

从单 Doppler 速度场反演风矢量 场的 VAP 方法*

陶 祖 钰

(北京大学地球物理系)

提 要

从单 Doppler 速度场反演风矢量场的 VAP (Velocity Azimuth Processing) 方法是在假定相邻方位角的风矢量相等的前提下, 从单部 Doppler 雷达所测得的各个距离圈上的径向速度随方位角分布的廓线推算风向和风速的方法。这个假定可以保证反演所得的风矢量场中仍保留次天气尺度的风场信息。

对 VAP 方法反演公式的误差分析表明, 反演出的风向误差为 20—30 度, 与常规测风的误差相近。风速误差一般为 10^0 m/s, 但在某些特定的情况下可达到与风速相同的量级 (10^1 m/s)。

用 VAP 方法反演风矢量场前必须首先消除原始 Doppler 速度资料中的脉动。它可以通过简单的一维线性平滑实现。

文中给出了一个反演实例, 从中可以分析出次天气尺度的切变线和辐合线。常规天气图和 UHF 雷达的风廓线观测表明, 这些次天气尺度系统是存在的。它们与反射率因子分布的配置还表明这些次天气尺度系统是和降水相联系的。

一、引 言

众所周知, Doppler 雷达只能测得径向速度分量。为了获得水平风矢量场, 必须用两部或三部 Doppler 雷达同时进行观测^[1]。由于 Doppler 雷达价格昂贵, 不少气象工作者致力于从单部 Doppler 雷达的观测中提取水平风场信息。Lhermitte 和 Atlas (1961) 提出了 VAD (Velocity Azimuth Display) 方法^[2]。这种方法只能从单 Doppler 速度场反演出平均风向和风速。Caton (1963)^[3], Browning 和 Wexler (1968)^[4] 在风场线性分布的假定下, 从单 Doppler 速度场中进一步提取出风场的平均散度、伸长变形和切变变形。为了从单 Doppler 速度场反演出风矢量场, Waldteufel 和 Corbin (1979) 提出了 VVP (Volume Velocity Processing) 方法^[5]。Koscielny, Doviak 和 Rabin (1982) 用简化的 VVP 方法 (假设每个分析体积中的风矢量均一) 反演出一个静止锋形势下的行星边界层风场^[6]。VVP 方法要求进行多达七个仰角的立体扫描, 并要对每个约为 30 度的扇形体积中的数千个数据进行最小二乘法拟合。无论在观测还是资料处理方面, VVP 方法的工作量都非常大, 而反演出来的风场的空间分辨率却只有 10^1 km。因此, 在中尺度气象的研究

* 本文于 1990 年 8 月 10 日收到, 1990 年 10 月 28 日收到修改稿。

和超短时预报中, VVP 方法至今尚未得到广泛应用。

本文将提出一个从单部 Doppler 雷达测得的径向速度随方位分布中反演风矢量场的 VAP (Velocity Azimuth Processing) 方法, 并从理论上讨论了此方法的误差和指出对原始 Doppler 速度资料进行预处理的必要性。最后给出一个反演的实例, 并将它和其它资料进行了对比, 证明反演的结果是合理的。

二、反演原理

如果水平风矢量 V 用矢量的大小 V 和矢量的方向与向径之间的夹角 α 来表示, 并规定从向径方向到风矢量方向为顺时针方向转动时, $\alpha > 0$ (如图 1 所示), 则水平风矢量和水平径向速度 C 之间有下列关系式:

$$C = -V \cos \alpha \quad (1)$$

由于 α 的取值范围为 $(-\pi, \pi)$, 故 $C > 0$ 表示趋近雷达的运动, $C < 0$ 为远离雷达的运动¹⁾。

只要假定在同一距离圈上, 相邻方位角两点的风矢量相同, 即可从 (1) 式导出从水平径向速度反演风矢量的公式。相邻方位角两点间的距离 $\Delta d = r \times \Delta\theta$ (r 为距雷达的距离)。本文所用的资料取自京津冀中尺度气象试验基地的 CAMS Doppler 雷达。其相邻方位角 $\Delta\theta = 1^\circ$, 最大不模糊距离为 150 km, 故 Δd 不大于 2.6 km。因此, 上述假定能够满足分析 $10^1 - 10^2$ km 的次天气尺度系统的要求。

在上述假定下, 很容易导出从相邻方位角水平径向速度的差异计算风矢量的公式。设 A, B 两点分别与 O 点相邻 1° 方位角。其水平径向速度分别为

$$C_1 = -V \cos \alpha_1, \quad C_2 = -V \cos \alpha_2 \quad (2)$$

从图 1 不难看出

$$\alpha_1 = \alpha + \Delta\theta, \quad \alpha_2 = \alpha - \Delta\theta$$

利用三角函数的加法公式, (2) 式可展开成

$$\begin{cases} C_1 = -V(\cos \alpha \cos \Delta\theta - \sin \alpha \sin \Delta\theta) \\ C_2 = -V(\cos \alpha \cos \Delta\theta + \sin \alpha \sin \Delta\theta) \end{cases} \quad (3)$$

当雷达天线的仰角很小时, 如 1 度, 则所测得的 Doppler 速度 v_r 和水平径向速度 C 之间的差异不到 2%。因此, (3) 式中的 C_1 和 C_2 可以用低仰角的 Doppler 速度 v_{r_1} 和 v_{r_2} 代替。于是便可从 (3) 式解出计算风矢量相对于向径的偏角 α 和风速 V 的表达式:

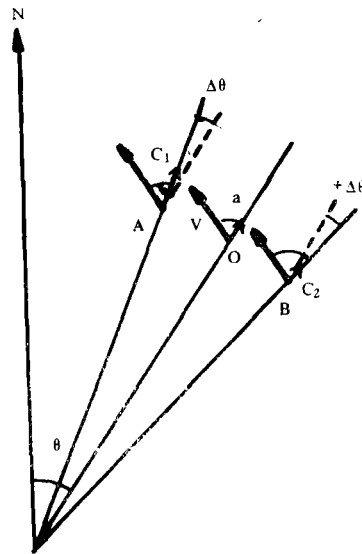


图 1 风矢量 V 和水平径向速度 C 之间的关系

1) 以上定义是为了和原始 Doppler 速度资料中大于零的值表示趋近运动相一致。

$$\tan\alpha = -\frac{v_r - v_{r_2}}{v_{r_1} + v_{r_2}} \cot\Delta\theta \quad (4)$$

$$V = \left| \frac{v_r + v_{r_2}}{2\cos\alpha\cos\Delta\theta} \right| \quad (5a)$$

或

$$V = \frac{v_{r_1} - v_{r_2}}{2\sin\alpha\sin\Delta\theta} \quad (5b)$$

只要知道每个距离圈上 Doppler 速度 v_r 随方位角的分布廓线, 就可以按(4)和(5)式计算出各方位上的风矢量。为此, 把上述方法简称为 VAP (Velocity Azimuth Processing)。

必须指出, 由于反正切函数的主值范围为 $(-\pi/2, \pi/2)$, 不同于(1)式中 α 的范围 $(-\pi, \pi)$, 因此在计算风矢量 $\mathbf{V} = u\mathbf{i} + v\mathbf{j}$ 的 u, v 分量时, 必须按如下公式计算:

当 $v_{r_1} + v_{r_2} < 0$ 时,

$$u = V \sin(\theta + \alpha)$$

$$v = V \cos(\theta + \alpha)$$

当 $v_{r_1} + v_{r_2} > 0$ 时,

$$u = V \sin(\theta + \pi + \alpha)$$

$$v = V \cos(\theta + \pi + \alpha)$$

其意义相当于当 Doppler 速度为趋近运动时, 向径的方向为指向雷达, 如图 2 所示。

从(1)、(4)、(5)式还可以得出一些分析 Doppler 速度场的定性规则:

1 根据(1)式, 当 $V \neq 0$ 而 $v_r = 0$ (即 $C = 0$) 时, $\alpha = \pm\pi/2$ 。因此, Doppler 速度为零处的风向和该处的向径垂直 (如图 3 所示)。

2 根据(4)式, 当 $v_{r_1} + v_{r_2} \neq 0$, 而 $v_{r_1} - v_{r_2} = 0$ 时, $\alpha = 0$ 。由于在 Doppler 速度的极值中心两侧, $v_{r_1} \approx v_{r_2}$, 因此 Doppler 速度极值处的风向应和向径平行, 且 $V = |v_r|$ 。

3 根据(4)式, 当 v_{r_1} 和 $v_{r_2} > 0$, 若 $v_{r_1} > v_{r_2}$, 则 $\alpha < 0$; 若 $v_{r_1} < v_{r_2}$, 则 $\alpha > 0$ 。因此在 Doppler 速度场的趋近中心处 $\partial\alpha/\partial\theta < 0$, 即在趋近运动中心两侧的风向相对于向径有向外辐散的特征。同理, 在远离中心两侧的风向有相对于向径向内辐合的特征。由于 $|\tan\alpha| \propto |v_{r_1} - v_{r_2}|$, 因此 Doppler 速度中心两侧的切向梯度越大, 风向的辐合或辐散越显著。

4 根据(5)式, V 和 $|v_{r_1} - v_{r_2}|$ 成正比, 因此在 Doppler 速度切向梯度大的地方, 风速较大。

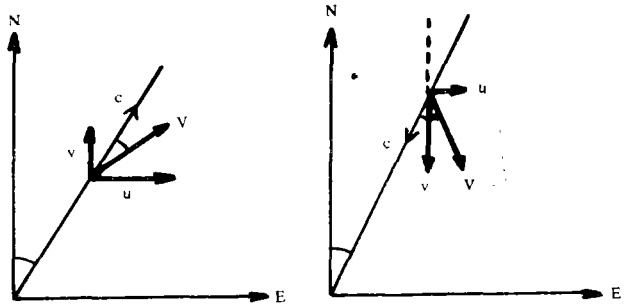


图 2 风矢量 \mathbf{V} , 径向速度 C 和 u, v 分量之间的关系

三、误差分析和资料的预处理

在用 VAP 方法反演风矢量场前, 有必要先讨论一下(4)和(5)式对 Doppler 速度观

测误差的敏感性。首先讨论风矢量方向对误差的敏感性。(4)式可改写成

$$\alpha = \arctg x$$

其中

$$x = \frac{v_{r_1} - v_{r_2}}{v_{r_1} + v_{r_2}} \cot \Delta \theta$$

由微分公式可知

$$d\alpha = \frac{1}{1+x^2} dx \quad (6)$$

由于 $1/(1+x^2)$ 恒小于 1, 故风向 α 对 v_r 的误差不敏感。例如取 $v_{r_1} + v_{r_2} = 20$ m/s, 根据 CAMS Doppler 雷达的测速精度 0.2 m/s, 取 $v_{r_1} - v_{r_2}$ 分别为 0.5 和 0.7 m/s, 则由(6)式计算出来的 $d\alpha$ 值为 20° 到 30° 。可见, VAP 方法反演出来的风向误差和常规高空风观测的风向误差相近。

其次讨论风速对误差的敏感性。将(5a)和(5b)式分别对 $(v_{r_1} + v_{r_2})$ 和 $(v_{r_1} - v_{r_2})$ 求微分可得

$$dV = \frac{1}{2\cos\alpha\cos\Delta\theta} d(v_{r_1} + v_{r_2}) \quad (7a)$$

$$dV = \frac{1}{2\sin\alpha\sin\Delta\theta} d(v_{r_1} - v_{r_2}) \quad (7b)$$

按照 v_r 的测量精度可知, $d(v_{r_1} + v_{r_2})$ 的量级为 10^{-1} m/s。由(7a)式可知, 风速误差 dV 的量级取决于 $1/(2\cos\alpha\cos\Delta\theta)$ 的量级, 其中 $\cos\Delta\theta \approx 1$ 。当 $|\alpha| \leq 87^\circ$ 时, $2\cos\alpha\cos\Delta\theta$ 的量级为 10^{-1} 到 10^0 , 故 dV 的量级为 10^{-1} — 10^0 m/s。可见, 在大多数情况下, V 对 v_r 的误差也不敏感, 按(5a)式反演出来的风速误差和常规高空风观测的风速误差相近。但是, 当 α 很接近 $\pm 90^\circ$ 时, 由于 $\cos\alpha$ 接近于零, 故 v_r 的观测误差将被强烈地放大, dV 的量级可达 10^1 m/s 以上。由(5a)式可知, 当 $\alpha \rightarrow \pm 90^\circ$ 时, 风速 V 将趋于无穷大。为了避免在用(5a)式反演风速时出现计算溢出现象, 必须规定一个临界值 α_c 。(例如取 $\alpha_c = 89.5^\circ$)。对于 $|\alpha| \geq \alpha_c$ 的点不反演其风速值。

在(7b)中, $\sin\Delta\theta$ 的量级为 10^{-2} , 因此 dV 对 $v_{r_1} - v_{r_2}$ 的误差非常敏感。而且当 $\alpha \rightarrow 0$ 时, 由于 $\sin\alpha \rightarrow 0$, V 将趋于无穷大。但是反演实例表明, 按(5a)式和(5b)式反演出来的风矢量场几乎完全相同。在 v_r 的极值处, 尽管 α 的值很小, 但反演出来的风速值 V 和 v_r 的值非常接近, 说明即使在 α 很小的情况下, 按(5b)式反演出来的风速仍是相当精确的。其原因是, 在 v_r 的极值处, 由于 $v_{r_1} - v_{r_2}$ 接近于零, 由(4)式可知反演所得的风向有很高

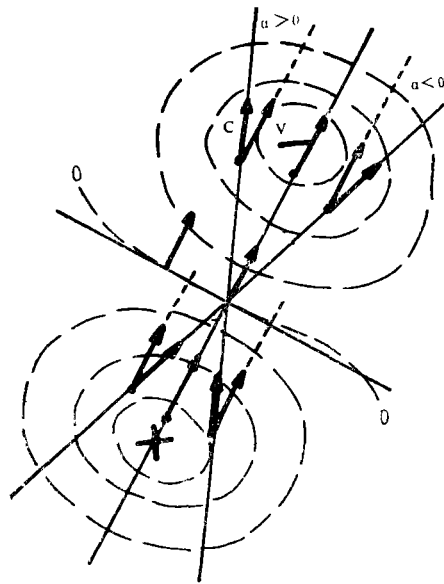


图 3 Doppler 速度极值附近风矢量相对于向径的偏角

的精度。同时由于如下面将要介绍的在反演前先对原始资料进行了平滑处理, 尽管此时 $\sin\alpha$ 的值非常小, 但是 $v_{r_1} - v_{r_2}$ 的值也非常小, 因此在 v_r 的极值附近按 (5b) 式反演所得的风速仍有较高的精度。当然, 在按 (5b) 式反演风速时, 为了避免出现计算溢出现象也需规定一个临界值 α_c (例如取 $\alpha_c = 0.5^\circ$)。

上述误差分析表明, Doppler 雷达的测速精度满足用 VAP 方法反演风矢量的要求, 反演出来的风矢量的误差和常规高空风观测的误差相近。但是, 实测 Doppler 速度资料中不仅包含 $10^1 - 10^2 \text{ km}$ 的次天气尺度的风场信息, 而且也包含尺度非常小的大气运动的信息, 如湍流。从图 4a 所给的 1989 年 7 月 21 日 20 时 43 分观测到的每隔 9.6 km 的十个距离圈上原始 Doppler 速度随方位角的分布廓线可见, v_r 的脉动非常明显。如 Doviak 等 (1984) 所指出的, v_r 的脉动是由湍流及大小雨滴降落速度不同等原因引起的^[1]。脉动使原始资料中 $v_{r_1} - v_{r_2}$ 的量级达到 10^0 m/s 。如果不消除脉动现象, 将使反演出来的风向发生严重的摆动, 风速将达到 10^2 m/s 的量级。

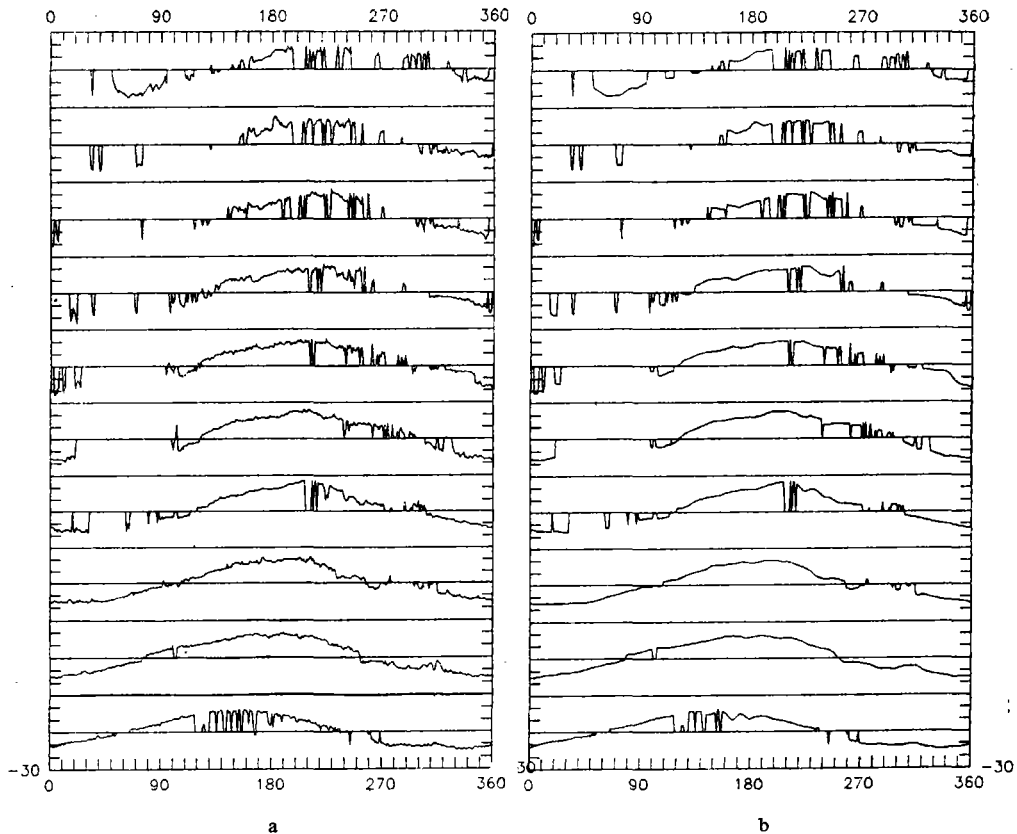


图 4 1989 年 7 月 21 日 20 时 43 分从 9.6 km 到 96.0 km (从下向上) 十个距离圈上的 Doppler 速度廓线
(a 为原始资料的廓线, b 为经过 9 次一维线性平滑后的廓线; 天线仰角 1° , 纵坐标上每一小格为 10 m/s , 横坐标上每一小格为 10°)

对原始 Doppler 速度场沿切线方向进行一维线性平滑即可消除廓线中的脉动现象。表 1 给出平滑 0—9 次的 $|v_{r_1} - v_{r_2}|$ 的平均值 $\overline{\Delta v_r}$ 。未平滑时 $\overline{\Delta v_r}$ 为 1.396 m/s 。随着平滑

表 1 Doppler速度廓线上 v_r 的偏差 $\overline{\Delta v_r}$ 随平滑次数 K 的变化

K	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$\overline{\Delta v_r}$ (m/s)	1.396	0.954	0.774	0.679	0.621	0.583	0.555	0.534	0.517	0.503

次数的增加, $\overline{\Delta v_r}$ 迅速减小。当平滑到 8 次时, $\overline{\Delta v_r}$ 已减小到 0.517 m/s, 且随着平滑次数的增加 $\overline{\Delta v_r}$ 的变化不到 0.02 m/s, 表明 v_r 的脉动已基本消除。

必须指出, 在 Doppler 雷达的速度观测中存在许多缺测点, 缺测点的 v_r 值都取为零。从图 4a 可见, 几乎在每个距离圈上都存在缺测现象, 有的是成片的, 有的是孤立的。为了避免缺测记录通过平滑过程影响周围 v_r 的分布特征, 凡是 $v_r=0$ 的点均不参与平滑。从图 4b 可见, 平滑 9 次后的廓线在缺测点仍保持为零, 而在 $v_r \neq 0$ 的区域, 廓线中已看不到脉动现象, 而 v_r 随方位角分布的尺度为 10^1-10^2 km 的特征仍得以保持。

四、反演实例和讨论

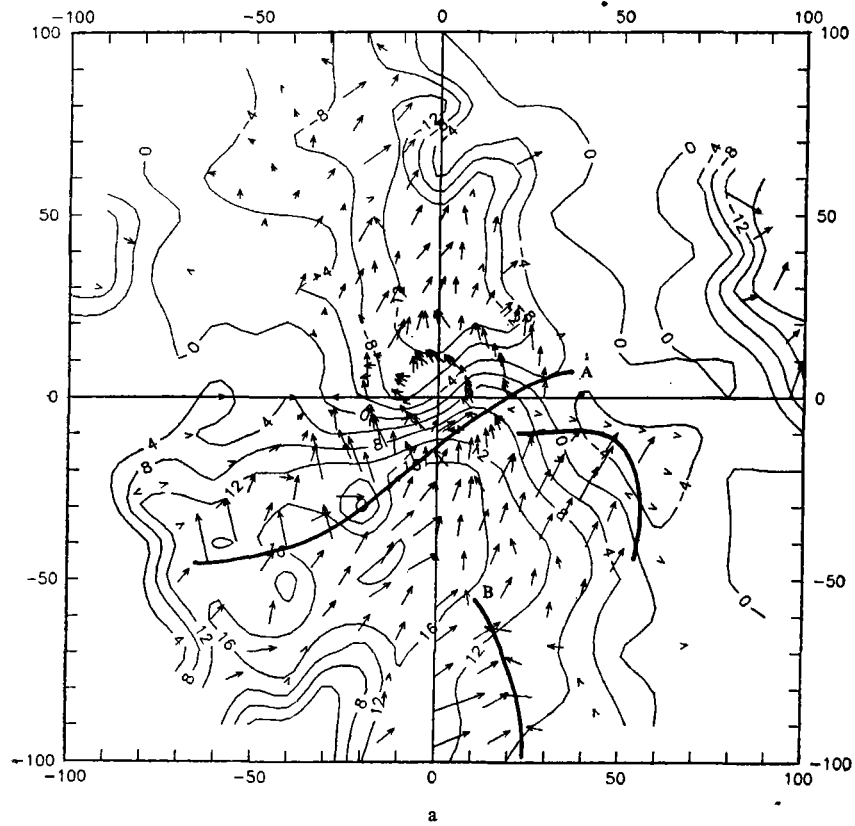
图 5 为根据图 4b 中的 Doppler 速度分布廓线用 VAP 方法反演得到的风矢量场。必须指出, 由于观测时天线的仰角为 1° , 10 个距离圈所对应的高度是不同的, 如表 2 所示。因此, 图 5 中的风矢量反映了 168 m 到 1676 m 高度间的风场结构。

为了考察反演结果是否反映了实际风场, 有必要将它和常规天气资料及 UHF 风廓线资料进行比较。UHF 雷达位于 CAMS Doppler 雷达以南约 20 km。

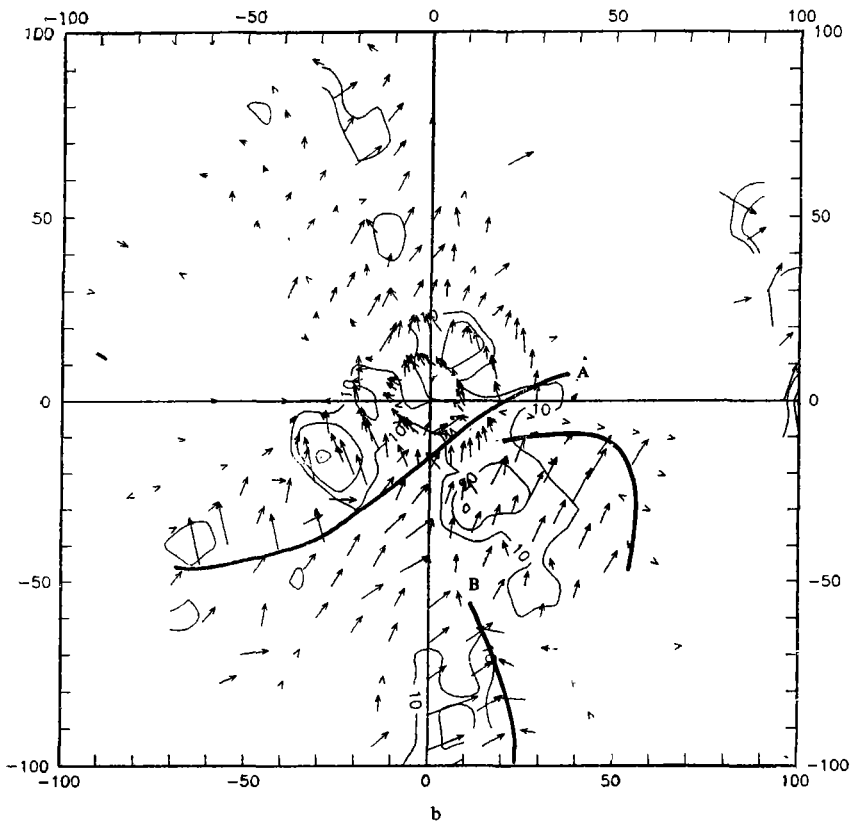
表 2 图 4 中 10 条廓线的距离圈及其对应高度

距 离 圈	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
距离(km)	9.6	19.2	28.8	38.4	48.0	57.6	67.2	76.8	86.4	96.0
高度(m)	168	335	503	671	838	1006	1173	1341	1509	1676

从图 6a 所给的 7 月 21 日 20 时 850 hPa 图可见, 北京位于河套低涡和西太平洋副热带高压之间的偏南气流中。反演出来的风矢量也基本上为 SSW 风。此反演结果是由图 5a 中 Doppler 速度的趋近区和远离区大致与原点对称及零线通过原点呈 300° 到 120° 走向的特征所决定的。在图 4 中也可以看到, 从 38.4 到 76.8 km 的 7 条廓线上零点的方位角都在 120° 和 300° 附近。它也表明高度 1000 m 附近的风向均为 SSW 风。但是在 9.6 km 距离圈上, 零点位于 60° 和 240° 附近, 同时图 5a 中原点附近的零线也相应地呈 WSW—ESE 走向。因此, 原点附近反演出来的风矢量(反映 200 m 以下近地面层中的风)也有偏东分量。它与图 6 b 所给的地面图上北京附近为偏东风相符。在图 4 中还可看到 19.2 和 28.8 km 圈上, 零点位于 $80-90^\circ$ 和 $260-270^\circ$ 附近, 因此反演出来的风矢量也相应地近于南风(代表 300—500 m 高度间的风向)。上述风矢量方向的垂直结构, 在图 6 c 所给的 19 时 00 分的 UHF 雷达测得的垂直方向风廓线图上可以得到证实。



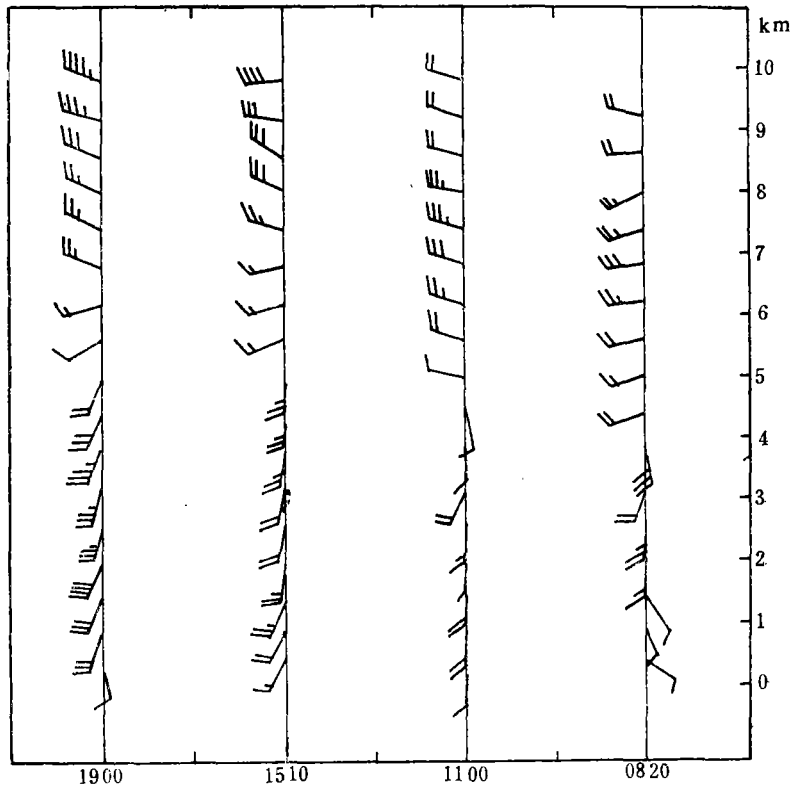
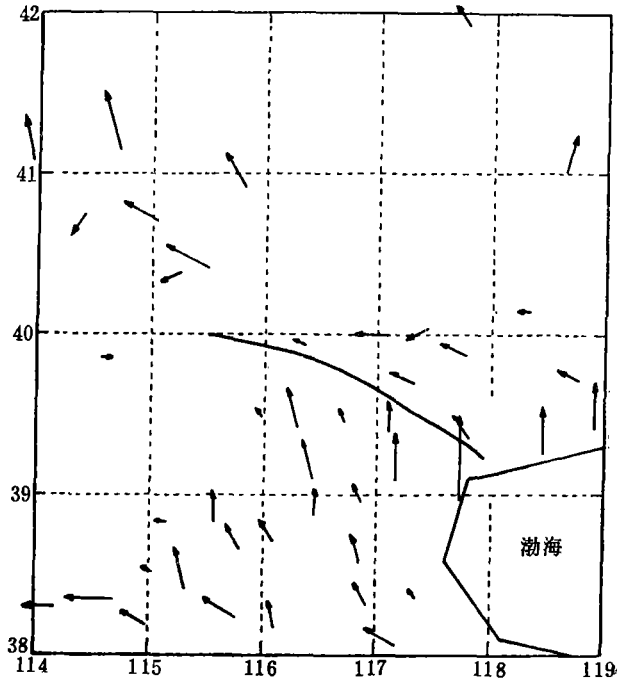
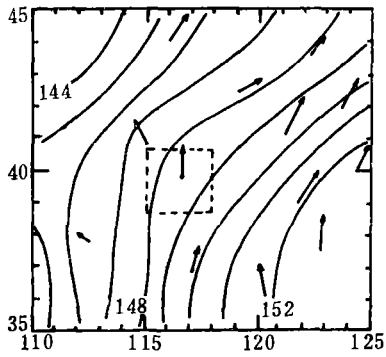
a



b

图 5 根据图 4(b)反演的 100 km 范围内的风矢量场
(a) 中的等值线为 Doppler 速度，间隔为 4 m/s。b 中的等值线为大于 10 dBz 的反射率用

图 6 1989年7月21日20时的850 hPa图(a)、地面图(b)及08时20分到19时00分的UHF垂直风廓线图(c)



值得特别指出的是,在图 5 的风矢量场上还可以分析出 A, B 两条风向不连续线。A 为由 SW 风和 SSE 风构成的暖锋式切变线,它位于雷达以南 30—50 km 之间。B 为由 WSW 风和 SE 风构成的辐合线,它位于雷达以南 70—100 km 之间。根据第二节中所指出的 Doppler 速度极值附近风向相对于向径的偏角的规律可知, A 和 B 这两条风向不连续线是分别由图 4 的廓线上 180° 到 230° 附近的极大值及 170° 附近的一个相对极小值区所决定的。在图 6 b 的地面图上,北京以南 30 km 左右的一条 E-W 走向的暖锋式切变线证实了不连续线 A 确实存在,虽然由于两者不在同一高度上,因此其走向及其两侧的风向并不完全相同。由于高空风测站间的距离太大,在 850 hPa 图上(图 6 a)分析不出这条暖性切变线。但是,在图 6 c 所给的 UHF 风廓线随时间的变化中,可以从 1500 m 以下的风向有 SSE 到 SSW 之间的转变推断在行星边界层中确有暖锋式切变线活动。

从图 5 b 所给的反射率因子分布还可以发现, A, B 两条风向不连续线均与较强的雷达回波相配合。它进一步表明反演出来的风矢量场所揭示的次天气尺度系统与降水密切相关。切变线 A 是引起北京地区降水的系统。辐合线 B 则可能是中尺度对流系统在流场上的反映。

此外,在雷达东南方 20—40 km 间还有一块中心强度超过 30 dBz 的回波。在其前沿,也可看到风矢量场的不连续现象。它发生在图 5 a 中一个 $v_r < -4$ m/s 的远离运动区中,因此也符合第二节中的规律之三。但是由于这条不连续线位于资料缺测区附近,所以在图 4 的 48.0 和 57.6 km 的廓线上仅表现为在 $100-110^\circ$ 方位间有一个小范围的 v_r 负值区。

我们用 VAP 方法对 1989 年 5 月 31 日到 8 月 19 日的 6 次降水过程中京津冀中尺度气象试验基地观测到的 20 个 Doppler 速度场进行了反演。结果表明,用 VAP 方法反演出来的风矢量场除了能揭示上述实例中的暖锋式切变线和辐合线外,还可揭示出冷锋和飚线的中尺度流场结构。由于篇幅所限本文中不再给出。总之从经过一维线性平滑后的 Doppler 速度场用 VAP 方法反演出来的风矢量场是合理的。它可以揭示出与降水相联系的 10^1-10^2 km 的中尺度流场系统。

五、结 论

1 VAP 方法是在假定相邻方位角风矢量相等的前提下,从低仰角测得的 Doppler 速度随方位角分布的廓线反演风矢量场的简便而有效的方法。反演出来的风场中保留了 10^1-10^2 km 尺度的风场结构。它可以用于对 Doppler 雷达观测结果进行中尺度流场的实时分析。

2 对反演公式的误差分析和对反演实例的考察都表明用 VAP 方法揭示出来的中尺度系统是可信的,并且是与降水相联系的。

3 在用 VAP 方法反演风矢量场前,必须首先消除原始 Doppler 速度资料中的脉动,它可以通过一维线性平滑实现。

致谢:作者感谢北京大学毛节秦同志提供的宝贵意见及中国气象科学研究院葛润生、张沛源和石定朴等同志为本研究提供的资料和帮助。

参 考 文 献

- 1] Doviak, R. J., and D. S. Zrnic, Doppler radar and weather observations, Academic Press, 1984.
- [2] Lhermitte, R. M., and D. Atlas, Precipitation motion by pulse Doppler, Preprints Ninth Weather Radar Conf., Amer. Meteor. Soc., 218-223, 1961.
- [3] Caton, P. G., The measurement of wind and convergence by Doppler radar, Preprints Tenth Weather Radar Conf., Amer. Meteor. Soc., 290-296, 1963.
- [4] Browning, K. A., and R. Wexler, The determination of kinematic properties of a wind field using Doppler radar, *J. Appl. Meteor.*, 7, 105-113, 1968.
- [5] Waldteufel, P., and H. Corbin, On the analysis of single Doppler data, *J. Appl. Meteor.*, 18, 532-542, 1979.
- [6] Koscielny, A. J., R. J. Doviak and R. Rabin, Statistical considerations in the estimation of divergence from single-Doppler radar and application to prestorm boundary-layer observations, *J. Appl. Meteor.*, 21, 197-210, 1982.

THE VAP METHOD TO RETRIEVE THE WIND VECTOR FIELD BASED ON SINGLE-DOPPLER VELOCITY FIELD

Tao Zuyu

(Department of Geophysics, Peking University)

Abstract

Under the assumption that the wind vectors of two contiguous azimuth are same, the VAP (Velocity Azimuth Processing) method is proposed to retrieve the wind vector field from the distributions of Doppler velocity on the distance circle. The information of sub-synoptic scale can be maintained in the retrieved wind field. The error analysis indicates that the error of retrieved wind direction is about 20 to 30 degree, and the scale of the wind speed error is 10^0 m/s (it could reach to 10^1 m/s in special situation). The pulsation in the original data of Doppler velocity has to be removed before the retrieval. It can be brought into being by one-dimension linear smooth.

The shear line and convergent line with sub-synoptic scale are revealed in a case of retrieved wind field and confirmed by the synoptic charts and the wind profile observed by UHF radar. The disposition of radar echo in the retrieved wind field suggests that the rainfall is associated with those mesoscale synoptic systems.