

# 新一代天气雷达冰雹探测算法 及在业务中的应用

吴林林

(南京信息工程大学, 210044)

**提 要:** 利用新一代多普勒雷达资料, 基于美国 NEXRAD 的新一代冰雹探测算法的主要思路, 编写了冰雹算法的程序, 利用该程序对 16 次观测到的冰雹个例进行了分析。结果表明冰雹探测算法对冰雹有比较好的识别能力, 并且, 针对误报率比较高的现象提出了解决的方法。

**关键词:** 风暴定位 冰雹算法 冰雹大小

## Description and Application of CINRAD Hail Detection Algorithm

Wu Linlin

(Nanjing University of Information Science & Technology, 210044)

**Abstract:** Based on the data of CINRAD and WSR-88D hail detection algorithm, the CINRAD hail detection algorithm codes are developed. With the observation data of 16 hailstorm cases, the algorithm is tested. The result shows that the algorithm works well in hailstorm detection and warnings. A method to reduce the high FAR is also discussed.

**Key Words:** storm identification hail detection algorithm hail size

---

资助项目: 中国气象局新技术推广项目“以大气监测自动化系统为基础的强对流天气预警和短时预报应用技术研究”  
和安徽省气象局“淮河流域强对流天气监测预警研究”项目资助

收稿日期: 2005年6月21日; 修定稿日期: 2005年11月7日

## 引言

近年来,随着多普勒雷达建设进度的加快,用雷达来探测冰雹已经成为比较重要的一种手段<sup>[1]</sup>。国外, Petrocchi 最早提出了用一系列预报因子的权重来探测冰雹,给出了冰雹发生的三种可能性 (POSITIVE/PROBABLE/NONE)。该算法没有考虑环境温度,没有区分普通冰雹和大冰雹。效果不是很好。20 世纪 90 年代, Johnson et. al 提出了利用风暴定位 (SCIT) 来识别风暴单体,并在此基础上提出了冰雹探测的新算法<sup>[2]</sup>。该算法综合考虑了冰雹产生时风暴单体的反射率值,温度及高度的关系。得出了冰雹发生的三种产品 (POH (冰雹概率) / POSH (强冰雹概率) / MEHS (冰雹大小))。国内,杨引明对上海引进的美国 NEXTRAD 的这套算法在业务上的应用进行了评价<sup>[3]</sup>。METSTAR 公司生产的 CINRAD-SA, SB 都采用了基于美国 NEXTRAD 的冰雹探测算法。但由于雷达软件版权的问题以及需要专门的显示软件,使得用户对产品的使用受到了一定的限制。本文作者详细分析了冰雹的算法,重新对算法进行了实现。通过一些有观测记录的冰雹实例对算法进行检验,并和 METSTAR 公司提供的新旧版本冰雹算法进行了比较。针对冰雹探测误报率过高的现象进行了算法改进尝试。

### 1 冰雹探测算法的主要步骤

冰雹探测主要采用反射率因子的资料。首先使用风暴中心定位和追踪 (SCIT) 算法,定位三维风暴。然后利用垂直方向上风暴强度、高度和  $0^{\circ}\text{C}/-20^{\circ}\text{C}$  层的高度的关系,得出冰雹产生的概率以及强冰雹产生的概率,并对冰雹的大小进行了估算。冰雹探测算法输出三个产品:任何尺寸冰雹概率

(POH)、强冰雹概率 (POSH)、冰雹尺寸大小 (MEHS)。

#### 1.1 一维风暴段 (SEGMENT) 的形成

定位三维风暴单体是从一维风暴段开始的。一个风暴段定义为一段连续的沿着一个径向的一系列距离库,他们的反射率因子超过一个规定的阈值 (记为 REFLECTIVITY)。当处理过程沿一个雷达径向首次遇到一个大于规定的阈值的反射率因子时,随后的超过阈值的距离库被编为一组,一直到遇到一个小于阈值的距离库。如果该距离库的反射率因子值与阈值的差值小于  $5\text{dBz}$  (记为 DROPOUT REF DIFF, 是可调参数),或这样的距离库小于 2 个 (记为 DROPOUT COUNT, 是一个可调参数),则过程继续。如果算法遇到的距离库的反射率因子值小于上述反射率因子阈值 REFLECTIVITY  $5\text{dBz}$  以上或小于 REFLECTIVITY 的距离库超过或等于两个,则过程终止,一个风暴段就此产生。如果风暴段的径向长度超过 SEGMENT LENGTH (一个可调参数,缺省值为  $1.9\text{km}$ ),它将被储存下来。

为了取得更好的风暴定位效果,一般用多个反射率阈值 (REFLECTIVITY1-7 (60, 55, 50, 45, 40, 35, 30)) 来生成不同的段。

#### 1.2 二维风暴分量 (COMPONENT) 组合

对每层的反射率数据取得每个径向的段以后,就可以对相邻径向的段进行合并,得到不同的风暴分量 (COMPONENT)。一个二维风暴分量必须满足下面的条件: 1) 相邻风暴段的重叠距离必须大于风暴重叠距离阈值 (SEGMENT OVERLAP RANGE =  $1.95\text{km}$ ); 2) 相邻风暴段的方位角的间距必须小于方位角的间距阈值 (AZIMUTHAL SEPERATION =  $1.5^{\circ}$ ); 3) 组成风暴分量的段的个数必须大于段个数阈值 (SEGMENT LENGTH = 2); 4) 组成风暴

分量的面积满足面积阈值 (AREA = 10km)。对于所有反射率阈值构成的二维分量, 计算它们的位置。如果反射率阈值大的风暴分量中心落在反射率阈值小的风暴分量中心, 则把反射率阈值小的风暴分量剔除。最后所有阈值的二维风暴分量按照风暴分量的质量从大到小排序。

### 1.3 三维立体风暴 (STCRM) 的生成

每一层的二维风暴分量 (COMPONENT) 都搜索完成以后, 从最低层开始对相邻仰角的二维风暴分量进行垂直组合。这里引入了三个搜索半径阈值 (SEARCH RADIUS = 5.0, 7.5, 10km)。步骤如下: 首先, 如果相邻层次的两个风暴分量的中心水平距离在搜索半径阈值以内, 则认为它们相关 (一个风暴分量可能和上一层的多个风暴分量相关, 但由于二维风暴分量是按照风暴的质量排序的, 所以, 最大的质量的风暴分量首先相关), 一个立体风暴被创建。其次, 如果当前的搜索半径没有找到相关的二维风暴分量, 则扩大搜索半径, 直到找到为止或已经达到最大的搜索半径。有时候, 一个风暴可能被识别成靠得很近的几个小风暴。如果两个风暴满足如下几个条件, 则它们被合并成一个风暴: 1) 两个风暴没有同一个仰角的二维风暴分量; 2) 两个风暴的中心距离不大于风水平合并阈值 (HORIZONTAL MERGE = 10.0km); 3) 两个风暴的其中一个风暴顶和另一个风暴底的垂直距离和仰角差值满足规定的垂直距离阈值 (HEIGHT MERGE = 4.0km) 和仰角差阈值 (ELEVATION MERGE = 3.0°)。最后, 为了防止风暴过于拥挤, 如果两个风暴在水平方向上靠得很近, 并且风暴的高度差满足一定的阈值, 则液态含水量比较小的风暴被删除。

### 1.4 任何尺寸冰雹概率 (POH) 的计算

得到风暴的定位信息以后, 根据风暴

45dBz 反射率的高度和 0°C 层的高度差经验关系, 得出 POH, 经验关系如图 1。

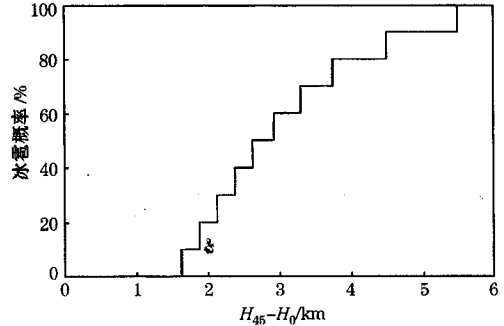


图 1 45dBz 反射率高度和 0°C 层高度差与冰雹概率 (POH) 的关系

### 1.5 强冰雹概率 (POSH) 的计算

强冰雹主要是指冰雹尺度大于 20mm 的冰雹。考虑了温度和反射率因子大小的因素, 首先引入了强冰雹指数 (SHI) 的概念, 定义为

$$SHI = 0.1 \int_{H_0}^{H_T} W_T E dH$$

其中 SHI 为大冰雹指数,  $W_T$  为权重函数,  $E$  为冰雹动能,  $H_0$  为溶化层高度,  $H_T$  为风暴单体顶高。E 的表达式为:

$$E = 5 \times 10^{-6} \times 10^{0.084z} W(Z)$$

权重函数  $W(Z)$  被用来定义雨和冰雹反射率因子的转换区, 它的值介于 0~1 之间。权重函数  $W_T$  为大气温度层结的权重函数, 它的值介于 0~1 之间。最后得到的 SHI 的单位是  $\text{J} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

在得到 SHI 以后, 需要确定一个报警阈值 WT (WARNING THRESHOLD) 来得到强冰雹的概率。这里采用 WSR-88D 的经验公式, WT 的单位为  $\text{J} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

最后, 根据 WSR-88D 的经验公式, 形成 POSH 的公式为:

$$POSH = 29 \ln(SHI/WT) + 50$$

POSH 就是强冰雹概率。它的值介于 0~100% 之间。当  $WT = SHI$  时, 概率为

50%。

### 1.6 冰雹尺寸 (MEHS) 的计算

在得到冰雹指数以后, 根据如下的经验公式:

$$MEHS = 2.54(SHI)^{0.5}$$

可以得到冰雹的大小, MEHS 的单位为毫米。

## 2 应用分析

根据上述算法, 采用 VISUAL C++ 6.0 编程语言, 设计了一套基于雷达基数据的软件, 用它来实时对冰雹进行定位和识别。该软件不仅提供了图形产品, 还提供了冰雹各层的风暴信息结构。

考虑到冰雹的实况信息收集的不一定很完全, 只采用了 16 个有冰雹大小实况报告的个例进行了分析。首先, 和 METSTAR 公司 10.8 版本冰雹探测结果比较如表 1。

表 1 和 METSTAR10.8 版本探测结果大小和误差分析

时间	绝对误差分析/%		探测结果/mm		观测结果
	程序	METSTAR	程序	METSTAR	
20020527.20.10	20	40	24	18	30
20020527.18.51	27	9	14	12	11
20020604.15.26	18	—	11	未发现	9
20020718.16.48	250	50	28	12	8
20030606.16.45	13	25	35	30	40
20030619.14.30	27	20	11	12	15
20030620.16.45	157	—	18	未发现	7
20030824.15.46	8	—	12	不能生成	13
20040406.16.53	36	8	15	12	11
20040521.23.24	31	—	9	未发现	13
20040707.13.17	12	—	9	未发现	8
20040707.15.24	75	0	21	12	12
20040708.17.30	100	200	8	12	4
20040708.20.31	70	72	85	86	50
20050420.15.07	60	20	16	12	10
20050420.14.49	8	0	13	12	12

从表 1 可以看出:

(1) 两者的平均误差分别为 57% (本工程序) 和 40% (METSTAR), 说明二者的探测能力相当。

(2) METSTAR 公司的软件探测距离为 230km 以内, 造成有些冰雹未能探测出来。

其次, 和 METSTAR7.0 版本探测结果进行比较, 由于 7.0 版本输出没有冰雹大小, 采用评分方法比较。定义 POD/FAR/CSI (探测概率/误报率/临界成功指数) 如下:

表 2 POD、FAR、CSI 的定义

	冰雹探测事件	
	探测到冰雹	没有探测到冰雹
发生冰雹	X	Y
没有发生冰雹	Z	W

其中:

$$POD = \frac{X}{X+Y}, FAR = \frac{Z}{X+Z};$$

$$CSI = \frac{X}{X+Y+Z}$$

得出的评分结果如表 3。

表 3 和 METSTAR7.0 版本探测结果评分比较

时间	POD/FAR/CSI	POD/FAR/CSI
2002/05/27	100/92/8	0/100/0
2002/06/04	100/66/33	0/100/0
2002/07/18	100/93/7	100/66/34
2003/06/06	100/91/10	100/83/17
2003/06/09	100/66/33	0/100/0
2003/06/20	100/92/8	0/100/0
2003/08/24	100/97/3	不能生成
2004/04/06	100/91/9	0/100/0
2004/05/21	100/91/9	0/100/0
2004/07/07	100/94/6	0/100/0
2004/07/24	100/96/4	0/100/0
2004/07/08	100/92/8	50/75/20
2005/04/20	100/66/33	0/100/0

结果表明, 新的算法比旧的算法探测效果有量级上的提高。

在冰雹算法中,  $0^{\circ}\text{C}/-20^{\circ}\text{C}$  的高度是一个比较重要的参数。这个高度有时会变化很大。在研究中我们发现, 输入当天准确的  $0^{\circ}\text{C}/-20^{\circ}\text{C}$  高度, 对冰雹大小的探测有比较好的效果, 如表 4 所示。

表 4  $0^{\circ}\text{C}/-20^{\circ}\text{C}$  高度改变效果

日期	默认高度计算结果/mm	探测结果/mm	正确高度计算结果/mm
20020527. 20. 10	25	30	24
20020718. 16. 48	33	8	28
20030606. 16. 45	33	40	35
20030619. 14. 30	10	15	11
20030620. 16. 45	27	7	18
20030824. 15. 46	15	13	12
20040406. 16. 53	15	11	15
20040521. 23. 24	9	13	11
20040707. 15. 24	6	8	7
20040708. 20. 31	84	50	84

### 3 改进

从表 3 可以看出, 冰雹探测结果误报率过高。我们尝试提高冰雹探测的反射率阈值, 将原来的 45dBz 提高到 50dBz。使得误报率有一些降低。总体效果 (CSI) 有一些改善, 如表 5。

结论: 除了两个个例的 CSI 有所下降 (因为有两个冰雹未能探测出来), 其它个例的 CSI 都有一定程度的提高, 误报率降低比较明显。

### 4 小结

(1) 从探测效果比较, 程序对冰雹探测的效果和 METSTAR10.8 版相当, 比 METSTAR7.1 版探测效果好。

(2) 输入当天实际的  $0^{\circ}\text{C}/-20^{\circ}\text{C}$  高度值有利于冰雹探测的效果。

表 5 提高冰雹探测反射率阈值评分效果

日期	提高阈值前			提高阈值后		
	POD	FAR	CSI	POD	FAR	CSI
20020527	100	92	8	100	87	13
20020624	100	66	33	0	100	0
20020718	100	93	7	100	92	8
20030606	100	91	9	100	89	11
20030609	100	66	34	100	66	34
20030620	100	92	8	100	86	14
20030824	100	97	3	100	96	4
20040406	100	91	9	100	86	14
20040521	100	91	9	100	88	12
20040707	100	95	5	100	94	6
20040708	100	92	8	100	90	10
20050420	100	66	33	50	75	20

(3) 适当提高冰雹探测的临界反射率值, 对冰雹的探测效果有一些改善。

由于缺少地面实际冰雹观测数据, 估计冰雹概率 *POH* 的性能比较困难。并且, 强冰雹概率和冰雹大小的公式是参照美国 WSR-88D 的经验公式。今后, 随着冰雹探测个例的增加, 需要进一步研究适合于本地情况的相关经验公式及参数, 以便提高冰雹探测的效果。

### 参考文献

- 俞小鼎. 新一代天气雷达对局地强风暴预警的改善. 气象, 2005, 30 (8): 3~7.
- Johnson, J. T., P. L. MacKeen, A. Witt, et al. The storm cell identification and tracking algorithm: an enhanced WSR-88D algorithm. Wea. Forecasting, 1998, 13: 263~276.
- 杨引明. WSR-88D 多普勒天气雷达冰雹探测算法及评价. 气象, 2002, 25 (5): 39~43.