

黄小玉,彭洁,毛紫阳,等,2019.多普勒天气雷达有源干扰回波识别算法研究[J].气象,45(3):371-380. Huang X Y, Peng J, Mao Z Y, et al, 2019. Analysis of algorithm for identifying active jamming echo from Doppler weather radar[J]. Meteor Mon, 45(3):371-380(in Chinese).

多普勒天气雷达有源干扰回波识别算法研究^{*}

黄小玉¹ 彭洁² 毛紫阳³ 尹新怀⁴

1 国家气象中心,北京 100081

2 岳阳市气象局,湖南岳阳 414000

3 国防科技大学文理学院,长沙 410073

4 湖南省气象信息中心,长沙 410118

提 要: 本文首先对多普勒天气雷达有源干扰回波形成的原因进行了分析,进一步分析了不同类型有源干扰回波的 PPI 图像形态特征。提出反射率因子径向能量以及径向能量一阶差分概念,并使用径向能量一阶差分识别有源干扰回波所在的方位。算法针对北京、长沙、汕头、岳阳等多个地(市)的雷达数据进行了试验,结果表明该算法对于各种形态的有源干扰回波,均能准确识别其所在方位。特别是当多处干扰回波同时存在,以及干扰回波与降水回波混合存在时,算法也能有效进行识别并滤除有源干扰回波,较完整保留降水回波。

关键词: 多普勒天气雷达,有源干扰回波,径向能量,径向能量一阶差分,回波识别算法

中图分类号: P412.25, P413

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2019.03.007

Analysis of Algorithm for Identifying Active Jamming Echo from Doppler Weather Radar

HUANG Xiaoyu¹ PENG Jie² MAO Ziyang³ YIN Xinhui⁴

1 National Meteorological Centre, Beijing 100081

2 Yueyang Meteorological Office of Hunan Province, Yueyang 414000

3 College of Liberal Arts and Sciences, National University of Defense Technology, Changsha 410073

4 Hunan Meteorological Information Centre, Changsha 410118

Abstract: In this paper, the reasons of the active jamming echo formation from the Doppler weather radar, and the morphological characteristics of PPI images from different types of active jamming echoes are analyzed. The concepts of radial energy of reflectivity factor and the first-order difference of radial energy are put forward, and the azimuth of active disturbance echo is identified by using the first-order difference of radial energy. Algorithm for the radar data from several cities such as Beijing, Changsha, Shantou, Yueyang is tested. The results show that the algorithm for various forms of active jamming echoes can accurately identify their locations. Especially when multiple locations interference echoes appear at the same time and interference echo coexists with precipitation echo, the algorithm is still able to identify and filter active jamming echo, retaining the whole precipitation echo.

Key words: Doppler weather radar, active jamming echo, radial energy, radial energy first-order difference, echo identification algorithm

^{*} 公益性行业(气象)科研专项(GYHY201206010)和湖南省气象局重点项目(XQKJ16A003)共同资助

2018年2月8日收稿; 2018年9月17日收修定稿

第一作者:黄小玉,主要从事短期、短时天气预报工作及研究. Email: hxylyr@126.com

引言

随着中国新一代天气雷达的建设和应用,我国气象工作者利用雷达开展了强对流监测预报(郑媛媛等,2004;俞小鼎等,2008;方翀等,2015;胡文东等,2015;李佰平等,2016;沈杭锋等,2016;魏东等,2011;何炳伟等,2018;蔡荣辉等,2017;吴涛等,2017;李兆慧等,2017;张琳娜等,2018)、暴雨研究(赵思雄等,2018;曹晓岗等,2009;东高红等,2011;黄小玉等,2005;2006;李柏等,2007)、冻雨分析(黄小玉等,2008)等工作,并在风场反演(周海光和王玉彬,2005)、定量估测降水(黄小玉等,2009;刘晓阳等,2010)和临近预报等方面(张亚萍等,2007;李柏等,2007)取得了一系列成绩。上述工作都建立在可靠的雷达资料的基础上。国外在雷达资料质量控制,特别是地物、超折射回波的识别方面进行了大量研究(Fulton et al, 1998; Kessinger et al, 2003a; 2003b; Pamment and Conway, 1998; Steiner and Smith, 2002; Zhang et al, 2004; Lakshmanan et al, 2007)。国内方面,刘黎平和王致君(1996)根据云和地物回波的反射率因子 Z_H 、差反射率因子 Z_{DR} 的取值大小及两者的关系、空间变化梯度有效识别了地物回波。毛紫阳等(2006)通过将雷达数据变换后并用模糊特征方法将地物及超折射回波有效地去除;刘黎平等(2007)应用模糊逻辑方法的雷达质量控制,在灾害性天气短时临近预报系统(SWAN)和新一代天气雷达业务系统(ROSE)中得到应用,并初步应用到中尺度数值模式雷达资料同化过程中。但该算法存在部分降水回波过度抑制的现象,庄薇等(2012)对镶嵌在降水中的地物以及小尺度对流云的过度抑制等问题进行了改进,进一步完善地物识别算法。

多普勒天气雷达反射率因子数据的质量除了受到地物、超折射、海浪等因素的影响外,还常受到其他雷达、电子设备等无线电源的干扰,以及太阳辐射的影响,在雷达PPI图上形成干扰回波,严重影响天气雷达的探测效果。并且大城市天气雷达的有源干扰回波明显多于偏远地区,周围电子设备越多的地区,其干扰回波也越明显。虽然预报员根据经验可以很容易对这类回波进行识别,但已有的回波识

别算法对这种干扰回波的讨论并不深入,对于某些特殊的回波识别效果较差,在有源干扰回波离雷达较远又有降水回波混合的区域,很难与降水回波分开,专门针对天气雷达有源干扰回波识别技术的研究也较少。本文对有源干扰回波进一步研究具有一定的指导作用。

1 有源干扰回波的种类及特征

雷达的工作原理是雷达发射的电磁波遇到目标物,其后向散射的电磁波被雷达接收后形成的回波。雷达附近如有电子设备,其发射特定的电磁波被雷达接收而形成的回波即为有源干扰回波。

邻近雷达的同频干扰信号的脉冲周期与本雷达所发射脉冲周期可能不同,也可能相同。前者被称为同频异步干扰,后者被称为同频同步干扰。相同工作频段、不同型号雷达同时工作时一般会互相引起异步干扰,而同频同步干扰一般由相同型号雷达同时工作时产生。观察雷达PPI图像可以直观地看到它们对雷达回波的不同影响:当两部雷达的脉冲周期完全相同或成整数倍关系时,干扰的回波呈现为同心圆环,此时的同频干扰被称为同步干扰或称同期干扰。如果脉冲周期不等或不成整数倍关系,干扰回波表现为旋转花瓣,称为异步干扰(张文祥和李进华,2007)。当雷达脉冲的周期参差时,干扰回波则以放射状线条形态出现(图1a,图2a,图3a,图4a)。

地基多普勒天气雷达之间相距较远且发射的脉冲频率相互错开,所以有源干扰回波多为其他雷达、电子设备相互干扰造成的异步干扰。从PPI图像上来看,主要有以下几种形态:(1)干扰回波区域呈扇形,回波内部紧密且比较平滑(图1a);(2)干扰回波出现在一个扇形区域内,十分稀疏,不连续,且变化剧烈(图2a);(3)干扰回波区域范围很小,近似呈扇形,变化剧烈,呈不规则纹理(图3a);以上三种形态的结合,并且同一幅PPI图像中出现不止一条干扰回波(图4a);干扰回波与降水回波同时存在(图5a,图6a)。

2 特征提取

虽然这一类干扰回波形态上有比较大的差异,

但都具有共同的特征:回波出现在某两个邻近的方位角之间的整个扇形区域中,区域的边界明显,反射率因子的均值比较大(相对于晴空回波等杂波)。这些特征从图像处理的角度来看,属于全局特征信息,而现有的回波识别算法大多是以局部统计量为基础计算回波的相关特征(Lakshmanan et al, 2007)。局部统计量一般是在 5×5 或者 7×7 的小区域中进行,只能反映回波的局部特征信息。因此,这些识别算法,对于此类干扰回波的识别效果较差。

由上述讨论可知,通过分析反射率因子在径向上的累积分布可望发现上述有源干扰回波的特征,于是提出以下定义:

定义1:反射率因子的径向能量定义为反射率因子数据沿径向方向的累积,即:

$$ER_i = \sum_{j=1}^{\max(\text{gates})} Z_{i,j} \quad i = 1, \dots, \max(\text{rays}) \quad (1)$$

式中, i, j 分别是反射率库在方位和距离方向上的序号值, $Z_{i,j}$ 代表反射率值,单位为 dBz, $\max(\text{rays})$ 和 $\max(\text{gates})$ 分别为在方位和距离方向上的最大库数。

由于云区在雷达的探测范围内是相对连续的,所以在没有杂波的理想情况下,仅由降水物质生成的反射率因子数据也应该是相对连续的,其径向能量同样是连续变化的。如果存在干扰回波,在杂波边界附近,径向能量会发生突变。由此提出,使用径向能量的一阶差分来揭示这种突变。

定义2:反射率因子径向能量的一阶差分,即:

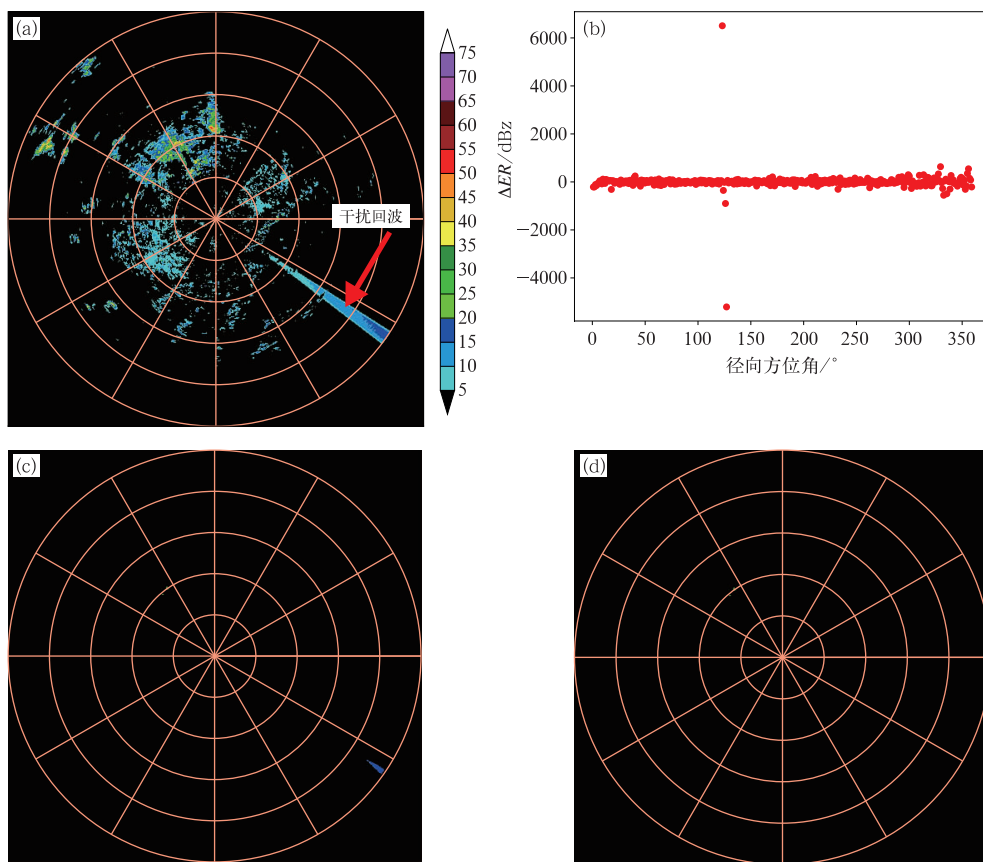


图1 2003年5月31日10:42长沙雷达 0.5° 反射率因子及 ΔER

(a)原图,(b)方位角— ΔER , (c)模糊特征质量控制图,
(d)去有源干扰后模糊特征质量控制图

Fig.1 The base reflectivity (0.5°) of Changsha Radar at 1042 UTC 31 May 2003 and ΔER

(a) original, (b) azimuth— ΔER , (c) fuzzy characteristics of quality control chart,
(d) active jamming filtered and fuzzy characteristics of quality control chart

$$\Delta ER_i = ER_{i+1} - ER_i = \sum_{j=1}^{\max(\text{gates})} (Z_{i+1,j} - Z_{i,j})$$

$$i = 1, \dots, \max(\text{rays}) - 1 \quad (2)$$

ΔER 突然增大的方位角(正的最大值附近)对应于干扰回波区域的开始, ΔER 突然减小的方位角(负的最大值附近)对应于干扰回波区域的结束, 即相邻两个正、负最大值之间的方位角, 对应于干扰回波区域。其他区域所对应的 ΔER 值应该在 0 附近波动。上述不同类型干扰回波所对应的 ΔER 分布也各有不同。

3 试验结果分析

选取了北京、长沙、汕头 SA 雷达及岳阳 SB 雷达的资料进行试验。试验表明(图 1b, 图 2b, 图 3b, 图 4b, 图 5b, 图 6b), 该特征量对于有源干扰回波的各种形态, 无论紧密还是稀疏, 无论一条还是多条, 无论是否与降水回波混合, 均能准确地识别出干扰

回波所在方位及数量。

图 1a 为长沙雷达站 0.5° 反射率因子图, 图中干扰回波内部紧密且比较平滑, 回波区域边界明确。从干扰出现的位置、时间及纹理特征分析, 图中干扰回波为太阳干扰回波。 ΔER 图中干扰回波的起始方位角及结束方位角的正、负最大值的绝对值较大, 且孤立, 其他方位角对应的 ΔER 值集中在 0 附近, 且方差较小(图 1b)。

图 2a 为汕头雷达站 0.5° 反射率因子图, 图中干扰回波十分稀疏, 不连续, 且变化剧烈, 区域边界分明, 则 ΔER 图中正、负最大值的绝对值相对图 1 来看较小, 但在干扰回波的起始方位角与结束方位角位置出现突然增大与减小现象(图 2b)。

图 3a 为岳阳雷达站 0.5° 反射率因子图, 图中有源干扰回波范围很小, 但在有源干扰起始与结束方位角位置同样出现了 ΔER 突然回波增大与减小现象(图 3b)。

图 4a 为北京雷达站 0.5° 反射率因子图, 图中存

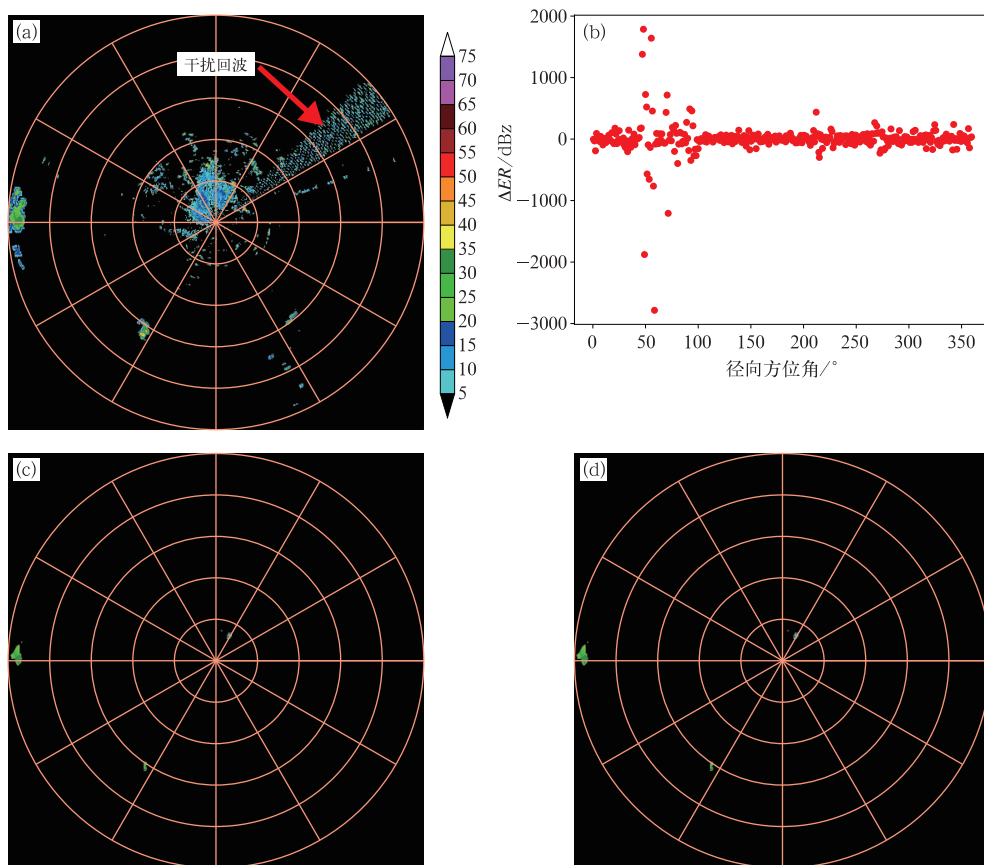


图 2 同图 1, 但为 2007 年 6 月 30 日 17:46 汕头雷达

Fig. 2 Same as Fig. 1, but for the Shantou Radar at 1746 UTC 30 June 2007

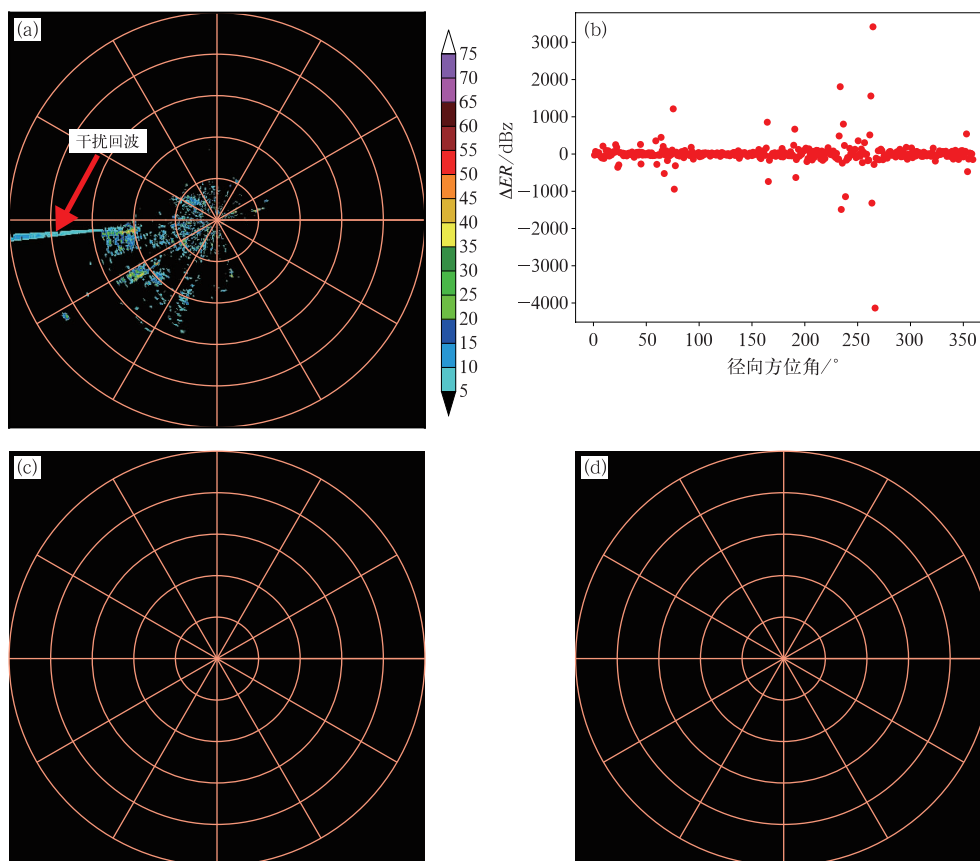


图3 同图1,但为2017年1月6日01:16岳阳雷达

Fig. 3 Same as Fig. 1, but for the Yueyang Radar at 0116 UTC 6 January 2017

在三处干扰回波, ΔER 图明确显示出这三处干扰回波所在的方位(图4b)。

图5a为北京雷达站 0.5° 反射率因子图,图中干扰回波存在于一个扇形区域内,非常稀疏,呈散点状,而且该区域中同时存在比较强的对流云降水回波。在出现干扰回波的区域仍然有 ΔER 的突变值存在。另外,由于整个区域中有较多的小块对流云降水回波,因此 ΔER 图中其他方位的 ΔER 值的绝对值比较大(仍然小于 1000 dBz,图5b)。

图6a为汕头雷达站 0.5° 反射率因子图,图中有源干扰回波穿过降水回波区, ΔER 图仍然明确标识出干扰回波所在的方位(图6b)。

由图1b,图2b,图3b,图4b,图5b,图6b还可以看出,对于反射率数据中不存在有源干扰回波的区域,各方位的 ΔER 值的绝对值都比较小(通过统计,低于 1500 dBz)。因此,可以通过设定一个阈值 ($T=1500$ dBz),识别出是否存在有源干扰回波,以及其所在的方位及区域。径向能量一阶差分完全可以作为识别有源干扰回波的特征量,普适性、稳定性

以及区分能力均较好。

4 干扰回波的滤除

对于类似图1~图4的情形,由于干扰回波没有与降水回波混合,可以通过阈值 $T>1500$ dBz,将干扰回波滤除。而对于图5和图6这种干扰回波与降水回波混合的情况,通过阈值 T 定位干扰回波所在区域后,不能将该区域中所有的回波全部滤除,需要进一步判断干扰回波所在的具体位置。参考式(1)、式(2),可类似定义分段径向能量及其对应的一阶差分:

$$SER_{I,j} = \sum_{k=0}^{N-1} Z_{I,j+k} \quad (3)$$

$$j = 1, \dots, \max(\text{gates}) - N + 1$$

$$\begin{aligned} \Delta SER_{I,j} &= SER_{I+1,j} - SER_{I,j} \\ &= \sum_{k=0}^{N-1} (Z_{I+1,j+k} - Z_{I,j+k}) \end{aligned} \quad (4)$$

$$j = 1, \dots, \max(\text{gates}) - N$$

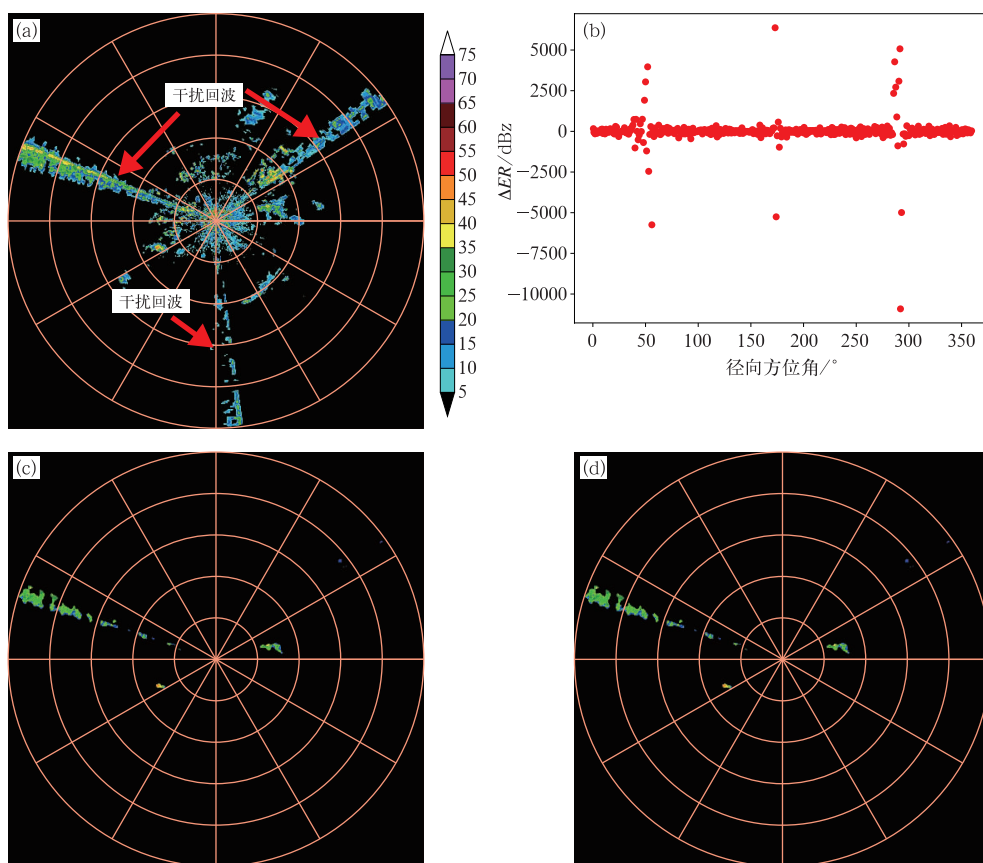


图 4 同图 1, 但为 2008 年 6 月 17 日 07:54 北京雷达

Fig. 4 Same as Fig. 1, but for the Beijing Radar at 0754 UTC 17 June 2008

式中 I 为干扰回波所在方位角, 由上一步的阈值 T 确定, N 为每一小段所包含的距离库数, 其取值由雷达以及雷达所在地区的气候环境决定。总的来说, N 的取值既不能太大, 又不能太小。若 N 过大则定位性能不好, 反之 N 太小则随机因素加强, 结果不稳定。经过对比试验, 确定 $N=115$ 。 ΔSER 的变化规律与 ΔER 一致, 只是前者考虑的是局部信息, 以便于定位。

雷达图像的质量控制采用两种方法进行对比: 一种是直接基于模糊特征方法(毛紫阳, 2006), 结果见图 1c, 图 2c, 图 3c, 图 4c, 图 5c, 图 6c, 另一种是先使用 ΔER 确定干扰回波所在方位后, 再用 ΔSER 定位干扰回波具体所在位置, 并滤除有源干扰回波后, 然后基于模糊特征方法将雷达资料进行质量控制, 结果见图 1d, 图 2d, 图 3d, 图 4d, 图 5d, 图 6d。

图 2a, 图 3a, 图 5a, 图 6a 有源干扰回波结构比较松散, 与降水回波有较大区别, 两种质量控制图基本一致(图 2c 与 2d, 图 3c 与 3d, 图 5c 与 5d, 图 6c

与 6d), 说明基于模糊特征质量控制能够去掉大部分杂波, 是一种较好的质量控制方法。

图 1a 和图 4a 有源干扰回波结构平滑, 纹理均匀, 采用第一种方法能够去掉大部分非降水回波, 但部分有源干扰回波仍然存在, 而经过过去有源干扰回波方法处理后, 杂波基本全部滤除, 同时有效地保留降水回波, 说明本文方法能去掉有源干扰回波, 可以作为雷达质量控制方法的补充。

5 讨 论

图 1a 中受太阳干扰回波影响, 图 2a, 图 3a, 图 4a, 图 5a 为其他电子干扰回波影响, 从回波的结构上看两者比较相似, 回波的起始、结束的方位角一致, 因此用本文的算法可以有效去除太阳干扰回波。

尽管本文提出的方法可有效去除有源干扰回波, 但由于之前基于模糊特征的质量控制方法在有效去除各种杂波的同时, 也去除了真实气象回波中

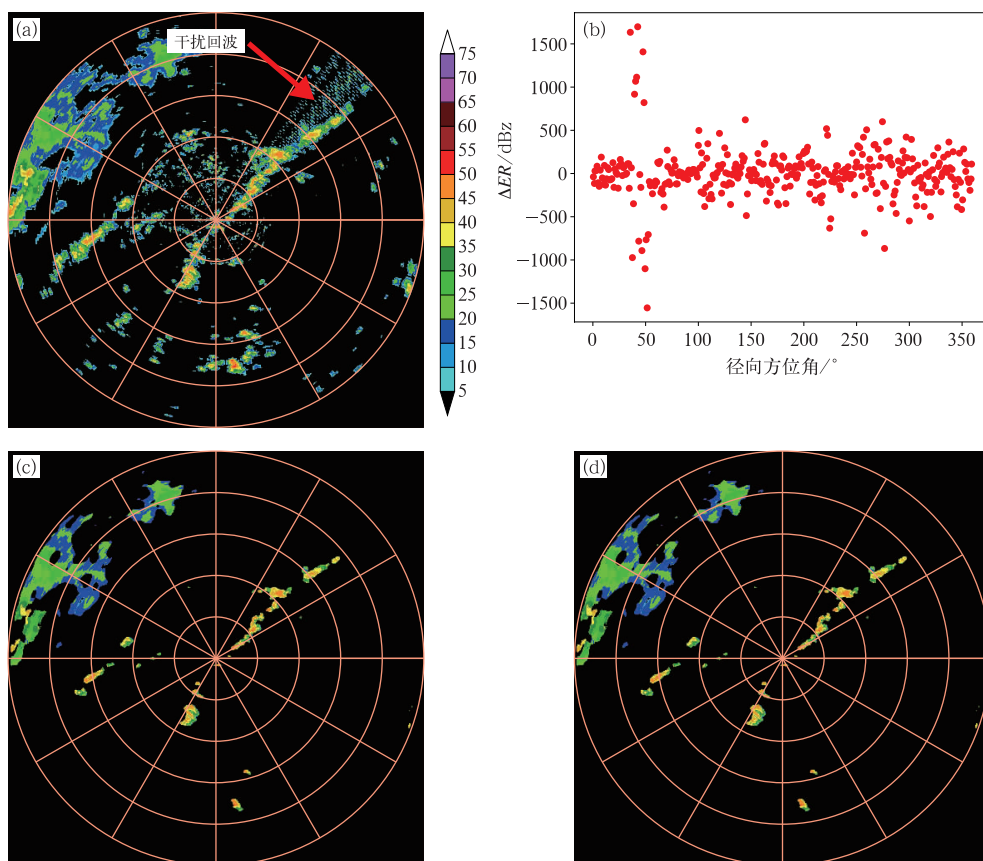


图5 Same as Fig. 1, 但为 2007 年 8 月 21 日 00:28 北京雷达

Fig. 5 Same as Fig. 1, but for the Beijing Radar at 0028 UTC 21 August 2007

的相对弱回波,包括远距离孤立积云和积层混合云的弱回波区部分,存在一定“过度抑制”的问题。在随后的研究中将针对这一不足作进一步研究,不断完善雷达数据质量控制。远距离孤立回波与空洞回波的回补将采用庄薇等(2012)文中的方法,主要思路如下:

(1) 对于远距离孤立对流回波,加一个距离因子来改变判别阈值,达到减小对孤立回波的过度抑制目的;

(2) 对于“空洞回波”,将通过回波顶高分析,大于降水回波顶高阈值的区域用上一层的资料及本层的资料进行回补;

(3) 对于晴空回波与真实气象回波附近的弱回波:地物回波及超折射一般比较强,而过度抑制的真实回波比较弱,通过分析可以设定阈值,将弱回波恢复;另外真实气象回波附近的弱回波还可以利用膨胀算法,对膨胀区域的反射率因子做分析,大于阈值的保留下来。

6 结 论

本文在分析多普勒天气雷达有源干扰回波特征的基础上,设计了两个特征量:径向能量及其一阶差分,对有源干扰回波进行过滤。结论如下:

(1) 多普勒天气图上由于受周边电子设备的影响,经常出现有源干扰回波现象。本文分析了有源干扰回波的形成原因及各种回波的形态。

(2) 径向能量及其一阶差分两个概念物理含义明确,计算简单,运算量小,对各种类型有源干扰回波均能准确识别,区分能力及稳定性较好。该特征量作为全局特征信息,弥补了以局部统计量为回波分类依据的回波识别算法的缺陷,可以很好地与这些算法结合,作为这些算法的预处理或者后处理过程,一起进行回波分类。

(3) 用北京、长沙、汕头及岳阳不同雷达站的有源干扰回波进行试验,均有很好的效果,当降水回波

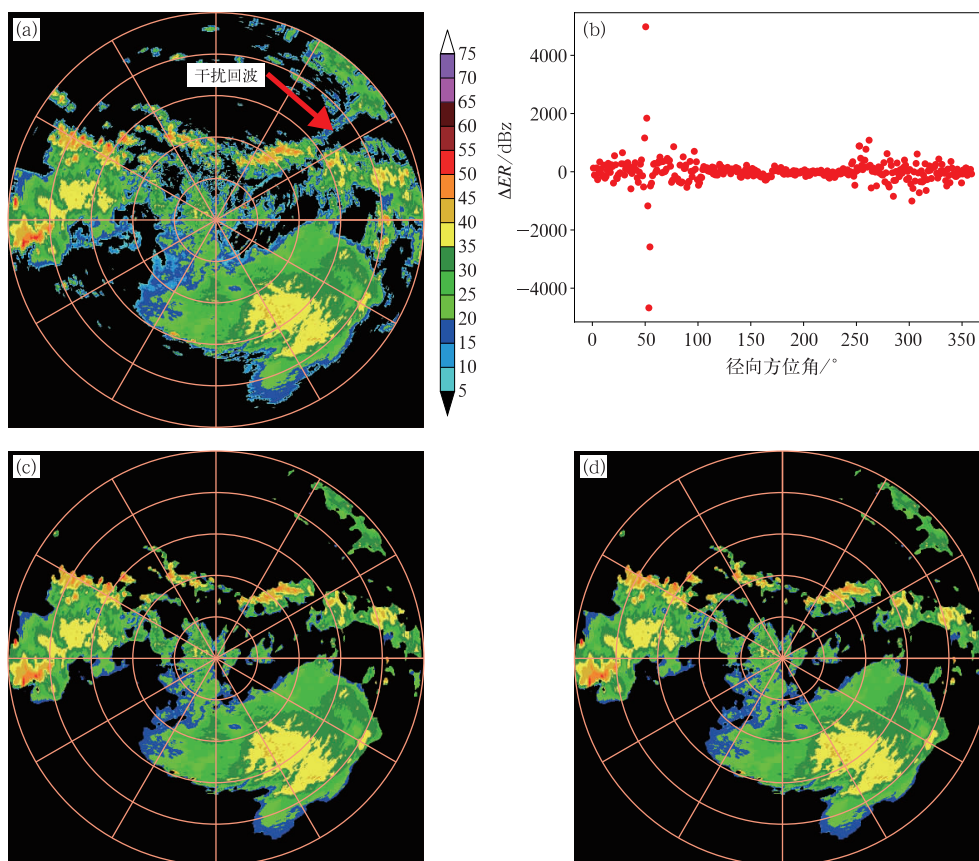


图6 同图1,但为2007年6月8日07:22汕头雷达

Fig. 6 Same as Fig. 1, but for the Shantou Radar at 0722 UTC 8 June 2007

与同频干扰回波混合时,也能将同频干扰回波滤除,保留降水回波。

(4) 尽管本文提出的方法可有效去除有源干扰回波,但由于之前基于模糊逻辑的质量控制方法在有效去除各种杂波的同时,也去除了真实气象回波中的相对弱回波,包括远距离孤立积云和积层混合云的弱回波区部分,存在一定“过度抑制”的问题。在随后的研究中将针对这一不足作进一步研究,不断完善雷达数据质量控制。

参考文献

- 蔡荣辉,姚蓉,黄小玉,等,2017. 洞庭湖区域雷暴大风分型及预报分析研究[J]. 气象,43(5):560-572. Cai R H, Yao R, Huang X Y, et al, 2017. Synoptic situation classification and forecast analysis of thunderstorm in Dongting Lake[J]. Meteor Mon, 43(5):560-572(in Chinese).
- 曹晓岗,张吉,王慧,等,2009. “080825”上海大暴雨综合分析[J]. 气象,35(4):51-58. Cao X G, Zhang J, Wang H, et al, 2009. Analysis on a severe convective rainstorm hitting Shanghai on 25 August 2008[J]. Meteor Mon, 35(4):51-58(in Chinese).
- 东高红,何群英,刘一玮,等,2011. 海风锋在渤海西岸局地暴雨过程中的作用[J]. 气象,37(9):1100-1107. Dong G H, He Q Y, Liu Y W, et al, 2011. The role of sea breeze front in local storm of Bohai Coast[J]. Meteor Mon, 37(9):1100-1107(in Chinese).
- 方翊,俞小鼎,朱文剑,等,2015. 2013年3月20日湖南和广东雷暴大风过程的特征分析[J]. 气象,41(11):1305-1314. Fang C, Yu X D, Zhu W J, et al, 2015. Characteristics of the thunderstorm gale process in Hunan and Guangdong on 20 March 2013[J]. Meteor Mon, 41(11):1305-1314(in Chinese).
- 何炳伟,胡振菊,高伟,等,2018. 常德多普勒天气雷达强雹暴三体散射统计分析[J]. 气象,44(3):455-462. He B W, Hu Z J, Gao W, et al, 2018. Statistical analysis about severe hailstorm TBSS in Changde Doppler weather radar[J]. Meteor Mon, 44(3):455-462(in Chinese).
- 胡文东,杨侃,黄小玉,等,2015. 一次阵风锋触发强对流过程雷达资料特征分析[J]. 高原气象,34(5):1452-1464. Hu W D, Yang K, Huang X Y, et al, 2015. Analysis on a severe convection triggered by gust front in Yinchuan with radar data[J]. Plateau Meteor, 34(5):1452-1464(in Chinese).
- 黄小玉,陈媛,顾松山,等,2006. 湖南地区暴雨的分类及回波特征分

- 析[J]. 南京气象学院学报, 29(5): 635-643. Huang X Y, Chen Y, Gu S S, et al, 2006. Classification and radar echo features of rain-storms in Hunan[J]. J Nanjing Institute Meteor, 29(5): 635-643(in Chinese).
- 黄小玉, 陈媛, 熊毅, 等, 2009. 基于漂移克里金融合雷达、雨量计定量估测降水研究[J]. 气象学报, 67(2): 288-297. Huang X Y, Chen Y, Xiong Y, et al, 2009. Quantitative precipitation estimation merging radar and rain gauge data based on Kriging with external drift (KED)[J]. Acta Meteor Sin, 67(2): 288-297(in Chinese).
- 黄小玉, 顾松山, 周雨华, 等, 2005. 岳阳市特大暴雨雷达产品分析及预报服务[J]. 气象, 31(3): 73-76. Huang X Y, Gu S S, Zhou Y H, et al, 2005. Analysis and forecast service of a heavy rainfall with radar products in Yueyang, Hunan Province[J]. Meteor Mon, 31(3): 73-76(in Chinese).
- 黄小玉, 黎祖贤, 李超, 2008. 2008年湖南极端冰冻特大灾害天气成因分析[J]. 气象, 34(11): 47-53. Huang X Y, Li Z X, Li C, 2008. Analysis on extreme freeze catastrophic weather of Hunan in 2008[J]. Meteor Mon, 34(11): 47-53(in Chinese).
- 李柏, 周玉淑, 张沛源, 2007. 新一代天气雷达资料在2003年江淮流域暴雨模拟中的初步应用: 模拟降水和风场的对比[J]. 大气科学, 31(5): 826-838. Li B, Zhou Y S, Zhang P Y, 2007. Application of the China new generation weather radar data to the torrential rain simulation over the Yangtze River-Huaihe River Basin in 2003: contrast of precipitation and wind[J]. Chin J Atmos Sci, 31(5): 826-838(in Chinese).
- 李佰平, 戴建华, 张欣, 等, 2016. 三类强对流天气临近预报的模糊检验试验与对比[J]. 气象, 42(2): 129-143. Li B P, Dai J H, Zhang X, et al, 2016. Fuzzy verification test and comparison of three types of severe convective weather nowcasting[J]. Meteor Mon, 42(2): 129-143(in Chinese).
- 李兆慧, 王东海, 麦雪湖, 等, 2017. 2015年10月4日佛山龙卷过程的观测分析[J]. 气象学报, 75(2): 288-313. Li Z H, Wang D H, Mai X H, et al, 2017. Observations of the tornado occurred at Foshan on 4 October 2015[J]. Acta Meteor Sinica, 75(2): 288-313(in Chinese).
- 刘黎平, 王致君, 1996. 双线偏振雷达探测的云和地物回波的特性及其识别方法[J]. 高原气象, 15(3): 303-310. Liu L P, Wang Z J, 1996. The properties of cloud and clutter echoes measured by dual linear polarization radar and discrimination[J]. Plateau Meteor, 15(3): 303-310(in Chinese).
- 刘黎平, 吴林林, 杨引明, 2007. 基于模糊逻辑的分步式超折射地物回波识别方法的建立和效果分析[J]. 气象学报, 65(2): 252-260. Liu L P, Wu L L, Yang Y M, 2007. Development of fuzzy-logical two-step ground clutter detection algorithm[J]. Acta Meteor Sin, 65(2): 252-260(in Chinese).
- 刘晓阳, 杨洪平, 李建通, 等, 2010. 新一代天气雷达定量降水估测集成系统[J]. 气象, 36(4): 90-95. Liu X Y, Yang H P, Li J T, et al, 2010. CINRAD radar quantitative precipitation estimation group system[J]. Meteor Mon, 36(4): 90-95(in Chinese).
- 毛紫阳, 2006. 基于支持向量机的天气雷达反射率基数据质量控制技术研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学. Mao Z Y, 2006. A technique to quality control CINRAD reflectivity data based on support vector machine[D]. Changsha: College of Science and Technology of National Defense University(in Chinese).
- 毛紫阳, 段崇雯, 成礼智, 等, 2006. 模糊特征在天气雷达反射率基数据质量控制中的应用[J]. 模糊系统与数学, 20(6): 136-142. Mao Z Y, Duan C W, Cheng L Z, et al, 2006. The application of fuzzy feature in technique to quality control CINRAD reflectivity data[J]. Fuzzy Sys Math, 20(6): 136-142(in Chinese).
- 沈杭锋, 张红蕾, 高天赤, 等, 2016. 浙江盛夏一次强对流天气的特征及其成因分析[J]. 气象, 42(9): 1105-1113. Shen H F, Zhang H L, Gao T C, et al, 2016. Study on features and formation of one severe convection process during midsummer in Zhejiang Province[J]. Meteor Mon, 42(9): 1105-1113(in Chinese).
- 魏东, 孙继松, 雷蕾, 等, 2011. 三种探空资料在各类强对流天气中的应用对比分析[J]. 气象, 37(4): 412-422. Wei D, Sun J S, Lei L, et al, 2011. Comparative analysis of three kinds of sounding data in the application of the severe convective weather[J]. Meteor Mon, 37(4): 412-422(in Chinese).
- 吴涛, 张家国, 牛奔, 2017. 一次强降水过程涡旋状 MCS 结构特征及成因初步分析[J]. 气象, 43(5): 540-551. Wu T, Zhang J G, Niu B, 2017. Preliminary analysis of structure characteristics and causes for heavy rain producing vortex shaped MCS[J]. Meteor Mon, 43(5): 540-551(in Chinese).
- 俞小鼎, 郑媛媛, 廖玉芳, 2008. 一次伴随强烈龙卷的强降水超级单体风暴研究[J]. 大气科学, 32(3): 508-522. Yu X D, Zheng Y Y, Liao Y F, 2008. Observational investigation of a tornadic heavy precipitation supercell storm[J]. Chin J Atmos Sci, 32(3): 508-522(in Chinese).
- 张琳娜, 冉令坤, 李娜, 等, 2018. 雷暴大风过程中对流层中低层动量通量和动能输送特征研究[J]. 大气科学, 42(1): 178-191. Zhang L N, Ran L K, Li N, et al, 2018. Analysis of momentum flux and kinetic energy flux transport in the middle and lower troposphere during a thunderstorm event [J]. Chin J Atmos Sci, 42(1): 178-191(in Chinese).
- 张文祥, 李进华, 2007. 雷达同频干扰现象分析研究[J]. 火控雷达技术, 36(2): 50-53. Zhang W X, Li J H, 2007. Analysis and study on radar shared frequency interference phenomenon[J]. Fire Contr Radar Tech, 36(2): 50-53(in Chinese).
- 张亚萍, 程明虎, 夏文梅, 等, 2007. 天气雷达回波运动场估测及在降水临近预报中的应用[J]. 气象学报, 64(5): 631-646. Zhang Y P, Cheng M H, Xia W M, et al, 2007. Estimation of weather radar echo motion field and its application to precipitation nowcasting[J]. Acta Meteor Sin, 64(5): 631-646(in Chinese).
- 赵思雄, 孙建华, 鲁蓉, 等, 2018. “7·20”华北和北京大暴雨过程的分析[J]. 气象, 44(3): 351-360. Zhao S X, Sun J H, Lu R, et al, 2018. Analysis of the 20 July 2016 unusual heavy rainfall in

- North China and Beijing[J]. Meteor Mon, 44(3): 351-360 (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).
- 周海光, 王玉彬, 2005. 2003 年 6 月 30 日梅雨锋大暴雨 β 和 γ 中尺度结构的双多普勒雷达反演[J]. 气象学报, 63(3): 301-312. Zhou H G, Wang Y B, 2005. Structure of meso β And γ scale on Meiyu in Huaihe River Basin on 30 June, 2003 by dual Doppler radar[J]. Acta Meteor Sin, 63(3): 301-312 (in Chinese).
- 庄薇, 刘黎平, 余燕群, 等, 2012. 雷达地物回波模糊逻辑识别法的改进及效果检验[J]. 气象学报, 70(3): 576-584. Zhuang W, Liu L P, Yu Y Q, et al, 2012. Improvement of the fuzzy logic technique for identifying ground clutter and its verification [J]. Acta Meteor Sin, 70(3): 576-584 (in Chinese).
- Fulton R A, Breidenbach J P, Seo D J, et al, 1998. The WSR-88D rainfall algorithm[J]. Wea Forecasting, 13(2): 377-395.
- Kessinger C, Ellis S, Van Andel J, 2003a. The radar echo classifier: a fuzzy logic algorithm for the WSR-88D[C]// Proceedings of the 3rd Conference on Artificial Intelligence Applications to the Environmental Science. Boston: American Meteorological Society.
- Kessinger C, Ellis S, Van Andel J, et al, 2003b. The AP clutter mitigation scheme for the WSR-88D[C]// Proceedings of the 31st Conference on Radar Meteorology. Seattle: American Meteorological Society: 526-529.
- Lakshmanan V, Fritz A, Smith T, et al, 2007. An automated technique to quality control radar reflectivity data[J]. J Appl Meteor Climatol, 46(3): 288-305.
- Pamment J A, Conway B J, 1998. Objective identification of echoes due to anomalous propagation in weather radar data[J]. J Atmos Oceanic Technol, 15(1): 98-113.
- Steiner M, Smith J A, 2002. Use of three-dimensional reflectivity structure for automated detection and removal of nonprecipitating echoes in radar data[J]. J Atmos Oceanic Technol, 19(5): 673-686.
- Zhang J, Wang S, Clarke B, 2004. WSR-88D reflectivity quality control using horizontal and vertical reflectivity structure[C]// Proceedings of the 11th Conference on Aviation, Range, and Aerospace Meteorology. Hyannis: AMS.