

# 多种单多普勒雷达风场反演方法对比试验

周海光 张沛源

(中国气象科学研究院, 北京 100081)

## 提 要

采用典型风场资料对4种单多普勒天气雷达风场反演方法进行了对比试验,这4种方法是VAP方法,涡度-散度法,简单伴随函数方法,动力方程组求解方法。试验结果表明,不同风场应采用不同反演方法。

**关键词:** 多普勒雷达 风场反演 对比试验

## 引 言

从1931年Lhermitte和Atlas<sup>[1]</sup>在均匀风场假定下提出VAD方法以来,到目前,单多普勒天气雷达风场反演技术有了很大发展。VAD方法已从均匀风场假定发展到线性风场假定。反演方法已从一种发展到多种,最复杂的甚至采用大气动力学方程组进行风场反演。但是不管哪种方法,都有各自的假定条件和应用范围。为了更好地使用这些技术,我们从多种反演方法中挑选出了4种方法,进行对比试验,以了解在什么样的风场条件下,使用什么反演方法最好。

### 1 4种反演方法简介

#### 1.1 局地均匀风场假定下的风场反演方法

1990年宋春梅等人<sup>[2]</sup>利用立体扫描资料,通过粒子下落速度订正,求得等高面上(CAPPI)的径向速度,在局地均匀风场假定的条件下,反演出二维水平风场。

1992年陶祖钰<sup>[3]</sup>利用PPI资料,在局地均匀风场假定下直接反演风向风速。他假定同一距离圈上相邻两个方位上的风向风速是一样的(即均匀风场),则可根据两个方位上的径向速度( $V_{d1}, V_{d2}$ )简单地求出风向风速:

$$\alpha = \arctg\left(\operatorname{ctg}\Delta\theta \frac{V_{d1} - V_{d2}}{V_{d1} + V_{d2}}\right) \quad (1)$$

$$V = \left| \frac{V_{d1} + V_{d2}}{2\cos\alpha \cos\Delta\theta} \right| \quad (2)$$

$$\text{或 } V = \left| \frac{V_{d1} - V_{d2}}{2\sin\alpha \sin\Delta\theta} \right| \quad (3)$$

其中 $V_{d1}, V_{d2}$ 为相邻两个方位上的多普勒速度, $\Delta\theta$ 为相邻两个方位的方位差, $\alpha$ 为风向与其中一个方位的夹角, $V$ 为风速。切向速度 $V_a$ 则可由

$$V_a = V\sin\alpha$$

计算得到,陶祖钰把它称之为VAP方法。

#### 1.2 简单伴随函数方法

1994年,邱崇践等人提出简单伴随函数方法的单多普勒天气雷达风场反演技术<sup>[4-6]</sup>。径向速度的动量方程为,

$$\partial V_r / \partial t + V_{rm} \partial V_r / \partial r + (V_{am}/r) \partial V_r / \partial \alpha - V_{am}^2 / r - k \nabla_{\text{H}}^2 V_r = F_m \quad (5)$$

其中 $V_r$ 是径向速度, $\nabla_{\text{H}}^2$ 是柱坐标中的水平Laplace算子, $k$ 是水平粘性系数, $F_m$ 是强迫项的时间平均部分, $(V_{rm}, V_{am}, F_m, k)$ 则是需要反演的控制变量。

用此方程作为控制方程,将控制方程中的 $(V_{rm}, V_{am}, F_m, k)$ 作为控制变量,先给一组初始猜测值,然后将控制方程向后积分,预报出下时段的 $V_r$ ,计算出 $V_r$ 与实测值的残差,运用模式共轭方程组反向积分的方法,计算残差对各初始猜测值 $(V_{rm}, V_{am}, F_m, k)$ 的梯度,再用共轭梯度方法计算出搜索方向,进而得到新的猜测值。反复迭代直至残差达到极小值,则最后的猜测值 $(V_{rm}, V_{am}, F_m, k)$ 即为所需反演的量。

#### 1.3 动力方程组求解(PAR)方法

吴绍荣等人<sup>[7]</sup>对柱坐标系下大气运动方程组中的有关垂直方向的物理量进行简化,

化成二维平面上的方程组:

$$\frac{\partial U}{\partial t} + U \frac{\partial U}{\partial r} + \frac{V}{r} \frac{\partial U}{\partial \alpha} + \frac{UW}{h} - \frac{V^2}{r} = - \frac{\partial \pi}{\partial r} \quad (6)$$

$$\frac{\partial V}{\partial t} + U \frac{\partial V}{\partial r} + \frac{V}{r} \frac{\partial V}{\partial \alpha} + \frac{VW}{h} + \frac{UV}{r} = - \frac{1}{r} \frac{\partial \pi}{\partial \alpha} \quad (7)$$

$$W = - \epsilon h \left( \frac{\partial U}{\partial r} + \frac{U}{r} + \frac{1}{r} \frac{\partial V}{\partial \alpha} \right) \quad (8)$$

$$\begin{aligned} \nabla^2 \pi = & - \left( \frac{\partial U}{\partial r} \frac{\partial U}{\partial r} + \frac{2}{r} \frac{\partial U}{\partial \alpha} \frac{\partial V}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial V}{\partial \alpha} \frac{\partial V}{\partial \alpha} - \frac{2V}{r} \frac{\partial V}{\partial r} + \frac{2U}{r^2} \frac{\partial V}{\partial \alpha} \right. \\ & \left. + \frac{U}{h} \frac{\partial W}{\partial r} + \frac{V}{rh} \frac{\partial W}{\partial \alpha} + \frac{U^2}{r^2} \right) \quad (9) \end{aligned}$$

其中 $(U, V, W)$ 为风矢量, $t$ 是时间, $\pi$ 为气压除以空气密度, $h$ 为雷达扫描面的高度, $\epsilon$ 为一订正系数,考虑 $h$ 以下为线性分布则 $\epsilon$ 约等于0.5。

用此方程组作为控制方程组,其中切向速度 $V$ 作为模式的输入量,径向速度 $U$ 作为模式的输出量。模式在 $V$ 的初始猜测值条件下,预报以后时段内的 $U$ ,计算出预报值与雷达实测值之间的残差,运用模式共轭方程组反向积分的方法,计算残差对各初始猜测值 $V$ 的梯度,再用共轭梯度方法计算出搜索方向,进而得到新的猜测值。反复迭代直至残差达到极小值,则最后的猜测值 $V$ 即为所需反演的量。

#### 1.4 涡度-散度法

葛润生、姜海燕<sup>[8]</sup>从动力学角度出发,用简化的垂直涡度方程,得到反演水平二维风场的方程组:

$$\xi = V_a/r + \partial V_r/\partial r - (1/r) \partial V_r/\partial \theta \quad (10)$$

$$D = V_r/r + \partial V_r/\partial r + (1/r) \partial V_a/\partial \theta \quad (11)$$

$$\begin{aligned} V_r(\partial \xi/\partial r) + (V_a/r)(\partial \xi/\partial \theta) \\ = - (f + \xi)D \quad (12) \end{aligned}$$

其中, $\xi$ 是垂直涡度, $t$ 是时间, $f = 2\Omega \sin \Phi$ 是地转涡度的垂直分量( $\Omega$ 是地球自转角速度, $\Phi$ 是地理纬度), $D$ 是散度, $V_r$ 是径向速度, $V_a$ 是切向速度。用此方程组求 $V_a$ 。

#### 2 生成典型风场的径向速度资料

理想的模式资料有3个,分别是定常西风场,涡旋风场和辐合风场。定常西风场是一个风速为 $5\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的均匀西风场,后两种风场的背景风场都是风速为 $5\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的均匀西

风场,在其上叠加一个涡旋或辐合气流,将合成的风矢量投影到雷达的径向上,即是雷达观测到的多普勒径向速度。涡旋气流和辐合气流的速度廓线采用Rankine近似,核半径和最大风速分别取为 $9\text{km}$ 和 $4\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。这个系统在西风中均匀地以 $5\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的速度向东移动,移动过程中风速的Rankine廓线保持不变,每15秒取一组资料,取到8分钟,共有32组模拟数据资料。

为了比较4种反演方法,采用模拟资料,进行对比的区域选在雷达正东偏北的一个扇形区域内,采用极坐标,距雷达最近的距离圈为 $38\text{km}$ ,最远的距离圈为 $82\text{km}$ ,径向格距为 $2\text{km}$ ,切向上由正东方向向北共 $44^\circ$ 的范围,格距为 $2^\circ$ 。首先将 $23 \times 23$ 格点的数据用VAP方法反演,得到 $21 \times 21$ 格点的数据,再将这 $21 \times 21$ 格点的数据用作其他方法的初始猜测值或初始边条件,最后得到 $19 \times 19$ 格点数据,再对此数据进行分析对比。

#### 3 计算反演误差的方法

各种反演方法的误差来源包括方程简化的误差,差分格式的误差,权重系数或参数的误差,径向速度本身的测量误差等等。

通过计算偏差等统计量,来定量比较4种反演方法的精确度。切向速度标准偏差为

$$MS(\Delta V_a) = \sqrt{\frac{\sum_{1}^{m \times n} (V_a - V_{aref})^2}{m \times n}} \quad (13)$$

其单位是 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。角度标准偏差为

$$MS(\Delta \varphi) = \sqrt{\frac{\sum_{1}^{m \times n} (\varphi - \varphi_{ref})^2}{m \times n}} \quad (14)$$

其单位是度。式中的下标 ref 代表模拟风场资料,  $V_a$  表示反演出的切向速度,  $V_{aref}$  表示模拟风场的切向速度,  $m$  表示反演风场径向格点数,  $n$  表示反演风场切向格点数,  $\varphi$  表示反演出的速度与正东方向的夹角,  $\varphi_{ref}$  表示模拟风场的速度与正东方向的夹角,  $\Delta\varphi = \varphi - \varphi_{ref}$  表

示反演出的风场的方向和模拟风场方向的角度差。

#### 4 对比试验结果

根据式(13)和(14)计算出的不同风场统计量详见表 1。

表 1 不同风场统计量

项目	定常西风场		涡旋风场		辐合风场	
	$MS(\Delta V_a)/m \cdot s^{-1}$	$MS(\Delta\varphi)/度$	$MS(\Delta V_a)/m \cdot s^{-1}$	$MS(\Delta\varphi)/度$	$MS(\Delta V_a)/m \cdot s^{-1}$	$MS(\Delta\varphi)/度$
VAP 反演方法	0.0017	0.0168	5.3527	53.7909	5.1165	56.1703
涡度-散度法(用 VAP 反演结果作边条件)	1.1326	9.1852	2.4413	23.7346	2.0553	22.2939
涡度-散度法(用零值作边条件)	1.4779	17.2459	2.7212	37.2731	3.7084	50.2442
简单伴随函数法(用 0 初始值)	0.0000	0.0000	2.5521	31.6582	2.7343	32.6485
简单伴随函数法(用 VAP 结果作初始值)	0.0000	0.0000	3.5786	44.8703	4.7641	56.7084
PAR 反演方法(用 VAP 结果作初始边条件)	0.0990	0.9924	2.6308	33.8530	5.0909	56.5896

从表 1 中可以看出:对于定常西风场,4 种反演方法反演出的风场与实际风场都非常接近;对于涡旋风场和辐合风场,涡度-散度法反演出的风场效果最好。

#### 4.1 定常西风场数值模式资料反演对比结果

采用 VAP 方法,反演出的风场与实际情况基本一致。这是因为 VAP 方法采用局地均匀假定,即同一距离圈上两个相邻方位角上的风矢量近似相同,在均匀西风场中,局地均匀假定成立,因此反演出的风场合理。

采用简单伴随函数方法,分别用零值和用 VAP 结果作初始猜测值而得到的风场与实际风场基本相吻合。

采用 PAR 方法,用 VAP 反演结果作边条件,初始猜测值采用 VAP 的反演结果,反演出的风场与实际情况基本一致。

采用涡度-散度方法,用 VAP 反演出的值做边条件得到的风场与实际风场基本吻合,只是中部区域风速值略大一些;采用零值做边条件得到的风场与实际风场较远,但从整体来看,效果还是比较好的,这是因为差分方程对边条件是敏感的。

#### 4.2 涡旋风场数值模式资料反演对比结果

采用 VAP 方法反演出的初始时刻的风场,在涡旋中心附近反演出的风场失真非常严重,只是在远离中心的四周区域反演出的风场与实际情况比较相近。这是因为 VAP 方法采用局地均匀假定,即同一距离圈上两

个相邻方位角上的风矢量近似相同,而实际上涡旋中心附近,两个方位角上的风矢量相差比较大,不仅不相同,而且有可能反向,因此由 VAP 方法所反演出的风场严重失真,而且,在 VAP 方法中对风速的量级还进行了人为的控制,否则会出现很大的风速。而在远离中心的区域,因为主要是均匀的风,局地均匀假定近似成立,因此反演出的风场较为合理,可以作为其他反演方法的边条件。

采用简单伴随函数方法,用零值作为初始猜测值反演得到的径向速度值与模拟场很相近,而且切向速度值只有较小的脉动,与初始猜测值相差不是很大;用 VAP 结果作初始猜测值而得到风场与前者类似。但从整体来看,用零值作为初始猜测值反演得到的风场与实际风场吻合得较好,原因是简单伴随函数方法的反演结果与初始猜测值有很大关系。在简单伴随函数方法中控制变量除了平均风矢  $V_{rm}$ 、 $V_{am}$  外,平均强迫项  $F_m$  也是控制变量,而目标泛函  $J$  对这三者梯度的量级是不同的,对  $F_m$  的梯度经常比对  $V_{am}$  的梯度大得多,因此  $F_m$  的贡献非常容易地就把  $V_{am}$  的贡献淹没了,使得  $V_{am}$  没有起作用,而对于  $V_{rm}$  来说,因为引入了  $V_{rm} = V_{robm}$  的约束因而逼近实测值。

采用 PAR 方法,用 VAP 结果作边条件,在涡旋中的上风方向反演得比较好,在下风方向反演出的风向有些偏差,但大体上还是比较好的。

采用涡度-散度方法,用 VAP 反演出的

值做边条件反演出的风场在一定程度上与实际风场吻合,风速值略大一些;用零值做边条件反演出的风场与实际风场相差较远,这是因为差分方程是边条件敏感的。

#### 4.3 辐合风场数值模式资料反演对比结果

采用 VAP 方法,与涡旋风场的 VAP 方法反演的结果非常类似,在反演区域的中心部位,风矢偏差非常大,但在四周区域反演的风矢与真实风场则相差较小,原因正如前所述。

采用简单伴随函数方法,用零作为初值所得到的反演结果和用 VAP 反演的结果作为初始值所得到的结果与涡旋风场反演结果很类似,反演结果与初始猜测值关系很大,基本上都是把径向速度全部反演出来了;但切向速度则与初始值相差不大。用 VAP 反演的结果作为初始值所得到的切向速度与实际风场相差太远。

采用 PAR 方法,用 VAP 反演方法的结果作边条件,切向速度的初始猜测值采用 VAP 的反演结果,所得到的风场与实际风场相差很大。

采用涡度-散度法,用 VAP 反演出的值做边条件得到的风场与实际风场基本吻合,只是风速值略大一些;采用零值做边条件得到的风场与实际风场相差较远,这是因为差分方程是边条件敏感的。

还可以得到另外一结论,在反演区域的上风方向反演效果比下风方向效果要好一些,这可能是因为在下风方向上计算网格的格距比上风方向的格距要大,因此数值差分的误差增大造成的。

## 5 结论

通过对比试验,可以看出:

①对于均匀风场,各种反演技术都比较实用。

②涡度-散度方法在反演复杂风场时有一定优势。

③简单伴随函数方法和 PAR 方法,尽管求解复杂,但结果不一定理想。

④VAP 方法简单,不但可以反演均匀风场,而且其反演结果还可以在其它反演方法中做为初始场或边界条件使用。

## 参考文献

- 1 Lhermitte, R. M., and D. Atlas, Precipitation motion by pulse Doppler, Preprints Ninth Weather Radar Conference, Amer. Meteor. Soc., 1961; 218~223.
- 2 宋春梅. 单部多普勒雷达对风暴探测技术的研究. 中国气象科学研究院硕士研究生毕业论文, 1990.
- 3 陶祖钰. 从单 Doppler 速度场反演风矢量场的 VAP 方法. 气象学报, 1992, 50: 81~90.
- 4 Xu, Q., C. J. Qiu and J. X. Yu. Adjoint-method retrievals of low-altitude wind fields from single-Doppler wind data. J. Atmos. & Oceanic Tech., 1994, 11: 579~585
- 5 Xu, Q., C. J. Qiu and J. X. Yu. Adjoint-method retrievals of low-altitude wind fields from single-Doppler reflectivity measured during Phoenix-1. J. Atmos. & Oceanic Tech., 1994, 11(2), Part. 1, 275~288.
- 6 Xu, Q. and C. J. Qiu. Simple adjoint methods for single-Doppler wind analysis with a strong constraint of mass conservation. J. Atmos. & Oceanic Tech., 1994, 11(2), Part. 1, 289~298.
- 7 吴绍荣. 单多普勒雷达资料水平风场反演的研究. 中国气象科学研究院硕士研究生毕业论文, 1994.
- 8 姜海燕. 一种新的单部多普勒雷达的反演技术. 中国气象科学研究院硕士研究生毕业论文, 1995.

## Contrast Experiments on Methods for Retrieving Two-Dimensional Wind from Single-Doppler Radar Data

Zhou Haiguang Zhang Peiyuan

(Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081)

### Abstract

Four methods for retrieving two-dimensional wind from single-Doppler radar data were introduced, they are the VAP method, rotation-divergence method, simple adjoint method, and the PAR method. Three experiments were conducted using simulated single-Doppler radar data to compare the methods. It is shown that different methods have different results. The root-mean-square errors of the tangential velocity and angle also support the main results.

**Key Words:** single-Doppler radar retrieval wind contrast experiment