

用矩不变量法估算天气雷达回波区流场^①

胡明宝

汤达章

(空军气象学院, 南京 211101) (南京气象学院)

提 要

介绍一种用矩不变量跟踪天气雷达回波, 以估测回波区域内部流场的方法。研究工作表明: 根据回波强度场计算得到的矩不变量能很好地代表回波模块的特征, 可用来估算雷达回波区流场。

关键词: 矩不变量 雷达回波 流场

引 言

用常规数字化天气雷达估算回波区内部流场, 一方面可大致了解降水区内部风场结构, 加强对中小尺度天气系统的监测和预报; 另一方面可了解云的形成及发展, 为人工影响天气、提高作业水平和进行效果检验等提供依据。故自数字化雷达问世以来, 该项工作得到较快发展。80年代初, Rinchart^[1]应用相关系数法在估算回波区流场, 有一定效果。我们通过研究发现, 用矩不变量法进行模块追踪的效果优于相关系数法。下面简要介绍我们的研究成果及矩不变量法的基本思想。

1 矩不变量

对于直角坐标形式的数字化雷达回波强度场 $Z(i, j)$, 矩不变量所用到的计算公式如下:

$$m_{pq} = \sum_i^I \sum_j^J i^p j^q z(i, j) \quad (1)$$

$$\bar{i} = m_{10}/m_{00}, \quad \bar{j} = m_{01}/m_{00} \quad (2)$$

$$\mu_{pq} = \sum_i^I \sum_j^J (i - \bar{i})^p (j - \bar{j})^q z(i, j) \quad (3)$$

$$\eta_{pq} = \mu_{pq}/\mu_{00}^r, \quad r = (p+q)/2 \quad (4)$$

在上述各式中, $p, q = 0, 1, 2, \dots; I, J$ 为回波块的横向和纵向尺度; i, j 为回波场的网

格点坐标; m_{pq} 为该回波场的 $(p+q)$ 阶矩。显然 m_{00} 为回波块内各点强度之和, (i, j) 为回波块的强度重心; μ_{pq} 为 $(p+q)$ 阶中心矩, 显然 $\mu_{00} = m_{00}$; 而 μ_{02} 和 μ_{20} 分别反映回波块在垂直和水平方向的惯性矩; 若 $\mu_{20} > \mu_{02}$, 这块回波可能是在水平方向拉长的; 而 μ_{30} 和 μ_{03} 可反映回波块的对称性, 完全对称时值为零。 η_{pq} 为 $(p+q)$ 阶标准化中心矩, r 即为标准化因子。由此便可计算出一组矩不变量:

$$\varphi_1 = \eta_{20} + \eta_{02} \quad (5)$$

$$\varphi_3 = (\eta_{30} - 3\eta_{12})^2 + (3\eta_{21} - \eta_{03})^2 \quad (6)$$

$$\varphi_4 = (\eta_{30} + \eta_{12})^2 + (\eta_{21} + \eta_{03})^2 \quad (7)$$

$$\varphi_6 = (\eta_{20} - \eta_{02}) [(\eta_{30} + \eta_{12})^2 - (\eta_{21} - \eta_{03})^2] + 4\eta_{11}(\eta_{30} + \eta_{12})(\eta_{21} + \eta_{03}) \quad (8)$$

这一组值反映了回波模块的强度值相对于重心是如何分布的。当图像发生平移、旋转和大小按比例变化时, 该组值是守恒的^[2]。

2 流场估算方法

用数字化天气雷达资料估算回波区内部流场的基本做法是: 用数字化天气雷达收集两幅 PPI(同仰角)或 CAPPI(同高度)回波资料, 以相同方式把回波区分割成若干个小回波模块, 再分别计算所有小模块的特征量。若

① 受国家自然科学基金项目 49275237 资助

第一时刻上某模块的特征量与第二时刻 A 模块的特征量差别最小,则认为第一时刻上该模块到了第二时刻移到了 A 模块所在位置。根据模块的位移和时间间隔,即可得到该追踪模块的移向移速。如此反复计算,即可得到所有模块的移向移速,它们共同组成回波区内部流场。

主要流程见图1。

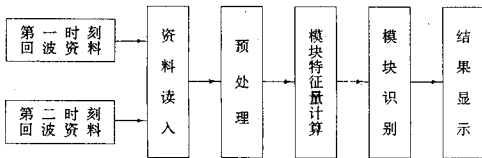


图1 计算流程图

在天气雷达的彩色终端上进行计算,区域可调,最大可达 240×240 个像素点,提供间距为5km的风矢量场。软件实行模块化设计,全部程序采用汇编语言编写,处理速度快,满足准实时化要求。

在选择资料时,要注意两时刻 PPI 资料探测量程相同、时间间隔以5~10分钟为宜,为了使估算结果近似反映水平流场,PPI 宜采用低仰角。为节省计算时间, t_1 时刻上某一回波模块无需在 t_2 时刻上整个计算区域内搜索匹配。为此要确定搜索范围,其搜索半径为 $V_{\max}(t_2 - t_1)$,其圆心即为 t_1 时刻上回波模块所在位置, V_{\max} 为选定的最大风速(如 $30\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)。

对划分出的每一回波模块,利用前述公式,计算出其所具有的矩不变量。将 t_1 时刻上所追踪的某回波模块的矩不变量值与 t_2 时刻相应搜索圆内所有回波模块的矩不变量值进行比较,把差别最小的模块视为 t_1 时刻所追踪的模块,记录下该模块的位移值,根据时间间隔大小,即可求得该回波模块的速度矢量。

3 分析研究

3.1 数值模拟

汤达章等^[3]在对相关系数法的计算误差详细分析的基础上指出,由于相关系数对回波强度分布的变化十分敏感;如果某一回波模块内回波强度分布从第一时刻到第二时刻稍有变化,则相关性迅速减小,从而导致判断错误,因此在非均匀流场情况下使用相关分析法,误差较大。于是试图寻找别的方法,通过对矩不变量的数值试验^[4],得出以下结论:

① 矩不变量的计算值与取样或模块内样本的排列次序几乎无关,这是其优于相关系数法的最大特点之一;

② 当模块内某些点的强度值发生变化时,矩不变量仍有良好的保守性;

③ 矩不变量对于同一回波模块具有良好的保守性,而在不同模块之间又存在明显的差异性,故有利于回波的识别跟踪和流场估测。

在此基础上,提出用矩不变量法代替相关系数法^[5],进行回波区流场的估算,并取得较好效果。

3.2 对比试验

利用上述方法对南京气象学院多普勒雷达收集的数字化回波资料进行了分析处理,求得回波区内部流场,再将其投影到所在径线上,这样得到的径向速度和多普勒雷达同时测量的平均多普勒径向速度进行比较。多普勒雷达测得的径向速度,分16个等级(正、负各8个),每个等级代表一个径向速度区间,只要矩不变量得到的径向速度值位于相应的多普勒速度区间内,即认为它与多普勒雷达测量值相符,是准确的。结果表明^[6]:两者具有较好的一致性,等值线走向及大多数高低值中心基本吻合。其准确率可达80%左右,若去除因边缘效应产生的错误风矢量,则准确率可达90%以上。

3.3 实例分析

对典型强对流天气下的雷达回波,进行

流场估算和特点分析。

1994年4月20日贵州省7个地州市22个县遭受冰雹袭击,主要灾区集中在省西北部和中部广大地区。这次强对流天气造成房屋倒塌,农作物毁坏,交通电力中断,全省直接经济损失超过人民币2亿元。

我们对20时09分到20时31分雷达观测到明显的弓状回波、地面出现重灾的这一时段的雷达回波资料进行了流场反演^[7]。图2为利用20时09分(t_1)和20时14分(t_2)回波资料估算出的流场,每圈距离40km,PPI仰角2°,实线分别表示回波强度0dBz、20dBz、40dBz的轮廓,箭头表示风的方向,箭杆长度表示风的大小,风矢量点之间的距离为5km,⊕⊖分别表示用反演流场计算出的正涡度中心和负涡度中心。

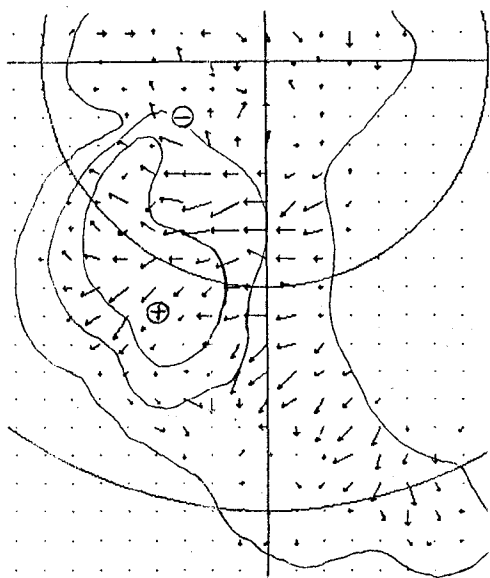


图2 用距不变量法估算的回波区流场

可以看出:回波的后部(近雷达一侧,高度约1km)为降雨区,有大片平直西风;回波前部(高度约2km)水平流场很弱,根据超级单体雹暴内部流场结构的模式模型,此处应为强上升气流区。另外,回波强度40dBz以

上的弓形区域,其头部流场表现出明显的气旋性,在尾部表现出反气旋性,在用反演流场估测出的涡度场上,40dBz的弓形回波头部为正涡度中心,尾部为负涡度中心。这一结构与藤田关于弓形回波的概念模式十分吻合^[8]。附表给出了3次计算结果的涡度中心强度,量级为 10^{-4} ,单位为 s^{-1} ,可以看出20时09分气旋性最明显,正涡度最强,此时地面观测的冰雹直径达45mm,降雹范围比较集中,造成重灾,20时20分以后降雹直径在10mm以下。

附表 涡度场中心强度的变化

t_1	t_2	正涡度中心	负涡度中心
20:05	20:09	50	25
20:09	20:14	20	20
20:26	20:31	16	20

另外,在正涡度中心处,流场上速度比周围小,散度值也小,在20时09分上甚至为0,这很可能是由于该区对应强烈降雹,致使下沉气旋很强,而水平气流较弱。由于很难有5km这样高密度的观测网来验证矩不变量法的反演效果,因此,该典型个例的计算结果与概念模式的一致性,使我们对该方法反演流场的可用性很有信心。

4 结语

4.1 用回波追踪技术估算回波区内部风场时,不要求对雷达严格标定,只需在资料采集期间雷达性能相对稳定即可。

4.2 上述技术仅应用常规的PPI或CAPPI资料,不要求其它特殊观测,故有利于业务推广应用。

4.3 考虑到回波功率本身的涨落变化和回波在移动过程中的生消,一般应用16个强度等级的回波资料的效果较好。此外,两幅回波资料的时间间隔也不宜过长,以5~10分钟为佳。

4.4 当回波块内强度分布十分均匀时,各模

块的特征量基本相同,将不能采用上述技术估算风场。当然,这种分布很均匀的回波块在强对流天气中是十分少见的。

4.5 用矩不变量法对该例反演出的流场与藤田关于弓形回波的概念模式具有较好的一致性。

4.6 在我国目前尚不可能大范围换装多普勒天气雷达的形势下,该项研究有助于进一步挖掘数字化天气雷达的应用潜力。

参考文献

1 Rinchart, R. E., A Pattern-Recognition Technique for Use with Conventional Weather Radar to Determine Internal Storm Motions, Recent Progress in Radar Meteorology. Atmospheric Technology, 1981, (13): 119~

134.

- 2 Hu, M. K., Visual Pattern recognition by moment invariant, IRE Trans. Int. Theory IF8, 1962: 179~187.
- 3 汤达章,赵清云. 雷达跟踪回波运动方法的研究——相关分析法的误差及其来源. 南京气象学院学报, 1988, 11(1): 89~99.
- 4 汤达章,李力. 一种新的跟踪雷达回波的特征量——矩不变量. 南京气象学院学报, 1989, 12(3)增刊: 1~8.
- 5 李力,汤达章. 用矩不变量方法估测雷达回波内部运动. 南京气象学院学报, 1989, 12(3): 增刊: 41~46.
- 6 汤达章,傅德胜,李力. 常规雷达测量回波区内部运动及与多普勒雷达的比较. 高原气象, 1991, 10(2): 113~122.
- 7 胡明宝,刘俄,汤达章. 一次弓状降雹回波区流场结构分析. 大气遥感技术论文集,北京:气象出版社, 1997: 50~54.
- 8 T. T. 藤田著,张杏珍译. 下击暴流. 北京:气象出版社, 1981: 32~51.

The Evaluation of the Flow Field within Weather Radar Echo by Use of Moment Invariant Method

Hu Mingbao Tang Dazhang

(Air Force Institute of Meteorology, Nanjing 211101)

Tang Mingbao

(Nanjing Institute of Meteorology)

Abstract

A new moment invariant method was presented to evaluate the flow field within weather radar echo. The study result shows that the moment invariants are very useful for extracting the features of modules from radar data and could be applied to the tracking of radar echo to determine the internal movement of the storm.

Key Words: moment invariant radar echo flow field