

近海台风雷达定位方法应用研究

许映龙^{1, 2} 矫梅燕² 毕宝贵² 张 涛²

¹ 南京信息工程大学, 南京 210044

² 国家气象中心, 北京 100081

摘 要 对于近似轴对称与类似兰金涡旋特性的台风近中心环流而言, 其多普勒雷达径向速度场具有相当特殊的偶极型态分布特征。在假设台风环流存在最大风速半径的前提下, 利用多普勒雷达径向速度场的这种分布特性和型态识别技术, 进行近海台风的雷达定位客观方法的应用研究, 并选取两种客观定位方法对台风中心位置进行估计。两种客观方法分别为几何轴对称中心定位法和速度距离方位显示中心定位法, 前者直接应用多普勒径向速度场进行定位估计, 后者则应用观测的多普勒径向速度场与观测点至雷达中心距离的乘积来估计台风中心位置。利用“兰金”涡旋模式模拟的多普勒雷达径向速度场和实际观测的台风环流的多普勒雷达径向速度场以及台风年鉴资料, 对这两种定位方法进行模拟和实际测试的结果表明: 模拟测试的定位误差在 0.5 km 以下, 最大风速半径的误差在 0.12 km 以下; 而实际测试的定位误差在 3~13 km 以内, 有些时次甚至在 3 km 以下。因此, 对近海台风而言, 利用多普勒雷达径向速度场资料进行实时业务定位是可行的, 且其定位结果将对台风实时业务预报和警报具有重要的参考价值。

关键词 台风 多普勒雷达 径向速度 客观定位方法

文章编号 1006-9895 (2006) 06-1119-10

中图分类号 P444

文献标识码 A

The Applied Study of the Positioning Method of a Tropical Cyclone over Offshore Using a Doppler Radar

XU Ying-Long^{1, 2}, JIAO Mei-Yan², BI Bao-Gui², and ZHANG Tao²

¹ Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044

² National Meteorological Center, Beijing 100081

Abstract The Doppler radar radial velocity field near a tropical cyclone center, which has characteristic of approximately axisymmetric distribution or Rankine vortex, has a particular dipole pattern distribution feature. On the basis of the distribution feature and the hypothesis about the radius of maximum wind (RMW) within the circulation of a tropical cyclone, a lot of methods are designed to decide a tropical cyclone center with the pattern recognition technique. The aim of the applied study in operational tropical cyclone monitoring is to establish some objective positioning methods for the center of a tropical cyclone using a single Doppler radar radial velocity. So the two methods have been chosen to detect and estimate the center of a tropical cyclone over China offshore. They are the Geometric Axisymmetric Center Positioning Method (GACPM) and the Velocity Distance Azimuth Display Positioning Method (VDADPM), respectively. The former decides the position of a tropical cyclone center using directly the Doppler radar radial velocity field, the latter does the position using the product ($V_r \times D$) of the Doppler radar radial velocity value (V_r) and the distance from observation site to radar center (D). Using the Doppler radar radial velocity data simulated by Rankine combined vortex, observed by a Doppler radar and typhoon yearbooks, a series of simulated

and actual tests are carried out for the two methods. The result shows that the errors of the two methods in simulated tests are below 0.5 km and those of radial maximum wind are below 0.12 km. Compared to the best operational track data, the errors of the two algorithms in actual tests are below 3–13 km, sometimes those are below 3 km. So it is feasible to decide the center of a tropical cyclone near with the data of a single Doppler radar radial velocity in operational tropical cyclone positioning. The positioning results of the two methods are of important reference and guidance in operational tropical cyclone forecasting and warning.

Key words typhoon center, Doppler radar, radial velocity, objective positioning method

1 引言

我国是世界上少数几个受台风(包括热带风暴、强热带风暴、台风、强台风和超强台风,下同)影响最严重的国家之一。平均每年有 7 个台风在我国登陆。在夏秋季节,台风是东南沿海最重要的灾害性天气系统,其所经之处带来的狂风暴雨和风暴潮等灾害,远非其他天气系统可比,常常给人民生命、国家财产和工农业生产造成重大损失。另一方面,台风引起的降水却能解除或缓和大范围的旱情。因此,准确、及时的台风预报和警报可以起到趋利避害的作用,而准确的定位则是台风成功预报的基础。

台风中心位置的确定一直是以卫星云图为主要手段,但当台风接近陆地时,由于受海岛和大陆下垫面的地形作用的影响,使得台风结构变得相对复杂,此时由云形不易确定台风的中心位置,从而给卫星定位带来很大困难,而且仅仅依靠卫星每小时的定时观测定位,将无法适时、精确掌握台风的动向。随着我国新一代天气雷达系统在沿海地区的建立,由于雷达观测时间及空间解析度的大为提高,使得精确掌握近海台风的动向成为可能,因此当台风接近陆地时,雷达就成为最佳的探测定位工具之一。

雷达在台风监测中的应用始于 20 世纪 40 年代后期,随着雷达探测技术的发展以及雷达观测网点的普及,雷达在台风监测中的作用日益显现。由雷达确定台风中心的方法,过去很多研究都涉及过,如 Senn 和 Hiser^[1]以及 Anthes^[2]提出的螺旋雨带定位法、Griffin 等^[3]提出的眼墙几何中心定位法等。这些方法对于雷达回波组织结构良好且存在明显的螺旋雨带或眼墙雨带的台风,其定位精度较高,但当台风螺旋雨带或眼墙雨带不明显,或台风中心雷达回波结构相当凌乱,或当登陆后的台风雷达回波常受地形影响而没有螺旋雨带或眼墙雨带的

结构时,其定位精度将大大降低而无法适用,且这些方法均难以进行客观定位。对即使存在强回波雨带结构或眼墙雨带的海上台风, Marks 等^[4]利用飞机探测的结果也表明雷达回波中心的位置和台风环流中心的位置并不一致,环流中心位置一般偏向于回波最强的区域一侧,可见利用雷达回波来确定台风的中心位置在定位精度上仍存在相当大的局限性。

随着 20 世纪 90 年代初期新一代 WSR-88D 多普勒天气探测雷达的迅速发展和普及,利用多普勒雷达径向速度场探测台风中心位置的技术方法研究也得到迅速发展。Wood 等^[5]和张保亮^[6]的研究工作指出:对于具有近似轴对称与类似“兰金”涡旋特性的台风近中心环流而言,其多普勒雷达径向速度场经常有相当特殊的偶极型态分布特征。利用多普勒雷达径向速度场的这种分布特性,Wood^[7]首先提出了一种利用多普勒雷达径向速度场确定涡旋风场中心的方法,并应用于接近陆地的台风中心定位,发现其与飞机观测的中心位置差距多在 4 km 以内,李伟等^[8]对这种方法也进行了初步的尝试应用;周仲岛等^[9, 10]在台风风场存在最大风速的假设前提下,提出了一种用雷达观测的多普勒径向速度场值(V_r)与观测点至雷达中心距离(D)的乘积作为新的参数场($V_r \times D$)来确定台风中心位置的方法,并利用 9418 号台风 Gladys 的资料进行了测试分析,也取得了很好的效果。值得指出的是上述两种定位方法由于均假设台风为轴对称环流或台风环流中存在唯一最大风速半径,因此当非轴对称分量或环境平均气流明显时,将会产生较大的误差。

本文将基于上述研究工作,选取两种近海台风雷达的客观定位方法来进行台风中心位置估计,两种客观定位方法分别是几何轴对称中心定位法和速度距离方位显示中心定位法,其中前者直接应用雷达观测的多普勒雷达径向速度场资料进行定位估计,后者则使用多普勒雷达径向速度场值(V_r)与观

测点至雷达中心距离(D)的乘积($V_r \times D$)来确定台风中心位置。文中将首先给出型态识别技术的概念模型,然后在此基础上对这两种定位方法的原理作简单介绍,并利用兰金(Rankine)涡旋模式模拟的多普勒径向速度风场对这两种定位方法进行模拟测试。在模拟测试的基础上,最后利用台风实时业务中观测到的台风多普勒雷达径向速度场资料进行实际测试,以验证这两种方法在确定台风中心位置中的实际效果。

2 台风眼雷达回波结构

在大多数情况下,一个发展完整的台风都有眼壁回波。虽然有时候眼壁回波可能不全或结构有些凌乱,但只要观测到这种眼壁回波,一般都可以比较准确地以雷达眼的几何中心来确定台风的中心位置^[11, 12]。在台风实时业务中,根据台风的雷达眼回波结构特征,可以将其分为同心双套圆眼、圆形眼、椭圆形眼、半圆环眼、破碎眼、不规则眼和无眼等七类台风(图 1、2)。一般而言,强度强的台风多数出现同心双套圆眼和圆形眼,中等强度的台风则呈现椭圆形眼和半圆环眼,弱台风则多数出现破碎眼、不规则眼或无眼。对于存在同心双套圆眼、圆形眼、椭圆形眼和半圆环眼的台风,我们可以将其雷达回波的几何中心确定为台风中心。而对于存在破碎眼、不规则眼的台风和无眼台风,用雷达回波来确定台风中心则存在着非常大的困难,这时可以借助多普勒雷达径向速度场或其他观测手段来确定台风中心。即使是同心双套圆眼、圆形眼、椭圆形眼和半圆环眼的台风,飞机探测的结果表明雷达回波中心和台风中心并不一致,台风中心一般偏向于回波最强的区域一侧,因此,仍然可以用多普勒雷达径向速度场确定的台风中心与用雷达回波的几何中心确定的台风中心相互印证,以取得最佳的定位精度。

3 型态识别技术

由于多普勒雷达仅能观测到沿雷达波束方向的径向速度,而无法得到真实三维气流场的结构,因此,对由多普勒雷达所观测到的气流结构的分析研究主要是通过其径向速度场的特殊型态分布来进行的,关于这方面的早期研究包括 Donaldson^[13]、Wilson 等^[14]和 Wood 等^[15]的工作。型态识别技术

就是用来识别由多普勒雷达径向速度场所反演的大气系统真实环流(如雷暴中尺度气旋或台风环流等)主要特征的一种分析技术。

图 3 给出了台风涡旋的单多普勒速度型态^[7],在这里我们将多普勒雷达某一径向上的径向速度连续递增段(顺时针方向)定义为一个切变段。图 3 中细实线和细虚线分别表示正负多普勒径向速度等值线,等值线间隔为 10 m/s;粗实线表示正的多普勒方位切变区域,每一个带箭头的线段表示一个切变段;环绕台风中心的圆点表示最大风速的位置,即台风的最大风速半径位置; V_N 和 V_P 分别表示负的和正的极端多普勒径向速度,图 3 中以“ $\times$ ”表示,其斜距和方位角分别为 (R_N, θ_N) 和 (R_P, θ_P) 。对于任一切变段,它是由斜距(R)、该切变段起点和终点的方位角(θ_b, θ_e)、径向速度(V_b, V_e)和扫描时间(T_b, T_e)等 7 个分量构成的一个七维型态矢量。当七维型态矢量合并为一个二维切变特征的型态矢量后,型态矢量就可以为我们提供环流的大小、强度及涡旋速度等重要信息^[7]。

为了识别台风涡旋环流,首先需要确定的一个重要参数是方位速度梯度的大小。对某一型态矢量来讲,我们将多普勒径向速度在方位角方向上的切变定义为该型态矢量的方位切变,用公式表示为

$$S = \frac{\Delta V}{R(\theta_e - \theta_b)}. \quad (1)$$

这里, $\Delta V = V_e - V_b$ 表示沿某一切变段的径向速度差; $R(\theta_e - \theta_b)$ 表示沿该切变段的方位距离。图 3 中台风中心左侧和右侧由圆点所组成的粗实线是表示多普勒径向速度达到极小值和极大值的点,它们分别为所有切变段上的速度连续递增的起点(R_b, θ_b)和终点(R_e, θ_e)所决定,对应任意切变段上的速度连续递增段的起点和终点所构成的型态矢量的多普勒方位切变的变化满足 $\partial V_d / \partial \theta = 0$,其中 V_d 为观测的多普勒径向速度。当 $S > 0$ 时,表明在某一径向上由多普勒雷达径向速度连续递增段所构成的切变段存在多普勒雷达径向速度气旋性切变。因此,为了识别台风环流,我们将所有满足 $S < 0$ 的切变段剔除,而只保留满足 $S > 0$ 的切变段,由所有这些切变段所决定的速度连续递增段的起点和终点所包围的型态矢量区域就是由型态识别技术所识别得到的台风环流,也就是图 3 中由所有圆点所构成的圆形区域。

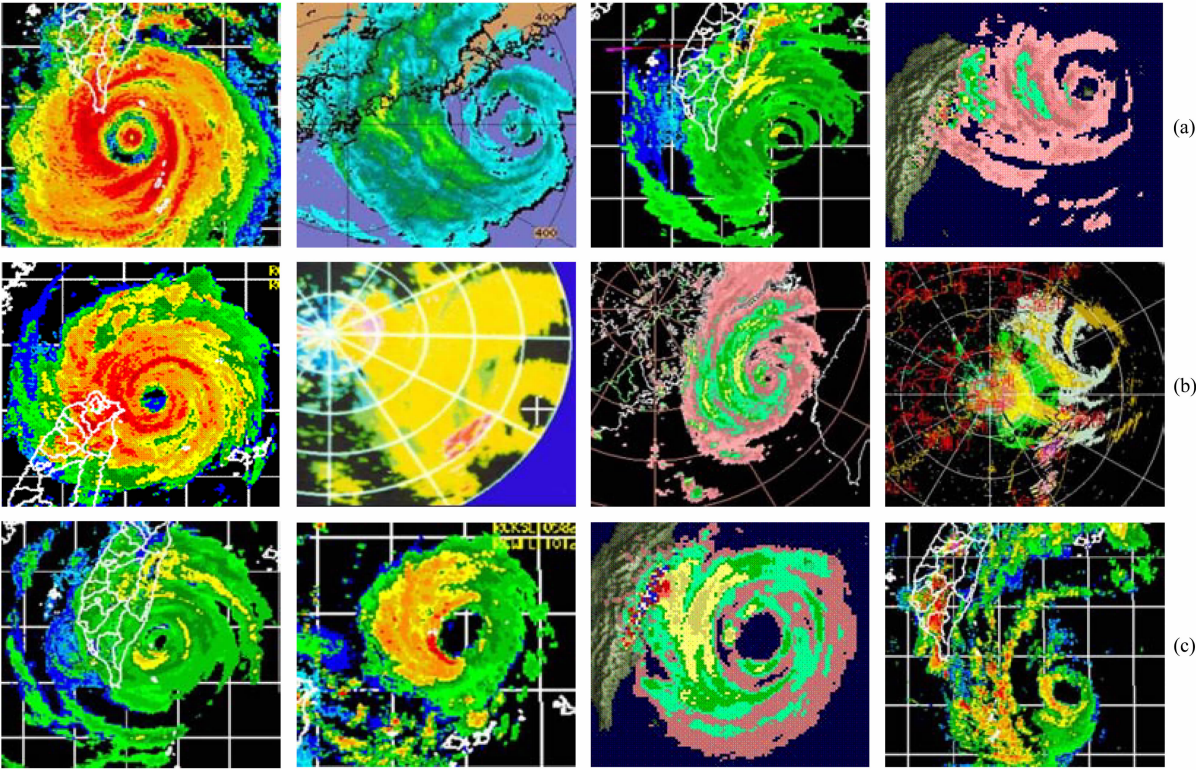


图 1 台风眼的雷达回波结构: (a) 同心双套圆眼; (b) 圆形眼; (c) 椭圆形眼
Fig. 1 The radar echo structure of a typhoon eye: (a) Two concentric eyes; (b) circular eye; (c) elliptic eye

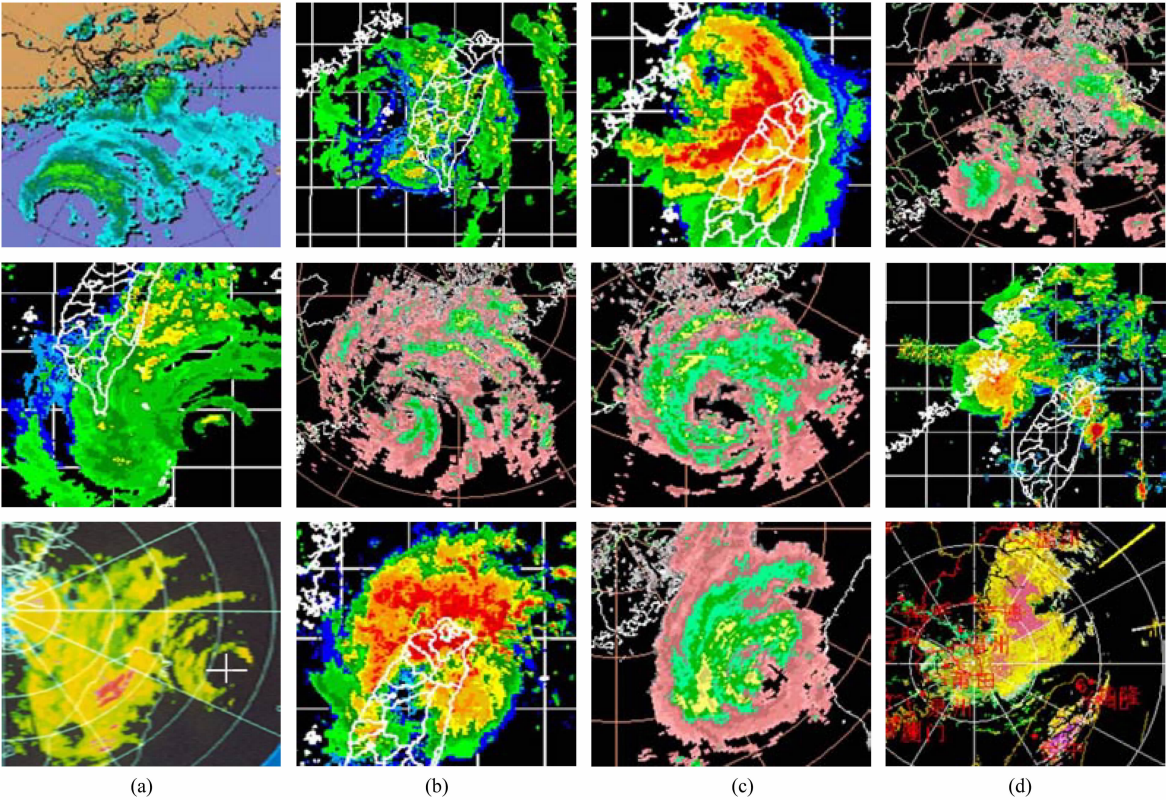


图 2 同图 1: (a) 半圆环眼; (b) 破碎眼; (c) 不规则眼; (d) 无眼
Fig. 2 As in Fig. 1: (a) Semi-circle eye; (b) bursting eye; (c) irregular eye; (d) without an eye

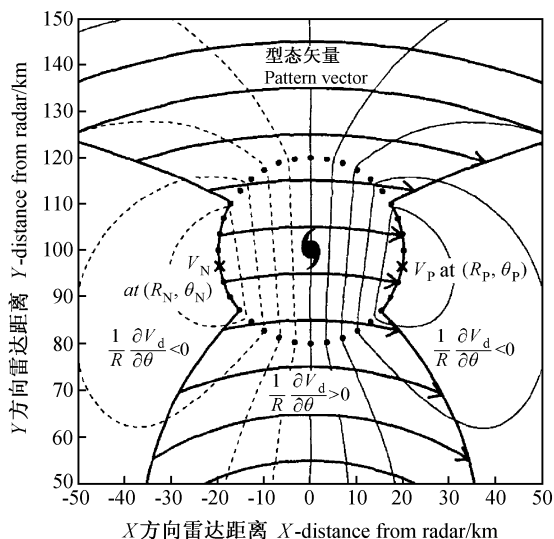


图3 台风涡旋的单多普勒速度型态图(引自文献[7])

Fig. 3 The single Doppler velocity pattern of an axisymmetric typhoon vortex (Adopted from reference [7])

下面,对基于上述型态识别技术的几何轴对称中心定位法和速度距离方位显示中心定位法进行详细介绍,并利用模拟和观测的多普勒雷达径向速度场资料对这两种方法进行测试。

4 几何轴对称中心定位法

直接利用多普勒雷达径向速度场来确定台风的中心位置,我国台站预报员在业务预报实践中总结了许多经验法则^[12],如对准静止或移动缓慢的台风,其中心可用零径向速度线与两侧正、负速度极值连线的交点确定,当有眼壁回波时,则中心可由零径向速度线与两侧正、负速度变化梯度极值区连线交点确定;而对移动较快的台风,特别当变化的环境风场叠加其上时,台风中心可以确定在径向速度正、负极值区同雷达位置点组成的伞形弧线中点位置。这样确定的台风中心位置在很大程度上依赖于预报员的主观经验,且正、负速度极值的确定也不是一件很容易的事,因此很难进行客观化处理。Wood^[7]利用台风环流近似轴对称的特性,假设台风环流为轴对称(包括切向和径向),且存在最大风速半径,提出了一种基于多普勒雷达径向速度场确定台风中心的方法(称之为几何轴对称中心定位法)。在该方法中,对台风涡旋的监测是通过搜寻多普勒雷达所有径向上的速度连续递增段的切变段上是否存在多普勒雷达径向速度气旋性切变来进行

的,即是否满足 $S > 0$ 。

首先,计算所有切变段上的方位切变,当满足 $S > 0$ 时,将所得到的切变段记录为一个型态矢量;在计算方位切变的过程中,为了排除一些非台风环流的干扰或影响,给定沿任意切变段的径向速度差 $\Delta V = V_e - V_b$ 和方位切变 S 的阈值,阈值大小的取舍与台风本身的强度、最大风速半径和范围等因素有密切关系。当某一切变段的径向速度差 $\Delta V = V_e - V_b$ 和方位切变 S 的数值大于给定的阈值时,就将该切变段记录下来,否则剔除该切变段。在本文后面的台风实际个例定位计算中,给定 $\Delta V = 60 \sim 70$ m/s, $S \geq 1$ m/s²·km⁻¹。

其次,确定极端多普勒径向速度值的位置。将上面得到的所有切变段的起点和终点的方位斜距 (R_b, R_e) 、方位角 (θ_b, θ_e) 和径向速度值 (V_b, V_e) 分别按照 Desrochers 和 Donaldson^[16] 提出的速度权重方法进行权重计算,分别得出负的和正的最大径向速度值及其位置 (V_N, R_N, θ_N) 、 (V_P, R_P, θ_P) 。具体的计算公式如下:

$$V_N = \frac{\sum_k (V_b)_k (W_b)_k}{\sum_k (W_b)_k}, \quad (2)$$

$$R_N = \frac{\sum_k (R_b)_k (W_b)_k}{\sum_k (W_b)_k}, \quad (3)$$

$$\theta_N = \frac{\sum_k (\theta_b)_k (W_b)_k}{\sum_k (W_b)_k}, \quad (4)$$

$$V_P = \frac{\sum_k (V_e)_k (W_e)_k}{\sum_k (W_e)_k}, \quad (5)$$

$$R_P = \frac{\sum_k (R_e)_k (W_e)_k}{\sum_k (W_e)_k}, \quad (6)$$

$$\theta_P = \frac{\sum_k (\theta_e)_k (W_e)_k}{\sum_k (W_e)_k}, \quad (7)$$

其中,权重的确定如下:

$$W_b = \Delta W - |(V_b)_k - V_{\min}|, \quad (8)$$

$$W_e = \Delta W - |(V_e)_k - V_{\max}|, \quad (9)$$

$$\Delta \bar{V} = \frac{V_{\max} - V_{\min}}{2}. \quad (10)$$

当 $\Delta\bar{V} \geq 35$ m/s, $\Delta W = 5$ m/s; 当 $\Delta\bar{V} < 35$ m/s, $\Delta W = 3$ m/s, 且 $0 < W \leq \Delta W$ 。

最后, 确定台风的中心位置。将上面得到的负的和正的最大径向速度值 (V_N, V_P) 及其位置 (R_N, θ_N)、(R_P, θ_P) 代入下列公式:

$$R_E = F \left(\frac{R_N + R_P}{2} \right), \quad (11)$$

$$\theta_E = \frac{(\theta_N + \theta_P)}{2}, \quad (12)$$

其中, $F = \sec(\Delta\theta/2)$, $\Delta\theta = \theta_P - \theta_N$, 且 $0^\circ \leq |\Delta\theta| < 180^\circ$ 。计算得出台风中心位置的斜距 R_E 和方位角 θ_E , 然后经过转换得到台风中心位置的经纬度坐标。这里 F 为修正参数, 它是为避免当台风环流的最大风速区域接近雷达时, 估计的和真实的台风中心到雷达的斜距的差异太大而设置的一个参数。

此外, 设雷达位置为坐标原点, 分别计算负的和正的最大径向速度值 (V_N, V_P) 的坐标位置 ($X_{\max}, Y_{\max}$) 和 ($X_{\min}, Y_{\min}$), 然后可计算得到台风环流的最大风速半径 $R_{\max}$, 计算公式如下:

$$R_{\max} = \frac{1}{2} \sqrt{(X_{\max} - X_{\min})^2 + (Y_{\max} - Y_{\min})^2}. \quad (13)$$

5 速度距离方位显示中心定位法

由于当台风非常接近雷达时, 雷达观测得到的多普勒径向速度将产生严重变形, 这时直接使用多普勒径向速度场来确定台风中心位置将产生很大的误差。因此, 如何更加有效地使用多普勒径向速度场资料就成了亟待解决的问题。周仲岛等^[9]提出了一种用雷达观测的多普勒径向速度场值 (V_r) 与观测点至雷达中心距离 (D) 的乘积作为新的参数场——力矩场 ($V_r \times D$) 来确定台风中心位置的方法, 我们称之为速度距离方位显示中心定位法。而在实际定位计算中, 为使 $V_r \times D$ 的数值大小与观测的多普勒雷达径向速度数值相近, 将 ($V_r \times D$) 除以台风中心的事先估计位置至雷达的距离 D_{CR} 得到的商 ($(V_r \times D)/D_{CR}$) 来作为新的参数场进行定位计算。在该方法中, 需要在等高面上计算 $V_r \times D$, 得到其空间分布图。对台风涡旋的监测是通过搜寻在多普勒雷达所有径向上的力矩场 $[(V_r \times D)/D_{CR}]$ 连续递增段的切变段上是否存在力矩场 $[(V_r \times D)/D_{CR}]$ 气旋性切变来进行, 即是否满足方位切变 $S > 0$ 。方位切变的计算公式如下:

$$S = \frac{\Delta V}{R(\theta_e - \theta_b)} = \frac{[(V_r \times D)/D_{CR}]_e - [(V_r \times D)/D_{CR}]_b}{R(\theta_e - \theta_b)}. \quad (14)$$

首先, 计算所有切变段上的方位切变, 当满足 $S > 0$ 时, 将所得到的切变段记录为一个型态矢量; 在计算方位切变的过程中, 同样为了排除一些非台风环流的干扰, 给定了沿任意切变段的力矩场差 ($\Delta V = [(V_r \times D)/D_{CR}]_e - [(V_r \times D)/D_{CR}]_b$) 和方位切变 S 的阈值, 阈值大小的取舍与台风本身的强度、最大风速半径和范围等因素有着密切关系, 在本文台风实际个个例定位计算中, 同样给定 $\Delta V = 60 \sim 70$ m/s, $S \geq 1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$ 。

其次, 确定力矩场 ($V_r \times D$)/ D_{CR} 的极值及其位置。将上面得到所有的切变段的起点和终点的方位斜距 (R_b, R_e)、方位角 (θ_b, θ_e) 和力矩场 ($[(V_r \times D)/D_{CR}]_b, [(V_r \times D)/D_{CR}]_e$) 同样按照几何轴对称中心定位法中使用的速度权重方法进行权重计算, 分别得出负的和正的最大力矩场及其位置 ($[(V_r \times D)/D_{CR}]_N, R_N, \theta_N$), ($[(V_r \times D)/D_{CR}]_P, R_P, \theta_P$)。具体的计算公式如下:

$$\left(\frac{V_r \times D}{D_{CR}} \right)_N = \frac{\sum_k \left[\left(\frac{V_r \times D}{D_{CR}} \right)_b \right]_k (W_b)_k}{\sum_k (W_b)_k}, \quad (15)$$

$$R_N = \frac{\sum_k (R_b)_k (W_b)_k}{\sum_k (W_b)_k}, \quad (16)$$

$$\theta_N = \frac{\sum_k (\theta_b)_k (W_b)_k}{\sum_k (W_b)_k}, \quad (17)$$

$$\left(\frac{V_r \times D}{D_{CR}} \right)_P = \frac{\sum_k \left[\left(\frac{V_r \times D}{D_{CR}} \right)_e \right]_k (W_e)_k}{\sum_k (W_e)_k}, \quad (18)$$

$$R_P = \frac{\sum_k (R_e)_k (W_e)_k}{\sum_k (W_e)_k}, \quad (19)$$

$$\theta_P = \frac{\sum_k (\theta_e)_k (W_e)_k}{\sum_k (W_e)_k}, \quad (20)$$

其中, 权重的确定如下:

$$W_b = \Delta W - \left| \left[\left(\frac{V_r \times D}{D_{CR}} \right)_b \right]_k - \left(\frac{V_r \times D}{D_{CR}} \right)_{\min} \right|, \quad (21)$$

$$W_e = \Delta W - \left| \left[\left(\frac{V_r \times D}{D_{CR}} \right) \right]_e - \left(\frac{V_r \times D}{D_{CR}} \right)_{\max} \right|,$$

(22)

$$\Delta \bar{V} = \frac{\left(\frac{V_r \times D}{D_{CR}} \right)_{\max} - \left(\frac{V_r \times D}{D_{CR}} \right)_{\min}}{2}.$$

(23)

当 $\Delta \bar{V} \geq 35$ m/s, $\Delta W = 5$ m/s; 当 $\Delta \bar{V} < 35$ m/s, $\Delta W = 3$ m/s, 且 $0 < W \leq \Delta W$ 。

最后, 确定台风的中心位置。设雷达位置为坐标原点, 分别计算负的和正的最大力矩场 $[(V_r \times D)/D_{CR}]_N$ 和 $[(V_r \times D)/D_{CR}]_P$ 的坐标位置 $(X_{\max}, Y_{\max})$ 和 $(X_{\min}, Y_{\min})$, 然后计算出台风中心的坐标位置 (X_C, Y_C) 和最大风速半径 $R_{\max}$, 计算公式如下:

$$X_C = \frac{X_{\min} + X_{\max}}{2},$$

(24)

$$Y_C = \frac{Y_{\min} + Y_{\max}}{2},$$

(25)

$$R_{\max} = \frac{1}{2} \sqrt{(X_{\max} - X_{\min})^2 + (Y_{\max} - Y_{\min})^2}.$$

(26)

6 模拟测试

6.1 模拟径向速度风场的建立

利用“兰金(Rankine)”涡旋模式进行多普勒雷达径向速度风场模拟, 假设轴对称台风环流由旋转气流、辐散或辐合气流以及均匀一致的水平气流等三种不同形态的气流所组成。

旋转气流与辐散或辐合气流按下式进行构造:

$$V(R) = \frac{V_{\max} \cdot R}{R_{\max}}, \quad R \leq R_{\max},$$

(27)

$$V(R) = \frac{V_{\max} \cdot R_{\max}}{R}, \quad R > R_{\max}.$$

(28)

水平气流按下式进行构造:

$$\mathbf{V}_M = -V_M \sin(\theta - \theta_M) \mathbf{i} + V_M \cos(\theta - \theta_M) \mathbf{j},$$

(29)

其中, R 为某一观测点至台风中心的距离; $V_{\max}$ 为最大风速; $R_{\max}$ 为最大风速半径; θ 为观测点与原点的连线与正东方向的夹角; θ_M 为均匀气流去向风向与正东方向的夹角; V_M 为均匀气流的水平速度。

6.2 模拟测试结果

对中心位于 $x_0 = 100$ km, $y_0 = 100$ km, 给定最大风速 $V_{\max}$ 为 40 m/s, 最大风速半径 $R_{\max}$ 为 10 km 的“兰金”涡旋, 分别在五种不同的环境平均气流下进行多普勒雷达径向速度场 (V_r) 和力矩场 $(V_r \times D)$ 的模拟。图 4 分别给出了无环境气流和引入西风、东风、西南风以及东南风环境气流条件下所模拟得到的多普勒雷达径向速度场和力矩场。可以看出, 在无环境气流和引入东南风环境气流条件下, 模拟得到的多普勒雷达径向速度场和力矩场均呈现出一种明显的对称分布, 而在引入西风、东风和西南风环境气流条件下, 其分布则呈现明显不同程度的非对称分布特征。但在涡旋环流中心附近, 无论是模拟的径向速度场还是力矩场均显现出一种特殊的偶极型形态分布特征, 这与台风实际观测的多普勒雷达径向速度场和力矩场分布是一致的。对模拟得到的径向速度场和力矩场分别运用几何轴对称中心定位法和速度距离方位显示中心定位法计算台风中心位置, 模拟计算结果如表 1 所示。由计算结果可以看出, 两种方法所确定的台风中心位置与台风的实际中心位置基本一致, 其误差在 0.5 km 以下, 且由这两种方法所确定的最大风速半径也与实际最大风速半径基本一致, 误差在 0.12 km 以下。

表 1 模拟测试定位和最大风速半径 (RMW) 估计误差分析表 (单位: km)
Table 1 The position and the errors (km) of the radius of maximum wind (RMW) in the simulated test

测试方案 Test scheme	几何轴对称中心定位法 Geometric Axisymmetric Center Positioning Method (GACPM)					速度距离方位显示中心定位法 Velocity Distance Azimuth Display Positioning Method (VDADPM)				
	X_C	Y_C	ΔX_C	ΔY_C	RMW	X_C	Y_C	ΔX_C	ΔY_C	RMW
$V_M = 0$ m/s	100.26	100.26	0.26	0.26	9.88	100.11	100.11	0.11	0.11	9.90
西风 West wind $V_M = 10$ m/s	100.01	100.01	0.01	0.01	9.88	100.13	100.15	0.13	0.15	9.90
东风 East wind $V_M = 10$ m/s	99.72	99.73	-0.28	-0.27	9.88	100.14	100.09	0.14	0.09	9.92
东南风 Southeast wind $V_M = 10$ m/s	99.88	99.53	-0.12	-0.47	9.88	100.11	100.11	0.11	0.11	9.90
西南风 Southwest wind $V_M = 10$ m/s	100.32	100.32	0.32	0.32	9.88	100.12	100.20	0.12	0.20	9.94

7 台风个例实际测试

为考察几何轴对称中心定位法和速度距离方位显示中心定位法这两种方法在台风实时定位业务上的效果,我们选取 2001 年第 16 号台风“百合(Na-ri)”在临近登陆我国台湾东北部时所观测到的多普勒雷达径向速度场资料进行实际测试,资料为我国台湾五分山 WSR-88D 雷达站所实际观测的速度场资料,扫描时间为 2001 年 9 月 16 日 00 时至 9 月 16 日 13 时(国际协调时,下同),仰角为 0.5°,径向象束点格距为 250 m。

图 5 分别给出了 2001 年 9 月 16 日 00 时、03 时、06 时、09 时和 12 时五个时次所观测到的多普勒雷达径向速度场以及由多普勒雷达径向速度场计算得到的力矩场,这里的径向速度场是经过速度退模糊处理后的数值,由图 5 可以明显看出,无论是多普勒雷达径向速度场还是力矩场均显现出一种近似对称的偶极型态的特殊分布特征,且吹向雷达的速度(负的径向速度)明显大于吹离雷达的速度(正

的径向速度)的数值。

表 2 给出了利用多普勒雷达实际所测台风百合的径向速度场资料分别运用几何轴对称中心定位法和速度距离方位显示中心定位法这两种方法所计算得到的每隔 1 小时的台风中心位置,表中实况位置为台风年鉴确定的中心位置。可以看出,由几何轴对称中心定位法和速度距离方位显示中心定位法所确定的台风中心具有相当稳定的西南移动路径,且与实际中心位置非常接近,两者相差在 3~13 km 以内,有些时次甚至在 3 km 以内,表明这两种方法所确定的台风中心位置具有较高的精度,对台风实时定位业务具有很好的参考价值,这无疑也会对台风实时预报和警报业务起到十分重要的作用。

另外,由几何轴对称中心定位法所计算得到的最大风速半径结果还表明在台风“百合”临近登陆我国台湾东北部时,其最大风速半径有逐渐缩小的现象,这与其眼墙回波半径逐渐缩小的现象是一致的(图 6)。在台风登陆前大约 13 小时的 00 时,其最大风速半径大约为 33.7 km,眼墙半径为 50~

表 2 实际测试定位误差和最大风速半径估计分析表

Table 2 The position errors and the radius of maximum wind in the actual test

时间 Time	实况位置 Real-time center	速度距离方位显示中心定位法 VDADPM		几何轴对称中心定位法 GACPM		RMW/ km
		计算结果 Result of test	误差 Error	计算结果 Result of test	误差 Error	
0000 UTC	(25.5°N, 123.1°E)	(25.53°N, 123.13°E)	(0.03°N, 0.03°E)	(25.52°N, 123.10°E)	(0.02°N, 0.00°E)	33.70
0100 UTC	/	(25.52°N, 123.03°E)	/	(25.48°N, 123.00°E)	/	36.02
0200 UTC	/	(25.47°N, 122.98°E)	/	(25.42°N, 122.91°E)	/	31.62
0300 UTC	(25.5°N, 122.8°E)	(25.38°N, 122.84°E)	(0.12°N, 0.04°E)	(25.38°N, 122.87°E)	(0.12°N, 0.07°E)	33.11
0400 UTC	/	(25.38°N, 122.75°E)	/	(25.38°N, 122.76°E)	/	31.95
0500 UTC	/	(25.33°N, 122.67°E)	/	(25.37°N, 122.68°E)	/	32.23
0600 UTC	(25.4°N, 122.6°E)	(25.32°N, 122.59°E)	(0.08°N, 0.01°E)	(25.35°N, 122.57°E)	(0.05°N, 0.03°E)	32.06
0700 UTC	/	(25.31°N, 122.53°E)	/	(25.25°N, 122.50°E)	/	30.79
0800 UTC	/	(25.23°N, 122.47°E)	/	(25.24°N, 122.47°E)	/	34.02
0900 UTC	(25.2°N, 122.4°E)	(25.12°N, 122.47°E)	(0.08°N, 0.08°E)	(25.13°N, 122.44°E)	(0.07°N, 0.04°E)	29.26
1000 UTC	/	(25.09°N, 122.34°E)	/	(25.06°N, 122.33°E)	/	25.31
1100 UTC	/	(25.06°N, 122.27°E)	/	(25.04°N, 122.20°E)	/	20.89
1200 UTC	(25.0°N, 122.2°E)	(25.04°N, 122.12°E)	(0.04°N, 0.08°E)	(24.99°N, 122.17°E)	(0.01°N, 0.03°E)	19.73
1300 UTC	/	(24.91°N, 121.98°E)	/	(24.99°N, 121.93°E)	/	8.22

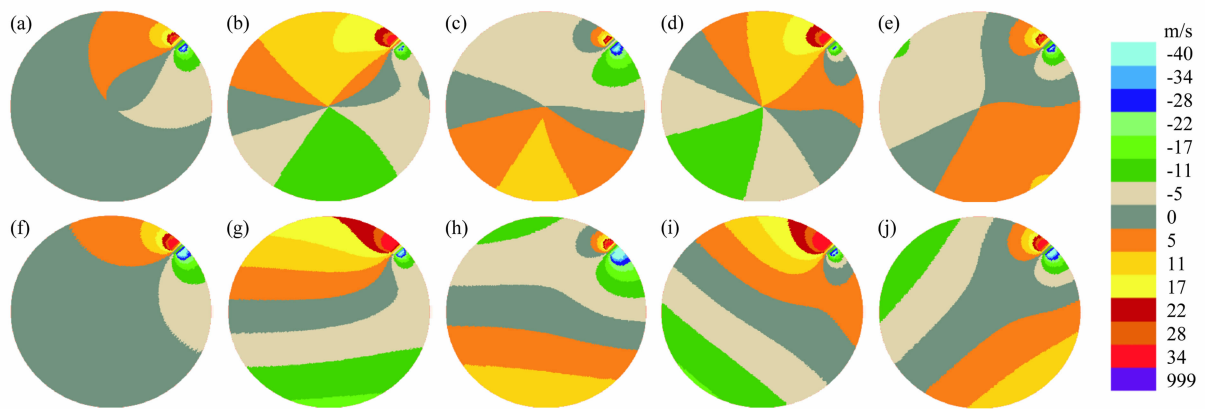


图 4 模拟的多普勒径向速度场 V_r (a、b、c、d、e) 和力矩场 ($V_r \times D/D_{CR}$) (f、g、h、i、j)：(a、f) 无环境气流时；(b、g) 环境气流为西风 ($V_M=10$ m/s, $\theta_M=180^\circ$)；(c、h) 环境气流为东风 ($V_M=10$ m/s, $\theta_M=0^\circ$)；(d、i) 环境气流为西南风 ($V_M=10$ m/s, $\theta_M=135^\circ$)；(e、j) 环境气流为东南风 ($V_M=10$ m/s, $\theta_M=45^\circ$)

Fig. 4 The simulated Doppler radial velocity V_r (a、b、c、d、e) and $V_r \times D/D_{CR}$ (f、g、h、i、j)：(a、f) No environmental mean flow；(b、g) westward environmental mean flow ($V_M=10$ m/s, $\theta_M=180^\circ$)；(c、h) eastward environmental mean flow ($V_M=10$ m/s, $\theta_M=0^\circ$)；(d、i) southwestward environmental mean flow ($V_M=10$ m/s, $\theta_M=135^\circ$)；(e、j) southeastward environmental mean flow ($V_M=10$ m/s, $\theta_M=45^\circ$)

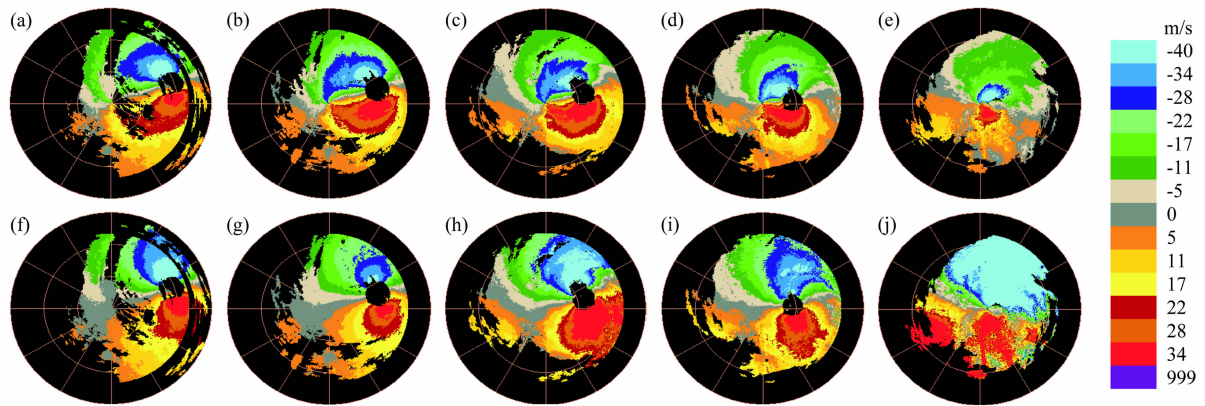


图 5 2001 年 9 月 16 日雷达观测的多普勒径向速度场 V_r (a、b、c、d、e) 和力矩场 ($V_r \times D/D_{CR}$) (f、g、h、i、j)：(a、f) 00 时；(b、g) 03 时；(c、h) 06 时；(d、i) 09 时；(e、j) 12 时

Fig. 5 The observed Doppler radial velocity V_r (a、b、c、d、e) and $V_r \times D/D_{CR}$ (f、g、h、i、j)：(a、f) 0000 UTC；(b、g) 0300 UTC；(c、h) 0600 UTC；(d、i) 0900 UTC；(e、j) 1200 UTC

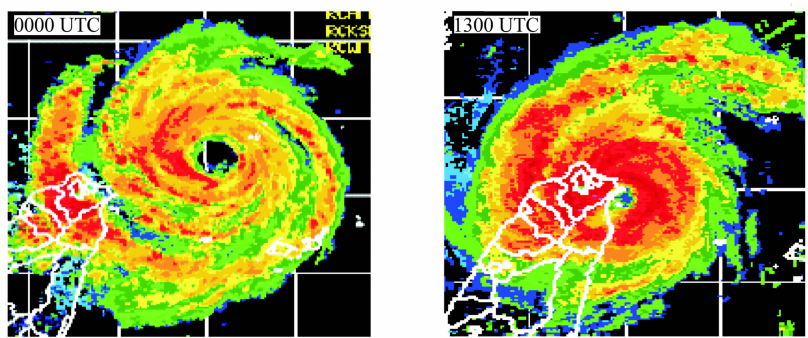


图 6 2001 年 9 月 16 日台风“百合”雷达回波 (资料来源：中国台湾省气象局)

Fig. 6 The radar echo images of typhoon Nari on 16 Sep 2001 (from Taiwan Province Meteorological Bureau, China)

60 km, 而临近登陆的 13 时则分别缩小至 8.2 km 和 15 km 左右, 大约分别缩小了 3/4, 台风最大风速半径和眼墙半径的缩小可能是由于台风在接近陆地时其中心附近低层环流受地形摩擦而产生向中心辐合的缘故而造成的。

8 结论与讨论

(1) 模拟测试和实际台风个例测试的结果表明, 几何轴对称中心定位法和速度距离方位显示中心定位法是目前较好的利用多普勒雷达径向速度场资料进行近海台风雷达定位的客观定位方法, 其定位结果对台风实时业务定位和预报具有很好的参考价值。

(2) 由于几何轴对称中心定位法和速度距离方位显示中心定位法均是以台风环流为轴对称, 且存在最大风速半径的假设前提而建立起来的, 因此当台风环流存在非对称分量或当非对称分量增加时, 由该两种方法确定的台风中心位置的误差将加大。

(3) 由于存在速度模糊的现象, 速度退模糊技术的好坏对反演接近台风真实环流的分布具有决定性的影响, 因此, 多普勒雷达径向速度退模糊技术的发展对提高近海台风的雷达定位精度是十分重要的。

致谢 本文在雷达资料和技术探讨上得到了中国台湾气象局张保亮先生的支持, 在此深表谢意。

参考文献 (References)

- [1] Senn H V, Hiser H W. On the origin of hurricane spiral bands. *J. Meteor.*, 1959, **16**: 419~426
- [2] Anthes R A. *Tropical Cyclones: Their Evolution, Structure and Effects*. Amer. Meteor. Soc., Boston, 1982. 208pp
- [3] Griffin I S, Burpee R W, Marks F D, et al. Real-time airborne analysis of aircraft data supporting operational hurricane forecasting. *Weather and Forecasting*, 1992, **7**: 480~490
- [4] Marks F D, Houze R A, Gamache J F. Dual-aircraft investigation of the inner core of hurricane Norbert. Part I: Kinematic structure. *J. Atmos. Sci.*, 1992, **49**: 919~942
- [5] Wood V T, Brown R A. Single Doppler velocity signatures: An atlas of patterns on clear air/widespread precipitation and convective storms. NOAA Tech. Memo. ERL NSSL-95, Nation Severe Storms Laboratory, Norman, Okla., 1983. 71
- [6] 张保亮. 登陆中台风环流变化分析: 贺伯(1996)台风个案研究. 中国台湾大学大气科学研究所博士学位论文, 2000. 158pp
- [7] Chang Paoliang. Circulation change analysis on landfalling typhoon: A case study Herb (1996). Ph. D. Dissertation, Department of Atmospheric Sciences, Taiwan University, China, 2000. 158pp
- [7] Wood V T. A technique for detecting tropical cyclone center using a Doppler radar. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, 1994, **11**: 1207~1216
- [8] 李伟, 汤达章, 苏卫东. 单多普勒雷达对台风的自动定位方法. 南京气象学院学报, 1999, **22**(2): 233~237
- [8] Li Wei, Tang Dazhang, Su Weidong. Automatic detection of typhoon by using a single Doppler radar. *Journal of Nanjing Institute of Meteorology*, 1999, **22**(2): 233~237
- [9] 周仲岛, 邓秀明, 张保亮. 多普勒雷达在台风中心定位与最大风速半径的应用. 大气科学(中国台湾), 1996, **24**: 1~24
- [9] Jou B D, Deng S M, Chang P L. The application of Doppler radar in the decision of typhoon center and radius maximum wind. *Atmospheric Science* (Taiwan, China), 1996, **24**: 1~24
- [10] 周仲岛, 李文兆. 台湾地区都普勒雷达资料应用系统发展计划 (I). 中国台湾省气象局委托研究计划报告. 中国台北, 2001, 29~44
- [10] Jou B D, Lee W C. Application System of Doppler Radar Data on Severe Weather Forecasting in Taiwan, China (I). China Taiwan Central Weather Bureau Technical Report, 2001, 29~44
- [11] 周笃诚, 刘同达. 十公分雷达所探测到的台风回波特征. 台风会议文集(1981). 上海: 上海科学技术出版社, 1983. 153~154
- [11] Zhou Ducheng, Liu Tongda. The characteristics of typhoon echo observed by ten centimeter radar. *Symposium on Typhoons in 1981*. Shanghai: Shanghai Science and Technology Press, 1983. 153~154
- [12] 张培昌, 杜秉玉, 戴铁丕. 雷达气象学. 北京: 气象出版社, 2001. 511pp
- [12] Chang Peichang, Du Bingyu, Dai Tiepi. *Radar Meteorology*. Beijing: China Meteorological Press, 2001. 472pp
- [13] Donaldson R J. Vortex signature recognition by a Doppler radar. *J. Appl. Meteor.*, 1970, **9**: 661~670
- [14] Wilson J W, Wilk K E. Nowcasting applications of Doppler radar. *Nowcasting*, K. A. Browning Ed. London: Academic Press, 1982. 87~105
- [15] Wood V T, Brown R A. Single Doppler velocity signatures interpretation of nondivergent environmental winds. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, 1986, **6**: 114~128
- [16] Desrochers P R, Donaldson R J. Automatic tornado prediction with an improved mesocyclone detection algorithm. *Weather and Forecasting*, 1992, **7**: 373~388