

杜言霞,刘光普,邱光敏,等. 天气雷达径向干扰回波去除方法的比较[J]. 干旱气象, 2017, 35(3): 502-506, [DU Yanxia, LIU Guangpu, QIU Guangmin, et al. Comparison of Radial Interference Echo Removal Methods for Weather Radar[J]. Journal of Arid Meteorology, 2017, 35(3): 502-506], DOI:10.11755/j.issn.1006-7639(2017)-03-0502

天气雷达径向干扰回波去除方法的比较

杜言霞¹, 刘光普², 邱光敏³, 吴勇凯¹

(1. 福建省泉州市气象局, 福建 泉州 362000; 2. 福建省气象局, 福建 福州 350001;
3. 福建省武平县气象局, 福建 武平 364300)

摘要:基于 SA 多普勒天气雷达资料, 使用滤波法、插值法和功率法对径向干扰回波进行剔除, 并对 3 种方法的去除效果进行对比。结果表明:(1) 滤波法适用于晴空径向干扰回波的去除, 在有降水特别是降水回波与干扰回波混合的区域滤波法效果较差;(2) 若只有单一方位存在径向干扰回波时使用插值法去除回波效果较好, 而多个方位存在干扰回波时插值法效果较差;(3) 功率法通过处理雷达接收功率, 对连续多方位存在的干扰回波, 以及径向干扰回波与降水回波重叠的情况, 都有较好的识别及去除干扰回波的效果。在有降水时, 降水回波越弱, 对干扰的订正越强; 降水回波越强, 对干扰的订正越弱; 晴空时, 径向干扰回波基本被全部去除。

关键词:多普勒天气雷达; 径向干扰回波; 去除; 对比

文章编号:1006-7639(2017)-03-0502-05 DOI:10.11755/j.issn.1006-7639(2017)-03-0502

中图分类号:P413

文献标识码:A

引言

目前, 天气雷达监测布网已具规模, 相关雷达产品资料也日渐丰富, 其应用范围也逐渐增加, 这就对雷达回波资料的准确性提出了更高要求^[1]。雷达回波数据质量直接影响定量日常气象业务应用的精确度, 因此对其进行质量控制具有十分重要的意义^[2-3]。

径向干扰回波是天气雷达回波中一种常见的异常回波, 其在径向上呈条辐状分布, 从较近的距离一直延续到雷达可探测到的最大距离处, 存在于雷达回波图中连续几个方位上, 对雷达资料的各种二次产品质量都会有严重影响。如径向干扰回波是影响定量估测降水的重要因素, 经常会导致降水估测出现较大误差, 有时还会造成回波跟踪失败。对径向干扰回波进行实时剔除是各种二次雷达产品的质量保证, 在实际业务应用中具有重要的现实意义^[4]。

目前国内外对径向干扰回波的识别和去除相关方面的研究工作开展较少, 尤其对去除混合在降水回波区域的干扰回波研究更少, 使用的算法也比较简单。如 Lakshmana 等^[5]提出利用反射率因子相关

系数识别干扰回波, 再进一步使用插值进行回波填充; Zhang 等^[6]利用滤波方法成功去除晴空条件下雷达的径向干扰回波。目前国内开展的针对干扰回波去除的工作, 大多使用上述 2 种方法作为雷达资料质量控制的一个步骤。

本文利用 2015 年 7 月 7 日、8 月 29 日泉州站及 6 月 5 日厦门站 SA 多普勒雷达的原始资料, 重点研究基于功率法的径向干扰回波去除方法, 并与滤波法、插值法的去除效果进行对比, 得出各自的优缺点, 以针对不同的回波情况找到最佳的干扰去除方法。

1 径向干扰回波的识别

分析多普勒天气雷达回波资料, 选取能反映降水回波与干扰回波特征的物理量^[7], 即同一距离库上相邻方位回波强度差 (D_{dBZ} , 单位: dBZ), 其公式为:

$$D_{\text{dBZ}} = |Z_{i,j} - Z_{i+1,j}| \quad (1)$$

其中, $Z_{i,j}$ 为任意点的回波强度 (单位: dBZ), i 为径向数, j 为距离库数。

一方面, 存在径向干扰回波的区域, 其边缘方位

回波强度与相邻无干扰回波方位的回波强度差异较大;另一方面,由于干扰电磁波较为稳定,其回波强度值几乎不变,故存在干扰回波的方位回波强度的方差比无干扰回波方位的小,故用 D_{dBZ} 就可以检测出干扰的具体方位。设定回波强度差值阈值 Z_{thresh} , 其值的选取根据不同地区回波资料有所区别:判断是否为干扰回波点阈值 Z_{thresh1} , 取 20 dBZ(经验值);判断是否为干扰回波的方位阈值 Z_{thresh2} , 一般取 $150^{\circ} \sim 180^{\circ}$ (经验值,本文选取 160°)。统计存在干扰回波区域某回波点上下连续 10 个距离库上 D_{dBZ} 值,若该值 $> Z_{\text{thresh1}}$, 则认为是干扰回波点;若该干扰回波点的方位值 $> Z_{\text{thresh2}}$, 则认为该方位为存在干扰的目标方位。

2 径向干扰回波的去除方法

2.1 滤波法

在识别径向干扰回波的基础上,分析径向干扰回波图像,类似噪声滤除原理,采用公式 $P_X = \frac{N}{N_{\text{total}}}$ 进行过滤^[8],其中 X 为雷达原始体扫资料中给定的反射率距离库, N 为以 X 为中心的 5×5 的窗口中包含的非空反射率探测值的个数, N_{total} 为该窗口内包含的所有探测值的个数, P_X 为窗口中有效反射率回波所占百分比,当 P_X 小于某一阈值(经验缺省值为 75%)时,则认为这个点 X 是无效值,即为干扰回波点,应被去除。

图 1 为 2015 年 7 月 7 日泉州站 SA 雷达原始回波及滤波后回波图。由原始回波图(图 1a)可以看出,在雷达东面有 2 个区域被径向干扰回波污染,与东部的降水区域混合在一起。在识别出 61° 、 62° 、 63° 、 99° 、 100° 及 101° 等 6 个方位存在径向干扰回波

的基础上,使用滤波法对其进行去除。由滤波后的回波图(图 1b)可以看出,无降水混合区域的干扰回波全部被很好地去除,但与降水回波混合在一起的干扰回波仍被保留。用该方法对多个径向干扰回波进行分析后得出:基于图像处理的滤波法适用于晴空时径向干扰回波的去除,而在有降水特别是降水回波与干扰回波混合的区域效果较差。

2.2 插值法

利用插值法去除径向干扰回波的原理是:对径向干扰回波进行识别,确定其具体方位后,先将这些方位的回波抠出,再依赖同一距离库上无干扰回波方位反射率值进行线性插值处理,恢复降水回波强度值^[9]。其公式如下:

$$Z_{i,j} = \frac{k}{n} Z_{i-1,j} + \frac{n-k}{n} Z_{i+n,j} \quad (2)$$

式中, n 为存在干扰的方位总数, k 为干扰区域 $1 \sim n$ 个方位之间的某个方位。

图 2 为 2015 年 8 月 29 日泉州站 SA 雷达的原始回波及插值后的回波图。由原始回波图(图 2a)可以看出,雷达东北方向有 2 个区域存在径向干扰回波,且和降水回波混合。识别出 23° 、 24° 、 25° 、 26° 连续 4 个方位及 43° 方位存在干扰,将这些方位的回波抠出,使用插值法对其进行回波填充。由插值后的回波图(图 2b)可以看出,在 $23^{\circ} \sim 26^{\circ}$ 区域填充的回波呈环状效果,而 43° 单一方位插值后的回波填充效果较好。

综上所述,径向干扰回波会存在在 1 个或多个方位上。若单一方位存在径向干扰回波时使用插值法效果较好,而多个方位存在干扰回波时,使用插值法会形成环状效果,剔除效果较差。

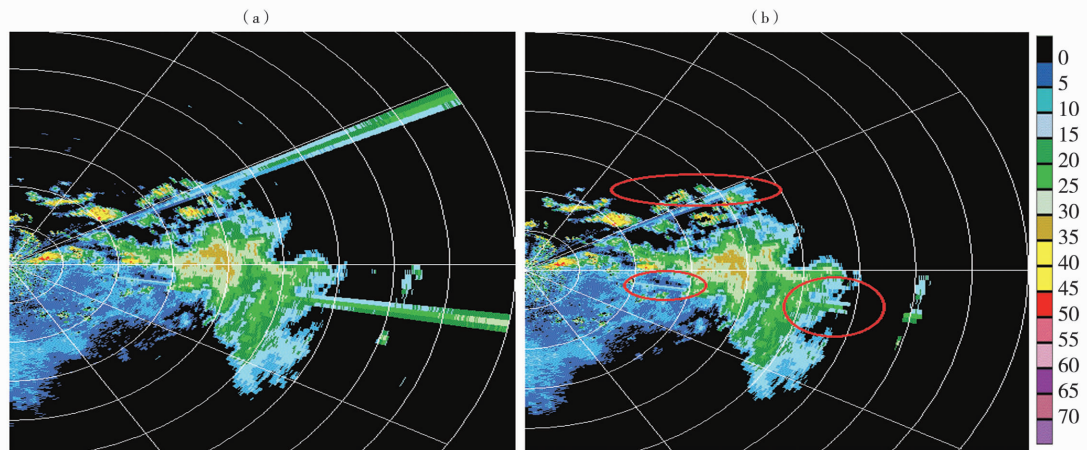


图 1 2015 年 7 月 7 日泉州站 SA 雷达原始(a)及滤波后(b)的反射率因子(单位:dBZ)

Fig. 1 The initial reflectivity (a) and filtered reflectivity (b) (Unit:dBZ) of the SA radar at Quanzhou station of Fujian on 7 July 2015

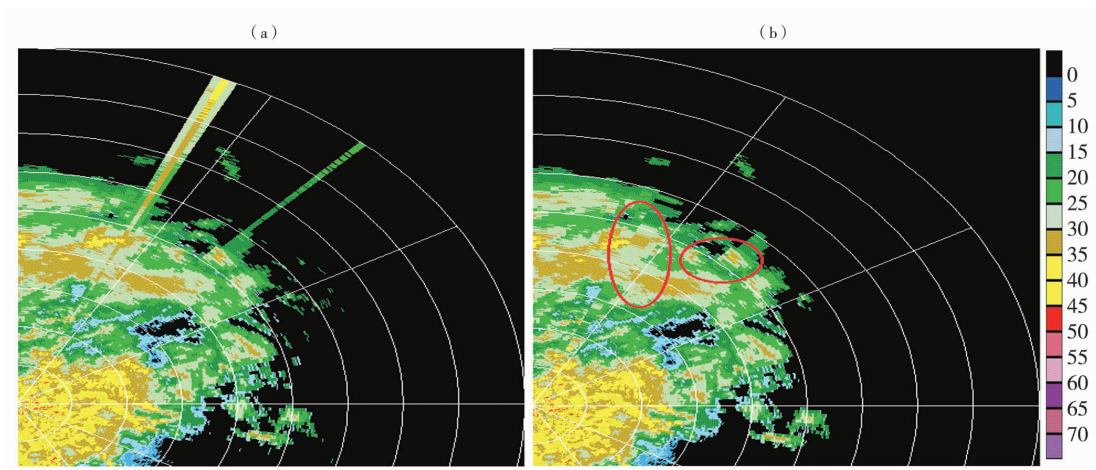


图2 2015年8月29日泉州站SA雷达原始回波(a)及插值后回波(b)图(单位:dBZ)

Fig. 2 The initial echo (a) and interpolated echo (b) of the SA radar at Quanzhou station of Fujian on 29 August 2015 (Unit: dBZ)

2.3 功率法

功率法通过对雷达接收功率的处理,达到去除径向干扰回波的目的。根据径向干扰回波的特征建立径向干扰回波模型(图3),模型中假设只有一个方位存在干扰,将回波分为晴空干扰回波区域及干扰与降水混合回波区域,选取晴空干扰回波区域A点,干扰与降水混合回波区域B点举例说明。

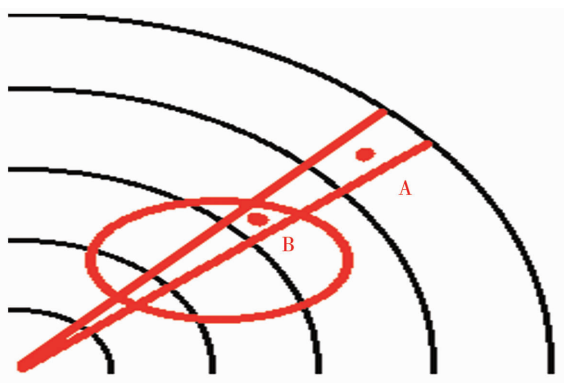


图3 径向干扰回波模型图

Fig. 3 Radial interference echo model

根据瑞利散射条件下大气衰减的雷达气象方程: $P = \frac{C}{r^2} Z \cdot 10^{K \cdot r}$ (P 为回波功率,单位:W; C 为雷达常数,只决定于雷达参数和降水相态; Z 为反射率因子; K 为衰减系数,其值与仰角有关; r 为距目标物的距离,单位:km),当回波功率 P 和距离 r 已知时可计算出反射率因子 $Z = \frac{Pr^2}{C \cdot 10^{K \cdot r}}$,这一过程为距离订正及衰减订正,我国新一代天气雷达都具备距离订正及衰减订正算法。由 $Z = \frac{Pr^2}{C \cdot 10^{K \cdot r}}$ 可以导出

dB 和 dBZ 的关系^[10],即:

$$10 \lg Z = 20 \lg r + 10 \lg P - 10 \lg C - K \cdot r \quad (3)$$

$$\text{dBZ} = \text{dBr} + \text{dBZ}' - K \cdot r \quad (4)$$

其中,dB 为分贝表示法,用于表示回波功率的大小,dBZ 为反射率因子的分贝表示法($\text{dBZ} = 10 \lg Z$),用于表示雷达回波强度。式(4)中,右端第1项 dBr 为距离订正项;第2项是接收功率与雷达常数合并项的 dB 表示值;第3项 $K \cdot r$ 为衰减订正项;左端是反射率因子的 dBZ 表示值,即雷达接收到的回波强度值。

由于距离及衰减订正结果已经包含在雷达基数据中,在订正降水回波的同时也会使本来较弱的干扰回波在远距离处增强,为得到真实的干扰回波,对数据进行了退去距离订正值及衰减订正值的处理。对晴空干扰回波区域中的A点,由式(4)得: $\text{dBZ}'_A = \text{dBZ}_A - \text{dBr}_A + K \cdot r_A$, A点的回波功率为: $P_A = \frac{C}{r_A^2} Z_A \cdot 10^{K \cdot r_A}$,令 $M_A = \frac{P_A}{C}$,则: $M_A = \frac{P_A}{C} = \frac{Z_A \cdot 10^{K \cdot r_A}}{r_A^2} = 10^{\text{dBZ}_A - \text{dBr}_A + K \cdot r_A}$,即A点退去距离订正值及衰减订正值后的功率值。

同理,对于干扰与降水混合回波区域中的B点,由式(4)得: $\text{dBZ}'_B = \text{dBZ}_B - \text{dBr}_B + K \cdot r_B$, B点的回波功率为: $P_B = \frac{C}{r_B^2} Z_B \cdot 10^{K \cdot r_B}$,令 $M_B = \frac{P_B}{C}$,则: $M_B = 10^{\text{dBZ}_B - \text{dBr}_B + K \cdot r_B}$,即B点退去距离订正值及衰减订正值后的功率值。

在干扰与降水混合回波区域对B点的回波功率进行处理,得到去除干扰回波功率后的近似回波功率

$(P_C): P_C = P_B - P_A$, 令 $M_C = \frac{P_C}{C}$, 则: $M_C = M_B - M_A$,

此时该点的反射率因子为: $Z_C = M_C \frac{r_c^2}{10^{K \cdot r_c}}$, 对其进行距离订正和衰减订正得:

$$\text{dBZ}_C = 10 \lg M_C + \text{dB}r_c - K \cdot r_c \quad (5)$$

式(5)中左端即为去除干扰回波后回波强度的dB表示值。

在实际计算时,为更真实地反映干扰回波功率大小,对晴空干扰回波区域方位上所有回波点功率取平均值代替A点的功率值。

图4为2015年6月5日厦门站SA雷达原始回波及去除干扰后的回波图。由原始回波图(图4a)可以看出,雷达东偏南方向多个区域存在干扰回波,

回波在径向上呈条幅状从较近的距离一直延续到460 km处并且在连续几个方位上存在,在150—300 km区域干扰回波与降水回波重叠在一起。确定干扰回波在151°、152°、153°及163°、164°、165°、166°的2个区域:计算晴空干扰回波区域径向上所有回波点的平均功率,即为径向干扰回波功率。干扰与降水混合回波区域中各点回波功率与该值做差值可近似得到真实降水回波功率,最后对所有回波点进行距离订正和衰减订正得到回波强度的dB值;晴空干扰回波区域的回波强度直接做赋值-32 dB(经验值)处理。

图5为2015年6月5日厦门站SA雷达151°方位170—320 km干扰回波与降水回波混合区域上原始回波及去除干扰后的回波强度值,图6为151°方

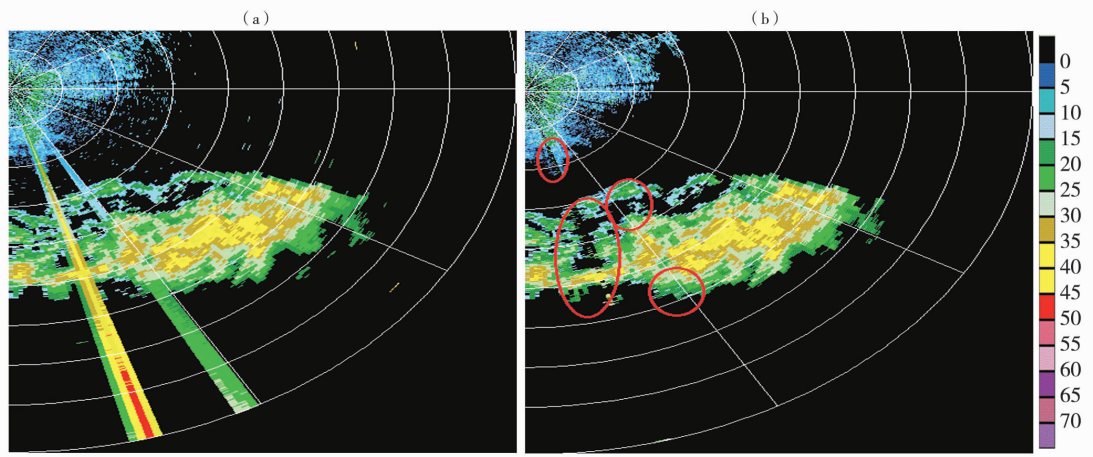


图4 2015年6月5日厦门站SA雷达原始回波(a)及去除干扰后的回波(b)图(单位:dBZ)

Fig.4 The initial echo (a) and the ehco removed interference (b) of the SA radar at Xiamen station of Fujian on 5 June 2015 (Unit:dBZ)

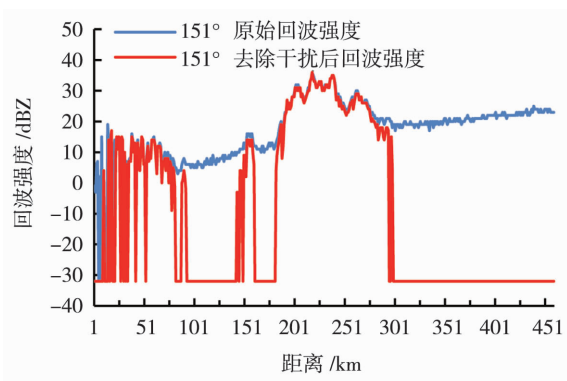


图5 2015年6月5日厦门站SA雷达151°方位干扰与降水回波混合区域上原始回波及去除干扰后的回波强度

Fig.5 The echo intensity of the original echo and the echo removed interference in the mixed area of the interference and precipitation echo on 151° azimuth of the SA radar at Xiamen station of Fujian on 5 June 2015

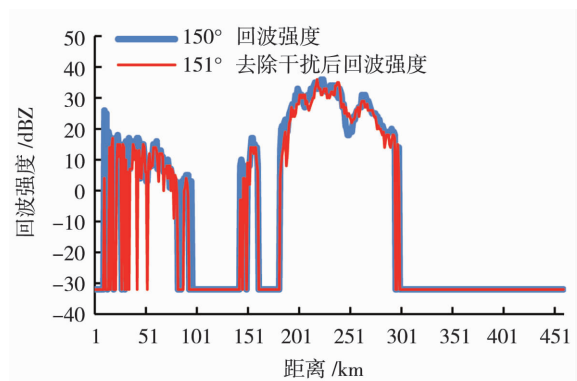


图6 2015年6月5日厦门站SA雷达150°方位原始回波以及151°方位去除干扰后回波强度

Fig.6 The echo intensity of the original echo on 150° azimuth and the echo removed interference on 151° azimuth of the SA radar at Xiamen station of Fujian on 5 June 2015

位去除干扰后回波与相邻无干扰的 150° 方位回波强度值。可以看出去除干扰后的回波强度与相邻无干扰方位的回波强度值大致呈相同趋势,说明径向干扰回波得到较好去除。另外,当原始降水回波越弱时,去除干扰后回波强度值也越小,对干扰的订正越强,即订正后的回波值越接近真实降水回波值;而当降水回波较强时,去除干扰后的回波强度值变化不大,对干扰订正较小;晴空下,干扰回波基本被全部去除。

3 结论与讨论

(1) 基于图像处理的滤波法适用于晴空径向干扰回波的去除,而在有降水特别是降水回波与干扰回波混合的区域效果较差。若只有单一方位存在径向干扰回波适合使用插值法去除,而多个方位存在干扰回波时,使用插值法效果较差。

(2) 对于降水回波和干扰回波重叠区域,干扰信号较弱时,用功率法去除径向干扰回波的同时也能较好地保留真实降水回波;而干扰信号很强时,在去除干扰回波后,对本身正常的降水回波也会去除一部分。

本文使用的方法对识别及去除螺旋状的干扰回波不适用,对于电磁干扰造成的异常回波的去除还须进一步研究。同时,干扰回波的形成原因众多,径向干扰回波的识别与去除仍然是比较复杂的问题,

应进一步分析干扰回波的特征,结合邻近站点雷达资料以及综合利用其它监测手段十分必要。

参考文献

- [1] 姜小云,李昭春,吴俞. 新一代天气雷达远程故障诊断与应急维修应用研究探讨[J]. 干旱气象,2016,34(2):376-381.
- [2] 吕博,杨士恩,王俊,等. X波段双线偏振多普勒雷达资料质量评估[J]. 干旱气象,2016,34(6):1054-1063.
- [3] 仰美霖,刘黎平,苏德斌. 新一代天气雷达径向速度质量分析[J]. 干旱气象,2016,34(1):145-153.
- [4] 江源. 新一代天气雷达气象回波与非气象回波识别方法的研究[D]. 北京:中国气象科学研究院,2008.
- [5] Lakshmanan V, Hondl K, Stumpf G, et al. Quality control of weather radar data using texture features and a neural network[C]. Preprints, the fifth International Conference on Advances in Pattern Recognition, IEEE, 2003.
- [6] Zhang J, Wang S, Clarke B. WSR-88D reflectivity quality control using horizontal and vertical reflectivity structure[C]. Preprints, the 11th Conference on Aviation, Range and Aerospace Meteorology, American Meteorology Society, 2004.
- [7] 周红根,柴秀梅,胡帆,等. 新一代天气雷达回波异常情况分析[J]. 气象,2008,34(6):112-115.
- [8] 宗蓉,刘春云. 雷达反射率数据质量控制方法初探[J]. 气象与环境学报,2009,25(2):62-67.
- [9] 孟昭林,王红艳. 提高新一代多普勒天气雷达产品数据质量的途径与方法[J]. 气象科技,2006,34(增刊):85-89.
- [10] 张培昌,杜秉玉,戴铁丕. 雷达气象学[M]. 北京:气象出版社,2001.

Comparison of Radial Interference Echo Removal Methods for Weather Radar

DU Yanxia¹, LIU Guangpu², QIU Guangmin³, WU Yongkai¹

(1. Quanzhou Meteorological Bureau of Fujian Province, Quanzhou 362000, China; 2. Fujian Provincial Meteorological Bureau, Fuzhou 350001, China; 3. Wuping Meteorological Station of Fujian Province, Wuping 364300, China)

Abstract: Based on the SA Doppler weather radar data, the filtering method, the interpolation method and the power method were used to eliminate the radial interference echo, and the removal efficiency of the three methods was analyzed and compared. The results are as follows: (1) The filtering method was suitable for the radial interference echo removal under clear sky condition, but the efficiency was poorer under precipitation condition, especially in the areas where the radial interference echo mixed with the precipitation echo. (2) If the radial interference echo existed in a single azimuth, the interpolation method was useful, when it existed in several directions, the efficiency was poorer. (3) By processing the received power of radar, the power method could effectively identify and remove the interference echo which existed in continuous multi directions or the overlap area of radial interference echo and precipitation echo. In the case of precipitation, the weaker the precipitation echo was, the stronger the interference correction was, otherwise, the weaker the interference correction was. If the sky was clear, the radial interference echo was completely removed.

Key words: Doppler weather radar; radial interference echo; removal; comparison