

文章编号: 2096-1618(2017)05-0487-05

一种改进的多普勒天气雷达下击暴流识别算法

杜牧云¹, 余蓉², 吴涛³, 唐巧珍⁴

(1. 中国气象局武汉暴雨研究所暴雨监测预警湖北省重点实验室, 湖北 武汉 430205; 2. 湖北省防雷中心, 湖北 武汉 430074; 3. 武汉中心气象台, 湖北 武汉 430074; 4. 宜昌市气象局, 湖北 宜昌 443000)

摘要:在下击暴流存在的显著速度场辐散特征的基础上,对旧的利用图像处理技术进行下击暴流识别的算法进行改进,设计一种更加高效的下击暴流识别算法,通过对比发现,新算法较之老算法具有更快的运算速度和更好的识别效果,更能满足未来的业务化需求。

关键词:信号与信息处理;雷达应用;多普勒天气雷达;下击暴流;识别算法

中图分类号: TN958

文献标志码: A

doi: 10.16836/j.cnki.jcuit.2017.05.004

0 引言

下击暴流为雷暴天气中云中下沉气流猛烈冲击地面并扩散而引起的近地面短时强风的灾害现象。下击暴流作为一种灾害性大风,其危害与陆地龙卷相似,即当一股较冷的气流以飞快的速度穿过雷雨中心云层并下落到地面时,就会水平辐散开来,在地面引起剧烈大风。下击暴流的这种强下沉气流和下击暴流触地后形成的环状涡旋将引起两类不同的危害。其中,强下沉气流对飞机的安全起降影响巨大,使飞机在短时间内失去空速,从而造成飞机的意外失事。“下击暴流”的概念最早是由 Fujita^[1]提出,他将能在近地面产生猛烈辐散风,且风速大于17.9 m/s的强烈下沉气流称为下击暴流。1975-1977年美国有4次飞行事故与下击暴流有关。除此之外,环状涡旋常导致翻船,1984年7月7日在美国田纳西河的一艘轮船的失事就是因为此。2015年6月1日发生在长江湖北监利段的“东方之星”沉船事件,经调查组调查认定,正是由突发的下击暴流带来的强风导致这起震惊中外的灾害性事件,此次事故共造成442人死亡。下击暴流中尺度较小的微下击暴流(水平尺度<4 km)发生的频度很高^[2-3],如在雷雨天气时微下击暴流发生的概率可达60%~70%,因此对于雷暴多发地区,下击暴流是一种常见的天气现象。下击暴流在世界范围内已引起了大量工程结构物的破坏,尤其是输电线塔结构的倒塌,作为大型生命线工程,输电线结构的破坏将导致供电系统的瘫痪,甚至引发火灾等严重次生灾害,不仅造成重大的经济损失,而且其安全问题直接影响国家生产建设及人民生活秩序。

下击暴流因其具有尺度小,生命周期短,高移动性等特征,一直以来都是短时临近预报预警的难题,而多普勒天气雷达资料具有很高的时间分辨率和空间分辨率,因此也成为监测和预警下击暴流最有效的手段,这也是其他常规资料无可比拟的。目前,中国许多气象学者对下击暴流识别方面进行了研究,并取得了一定的成果。赵东彦等^[4]对目前国内外利用多普勒天气雷达进行下击暴流研究的情况做了总结和阐述;陶岚等^[5]通过反射率因子核心下降和低层速度场强辐散的雷达回波特征,开发一种自动识别下击暴流的算法,该算法能很好地识别静止型和移动型的低层辐散特征明显的下击暴流。杜牧云等^[6]利用图像处理技术对下击暴流进行图像识别,取得了较好的识别效果。在已有研究的基础上,提出了一种改进的下击暴流识别算法,该算法拥有更加快捷的运算速度和更加显著的识别效果。

1 下击暴流特征分析

下击暴流在强度回波图上的显著特征是出现“弓”形回波。有时中空微下击暴流可能出现在一条明显的回波带前方,这条明显的回波带强度约为10 dBZ,称为阵风锋。下击暴流的速度场特征为径向速度辐散,其特点是沿雷达扫描径线方向出现一对速度值大致相同而符号相反的径向速度,而且是靠近雷达一侧为负速度极值中心(即向雷达径向速度),远离雷达一侧为正速度极值中心(即远离雷达的径向速度),两个径向速度极值中心的距离长短大致可以判断下击暴流范围大小与强度大小。微下击暴流两个径向速度极值中心的距离越短,极值差越大,下击暴流越强。其中,径向速度辐散特征在下击暴流从中空下击触地的演变过程中逐渐明显。

收稿日期: 2017-05-08

基金项目: 国家气象行业专项资助项目(GYHY201306008); 湖北省气象局科技发展基金资助项目(2015Q04)

下击暴流在多普勒雷达速度图上则常表现为径向上的速度入流和出流成对出现,即“牛眼”形式的回波,这一现象最早由 Fujita 和 Wilson 于 1978 年 5 月 29 日观测到^[7]。图 1 为 Hjelmfelt^[8]通过试验绘制出的一个典型下击暴流的风速剖面图,从图中可以清晰地分辨下击暴流在近地面形成的气流辐散场。Potts^[9]经过大量研究发现,地面辐散就是识别下击暴流最可靠的特征。因此,下击暴流的速度场特征正是进行自动识别的基础和关键。但在实际应用过程中,这种特征的探测会受复杂环境风场的影响而存在一定的不确定性,主要表现为速度场的辐散特征并不明显,形态也不对称。

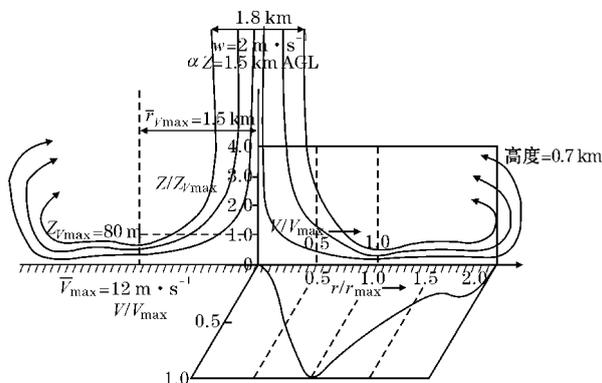


图1 典型下击暴流的速度剖面

2 下击暴流图像识别算法介绍

2.1 算法流程图

提出的下击暴流识别算法同样以下击暴流地面辐散的显著速度场特征为基础,且主要是针对杜牧云等^[6]提出的下击暴流图像识别算法进行了改进,在运算速度和识别效果方面都有较大提升。图 2 即为该改进算法的基本流程图。

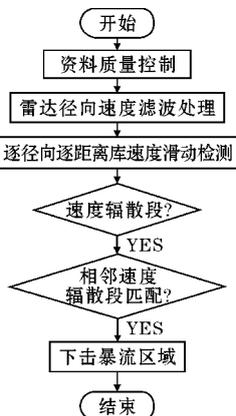


图2 下击暴流识别算法流程图

2.2 算法介绍

杜牧云等^[6]提出的下击暴流图像识别算法利用的图像识别技术(后简称“旧算法”),将雷达低层径向速度图像进行正负速度二值化处理,并识别有效速度连通区,最后通过设定的阈值将正负速度连通区进行匹配,从而得到下击暴流识别区。该方法能较好地识别明显的下击暴流区域,但对于受环境风影响导致速度对特征不明显的个例,需要进行二次匹配识别,且在连通区识别中的迭代运算相对更加耗时。提出的改进算法(后简称“新算法”)同样以下击暴流的低层速度场辐散特征为基础,但直接从径向速度的分布特征出发,得到下击暴流识别区。其基本步骤如下:

第一步,为了不使雷达资料质量受各种外界干扰因素的影响而变差,从而直接影响算法的识别效果,在此需要先对雷达资料进行孤立杂波剔除、地物回波滤除、速度退模糊等质量控制处理。其中径向速度的退模糊尤为关键,这直接关系到识别算法的识别效果,如果雷达资料存在速度模糊,那么极易导致下击暴流的误识别。

第二步,径向速度资料滤波处理,减少数据异常波动对后期识别的影响。常用的滤波方法包括:滑动平均、中值滤波、小波滤波等。

第三步,对雷达低层径向速度进行逐径向、逐距离库的滑动检测,通过设置的速度阈值找出径向速度辐散段,即负速度距离库小于正速度距离库(负速度距离雷达更近)的径向速度段。记录正负速度差值大于阈值的径向速度辐散段信息,其中包括径向方位角、正负速度距离库、最大正负速度值及其速度差值等。

第四步,对识别出的各径向速度辐散段做进一步筛选。根据下击暴流地面辐散这一显著速度场特征,沿某一固定方向(如顺时针方向)挑选出位置相邻的径向速度段,形成径向速度区,并从中找出正速度中心大于负速度中心的径向速度辐散区。而参考下击暴流的定义可知,下击暴流的正速度与负速度之间的速度差值 ΔV 较大;且正速度中心与负速度中心之间的距离间隔 ΔD 较小;若正负速度中心不在同一径向方向时,其之间的夹角 ΔA 同样较小,因此,将设置上述几项约束阈值对速度辐散区做进一步的筛选,从而得到下击暴流识别区。

2.3 算法阈值

根据 Fujita^[1] 和 Wilson^[10] 分别对下击暴流的定义,最终将速度差值设定为 $\Delta V = 35 \text{ m/s}$ 。其中,根据下击暴流辐散出流的高度和低仰角的要求,该算法只探测 100 km 范围内的下击暴流。表 1 为下击暴流图

像识别算法的参数设置。

表1 改进下击暴流识别算法相关的阈值参数

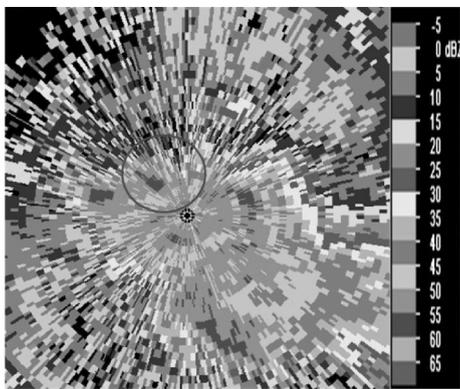
反射率因子/dBZ	间距/km	速度/(m/s)	速度差/(m/s)	方位夹角/°	最小相邻径向数
20	5	10	35	10	3

3 算法检验

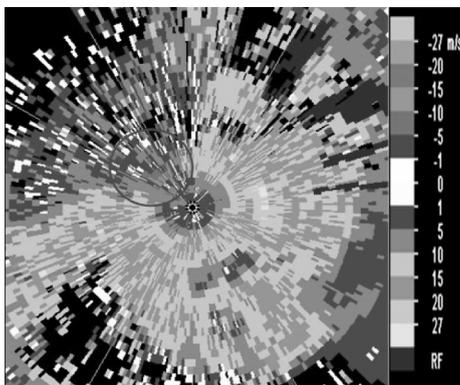
利用2006–2013年收集的多次下击暴流过程的雷达资料对改进的下击暴流识别算法的实际效果进行检验。在此仅选取其中两次具有代表性的过程做简要分析,并针对之前的下击暴流图像识别算法做对比分析。其中,雷达都是S波段多普勒天气雷达(CINRAD-SA),雷达反射率因子和径向速度的距离库长分别为1000 m和250 m。

3.1 个例分析

2006年6月10日15时30分至17时(北京时,下同),一场伴随着9级雷雨大风的强降水袭击南昌。图5为当天16时50分的雷达0.5°仰角下反射率因子和径向速度的PPI图(距离圈间隔为50 km,每个径向射线间隔30°,雷达位于图的正中间),图中圆圈标示区域即为识别的下击暴流区域(下同)。



(a) Z_H

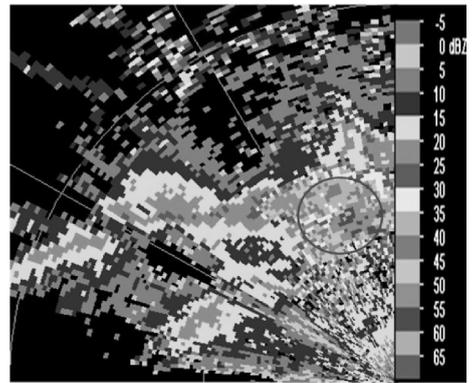


(b) V_r

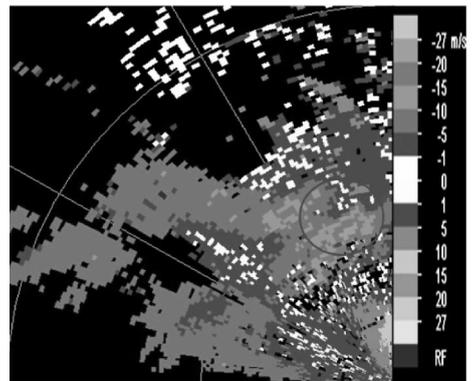
图3 2006年6月10日16时50分0.5°仰角雷达PPI图

从图3可以清楚地看到,圆圈标示区域呈现出明显的正负速度对特征,即近地面辐散流场特征,且正负速度对基本在同一径向方向上,结构非常对称,新算法通过径向速度对的检索和匹配成功地识别该下击暴流区域,识别效果令人满意。

2009年6月29日下午,由东北冷涡甩出的冷空气与青岛市上空的暖空气相互交汇,引发青岛市出现强对流天气,从下午2时左右开始,青岛市自北向南依次出现了降水过程,并伴有剧烈阵风。不少地方还出现了冰雹,下午6时许,暴雨突袭市区,局部地区也下起了冰雹,这次强对流天气过程给多个区域造成了严重的经济损失。图4即为2009年6月29日17时17分雷达0.5°仰角下反射率因子和径向速度的PPI图(雷达位于图的右下角)。



(a) Z_H



(b) V_r

图4 2009年6月29日17时17分0.5°仰角雷达PPI图

由图4发现,圆圈标示区域虽也呈现出正负速度对的特征,但是受环境风场的影响,负速度的速度模值远大于正速度的速度模值,且正负速度对也不在同一径向上,而是存在一定的夹角。正是存在这种速度“不匹配”的情况,旧算法在第一次速度匹配时未能识别出该正速度区,需要进行二次匹配。而新算法依旧能通过检测和匹配径向速度辐散段信息成功地识别下击

暴雨区域,且运算耗时更短,识别效果明显优于旧算法。用该新算法对其他过程资料进行分析识别也可以得到较满意的识别效果(图略)。

3.2 对比分析

选择2006–2013年发生在湖北、江西、山东的7次下击暴流过程共计211个时次的雷达数据资料作为测试样本对两种算法的识别效果进行对比分析,并通过计算命中率、虚警率和临界成功指数^[11]对新旧两种下击暴流识别算法的识别效果进行量化对比,对比结果详见表2。其中:

$$\text{命中率 } POD = \frac{n_1}{N} \quad (1)$$

$$\text{虚警率 } FAR = \frac{n_2}{n} \quad (2)$$

$$\text{临界成功指数 } CSI = \frac{n_1}{N + n_2} \quad (3)$$

式中, N 为雷达探测到下击暴流特征的样本数量, $N=32$; n_1 为识别下击暴流的样本数, n_2 为识别有下击暴流实际却无下击暴流的样本数, n 为识别有下击暴流的样本数。

表2 两种下击暴流识别算法的识别效果对比

	样本数	正确数	空报数	漏报数	POD/%	FAR/%	CSI/%	平均耗时/ms
旧算法	211	26	25	6	81.3	14.0	45.6	75.41
新算法	211	29	10	3	90.6	5.6	69.1	65.38

由表2可见,新、旧两种算法都有不错的识别成功率,成功识别下击暴流的比例都超过了80%,但相较之下,新算法的命中率POD达到了90.6%,仍高于旧算法;与此同时,新算法还有效降低了空报率,其虚警率FAR从14.0%降低到了5.6%,临界成功率CSI则由45.6%提高到69.1%;除此之外,新算法的运算效率更高,其平均耗时仅为旧算法的86.7%,且从实际运算情况来看,对于存在大面积回波的个例,新算法在运算速度方面的提升更加明显。综上所述,新算法比旧算法在识别效果和运算速度方面都有所提高,更能满足未来的业务化运行需求。

4 结束语

以下击暴流的地面辐散流场特征为基础,直接从雷达径向速度的分布特征出发,提出了一种改进的多普勒天气雷达下击暴流识别算法。由多次下击暴流过程实测资料的检验结果可知,新算法相较于旧算法具有更快的运算速度和更好的识别效果。由于目前算法测试多以CINRAD SA雷达资料为主,且实际测试的雷达数据量还较少,还有待做进一步的批量试验,以检验该算法的稳定性,且继续优化算法代码以进一步提高运算速度,以期能投入到实际的业务运行中。

参考文献:

[1] Fujita T T. Manual of downburst identification for

Project NIMROD [Z]. University of Chicago, 1978:104–112.

[2] Fujita T T, Tornadoes and downburst in the context of generalized planetary scales [J]. J Atmos Sci, 1981, 38:1511–1534.

[3] Fujita T T, The Downburst: Microburst and Macroburst. University of Chicago, 1985:122–130.

[4] 赵东彦,白洁.多普勒天气雷达识别和预警下击暴流[J].气象科技,2007,35(5):631–636.

[5] 陶岚,戴建华.下击暴流自动识别算法研究[J].高原气象,2011,30(3):784–797.

[6] 杜牧云,肖艳娇,吴涛.多普勒天气雷下击暴流图像识别[J].气象科技,2015,43(3):368–372.

[7] Fujita T T. Objectives, operation, and results of Project NIMROD [C]. 11th Conference on Severe Local Storms, AMS, 1979:259–266.

[8] Hjelmfelt M R. Structure and life cycle of microburst outflows observed in Colorado [J]. Journal of Applied Meteorology, 1988, 27:900–927.

[9] Potts R. Microburst precursors observed with Doppler radar [C]. 24th Conference on Radar Meteorology, AMS, 1989:158–162.

[10] Wilson J W, Roberts R D, Kessinger C, et al. Microburst wind structure and evaluation of Doppler radar for airport wind shear detection [J]. Journal of Applied Meteorology and Climatology, 1984, 23:898–915.

- [11] 余蓉,杜牧云,杜九三,等. 基于多对流参数的
武汉地区雷电活动预报方法研究[J]. 气象科
技,2016,44(2):269-274.

An Improved Method of Downburst Recognition based on WSR-88D Doppler Weather Radar

DU Mu-yun¹, YU Rong², WU Tao³, TANG Qiao-zhen⁴

(1. Hubei Key Laboratory for Heavy Rain Monitoring and Warning Research, Institute of Heavy Rain, China Meteorological Administration, Wuhan 430205, China; 2. Hubei Lightning Protection Center, Wuhan 430074, China; 3. Wuhan Central Meteorological Observatory, Wuhan 430074, China; 4. Yichang Meteorological Bureau, Yichang 443000, China)

Abstract: According to the significant low-level divergence characteristic in the flow field of a downburst, an more efficient method of downburst recognition using Doppler radar data is developed by improving the old image recognition algorithm. Through the comparison, it is found that the new algorithm has faster arithmetic speed and better identification effect in contrast to the old algorithm. Moreover, the new algorithm is more suitable for the future business requirements.

Keywords: signal and information processing; radar application; doppler weather radar; downburst; recognition algorithm