

# 一种简易的多普勒雷达速度模糊纠正技术\*

刘淑媛<sup>1),2)</sup> 王洪庆<sup>2)</sup> 陶祖钰<sup>2)</sup> 刘海霞<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>(空军气象中心,北京 100843)

<sup>2)</sup>(北京大学物理学院大气科学系,北京 100871)

## 摘 要

多普勒天气雷达是监测强对流天气中尺度风场的重要手段。纠正速度模糊是多普勒雷达探测风场信息有效应用的前提。速度模糊纠正技术大多需要首先对模糊点集或非模糊点集进行识别,如果无法识别或识别错误,将造成纠正过程的失败或需要人工识别。文章提出了一种不需先对模糊点集或非模糊点集进行识别的纠正速度折叠的简便方法。它只需首先将存在折叠的速度场恢复为连续的速度场;然后对其速度数值是否存在整体偏移做出判断和调整。给出的存在严重模糊的台风个例的速度模糊纠正实例表明,这种方法对二次折叠也同样有效。

关键词:多普勒天气雷达 速度模糊 台风

## 引 言

多普勒天气雷达可以获得降水强度和相应范围内风场径向分量的信息,且时空分辨率远高于常规探空资料,被广泛应用于灾害性天气预警,是短时天气预报的重要手段之一,于中尺度气象研究也有很高应用价值。美国已经在上个世纪末建立了多普勒天气雷达网,我国也将在近年内建立多普勒天气雷达网。

多普勒雷达的最大探测距离  $R_{\max} = \frac{c}{2\omega}$  ( $c$ :光速,  $\omega$ :脉冲重复频率)和最大测速范围  $V_{\max} = \pm \frac{\omega\lambda}{4}$  ( $\lambda$ :波长)之间存在反比关系。在最大探测距离内,当粒子沿雷达波束方向的径向速度超过最大测速范围时,测得的径向速度将出现速度模糊(如图1中I、II、III三段),它和真实径向速度相差  $2nV_{\max}$  (其中  $n = \pm 1, \pm 2, \dots$ )。由于速度模糊扭曲了真实的风场信息,因此必须首先对速度模糊进行纠正之后,才能正确地应用多普勒雷达对速度的测量结果。虽然硬件的改进和采用双重复频率方式可以加大最大测速范围,但在强烈的天气系统(如台风和对流性强风暴)中的风速非常大,速度模糊的出现仍难以避免。在多普勒雷达速度图像上速度模糊的特征非常显著,但由于雷达探测到的速度在空间上往往是不完整的,而且其中还存在大量的噪音(如图1中廓线上大量的不规则起伏),造成了

\* 受 973 项目 G1998040907 号,国家自然科学基金重点项目 40233036 号和高等院校重点实验室访问学者基金资助。

2002-11-08 收到,2003-02-18 收到修改稿。

计算机自动识别的困难,使速度模糊纠正问题至今没有得到满意的解决。

由于速度模糊的特征在速度-方位廓线上表现为廓线的折叠现象(如图 1 所示),因此速度模糊纠正技术多建立在对模糊点集或非模糊点集正确识别的基础上<sup>[1~10]</sup>。但是,非模糊点的确定是非常困难的,并且常常需要辅助资料的配合和某种人为的假定以及各种复杂复杂的判别方法。一旦非模糊点(区域)确定失误,将导致速度模糊纠正失败。

本文提出一种首先纠正模糊造成的速度场不连续,然后再将已经变为连续的速度场的数值恢复到无模糊水平的新方法。介绍这一方法的原理和具体的实现步骤,并给出了两个台风的速度模糊纠正实例。

## 1 多普勒速度模糊纠正方法

### 1.1 基本思路

本文提出的纠正速度模糊方法的基本出发点是:如果没有速度模糊,多普勒雷达测得的径向速度在每一距离圈上随方位角的分布廓线应是一条连续的围绕零线的曲线,它都有一个最大的远离速度和一个最大的趋近速度,因此其基本轮廓形状类似于二阶简谐曲线。当出现速度模糊时,雷达测得的速度将被折叠到相反方向,速度随方位的变化发生不连续的跳跃。它是退模糊方法的基本依据。

为方便说明本文提出的方法可以无需首先确定非模糊点(集),下面用一条最简单的速度-方位廓线,如图 2a 所示,来加以说明,其最大速度为  $28 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。假定存在一次速度折叠。如果雷达的最大不模糊速度为  $15 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,则雷达测得的速度-方位廓线中超过  $15 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  的峰值区段(或谷值区段)应被折叠到相反方向,很大的正值(或负值)突然变为很大的负值(或正值),即如图 2b 所示。相邻两个跳跃点之间的速度差为最大不模糊速度的 2 倍。但在图 2b 中可以看到,速度模糊所造成的折叠现象并不改变模糊区段廓线的形状(即速度随方位角的分布特征),只是在数值上发生向下或向上平移。因此,只要将图 2b 廓线中的折叠线段依次向相反方向平移 2 倍不模糊速度,就可将廓线恢复成没有折叠的连续廓线,如图 2c 所示。但是由于图 2b 中第一个区段是模糊区段,则平移的结果使图 2c 廓线的速度值都是负值。显然,只需将廓线上每一点的值都加上 2 倍不模糊速度,就可将廓线恢复成没有模糊的正确廓线(如图 2d 所示),从而达到消除速度模糊的目的。所以,纠正速度模糊最简便的方法是,第一步先使廓线恢复连续。第二步是对廓线是否发生整体偏移做出判断,如是,则将连续的廓线整体平移到正确的数值。

原始径向速度常存在大量噪音,在实现上述方法前先对原始资料进行消除噪音的处理。

### 1.2 噪音消除

根据 Bergen 和 Albers<sup>[5]</sup>的实验结果,选用一个  $3 \times 3$  窗口(表 1)滤去较大的噪音,表中中心点  $V_r[i, j]$ (其中  $i$  表示方位角,  $j$  表示径向)为需要订正的点。从靠近雷达的第一个距离圈开始,沿切向逐点逐圈进行判断,直到遍历整个扫描面。

表 1 窗口单元各点位置分布

$V_r[i-1, j+1]$	$V_r[i, j+1]$	$V_r[i+1, j+1]$
$V_r[i-1, j]$	$V_r[i, j]$	$V_r[i+1, j]$
$V_r[i-1, j-1]$	$V_r[i, j-1]$	$V_r[i+1, j-1]$

给定标准数  $K$ 。为了消除孤立的有值点,在一个有效值点的周围 8 个邻近点中,有

多于  $K$  个点没有有效值时,将此点置为缺测点。为了消除孤立的缺测点,在一个缺测点周围 8 个点中有多于  $K$  个点为有效值,将中心点同一距离圈的前一个点赋值给中心点。使用陶祖钰<sup>[9]</sup>的切向模糊消除技术中的方法消除孤立的跳跃点(连续非模糊段中孤立的模糊点,或相反)。

### 1.3 纠正速度模糊的具体做法

#### 第 1 步:恢复速度-方位廓线的连续性

从雷达扫描的任意一个距离圈开始(为方便起见可以从第一个距离圈开始),找出第一个不为零的点为起点,以此点为中心选取一个  $n \times m$  的小窗口(如  $3 \times 3$ ),在窗口中逐点与中心点比较,如果与中心点符号相反,且两点差的绝对值大于给定的判断标准 LIMIT(其数值原则上应大于不模糊速度),则认为该点是模糊点,并做退模糊处理。然后再对下一点进行同样的处理,但前面已做模糊纠正的点只参与判断而不做处理,以确保每一个点只做一次纠正。将此步骤遍历整个廓线,并以此类推直到遍历整个雷达扫描区域。经过上述处理后,原来廓线上的折叠区段都经过了平移,整个廓线恢复了连续,不再存在折叠现象(相当于图 2c 所示)。如果初始点恰好是非模糊点,则处理后的廓线便是模糊纠正后的廓线。但如果初始点是模糊点,则恢复连续后的廓线发生了整体偏移,基本上都是正的速度或负的速度。因此,还需要进一步作出判别和修正。

#### 第 2 步:判断廓线是否发生了整体偏移

判断经过第一步修正后的廓线是否发生了整体偏移,可以根据在没有模糊情况下的速度-方位廓线上总有一个最大值和最小值,而且它们的符号相反,数值大致相当做出判断。也就是只需按廓线上极大值和极小值之和相对于最大不模糊速度的比值的整数倍进行修正,即可将整体偏移的廓线调整到正确位置。具体做法是,在每一距离圈中选出该圈的最大值( $V_{r\max}$ )和最小值( $V_{r\min}$ ),并计算出两者的差与最大不模糊速度的比值  $n$ ,即

$$n = \text{int}((-V_{r\min} + V_{r\max}) / V_{\max})$$

其中,  $\text{int}$  为取整函数。若  $n = 0$ ,则第一步得到的连续廓线没有发生整体偏移,表明该廓线的速度模糊已消除。若  $n$  的绝对值  $\geq 1$ ,则第一步得到的连续廓线存在整体偏移。其整体偏移的数值就是  $nV_{\max}$ ,只要将廓线上每一点按  $V_r^* = V_r - nV_{\max}$  进行修正,就可使廓线调整到正确位置(图 2d)。

#### 第 3 步:根据风场的连续性沿径向对边缘区域进行调整

可见,上述方法可以在无需首先确定非模糊点(集)的条件下对模糊进行纠正,从而避免了以往各种纠正速度模糊方法中寻找非模糊点的各种假设和复杂计算以及由于误判造成的一系列问题。下面给出用此方法纠正速度模糊的实例。

## 2 速度模糊纠正的实例

众所周知,台风中的风速非常强,常常超过多普勒雷达的不模糊速度,速度模糊现象往往难以避免。下面分别给出两次存在一次和多次严重折叠的台风实例对本方法进行检验。

## 2.1 一次折叠实例

1993年9月17日广州白云机场的一次多普勒雷达观测到的台风实例。台风位于雷达的南部,多普勒雷达观测的最大不模糊速度为 $16.0\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。

图3a给出了 $10:17$ 仰角为 $2.73^\circ$ 的原始多普勒雷达径向速度图像(趋近雷达为负,顺时针旋转,正东方向为零度,下同),其中存在明显的速度模糊。主要模糊区为:在 $120^\circ\sim 240^\circ$ 之间由正速度(兰色)突变为负速度(黄色)的A区域;在 $330^\circ\sim 90^\circ$ 之间由负速度(黄色)突变为正速度(兰色)的B区域。图3b是经过模糊纠正后的图像。可以看到,原始图像中A、B两大模糊区已得到纠正,散乱分布的孤立有效点和零值点也已被消除,速度图像表现得十分清晰完整,正负径向速度区有规则地分布在零线左右。模糊纠正后的最大趋近速度和远离速度从 $16\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 提高到了 $40\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,显示出台风很强的涡旋风场。

## 2.2 多次折叠实例

1998年8月4日台湾绿岛雷达对OTTO台风的观测是一个有多次速度折叠的个例。观测时的最大不模糊速度为 $15.6\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。台风中心位于雷达的东南方。

在 $1.06^\circ$ 仰角的第50距离圈原始速度-方位廓线(图4a)上, $0^\circ\sim 90^\circ$ 之间存在连续两次从正到负的速度跳跃, $90^\circ\sim 270^\circ$ 则有连续两次从负到正的速度跳跃,是明显的两次折叠现象。模糊纠正后(图4b),速度-方位廓线上的折叠现象完全被消除了,最大速度为 $48.3\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,是雷达观测的不模糊速度的3倍。最大的远离速度位于 $90^\circ$ 附近,与台风左侧的偏北气流相对应;最大的趋近速度位于 $340^\circ$ 附近,与台风右侧的偏东气流相对应。图4c、4d给出 $1.06^\circ$ 仰角退模糊前后整个扫描面的速度图像对比。可见,退模糊前(图4c)雷达南侧和东侧的速度大值区中都存在两次速度折叠。而退模糊后(图4d)所有的速度模糊均得到正确的纠正,纠正后的最大多普勒速度从 $15.6\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 提高到 $55.2\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。

## 3 结束语

本文提出的首先将存在折叠的速度场恢复为连续的、没有跳跃的速度场,然后再对其速度数值是否存在整体偏移做出判断及进行调整的方法,由于不需对模糊点集或非模糊点集进行识别,避免了由于无法识别或识别错误造成的失败,是一种简便可靠的速度模糊纠正方法。对相当数量多普勒雷达速度模糊资料的处理表明,此方法是可行的,且对二次折叠也有效。

最后需要指出的是,在雷达扫描的范围内只获得少量分散的速度资料并且分布在离雷达较远地方的情况下,如果存在速度模糊,则可能出现模糊点集和非模糊点集不相邻接的情况。本文所提出的方法,在这种情况下由于不能找到跳跃点而失效。不过在这种情况下,速度场的分析已经没有太大的意义。

致谢:感谢台湾大学周仲岛教授提供OTTO台风的Doppler雷达观测资料。

## 参考文献

- 2 Bargen D W, Brown R C. Interactive radar velocity unfolding. Proceedings, 19th Conference on Radar Meteorology, Miami, Fla., American Meteor. Soc., Boston, 1980. 278 ~ 283.
- 3 Merrit M W. Automatic velocity dealiasing for real-time application. Proceedings, 22nd Conference on Radar Meteorology. Zurich, Switzerland, American Meteor. Soc., Boston, 1984. 528 ~ 533.
- 4 Jay M L, Mohr C G, Weinheimer A J. The simple rectification to Cartesian Space of fold radial velocities from Doppler radar sampling. *J. Atmos. Oceanic Tech.*, 1986, **3**: 162 ~ 174.
- 5 Bergen W R, Albers S D. Two and three-dimensional dealiasing of Doppler radar velocity. *J. Atmos. Oceanic Tech.*, 1988, **5**: 305 ~ 319.
- 6 Eilts M D, Smith S D. Efficient dealiasing of Doppler velocities using local environment constraints. *J. Atmos. Phys.*, 1990, **72**: 185 ~ 202.
- 7 Jing Z W. Two dimensional dealiasing of Doppler velocities. *J. Atmos. Oceanic Tech.*, 1993, **10**: 798 ~ 808.
- 8 Yamada Y, Chong M. VAD-based determination of the Nyquist interval number of Doppler velocity aliasing without wind information. *J. Meteor. Soc. Japan*, 1999, **77**: 447 ~ 457.
- 9 陶祖钰. 多普勒速度模糊的切向消除技术. *应用气象学报*, 1993, **4**: 145 ~ 153.
- 10 James C N, Houze Jr. R A. A real-time four-dimensional Doppler dealiasing scheme. *J. Atmos. Oceanic Tech.*, 2001, **18**: 1674 ~ 1683.

## A SIMPLE ALGORITHM FOR DEALIASING VELOCITY AMBIGUITY

Liu Shuyuan<sup>1), 2)</sup> Wang Hongqing<sup>2)</sup> Tao Zuyu<sup>2)</sup> Liu Haixia<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup> ( Air Force Meteorological Center, Beijing 100843)

<sup>2)</sup> ( Department of Atmospheric Science, Peking University, Beijing 100871)

### Abstract

Doppler velocity aliasing will appear when the radial component of the target's velocity is greater than the Nyquist velocity of the radar. A simple and effective algorithm for Doppler velocity dealiasing is put forward based on the characteristics that the wind field is continuous along a ring centered at the radar and an unfolding Doppler velocity-azimuth profile always has a maximal away-speed and a maximal toward-speed. This new algorithm does not require the knowledge of an auxiliary wind field and manual judgment about aliased area. So, the assumptions for finding aliasing points are avoided. It does not need the help of auxiliary wind information and man-made judgment about aliasing velocities. It can be carried out easily and automatically by the computer and has potential to be implemented in operational environment. The dealiasing algorithm has two steps for each PPI scan. The first step is to make the piecewise folded velocity-azimuth curve to be a continuous curve. The second step is to determine whether the continuous velocity-azimuth curve is on the correct level based on the character that an unfolded velocity-azimuth curve always has a maximal away-speed and a maximal toward-speed approximately equal value. If not, the velocity-azimuth curve should be adjusted to the correct level according to the number  $n$ , which  $n = \text{INT}$

$((V_{rmax} - V_{rmin}) / V_{rmax})$ . Where  $V_{rmax}$  is the maximum value and  $V_{rmin}$  is the minimum value in the velocity-azimuth curve. After the second step, the velocity-azimuth curve will be adjusted to the reasonable velocity interval. For get better result of dealiasing, the above steps can be repeated one or two times. The Doppler velocity data with multi-aliasing collected from Typhoon OTTO observed by Ludao Doppler Radar at the southeastern Taiwan on 4th August in 1998 is used to test this dealiasing algorithm. The result shows that this algorithm can effectively dealias multiple folds of Doppler velocities once the low signal to noise ratio data have been thresholded.

**Key words:** Doppler weather radar    Velocity aliasing    Typhoon