

刘娟, 2015. CINRAD/SC 新一代天气雷达回波地物检测与校正方法探讨. 气象, 41(10):1286-1291.

CINRAD/SC 新一代天气雷达回波地物 检测与校正方法探讨^{* 1}

刘 娟^{1,2}

1 四川省气象探测数据中心, 成都 610072
2 高原与盆地暴雨旱涝灾害四川省重点实验室, 成都 210072

提 要: 文章提出了一种基于 CINRAD/SC 新一代天气雷达地物回波强度和速度数据的质量检测方法。通过采集天气雷达按统一的参数进行标定后的晴空标准地物回波强度作为模版, 与实时采集的回波强度进行比较和误差分析, 以及通过移相来自动检测速度数据理论值和实测值的误差大小, 对回波强度数据和速度数据质量进行检测和校正, 以此来实现对天气雷达探测精度的提高。

关键词: 新一代天气雷达, 地物回波检测, 校正

中图分类号: P412 **文献标志码:** A **doi:** 10. 7519/j. issn. 1000-0526. 2015. 08. 012

Detection and Correction Discussion of Ground Echoes of CINRAD/SC New Generation Doppler Weather Radar

LIU Juan^{1,2}

1 Sichuan Meteorological Observation Data Centre, Chengdu 610072
2 Heavy Rain and Drought-Flood Diaster in Plateau and Basin Key Laboratory of Sichuan Province, Chengdu 610072

Abstract: A method of quality detection about ground echo intensity and speed of CINRAD/SC new generation Doppler weather radar is proposed in this paper. First, calibrate all the weather radars by same parameters, and collect ground echo intensity data as a template on clear days. Then compare it with real-time echo intensity data. Through phase-shift, the speed data are automatically tested by the sides of error between measured and theoretical values and the echo intensity and speed data is detected and corrected to achieve high detection precision of weather radar.

Key words: new generation weather radar, ground echo detection, correction

引 言

新一代天气雷达是气象部门目前探测强对流天气的主要手段, 对气象防灾减灾及气象预报服务起着很重要的作用。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(潘新民等, 2010a)。提高天气雷达的性能可以从增强探测能力

和提高测量精度方面考虑, 探测能力局限于雷达所处环境、位置的影响, 在现场安装测试后一般很难做出调整改变, 所以提高测量精度是更加值得去研究和探讨的方面。

天气雷达在运行过程中受系统稳定性、器件性能等因素的影响, 一些主要工作参数需要定期进行检测, 以便及时对探测结果进行纠正, 确保天气雷达的探测精度。目前大部分雷达站常用的检测方法, 主要是将机内信号源直接注入雷达接收端, 并在雷

^{*} 川气课题(2009-09-03, 2009-03-03, 2012-开发-05 和 2014-开发-01)共同资助
2014 年 5 月 15 日收稿; 2015 年 4 月 3 日收修定稿
作者: 刘娟, 主要从事大气探测和技术保障工作. Email: liuxiaojuan1123@126.com

达终端测得数据与计算的理论值的误差比较来进行检测与校正。由于机内信号源是无干扰的理想信号源,且直接注入接收端,只能起到对雷达接收端性能的检测,而无法实现雷达发射端的实际探测能力的检测,更无法对雷达运行中出现的由于雷达参数变化引起的回波强度测量误差进行实时校正。有关研究对天气雷达强度及速度定标原理和方法从不同方面进行了论述(柴秀梅等,2007;2011;王立轩等,2001;葛润生等,2000;张沛源等,2001;李喆等,2015;刘晓阳等,1996)。

本文在天气雷达实时处理程序中嵌入回波质量控制程序模块,通过比较标准地物回波强度与实际回波强度的误差,以及比较理论速度和实测速度误差的检验方法,对天气雷达的回波强度数据和速度数据质量进行检测,并针对误差过大的检测结果分析出可能导致该误差的因素和解决方案,提出了一种快速有效的天气雷达实际探测数据质量检测与控制方法。并用常用的机内信号源检测方法与该方法检测结果进行了对比检验,证明了该方法的可行性。

1 回波质量控制

1.1 强度质量控制

在天气雷达观测的过程中,观测目标分为两类,一类是雷达观测的目标对象即气象目标,另一类是由于周围其他目标存在而形成的非气象目标。这两类目标都能在显示器上显示出来。非气象目标回波的形成是测站周围地物环境、空中飞行物等非气象目标对雷达电磁波的反射以及由于雷达自身原因造成的虚假回波形成的,地物回波就属于非气象目标回波的一种。通常来讲,地物回波的特点是边缘特别清晰,位置固定不变,每次出现的强度变化不大,而且在 PPI 上观测到的地物回波和周围地物的物理位置是一致的。

根据地物回波这一特性,可得知,在雷达参数一定并且天气晴朗没有气象目标回波时,雷达在同一角度下探测到的同一位置的地物回波强度数据应该是变化不大的。需要注意的是,地物回波主要在雷达低仰角才能探测到(钟常鸣,2008)。根据以上原理,可采集天气雷达在低仰角 PPI 模式下的标准地物回波强度数据 $Z_s = \{z_{s1}, z_{s2}, \dots, z_{sN}\}$ 作为模版。在检测雷达数据时,实时采集天气雷达地物回波强度数据 $Z_r = \{z_{r1}, z_{r2}, \dots, z_{rN}\}$ 。其中, Z_s 和 Z_r 均为

一维数组,个数为 N ($N=360 \times 998$)。将实时采集的地物回波强度数据与作为模版的标准地物回波强度数据比较求出误差 E 。

以上理论只是假设在理想的状态下才能得出较好的结果,但在天气雷达实际探测到的回波强度数据中,需要考虑一些会影响到地物回波的因素。

1.1.1 影响地物回波变化的因素

(1) 季节变换对地物回波的影响

在不同的天气条件下,由于大气波导的影响,同样仰角的地物回波强度会发生变化。而季节和气候的不同,也会引起地物面貌发生一些改变。因此,天气雷达所探测到的地物回波强度数据也会有一定的差别。

(2) 伺服电机的定位精度问题

天气雷达伺服电机通过自带的编码器反馈信号给驱动器,驱动器根据反馈值与目标值进行比较,调整转子转动的角度。在给出同一目标值时,电机转动的位置并不是完全相同的,而是存在一定的偏差的,这种很小的偏差可能会引起采集到的回波强度个别数据较大的偏差。

1.1.2 强度数据质量检测方案

为了减小季节变换和伺服精度等因素对地物回波的影响,提高强度数据质量检测的精度,提出了以下检测方案。

首先,将全年划分为四个季度,分别采集不同季度的标准地物回波图模版,以存图的名称不同来区别,如第一季度存为“1_XXXXXXX”,第二季度存为“2_XXXXXXX”,以此类推。在检测数据时,根据检测季度选择当季度的标准模版作比较。

其次,可以采集足够多的标准地物回波数据,取其平均值。设采集了 M 组标准地物回波强度数据分别为 $Z_{s1}, Z_{s2}, \dots, Z_{sM}$,则得到标准地物回波数据模版:

$$Z'_s = \frac{Z_{s1} + Z_{s2} + \dots + Z_{sM}}{M} \quad (1)$$

最后,可求出实时天气雷达地物回波强度数据与标准地物回波数据模版的差值 E ,即

$$E = Z'_s - Z_r = \{z'_{s1}, z'_{s2}, \dots, z'_{sN}\} - \{z_{r1}, z_{r2}, \dots, z_{rN}\} = \{e_1, e_2, \dots, e_N\} \quad (2)$$

根据回波强度测量误差范围应在 ± 1 dBz 内的技术要求(潘新民等,2010b),规定 $e_i \leq 1$ dBz 时,雷达回波数据为正常的。但实际探测的结果是不可能这么理想,可能会因各种干扰因素出现几个突变点,如果以 $e_i \leq 1$ dBz 作为判断依据的话,可能导致即使在回波数据正常时得出的结论仍是异常,即比较结果会出现很高的异常率。由此可知,单以各个误差

$e_i \leq 1$ dBz 作为评判标准,并不能够准确判断数据的质量。因此,引入了均方根误差 ϵ ,即

$$\epsilon = \sqrt{\frac{\sum e_i^2}{N}}, \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (3)$$

规定当 $\epsilon \leq 1$ dBz 时,雷达探测数据为正常。均方根误差能更好地反映误差数据的离散程度,减小突变点的影响,得出较准确的结论。

1.2 速度数据质量控制

常规天气雷达可以提供云和降水回波的空间分布、强度及其随时间变化的信息。而多普勒天气雷达除具备常规天气雷达的功能外,还以多普勒效应为基础,通过测定回波信号与发射信号高频频率(相位)之间存在的差异,进一步得出雷达电磁波束有效照射体积内,降水粒子群相对于雷达的平均径向运动速度和速度谱宽,从而在一定条件下,反演出大气风场、气流垂直速度的分布,以及湍流状况等(梁华,2009)。

新一代天气雷达是一种全相干雷达,通常不是直接测量多普勒频移,而是利用相继返回的两个脉冲对之间的位相变化确定目标物的径向速度,这种测速技术叫做“脉冲对处理”。全相干雷达的每个发射脉冲的频率是常数,其位相对于一个内部参考信号而言是相同的。当脉冲返回时,与参考信号做比较以确定位相,任何脉冲到另一个脉冲的位相变化都可以计算。目标物沿雷达波速径向速度计算方法如下(俞小鼎等,2006):

$$V_r = \frac{\Delta R}{T_s} = \frac{\lambda \Delta \varphi}{4\pi T_s} = \frac{\lambda \Delta \varphi F}{4\pi} \quad (4)$$

式中, F 为脉冲重复频率, T_s 为脉冲重复周期, $\Delta \varphi$ 为相继返回的两个脉冲之间的位相差。

由式(4)可看出,气象目标物的径向速度是随位相的变化而变化的。根据此原理,可用机内微波移相器对速度测量进行检验。探测信号经移相器后注入接收机,改变发射脉冲间隔内移相器的变化值,计算出理论速度值与信号处理器的速度估算值的误差,并规定当|误差| $<1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时(潘新民等,2010b),雷达探测的回波速度数据正常。其中,理论速度值由式(4)计算得出。

2 程序介绍及实验结果

2.1 程序介绍

多普勒天气雷达实时处理系统是雷达和用户之

间的桥梁,用户通过实时系统操控雷达,雷达通过实时系统为用户服务(刘晓阳等,1996)。为了使用方便,本程序在天气雷达的实时处理程序中添加了一个名为“回波质量控制”的模版,可以直接安装到各台站的实时处理程序中,开发语言为 C++ Builder。由于四川省目前已安装的 CINRAD/SC 新一代天气雷达信号处理器有 RVP7 和 RVP8 两种型号,所以本程序也分别设计了两种信号处理器的通讯接口。程序共分为三个部分:采集地物标准回波数据、强度质量控制和速度质量控制,见图 1。

第一部分为“采集标准地物回波数据”,此部分主要是将采集的标准晴空地物回波数据保存下来,以便作为模版。数据存储格式为“N_YYYYMMDDHHmm.dw”,其中 N 表示第 N 季度,全年共划分为四个季度,即 $N=1, 2, 3, 4$,存图的时候会先选择季节,如图 2。后面依次代表的是年月日时分,清除记录该幅回波图保存的时间;后缀名 dw 是为了区别于其他回波图而自定义的,其格式与实时处理程序中保存的其他回波图其实是一样的。

第二部分为“强度质量控制”,此部分主要完成强度数据的误差比较工作,并将得出的误差结果以回波图和折线图这两种方式显示出来,图左边给出了不同强度范围的色条,根据色条在回波图中按不同强度显示不同颜色,更直观地显示出结果。在回波图方式显示中,以颜色不同代表误差大小,还增加了过大误差闪动点,即把超出规定误差范围的数据点以闪动的方式表现在回波图上,以方便观察异常结果,如图 3。折线图是将误差数据在坐标图中描点形成,更直观地反映误差的大小,如图 4。在每幅图的右上方显示出了该图的类型、采集时间、最大探测距离及仰角。另外,根据平均误差判断出结论,在数据异常时,还给出了检测及校正方案,即如何检测及校正雷达参数使回波数据恢复正常。该方案是可编辑的 txt 文本文档,技术保障人员可以根据实际操作的经验添加和完善检测方案,实现经验交流共享。

第三部分为“速度质量控制”。此部分主要是通过移相自动检测理论速度和实测速度的误差大小,以此判断速度数据是否正常。在速度质量控制框上分别显示出了移相角度、理论值、实测值及误差,并在结果显示栏中给出正常误差范围和判断结果。增加存图的功能按钮以方便保存当前结果,在误差异常时,同样给出了检测及校正方案,如图 5。

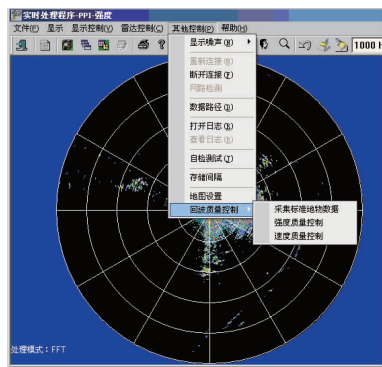


图 1 回波质量控制模块
Fig. 1 Echo quality control module

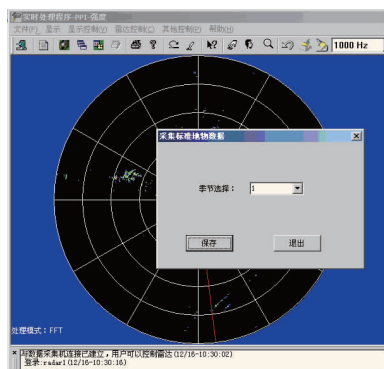


图 2 回波数据季节选择
Fig. 2 Season option of echo data

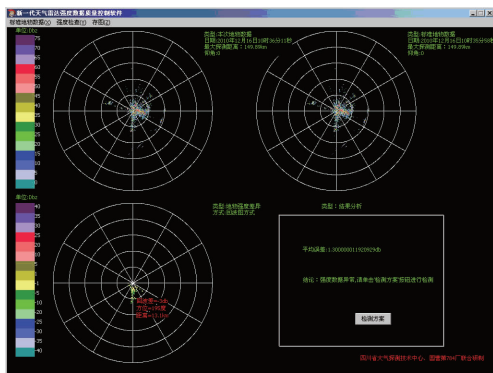


图 3 强度误差回波图显示方式
Fig. 3 Echo image display mode of intensity error

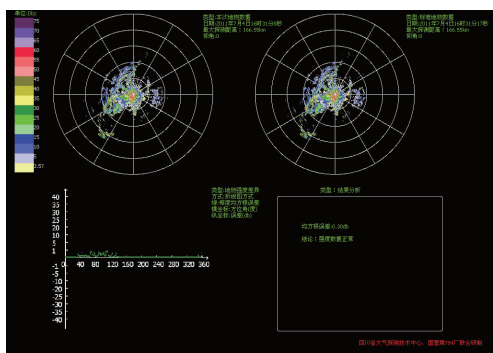


图 4 强度误差折线图显示方式
Fig. 4 Line chart display mode of intensity error

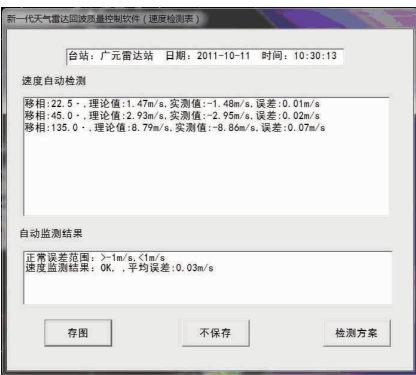


图 5 速度质量控制结果显示
Fig. 5 Result display of speed quality control

表 1 地物回波误差检测结果
Table 1 Result of ground echo error detection

年份	季度	日期/ 月.日	强度均方根 误差值/dBz	速度误差/ $m \cdot s^{-1}$
2011	1	01.04	1.00	0.02
		01.10	0.77	0.01
		02.15	0.82	0.03
		02.23	0.73	0.02
		02.26	0.67	0.01
		03.03	0.65	0.02
		03.16	0.87	0.01
		03.28	0.73	0.03
	2	04.12	0.93	0.03
		04.14	0.89	0.00
		04.18	0.92	0.01
		05.04	0.78	0.03
		05.11	0.64	0.02
		05.17	0.96	0.00
		06.23	0.54	0.01
		06.29	0.63	0.00
	3	07.04	0.86	0.01
		07.07	0.98	0.01
		07.18	0.59	0.01
		08.08	0.69	0.03
		08.23	0.59	0.02
		08.30	0.69	0.00
		09.02	0.87	0.02
		09.14	0.71	0.01
	4	10.15	0.93	0.00
		10.28	0.60	0.03
		11.09	0.76	0.00
		11.14	0.87	0.02
		11.23	0.65	0.01
		12.02	0.69	0.01
		12.12	0.97	0.03
		12.29	0.53	0.02

2.2 实验结果

为了验证该方法的可行性,本文提出了两种方

法来对实验结果进行验证。首先,采集了 2011—2014 年大量地物回波数据来对地物回波变化进行分析研究。然后,搜集了历年雷达站年维护时测量的强度和速度定标误差数据来进行对比分析。表 1 是地物回波误差检测结果。

2.2.1 地物回波变化分析研究

本文采用的是成都新一代天气雷达站 0.5°仰角的 PPI 晴空地物回波数据。从 2011—2014 年这

4 年的晴空地物回波数据里,每个季度选择 15 d 的晴空地物回波数据,按照强度检测方案的模版算法训练出每个季度的模版。然后,每个季度选择 8 d 的晴空地物回波数据来对比模版得出均方根误差值。表 1 给出了检测得出的均方根误差值以及速度误差值,图 6a~6c 分别为 2012、2013 和 2014 年采集的晴空地物回波数据对比模版得出的均方根误差及速度误差折线图。

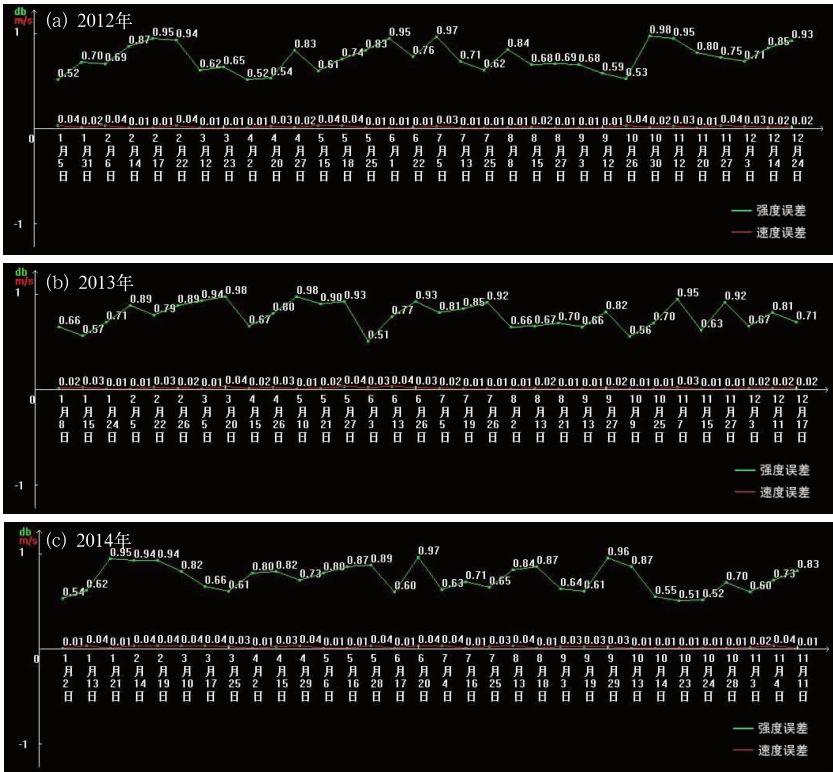


图 6 2012—2014 年地物回波误差检测结果
Fig. 6 Ground echo error detection result from 2012 to 2014

通过采集 4 年的晴空地物回波数据与模版数据的均方根误差结果可看出,采集足够多的地物回波数据可以得到较为准确的标准模版,并通过划分季度、取均方根误差等方法来减小天气条件及季节变化、伺服精度等因素对地物回波变化的影响,最终得到的探测数据质量检测结果是可靠的。

2.2.2 对比机内信号源检测结果

机内信号源强度定标方法:用机内信号源注入功率为-90~-40 dBm 的信号,在距离 5~200 km 范围内检验其回波强度的测量值,回波强度测量值与注入信号计算回波强度值(期望值)的最大差值应在±1 dBz 的范围内。速度定标方法:用机内微波移相器对速度测量进行检验。由机内测试信号经移

相器后注入接收机,改变发射脉冲间隔内移相器的变化值,由理论计算速度值与信号处理器的速度估算值进行比较。

搜集了成都雷达站历年年维护时机内信号源检测结果做对比(表 2)。

表 2 机内信号源检测结果
Table 2 Result of internal signal source detection

台站	日期	强度最大 误差/dBz	速度最大 误差/m·s ⁻¹
成都 雷达站	2008. 12. 24	0.75	0.01
	2010. 12. 8	0.73	0.01
	2011. 11. 10	0.82	0.01
	2012. 2. 23	0.79	0.01
	2013. 12. 27	0.65	0.01
	2014. 2. 19	0.96	0.00

对比检测结果可看出,实测地物回波误差与机内信号源检测得出的最大误差值是比较接近的。鉴于理想的机内信号源只能起到对接收端的检测,而无法检测雷达发射端的实际探测性能这一局限性,本文提出的使用实际探测数据来对天气雷达回波数据进行质量检测与校正的方法是可行的,实测数据比机内信号源更能准确地反映雷达的探测能力。

3 结 论

本文提出了一种通过对回波强度数据和速度数据的检测来对雷达回波数据质量进行校正的方法,并编写成回波质量控制程序嵌入天气雷达实时处理程序中,对该方法进行了实验验证。由实验结果可看出,该方法可对雷达回波数据的质量进行较准确的检测,并根据检测结果对雷达可能出现的参数改变或性能下降进行调整和维护,起到快速有效的雷达回波数据质量检测及校正作用,提高雷达探测精度。

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. 气象科技,35(3):418-421.
柴秀梅,潘新民,汤志亚,等. 2011. 新一代天气雷达回波强度异常分析与处理方法. 气象,37(3):379-384.
葛润生,朱晓燕. 2000. 提高多普勒天气雷达晴空探测能力的一种方法. 应用气象学报,11(3):261-263.
李喆,何平,潘新民,等. 2015. 风廓线雷达回波强度和速度标定问题研究. 气象,41(8):1023-1027.
梁华. 2009. 脉冲多普勒天气雷达数据质量控制之解速度模糊处理. 气象水文海洋仪器,26(3):59-61,65.
刘晓阳,顾松山. 1996. 天气多普勒雷达资料实时处理系统. 南京气象学院学报,19(4):405-411.
潘新民,柴秀梅,崔柄俭,等. 2010a. CINRAD/SB 雷达回波强度定标调校方法. 应用气象学报,21(6):739-746.
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. 气象科技,38(2):214-221.
王立轩,葛润生,秦勇,等. 2001. 新一代天气雷达的自动标校技术. 气象科技,29(3):27-29.
俞小鼎,姚秀萍,熊延南,等. 2006. 多普勒天气雷达原理与业务应用. 北京:气象出版社,36-37,40,46.
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. 气象,27(6):27-32.
钟常鸣. 2008. 利用雷达回波资料作临近预报应注意的几个问题. 气象研究与应用,29(Z2):62-63.