

文章编号: 2096-1618(2018)03-0236-06

太原 CINRAD/CC 雷达与 X 波段雷达观测一致性分析

王翔弘, 何建新, 王旭, 史朝

(成都信息工程大学电子工程学院 中国气象局大气探测重点开放实验室, 四川 成都 610225)

摘要: 由于地球曲率和地形阻碍等原因造成太原 CINRAD/CC 雷达探测盲区较多,且远距离处波束展宽导致分辨率降低,因此安装在太原雷达扫描范围内的 X 波段雷达能够对 CINRAD/CC 的探测盲区进行补充,但在应用之前,需对二者的观测一致性进行分析。首先确定两型号雷达的有效共同探测区域,然后以太谷 X 波段雷达为例,对比分析共同探测区域内两部雷达在同时刻反射率因子的观测结果。结果表明:无遮挡时反射率因子在两部雷达上出现的位置和变化趋势基本一致;两部雷达所在位置连线的垂直剖面上回波强中心的位置一致,且 X 波段雷达的垂直剖面更清晰,强中心更突出;由于 X 波段雷达为全固态雷达,在 20 km 内外采用了不同的脉冲模式,导致距太谷雷达 20 km 内的值与太原雷达存在明显差异,距太谷雷达 20 km 外的区域相差不大,该差异可以通过系统定标加以订正。

关键词: 天气雷达;CINRAD/CC; X 波段雷达;反射率因子;一致性

中图分类号: TN959.4 **文献标志码:** A

doi: 10.16836/j.cnki.jcuit.2018.03.003

0 引言

太原 CINRAD/CC 新一代天气雷达能够探测 150 km 范围内的回波信息,但也存在以下问题:(1) 体扫描时间间隔较长(约 5~6 min);(2) 由于地球曲率和地形阻碍造成雷达的探测盲区较多(尤其是在部分气流变化最旺盛的对流层底部),导致在 0~3 km 存在极大的探测盲区;(3) 远距离处由于雷达波束扩展造成分辨率降低。0.01~3 km 海拔高度的大气层在很大程度上处于观测空缺状态,而这一空间正是十分活跃的大气活动区域,很多中尺度天气发源于这个空间区域,对龙卷、下击暴流、洪水暴雨的识别、雷暴初始化的预报,以及雾、冻雨和降雪的观测等都十分关键;而龙卷、风切变等严重气象灾害或不利条件始于 1 km 以下。因此新一代天气雷达网络对地表以上 3 km 的空间范围覆盖能力较差^[1-2]。

利用 X 波段天气雷达构成网络雷达,作为对新一代天气雷达的补充设备,主要用于测量地面 3 km 以内的天气回波。在自适应协同分布式天气雷达网^[3-5]中提出,作为“间隙雷达”,预警系统要求分布式天气雷达网的探测速度和数据质量必须足够高,而探测距离则一般较短。通常这种“间隙雷达”的探测距离在 20~30 km,甚至更短^[6]。在相同波束宽度下,雷达天线的尺寸与波长成正比,S 和 C 波段天线直径高达 5~8 m,而 X 波段雷达天线尺寸相对较小,站点建设、雷达架设相对更为

便捷。其次,X 波段雷达造价较为低廉,少量资金就可以建设更多的雷达站点,可以为新一代天气雷达的低层盲区、山区及重点监测区域提供精细的观测资料作为补充^[7]。在 Snook 等^[8]的研究中证明了 X 波段雷达组网对临近预报和定量降水估测中的积极作用,日本也在东京等主要城市建立了以 26 部 X 波段双线偏振雷达组成的观测预警网用于定量降水的估测^[9]。

近年来,山西省建设了多部 X 波段天气雷达,其中有 3 部雷达的扫描范围能够被太原雷达全部覆盖(不考虑地形遮挡等因素,只考虑扫描范围时),对两种型号雷达的观测一致性进行分析,有助于帮助确定 X 波段天气雷达加入新一代天气雷达进行组网观测的有效性。

1 两部雷达共同有效探测区域的确定原理

采用史朝等^[10]分析华南地区季风降水实验中确定共同扫描区域的方法确定两部雷达的共同有效探测区域。首先,绘制需分析的两个站点之间连线上的地形高度,这样在绘制波束的传播路径时,可以直观看到波束阻挡情况,绘图时将地形高度以特定颜色填充。然后,画出雷达波束的中心以及上下边界。两个站点雷达的波束分别用不同的颜色表示,以便加以区分。最后,根据两部雷达波束相交的位置和地形遮挡情况确定共同有效观测区域。

共同有效观测区域的确定过程如下:

(1) 载入 SRTM 地理信息数据。

(2)计算两部雷达之间的距离。已知两部雷达的经纬度坐标,需要计算二者之间的距离时,可调用 MATLAB 中的 distance 函数首先计算出两个站点之间的球面距离 arclen 以及相对方位角 az。公式如下:

$$[s,t] = \text{distance}[a,b,c,d] \quad (1)$$

式中,(a,b)和(c,d)分别表示两个雷达站点的经纬度坐标,s表示球面距离 arclen,t表示相对方位角 az。

得到 arclen 后,通过公式(2)即可计算出两个雷达站点之间的直线距离:

$$D = s \times \frac{er}{180} \times \pi \quad (2)$$

其中,er 为等效地球半径,取值6371 km。

(3)计算两部雷达连线以及延长线上的经纬度信息。将两部雷达的站点经纬度做差,以其中一部雷达为参考点,在参考点的经纬度上加上 2 倍经纬度差(即以参考点为原点,加上 2×D 的距离)后所形成的点与参考点连线,即可获得该连线上的经纬度信息。

(4)画出过程(3)中经纬度位置所对应 SRTM 数据中的海拔高度信息。根据 SRTM 数据经纬度格点的分辨率,找出该连线上经纬度所对应的海拔高度信息,将海拔高度信息绘制出来进行连线并填充颜色,即获得了连线上的地形高度图。

(5)根据两部雷达的波束展宽,画出标准大气折射条件下对应仰角的波束传播路径。

已知雷达的波束宽度,对于某个确定的仰角,即可通过公式(3)计算雷达波束的上下边界。

$$A_1 = e - \frac{M}{2}$$

$$A_2 = e + \frac{M}{2} \quad (3)$$

式中,A₁ 为下边界,A₂ 为上边界,e 为雷达波束中心角度,M 为波束宽度。

(6)分别得到两部雷达波束的上下边界传播路径,即可确定两部雷达波束上下边界的交点。得到交点后,共同探测区域的确定方法如图 1 所示。图中 A 点为雷达 2 波束的下边界与雷达 1 波束的上边界的交点;B 为雷达 1 波束的下边界与雷达 2 波束的上边界的交点。AB 之间的区域即为两部雷达有共同探测范围的区域。

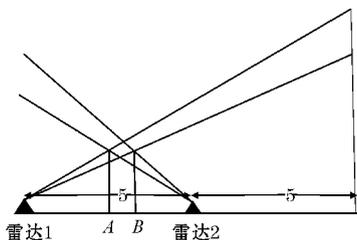


图1 确定两部雷达共同探测区域的示意图

使用该方法确定的共同探测区域虽然属于两部雷达都能探测到的范围,但由于两部雷达在该范围内的波束填充情况并不完全一致,且是从两个方向进行观测,所以得到的比对结果会存在一定的差异,但仍具有一定的可比性。

2 太原 CINRAD/CC 雷达与太谷 X 波段雷达有效共同探测区域的结果及分析

以太原 CINRAD/CC 雷达与太谷 X 波段雷达为例进行数据对比分析。两部雷达的部分参数如表 1 所示。其中,X 波段雷达采用全固态的发射体制,固态器件在稳定性上更好,使用寿命相比速调管也 longer,为保证足够的探测威力并减小盲区的影响,采用宽窄脉冲相结合的发射形式。

表1 太原 CINRAD/CC 雷达与太谷 X 波段雷达部分参数

参数	雷达	
	CINRAD/CC	X 波段
最大探测距离/km	150	75
距离分辨率/m	250	75
波束宽度/°	1	1
体扫包含仰角个数/个	9	14
发射机制	速调管	全固态

根据式(2)可算出太原站与太谷站距离为 34.7 km,两部雷达的部署位置如图 2 所示。图中红色实线的圆圈表示原站雷达的最大探测距离,红色虚线圆圈表示太谷站最大探测距离,颜色表示地形高度。通过上文计算方法可得出:太谷站位于太原站的 178° 方向,太原站位于太谷站的 358° 方向。

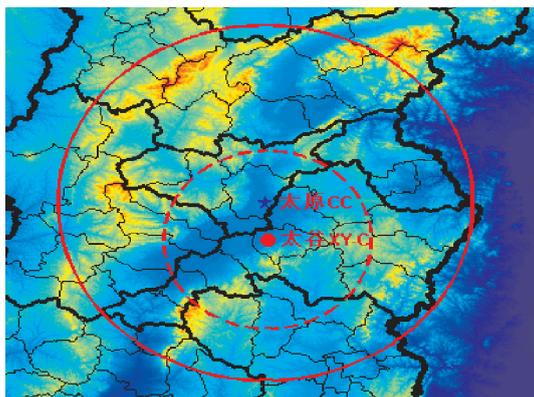


图2 太原站雷达与太谷站雷达位置示意图

图 3 给出了根据文中原理绘制出的太原站雷达以及太谷站雷达的共同观测区域示意图。图中,蓝色三角形表示太原站,其海拔高度为0.8174 km,红色圆点表示太谷站,其海拔高度为0.785 km,比太原站略低。

横坐标表示以太原雷达站为起点,与太谷雷达站的连线及其延长线;纵坐标表示海拔高度。绿色覆盖范围表示该距离对应的地形高度。蓝色线表示标准大气条件下,太原雷达 0.5° 仰角波束的中心轴线以及仰角波束的上下边界所在的位置。蓝色实线表示太原站的波束中心线,蓝色虚线分别为其波束的上下边界线。红色线表示标准大气条件下,太谷雷达 0.5° 仰角波束的中心轴线和上下边界所在的位置。红色实线表示波束中心线,虚线为其波束上下边界线。图中黄色竖线标识了两部雷达的共同观测区域,即两部雷达的波束有交点的范围。

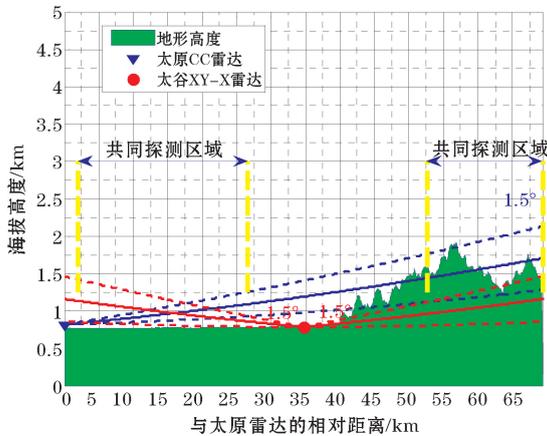


图3 太原和太谷站雷达连线海拔高度及 0.5° 仰角时两雷达的共同探测范围示意图

从图3可以明显看出:(1)太原站与太谷站在 0.5° 仰角层扫描时有两部分共同探测区域,第一部分共同探测区域起点为太原站 178° 方向波束的上边界与太谷站 358° 方向上的波束下边界的交点,结束位置为相同方向上太原站波束的下边界和太谷站波束的上边界交点。其具体距离位置为:太原站雷达 178° 方向上的 $2.5 \sim 27.5$ km;太谷站雷达 358° 方向上的 $7.5 \sim 32.5$ km。第二部分共同探测区域位于太原雷达站 178° 方向上的 $52 \sim 70$ km;太谷站 178° 方向上的 $17.3 \sim 35.3$ km。(2)第一部分共同探测区域不受地形影响,无遮挡;而第二部分共同探测区域受地形阻挡严重,特别是对太谷雷达的影响更大。所以,后文重点对二者的第一部分共同观测区域进行对比分析。

按照相同的方法可以绘制出太原站与太谷站雷达 1.5° 仰角扫描时两雷达的共同探测区域情况。其结果如图4所示。

比较图3、图4可以看出:当两部雷达扫描的仰角度数增大到 1.5° 后,在两部雷达的连线及延长线上其有效的共同探测区域从之前的两部分变为一部分。右侧的共同探测区域消失,左侧的共同探测区域从 0.5° 时的 25 km范围减小到 1.5° 时的 10 km左右。具体位置

在太原站 178° 方向上的 $14 \sim 24$ km,在太谷站 358° 方向的 $11 \sim 21$ km。当两部雷达的扫描仰角继续抬高时,共同探测区域会变得更小。所以,在后文仅给出 0.5° 仰角的对比结果。

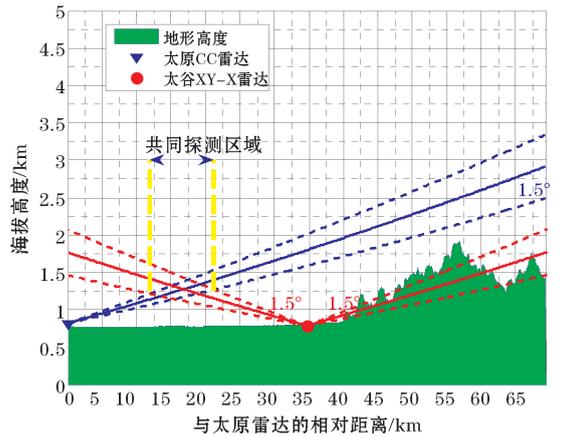


图4 太原站和太谷站连线海拔高度及 1.5° 仰角时两雷达的共同探测范围示意图

3 两部雷达观测一致性对比分析

针对太原雷达和太谷雷达同时刻对同一区域内的气象目标进行观测时,两雷达连线上的水平径向和垂直剖面上的反射率因子进行对比,分析两部雷达所观测到的回波强度以及回波位置是否一致。为尽量降低衰减对X波段雷达造成的不良影响,首先使用逐库订正法^[11]对X波段雷达的反射率因子进行衰减订正,再将其数据在水平和垂直方向上与太原站雷达进行对比。

选取两部雷达在2017年6月12日19点45分的数据进行对比。太原以及太谷 0.5° 仰角层反射率因子的PPI分别如图5和图6所示。

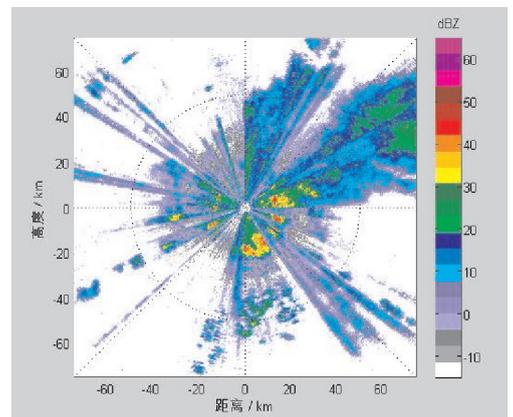


图5 2017年6月12日19:45太原站 0.5° 仰角层反射率因子的PPI

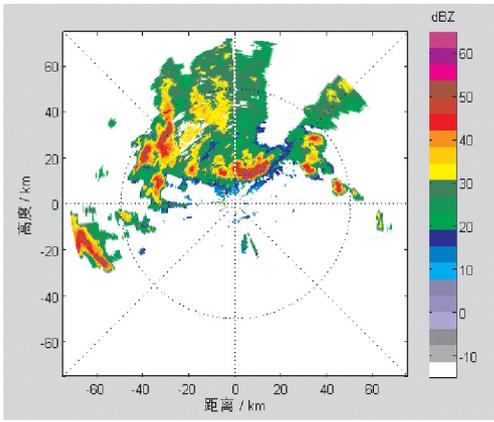


图6 2017年6月12日19:45 太谷站 0.5° 仰角层反射率因子的PPI

太原站与太谷站相距34.7 km,太原站位于太谷站的 358° 方向,太谷站位于太原站的 178° 方向。在图5中可以看出,在太原雷达 178° 方向,距离雷达站点20 km范围内有较高的反射率因子值,与图6太谷雷达 378° 方向7.5~32.5 km的强度近似。

绘制两部雷达连线及延长线上的反射率因子廓线,由于两部雷达距离分辨率不同,先对数据进行平滑处理再绘制廓线图。处理方式如下:求出两部雷达距离库长的最小公倍数作为新的距离库长度,然后分别将两部雷达包含在新距离库内的反射率因子做平均,其结果如图7所示。图7中蓝色线表示太原站雷达 178° 的反射率因子随距离的变化廓线,红色线和绿色线分别表示衰减订正前后太谷站第 358° 方位上反射率因子随距离变化廓线。黄色虚线代表的是太原站与太谷站雷达的共同探测区域。由图7可以看出,在第一部分共同探测区域内,太谷站雷达反射率因子的变化趋势与太原站雷达的基本一致,都是先减小后增大,再变为减小,与图5和图6的PPI图所反映的情况一致。第二部分共同探测区域内,两部雷达都无有效数据。

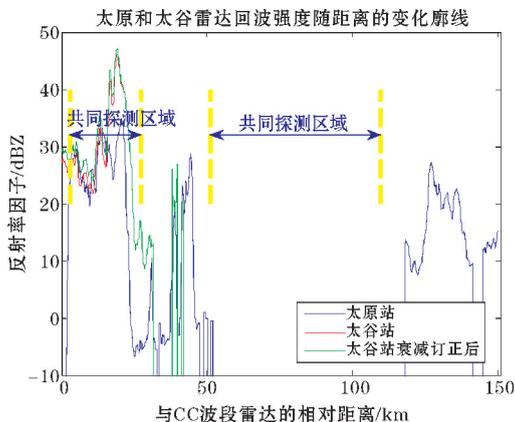


图7 2017年6月12日19:45 太原和太谷雷达回波强度随距离的变化廓线

为更清楚分析共同探测区域范围内两部雷达反射率因子的变化情况,图8给出有效数据的太原和太谷雷达共同探测区域的放大图,其横坐标范围为2.5~27.5 km。可以看出,在距离太原站雷达2.5~15 km(该距离位于太谷站雷达20 km范围外),二者的观测结果较为一致,而15~20 km(该距离位于太谷站雷达20 km范围内)太谷站雷达衰减订正后的值与太原站雷达的相差较为明显,但是变化趋势基本一致。造成该差异的主要原因是由于全固态X波段雷达脉冲峰值功率只有30 W,为保证足够的探测威力,只能增加发射脉宽以提高平均功率。对于单天线雷达,发射期间接收机处于关闭状态,再加上发射机电源调制关断延迟,增大的脉宽导致实际的探测盲区接近20 km。鉴于此,只能通过再发一组窄脉冲信号来弥补宽脉冲的盲区影响。在峰值功率不变的情况下,两种脉冲宽度相差10倍,因此对于弱回波探测能力也就相差10 dB。由于采用了LFM脉冲压缩技术,不同脉宽对应的脉压比不一样,距离旁瓣泄露情况也不一致,这就会引起两种脉冲对同一目标探测强度的差异,同时考虑到两种脉宽采用了不同载频,对于收发系统的增益也存在差异,同样也会带来回波强度的差异(此差异可通过系统定标加以订正)。

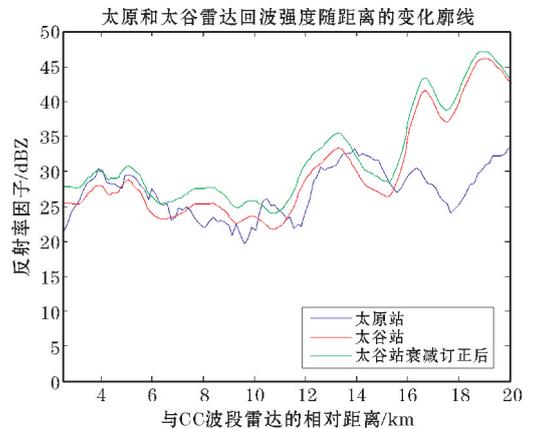


图8 太原和太谷雷达共同探测区域放大图

在垂直面上的分析主要通过垂直剖面图进行对比。垂直剖面图按以下方式生成:将雷达沿某径向上的所有仰角层的反射率因子数据,根据仰角层与回波位置绘制,相邻仰角层之间不做插值,直接用相应的仰角填充。因为未做插值和平滑处理,所以该垂直剖面图能够很好地反映不同仰角层该径向上回波的实际分布与反射率因子值,能够更好地进行对比分析。太原站 178° 方位的垂直剖面如图9所示。

太原站雷达体扫仰角有9个,从图9中可以看出,强回波中心出现在距离太原站17 km,高度1.5 km左右的位置。

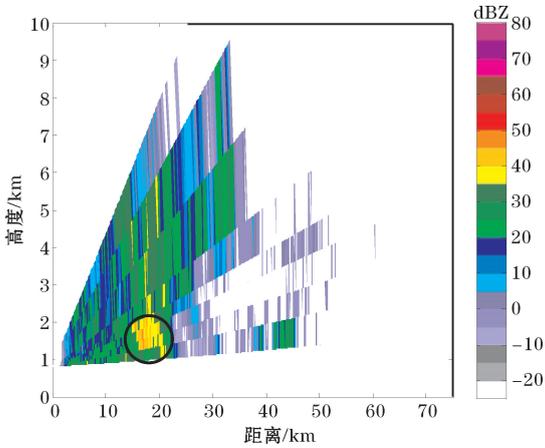


图9 2017年6月12日19:45太原站
雷达第178°方位的垂直剖面图

按照同样的方法可绘制出太谷站雷达该时刻358°方位的垂直剖面图,如图10所示。太谷站雷达体扫仰角为14°。强回波中心出现在距离太谷站17 km,高度1.5 km左右的位置。且在该距离处的3.5 km左右高度出现了另外一个强回波中心,太原雷达由于分辨率较低,未能明显的观测到该强中心。

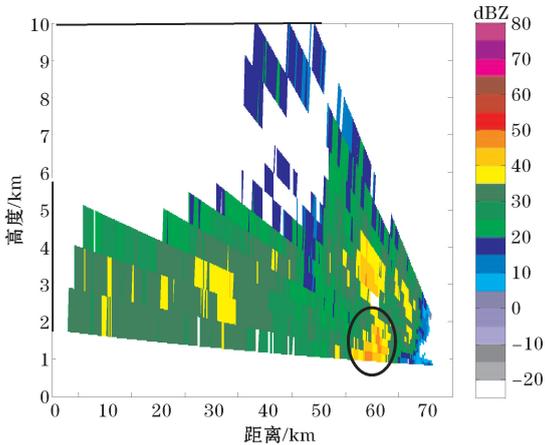


图10 2017年6月12日19:45太谷站
雷达358°方位的垂直剖面图

表1可知,太谷站雷达的距离分辨率和垂直分辨率都高于太原站雷达,因此相同位置的回波在太谷站雷达中显示得更为清晰。太谷雷达17 km左右位置处,高度在2.8~4.5 km的回波在图9中仅为很细的一条黄线,在图10中可以清晰地看到回波的结构。表2给出了距离太原和太谷站雷达17.3 km,高度在1~2 km的回波反射率因子。

表2 两部雷达观测相同回波的具体强度值

高度/km	17.3 km 处回波强度/dBZ	
	太原站	太谷站
1	28	39.8
1.3	43.5	43.9
1.6	44.5	45.1
2	39	36.0

从表2可以看出:太原站1 km高度其强度值为28 dBZ,太谷站观测强度为39.8 dBZ,造成该差异的原因可能是太原雷达在底仰角近距离时存在部分波束遮挡。1.3~2 km其观测到的强度基本一致。因此,太谷站雷达对于同一观测目标与太原站雷达观测较为一致,且更为精细,能够对太原站雷达进行有效的补充。

4 结束语

在对两部不同波段雷达的观测一致性进行对比分析之前,首先根据两部雷达的位置、距离分辨率、波束宽度以及体扫仰角度数等确定两部雷达的有效共同探测区域。然后在共同探测区域内对两部雷达水平方向上的回波反射率因子廓线和垂直剖面图进行了对比分析。结合太原 CINRAD/CC 天气雷达与太谷 X 波段两部雷达连线上的地形信息得到:(1)当两部雷达天线的海拔高度接近时,CC 雷达和探测范围内的 X 波段雷达在同一仰角的共同探测区域包括两部分:一部分位于两部雷达相同的方位,另一部分位于相差180°的方位。该区域随着仰角的增大会逐渐减小,且位于相同方位的共同探测区域会减小的更快,直至消失。(2)两部雷达在未受到地物遮挡的有效共同探测区域内,反射率因子在两部雷达上出现的位置和变化趋势基本一致;两部雷达所在位置连线的垂直剖面上回波强中心的位置一致,且 X 波段雷达的垂直剖面更清晰,强中心更突出;(3)因为 X 波段雷达为全固态雷达,在20 km内外采用了不同的脉冲模式,可能导致位于 X 波段雷达20 km范围内的反射率因子与太原 CC 雷达的反射率因子存在较大差异,该差异可以通过系统定标加以订正。在后续的研究中,可以考虑先将两部雷达进行统一标定后再进行对比分析;另外要考虑雷达周围地表建筑物的影响。

参考文献:

- [1] 吴翀,刘黎平,吴海涛.多部 X 波段天气雷达测量偏差分布及组网拼图结果分析[J].高原气象,2016,35(3):823-833.
- [2] 史朝,何建新,李学华,等.X 波段天气雷达地物回波的双偏振参量特征分析及应用[J].高原气象,2013,32(5):1478-1484.
- [3] McLaughlin D, Pepyne D, Philips B, et al. Short-Wavelength Technology and the Potential For Distributed Networks of Small Radar Systems [J]. Bull. Am. Meteorol. Soc. 2009, 90:1797-1817.

- [4] Chandrasekar V, Chen H, Philips B. Principles of High-Resolution Radar Network for Hazard Mitigation and Disaster Management in an Urban Environment[J]. J. Meteorol. Soc. Jpn, 2018.
- [5] Chandrasekar V, Wang Y, Chen H. The CASA quantitative precipitation estimation system: A five year validation study[J]. Nat. Hazards Earth Syst. Sci, 2012, 12:2811-2820.
- [6] Junyenet F, Chandrasekar V, Mclaughlin D, et al. The CASA integrated Project 1 networked system[J]. J Atmos. Ocean Technol. ,2010, 27(1):61-78.
- [7] 愈小鼎,姚秀萍,熊廷南.多普勒天气雷达原理与业务应用[M].北京:气象出版社,2009.
- [8] Snook N, Xue M, Jung Y. Ensemble probabilistic forecasts of a tomadic mesoscale convective system from ensemble Kalman filter analyses using WSR-88D and CASA radar data[J]. Mon wea Rev, 2012, 140(7):2126-2146.
- [9] Kim D-S, Maki M. Validation of composite polarimetric parameters and rainfall rates from an X-band dual-polarization radar network in the Tokyo metropolitan area[J]. Hydrol. Res. Lett, 2012(6):76-81.
- [10] Zhao Shi, Haonan Chen, Venkatachalam Chandrasekar, et al. Atmosphere Deployment and Performance of an X-band Dual-polarization Radar during the Southern China Monsoon Rainfall Experiment[J]. Atmosphere, 2017, 9(1):4.
- [11] 张培昌,王振会.天气雷达回波衰减订正算法的研究(1):理论分析[J].高原气象,2001,20(1):1-5.

Observation Consistency Analysis of the Taiyuan CINRAD/CC Weather Radar and the X-band Radar

WANG Xiang-hong, HE Jian-xin, WANG Xu, SHI Zhao

(College of Electronic Engineering, Chengdu University of Information Technology, Key Laboratory of Atmospheric Sounding, China Meteorological Administration, Chengdu 610225, China)

Abstract: Due to the curvature of the earth and terrain obstructing, there are many blind area for CINRAD/CC radar detection in Taiyuan, and the resolution is reduced at long distance due to the spread of the beam. X-band radar, which is installed in the range radar scanning in Taiyuan, can supplement the detection blind area of CINRAD/CC. But before application, it is necessary to analyze the observation consistency of the two radars. In this paper, the effective common detection area of the two radar is determined firstly, and then the Taigu X-band radar is taken as an example to compare and analyze the observation results of the reflectivity in the common detection area. The results show that: the position and change trend of the reflectivity factor is basically the same; the position of the echo strong center on the vertical section of common detection area is consistent, and the vertical section of the X-band radar is clearer and the strong center is more prominent; because X-band radar is all solid state radar, different pulse modes are adopted in and out the range of 20 km, so there is a significant difference between the reflectivity of these two radars in the range of Taigu radar 20 km, and the difference from the area outside 20 km of the Taigu radar is small, the difference can be corrected by the system calibration.

Keywords: weather radar; CINRAD/CC; X-band radar; reflectivity factor; consistency