一些问题,潘新民等人^[10-12]对天气雷达接收功率标定和检验方法进行了探讨,介绍了回波强度定标相关的接收机测试通道、信号主通道以及发射机测试信号流程,总结了回波强度定标故障的诊断分析方法,并给出了 CINRAD/SB 雷达回波强度定标和调校方法;柴秀梅等人^[13]和王立轩等人^[14]研究了新一代天气雷达的自动标定技术,王志武等人^[15]对 CINRAD/SA 定标常见问题进行了分析。

本文介绍了中美天气雷达回波强度的标定原理,比较了雷达气象方程的两种表达方式,分析了影响回波强度测

收稿日期:2015-10

* 基金项目:国家自然科学基金(U1431104)资助项目

量精度的因素,并以我国新一代天气雷达和美国 WSR-88D 天气雷达为例,给出了标定参数的实际变化曲线和分析结果。

2 我国新一代天气雷达回波强度测量原理

天气雷达回波强度是通过测量雷达接收的回波功率,根据雷达气象方程计算得到的。Probert Jones 在假定降水粒子满足瑞利散射,天线波束中充满了散射体,且天线波束为高斯型的条件下,推导的雷达气象方程如下:

$$P_r = \frac{\pi^3}{1.024 \ln 2} \times |K|^2 \times \frac{P_t G^2 c \tau \theta \varphi}{\lambda^2 R^2} \times Z \quad (1)$$

式中: Z 为反射率因子, P_r 为到达天线馈源处的回波功率, P_t 为到达天线馈源处的发射峰值功率, λ 为雷达发射的波长, G 为天线增益, τ 为雷达发射的脉冲宽度, θ 为水平方向波束宽度, φ 为垂直方向波束宽度, R 为目标物距雷达天线馈源处的距离, c 为真空中的光速, $|K|^2 = \frac{m^2 - 1^2}{m^2 + 2}$ 是与目标物散射特征有关的量, m 为复折射指数。

令 C 为雷达常数,定义如下:

$$C = \frac{1.024 \ln 2}{c \pi^3 \times |K|^2} \times \left(\frac{\lambda^2}{P_t \tau} \right) \times \left(\frac{1}{G^2 \theta \varphi} \right) \quad (2)$$

式(1)、(2)换算为对数单位,可以简化为:

$$dBZ = C + P_t + 20 \lg R \quad (3)$$

早期的新一代天气雷达通常在接收机的混频器/前置中频放大器后加一级匹配带通滤波器,该匹配滤波器抑制了部分接收信号功率,导致 P_r 减少 L_0 dB, L_0 取决于发射谱和接收机匹配滤波器的细节。在接收机数字中频改造后,采用数字匹配滤波器, L_0 与脉冲宽度匹配。

在雷达回波强度定时,为计算方便,一般把发射支路馈线损耗(发射机输出端到天线馈源) L_t 、接收支路馈线损耗(天线馈源到接收机输入端) L_r 、天线罩的双程损耗 L_p 、匹配带通滤波器损耗 L_0 统称系统总损耗 L_Σ ($L_\Sigma = L_t + L_r + L_0 + L_p$),并考虑大气双程衰减损耗 L_{at} ,则式(3)变为:

$$dBZ = C + P_t + 20 \lg R - RL_{at} - L_\Sigma \quad (4)$$

由式(2)可知,雷达常数 C 由 3 项组成,其中第 1 项为常数项,第 2 项为发射机参数,第 3 项为天线参数。在式(2)中, λ 、 τ 、 G 、 θ 、 φ 在雷达工作中基本保持不变,因此影响反射率测量精度的因素主要是 P_t 和 P_r 。当环境温度、电源电压或电路工作参数发生变化时,有源微波器件如发射机功率放大器和接收机低噪声放大器、中频放大器等容易产生增益漂移,表现为发射机功率 P_t 和回波功率 P_r 的变化,最终导致反射率的测量误差,而这类误差往往难以在雷达产品数据中发现。

在新一代天气雷达中通常用线性通道增益定标常数 Syscal 反映发射机功率和接收机增益的变化,距离 R 的单位为 m ,在每个体扫结束后更新,将上一个体扫的回波强度测量误差作为 ΔSyscal ,订正到下一个体扫中。即:

$$\text{Syscal} = C - 60 + \Delta \text{Syscal}.$$

3 美国 WSR-88D 天气雷达回波强度测量原理

在美国 WSR-88D 天气雷达的 RVP900 信号处理器中,反射率因子计算方法如下:

$$dBZ = 10 \lg \left(\frac{P_R - N}{N} \right) + 20 \lg R - RL_{at} + dBZ_0 \quad (5)$$

式中: P_R 是在接收机数字中频输出端测量的回波功率, N 是在接收机数字中频输出端测量的噪声功率, R 是距离, L_{at} 是大气双程衰减损耗, dBZ_0 是系统标定常数,表达式为:

$$dBZ_0 = 10 \lg \left\{ \left(\frac{2^{10} \times \ln 2 \times 10^{20} \times 180^2}{c \pi^5} \right) \times \left(\frac{\lambda^2}{G^2 \theta \varphi \tau |K|^2 L_d} \right) \times \left(\frac{1}{P_t L_t} \right) \times \left(\frac{1}{L_r} \right) \times \left(\frac{N}{g} \right) \right\} \quad (6)$$

dBZ_0 是指在 1 km 处,给定发射功率的前提下,雷达的回波功率等于噪声功率(即 $\text{SNR} = 0$ dB)时所对应的反射率因子。有时,这个值也称为在 1 km 处,雷达最小可检测反射率因子。式(6)可简化为

$$dBZ_0 = C_0 + A - P_t - L_r + I_0 \quad (7)$$

式中: C_0 为常数项, A 为基本保持不变的雷达适配数据(包括发射波长、天线增益、天线波束宽度、发射脉冲宽度、折射率常数、接收机匹配滤波器损耗), P_t 为到达天线馈源处的发射峰值功率, L_r 为接收支路馈线损耗(天线馈源到接收机输入端), I_0 为接收机最小可检测信号,即接收机输入端 $\text{SNR} = 0$ dB 时的注入功率值。 C_0 、 A 和 L_r 是常数,基本不随时间变化。 P_t 和 I_0 是 dBZ_0 方程中随时间的变化量,每个体扫周期都需要测量。精确的 I_0 测量结果与系统噪声功率值 N 和接收机增益 g 密切相关,即:

$$I_0 = N - g \quad (8)$$

以美国 WSR-88D 雷达为例,接收机增益为 33 dB,数字中频测量的噪声电平为 -81 dBm,则折算到接收机输入端的噪声功率为 $-81 - 33 = -114$ dBm。注意:由于 I_0 是 $\text{SNR} = 0$ dB 时功率值,也可以认为 I_0 和接收机的噪声相等,因此也可以通过噪声系数、接收机带宽来进行计算,等效到接收机输入端的噪声功率 $I_0 = -114$ dBm + $10 \lg B + NF$ 。 B 为接收机数字中频带宽, NF 为接收机噪声系数。这两种方法得到的 I_0 可以相互验证。如果两种方法得到的结果有很大差异(超过 0.5 dB),则说明该雷达的接收系统中可能引入了干扰、噪声等,影响了灵敏度。

4 实测数据和分析

图 1 给出了北京 CINRAD/SA 雷达在 2015 年 4 月 30 日~6 月 23 日期间和杭州 CINRAD/CA 雷达在 2015 年 4 月 18 日~7 月 27 日内的 Syscal 值变化曲线。其中北京 CINRAD/SA 雷达 Syscal 值的标准差为 0.68 dB;杭州 CINRAD/CA 雷达 Syscal 值的标准差为 0.65 dB。Syscal 值的波动主要是由发射机功率、接收机增益的变化及测试通道误差引起的。另一方面,回波功率 P_r 是利用接收机数

字中频的 AD 采样值 S , 扣除接收机增益 g , 折算到接收机输入端的, 即 $P_r = S - g$ 。如果接收机增益 g 发生变化, 回波功率 P_r 就会产生测量误差。由式(4)可知, 最终导致反射率测量误差。

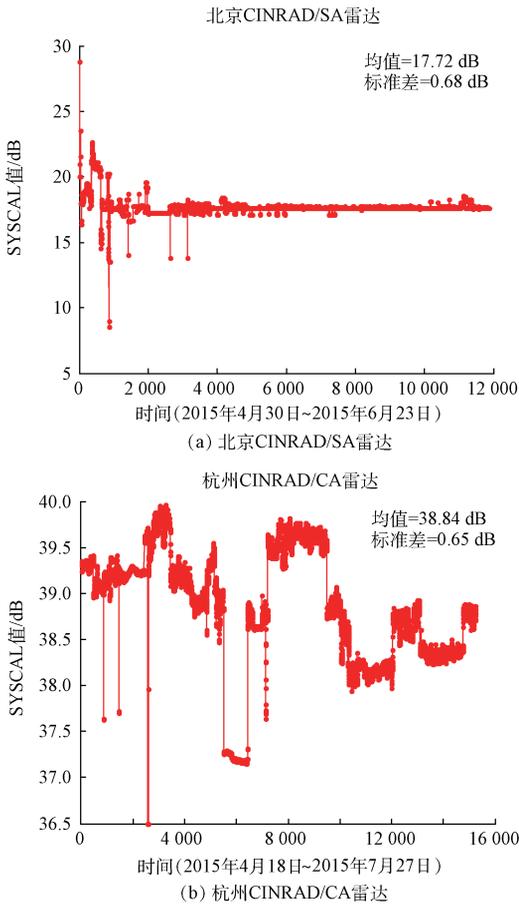


图 1 北京 CINRAD/SA 雷达和杭州 CINRAD/CA 雷达的 Syscal 值变化曲线

图 2 和 3 给出了美国 WSR-88D 业务雷达 KTLX 和 KICT 的 I_0 和 dBZ_0 变化曲线^[16], 其中 KTLX 雷达的统计时间为 2005 年 8 月 30 日~9 月 11 日, dBZ_0 的标准差为 0.15 dB; KICT 雷达的统计时间为 2005 年 10 月 1 日~11 月 1 日, dBZ_0 的标准差为 0.22 dB; 而且可以发现 I_0 和 dBZ_0 的变化趋势非常一致。由于 dBZ_0 中只含有 P_r 和 I_0 这两个变量, 而 I_0 可以通过噪声系数和接收机带宽计算得到, 因此影响 dBZ_0 的只有 P_r 的变化。与式(4)不同, 式(5)中的回波功率 P_r 是在接收机数字中频输出端测量的, 不需要折算到接收机 LNA 输入端, 因此避免了接收机增益变化这个起主要作用的不确定因素, 改善了反射率测量精度。

表 1 给出了美国 KTLX 和 KICT 雷达采用 S_{syscal} 和 dBZ_0 作为标定常数的实测结果, 该统计结果取自超过 3 000 个样本值, 用标定常数的标准差表示。对比发现, dBZ_0 的标准差更小, 说明标定过程更稳定。

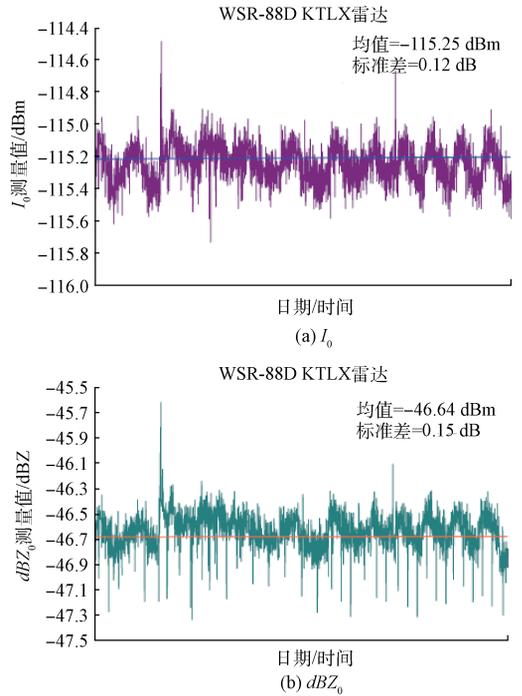


图 2 美国 KTLX 雷达 I_0 和 dBZ_0 变化曲线

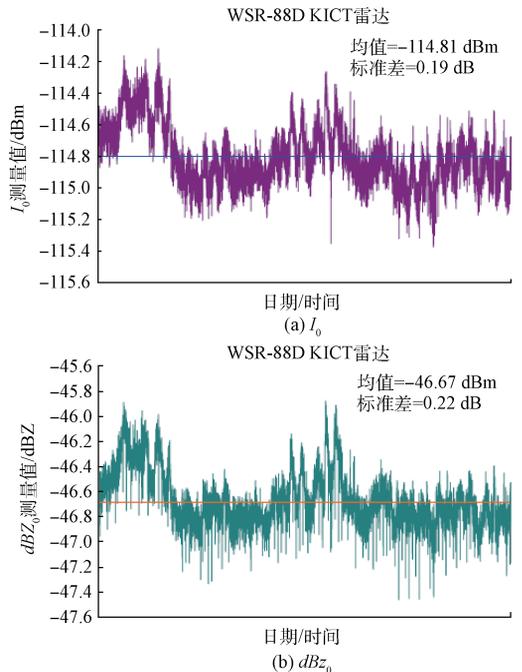


图 3 美国 KICT 雷达 I_0 和 dBZ_0 变化曲线

表 1 美国 KTLX 和 KICT 雷达标定常数的标准差

| 雷达站名 | S_{syscal} | dBZ_0 |
|------|--------------|---------|
| KTLX | 0.527 | 0.204 |
| KICT | 0.287 | 0.232 |

5 结 论

本文介绍了中美天气雷达回波强度的标定原理,比较了雷达气象方程的两种表达方式,分析了影响回波强度测量精度的因素,并以北京和杭州新一代天气雷达以及美国 KTLX 和 KICT WSR-88D 天气雷达为例,给出了标定常数的实际变化曲线和分析结果。对比发现,以 dBZ_0 作为标定常数的标定过程更稳定,有助于提高雷达数据质量。

参考文献

- [1] 李柏,古庆同,李瑞义,等. 新一代天气雷达灾害性天气监测能力分析及其未来发展[J]. 气象, 2013, 39(3):265-280.
- [2] 何建新,李学华,史朝,等. 天气雷达距离分辨率提高方法研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2008, 22(S2):49-52.
- [3] 许致火,何建新,史朝,等. 我国地基天气雷达技术系统发展介绍[J]. 气象科技, 2012, 40(3):326-328.
- [4] 张新忠,陈军明,赵平. 多普勒天气雷达资料同化对江淮暴雨模拟的影响[J]. 应用气象学报, 2015, 26(5):555-566.
- [5] 江源,刘黎平,庄薇. 多普勒天气雷达地物回波特征及其识别方法改进[J]. 应用气象学报, 2009, 20(2):203-213.
- [6] 陈钟荣,李祥超,顾松山. 双基多普勒天气雷达信号采集方法研究[J]. 仪器仪表学报, 2005, 26(z1): 125-126.
- [7] 刘辉. 某型雷达天线方向图在线测量方法与分析[J]. 电子测量技术, 2013, 36(6):105-108.
- [8] 俞建,赵杰. 远场暗室条件下圆极化天线增益不同测试方法分析研究[J]. 国外电子测量技术, 2014, 33(9):34-36.
- [9] 张沛源,周海光,梁海河,等. 数字化天气雷达成标中应注意的一些问题[J]. 气象, 2001, 27(6):27-32.
- [10] 潘新民,汤志亚. 天气雷达接收功率标定的检验方法探讨[J]. 气象, 2002, 28(4):34-37.
- [11] 潘新民,柴秀梅,黄跃青,等. CINRAD/SA&SB 回波强度定标故障的诊断分析和解决方法[J]. 气象, 2010, 36(12):122-127.
- [12] 潘新民,柴秀梅,崔柄俭,等. CINRAD/SB 雷达回波强度定标调校方法[J]. 应用气象学报, 2010, 21(6):739-746.
- [13] 柴秀梅,黄晓,黄兴玉. 新一代天气雷达回波强度自动标校技术[J]. 气象科技, 2007, 35(3):418-422.
- [14] 王立轩,葛润生,秦勇,等. 新一代天气雷达的自动标校技术[J]. 气象科技, 2001, 29(3):26-29.
- [15] 王志武,蔡作金,周宽宏,等. CINRAD/S-RDA 定标常见问题分析[J]. 气象科技, 2008, 36(3): 349-354.
- [16] FREE A D, PATEL N K, MACEMON R W. Open radar data acquisition (ORDA) calibration consistency[C]. 86th AMS Annual Meeting, Atlanta, 2006: 1-9.

作者简介

李喆, 硕士, 工程师, 主要研究方向为气象雷达技术。

E-mail: lizhe0906@163.com