

改善 EVAD 技术求解散度的方法

陶 珏¹⁾ 汤达章¹⁾ 肖稳安¹⁾ 夏文梅²⁾

¹⁾(南京气象学院电子工程系, 南京 210044)

²⁾(江苏省气象局, 南京 210008)

摘 要

详细介绍了改善 EVAD 技术中测量水平散度的方法,用 Sirmans 建议的技术来模拟降水回波信号,通过此方法对模拟的含有 0,1,2,3 阶谐波的非线性风场加噪声,得到近于真实的多普勒速度场,并用此速度场得到的水平散度和以前的 EVAD 算法(Srivastava 算法和 Thomas 算法)的水平散度相比较,结果表明:无论在非全方位不均匀采样、非全方位均匀采样、不同信噪比、不同速度谱宽条件下,文章建议的 EVAD 方法求得的水平散度精度有明显的提高。

关键词: EVAD 算法 数值模拟 权重函数

引 言

众所周知, VAD 技术在水平风场为线性分布的假定条件下,从一阶谐波系数中得到平均风向风速,从二阶谐波系数得到平均水平弹性形变和切变形变,并且在任何水平呈线性和非线性分布的风场, VAD 技术都可以提取出零阶谐波项的系数 a_1 ^[1~4], 已经过 Srivastava^[5]和 Matejka^[6]证明:任何含有小于四阶谐波的风场,零阶谐波项的系数 a_1 本身包含两项,即平均水平散度和降水质点相对于大气的垂直速度 V_f , 如式(1)所示:

$$\frac{2a_1}{r \cos \alpha} = \overline{\text{div } V_h} - \overline{V_f} \frac{2 \sin \alpha}{r \cos \alpha} \quad (1)$$

由上式可见,由 a_1 不能直接得到水平散度,而且,其中 V_f 实际上是大气垂直速度 W 和有效照射体积内不同大小粒子在静止大气中的平均下落末速度 W_0 之和,即使可准确得到 V_f ,但仍不能得到 W 。为此,许多人都想从 a_1 中提取出水平散度,通过连续方程估计出大气的垂直速度 W ,其中 Srivastava^[5]提出了提取水平散度的方法,即 EVAD 技术,他假定在某一水平层内水平散度和垂直速度 V_f 不变,用最小二乘法,从 VAD 分析中得到的零阶谐波项 a_1 中分离出水平散度和降水质点相对于大气的垂直速度 V_f ,但由于此方法假设条件有问题,且违背了回归变量的方差在独立变量的范围内为一常数的最小二乘法的基本假定,故分离水平散度的效果不好。为此, Matejka^[6]在 Srivastava 的基础上提出了用带有权重的最小二乘法分离水平散度的 EVAD 技术,分离的效果有所改善,但在信噪比较小、速度谱宽较宽的条件下,还存在明显的误差,为此,本文提出了另一个权重函数,应用模拟信号技术,对模拟的多普勒速度场进行数值实验,数值实验表明,本方法在

信噪比较小,速度谱宽较宽的条件下,对水平散度有明显的改善。

1 基本原理及计算方法

1.1 EVAD 算法

EVAD 分析分两步:①进行 EVAD 分析的第一步是在含有 0,1,2,3 阶谐波的非线性风场的假设下,应用单多普勒雷达采集的速度资料,在每一个距离圈上对 V_r 进行谐波分析,可得不同仰角上每个距离圈的零阶谐波项 a_1 及 a_1 的方差 $\text{var}(a_1)$ 。②3 种算法的最小二乘回归求平均水平散度。EVAD 分析假设在水平薄层内,水平散度和垂直速度为常数,故 EVAD 分析是在一定厚度的水平层上进行的,薄层的厚度至少应该与沿着波束的数据间隔一样厚,通常 Δh 取在 150~1000 m(本文 Δh 为 300 m),将速度资料按 Δh 垂直分层。根据公式(1),

$$\text{令} \quad \frac{2a_1}{r \cos \alpha} \equiv Y, \text{ 则: } \hat{Y} = \sum_{i=1}^2 p_i g_i \quad (2)$$

其中 $p_1 = \overline{\text{div } V_h}$, $p_2 = \overline{V_f}$, $g_1 = 1$, $g_2 = -2 \sin \alpha / (r \cos \alpha)$ 。利用在每一水平层内不同仰角和半径的资料以及第一步中得到的每一水平层内不同仰角上每一个距离圈上的零阶谐波项 a_1 及 a_1 的方差 $\text{var}(a_1)$,对式(2)进行最小二乘回归得到的系数 p_i 的解为:

$$p = P^{-1} q \quad (3)$$

用式(3)便能计算出每一水平层的 p_1 ,即每一水平层的平均水平散度 $\overline{\text{div } V_h}$ 。

Srivastava 等人提出的 EVAD 算法中,系数 p_i 的解式(3)是对式(2)进行不带权重的最小二乘回归得到的,式(3)中:

$$q_i = \sum_{k=1}^M g_i(a_k, r_k) Y(a_k, r_k) \quad i = 1, 2$$

$$P_{i,j} = \sum_{k=1}^M g_i(a_k, r_k) g_j(a_k, r_k) \quad i = 1, 2; j = 1, 2$$

Matejka 和本文建议的 EVAD 算法中,系数 p_i 的解式(3)都是对式(2)进行带权重的最小二乘回归得到的,式(3)中:

$$q_i = \sum_{k=1}^M Y_k g_i(a_k, r_k) Y(a_k, r_k) \quad i = 1, 2$$

$$P_{i,j} = \sum_{k=1}^M Y_k g_i(a_k, r_k) g_j(a_k, r_k) \quad i = 1, 2; j = 1, 2$$

M 为这一层内距离圈的总数, Y_k 为这一层内第 k 个距离圈的权重。但这两种算法的权重函数不同。Matejka 的权重函数为:

$$Y_k = \frac{1}{\text{var}(Y_k) n_k} = \frac{r_k^2 \cos^2 \alpha_k}{4 \text{var}(a_1)_k n_k} \quad (4)$$

其中, $r_k = R_k \cos \alpha_k$, R_k 为这一层内第 k 个距离圈的径向距离, α_k 为这一层内第 k 个距离圈所在的高度仰角, n_k 为这一水平层内第 k 个距离圈所在仰角上的距离圈总数。

本文在 Matejka 的权重函数的基础上,对其中的 n_k 和 $\text{var}(a_1)$ 进行了两点改善,即,

用 Δz_k 代替 n_k , 且对 Thomas 的权重中的 $\text{var}(a_1)$ 设定一个阈值 α_k 。改善后的权重函数为:

$$Y_k = \frac{1}{\text{var}(Y_k) \Delta z_k} = \frac{r_k^2 \cos^2 \alpha_k}{4 \text{var}(a_1)_k \Delta z_k} \quad (5)$$

其中, $\Delta z_k = |h_k - h'|/h_0$, h_k 为这一水平层内第 k 距离圈所在的垂直高度, h' 为这一层的中心所在的高度, h_0 为薄层厚度的一半, 即 $h_0 = \Delta h/2$, 当 $\Delta z_k = 0$ (即 $h_k = h'$) 时, 这一层内第 k 距离圈的权重就等于第 k 圈所在仰角上第 $k-1$ 圈和第 $k+1$ 圈的权重的算术平均, 即 $Y_k = (Y_{k-1} + Y_{k+1})/2$ 。这里有两个原因表明为什么要对 Matejka 的权重函数中的 n_k 和 $\text{var}(a_1)$ 进行改善。第一, Srivastava 的 EVAD 分析是在某一水平层内进行的, 很明显, 在有一定厚度的水平层内, 低仰角探测的距离圈数比高仰角的多, 所以在进行最小二乘时, 低仰角的影响大。为此, Matejka 将 n_k 考虑到权重中去, 但 $1/n_k$ 只是对一层内同一仰角上的距离圈的算术平均, 而不是对一层内所有距离圈的加权平均, 所以对其进行了改善。而且, 由于 Srivastava 假定在某一水平层内, 水平散度保持不变, 然而在实际中, 水平层内的水平散度是变化的, 故为了补偿假定条件的影响, 在水平层内, 取某一高度的水平散度做为标准, 本文以这一层的中心所在高度上的水平散度为标准, 由距离权重 $1/\Delta z$ 作为每一个距离圈的权重, 使靠近水平层中心的距离圈上的权重大, 而远离中心的距离圈上的权重小, 从而补偿了假定的影响。第二, 虽然 Matejka 把方差 $\text{var}(a_1)$ 考虑到权重中去, 但是当某距离圈上的方差很大时, 即表明此距离圈上的数据质量太差, 则这个距离圈上的权重非常小, 在这种情况下, 完全可以将这个距离圈从此层中去掉。故将数据质量差的距离圈从此层中去掉, 然后再进行有权重的最小二乘回归。所以, 对 Matejka 权重中的 $\text{var}(a_1)$ 设定一个阈值 α_k , 即:

$$\alpha_k = \sqrt{\sum_{k=1}^M |\text{var}(a_1)_k - \overline{\text{var}(a_1)}|^2 / M} \quad \overline{\text{var}(a_1)} = \sum_{k=1}^M \text{var}(a_1) / M$$

其中, $\text{var}(a_1)_k$ 为某一水平层内第 k 个距离圈上 a_1 的方差, $\overline{\text{var}(a_1)}$ 为这个水平层内所有距离圈上 a_1 的方差的算术平均。对这一层内每一个距离圈都求出 $\Delta \text{var}(a_1)_k = |\text{var}(a_1)_k - \overline{\text{var}(a_1)}|$, 将这一层内 $\Delta \text{var}(a_1)_k \leq \alpha_k$ 的距离圈保留, 而把 $\Delta \text{var}(a_1)_k > \alpha_k$ 的距离圈都删除后, 再对这一层内剩下的距离圈, 用本文建议的权重函数进行最小二乘回归, 得到这一层的平均水平散度。本文将这种方法称为汤-陶法, 简称 T-T 法。

本文通过模拟降水回波信号的方法来验证此方法, 故下面根据文献[7]介绍一下模拟降水回波信号的基本理论。

1.2 回波信号模拟的基本理论

① 模拟信号的采样

降水回波的功率谱密度通常呈高斯谱分布, 而谱分析的信号是离散的谱信号, 必须对原谱进行离散化, 用采样公式可得到离散谱序列 $\{S_n\}$ 。以 $V_r = 11 \text{ m/s}$, 即径向速度 V_r 所对应的多普勒频率 $f_0 = 120 \text{ Hz}$ ($f_0 = 2 V_r / \lambda$, 波长 $\lambda = 10 \text{ cm}$), 频率谱宽 $\sigma_f = 40$ (或速度谱宽 $\sigma_v = 2 \text{ m/s}$), Nyquist 频率 $F_n = 256 \text{ Hz}$ 为例, 图 1 是在原谱的基础上取信噪比 $\text{SNR} = 40 \text{ dB}$ 时得到的。

② 模拟信号加噪

为了使模拟出的时域信号尽可能符合实际情况,需要对采样后的离散谱附加一定信噪比的白噪声,用加噪公式可得到加噪后的离散功率谱 $\{P_n\}$,如图1所示(其中 P 为加噪后的离散功率谱值, P_{\max} 为最大的功率谱值)。

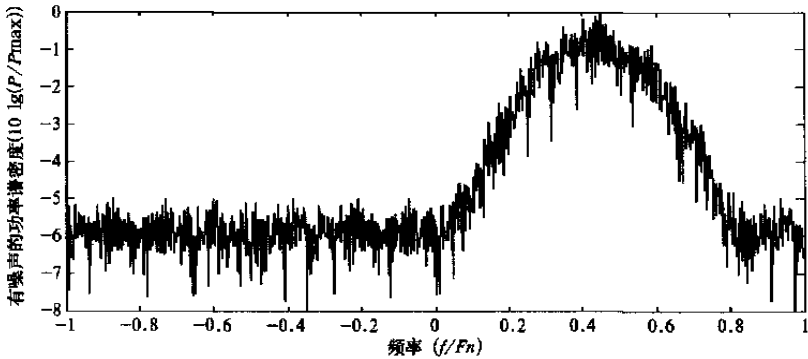


图1 径向速度 V_r 为 11 m/s(即对应的多普勒频率 f_0 为 120 Hz, 速度谱宽 σ_v 为 2 m/s)时,附加 40 dB 信噪比($SNR = 40$ dB)白噪声后的离散功率谱密度图(其中 Nyquist 频率 $F_n = 256$ Hz)

③ 附加相位谱

对实谱序列附加上相位谱,考虑到噪声的随机性,附加的是 $[0, 2\pi]$ 区间上概率均匀分布的随机相位谱,得到的复谱序列,再进行反傅立叶变换,得到回波的时域信号。

①~③的具体做法和其中用的公式见文献[7]。

④用加噪后的时域信号,根据文献[7]中的脉冲对处理法(PPP法)得到加噪后的径向速度

模拟风场的每一个径向速度所对应的多普勒频率 f_d ($f_d = 2 V_r / \lambda$) 做为模拟回波信号的平均多普勒频率 f_0 ,按照上述①~③步骤对模拟风场的每一个径向速度加不同信噪比和不同速度谱宽的噪声,模拟出每一个径向速度的带噪声的回波信号,最后按④将模拟的回波信号还原成径向速度,从而模拟得到带有噪声的径向速度。

2 数值模拟试验及结果分析

2.1 数值模拟试验

为比较 Srivastava、Matejka 和本文建议的 T-T 法得到的水平散度的精度,本文进行了数值模拟试验。

首先,考虑到 EVAD 算法中径向速度展开的傅氏级数中含有方位角 θ 的 0, 1, 2, 3 阶谐波项,本文设计模拟风场含有 0, 1, 2, 3 阶谐波,此风场的水平风场呈非线性分布。令 u, v 分量符合含有 θ 的 0, 1, 2, 3 阶谐波的非线性分布条件,将它们分别对雷达中心进行泰勒展开,则有

$$u = u_0 + u_x x + u_y y + \frac{1}{2} u_{xx} x^2 + u_{xy} xy + \frac{1}{2} u_{yy} y^2$$

$$v = v_0 + v_x x + v_y y + \frac{1}{2} v_{xx} x^2 + v_{xy} xy + v_{yy} y^2$$

$$x = r \sin \theta, y = r \cos \theta, r = R \cos \beta$$

式中的 θ 、 β 分别为方位角、高度仰角, R 为径向距离, u_0, v_0 以及 u, v 的各阶偏导数均在扫描中心取值。模拟风场的特征参量如表 1 所示。将上述公式带入下式:

$$V_r(r, \theta) = v \cos \theta \cos \beta + u \sin \theta \cos \beta - V_f \sin \beta, V_f = W + W_0$$

再由表 1 的特征参量可得到全方位角上径向速度模拟场。此模拟风场是按美国标准探测模式即在 14 个高度仰角 β 上进行模拟,方位角按采样间隔为 1° 的均匀采样进行模拟,并且在每条径向上每隔 150 m 模拟一个径向速度资料库,共 100 个资料库。

表 1 模拟含 0, 1, 2, 3 阶谐波的非线性风场的特征参量

模拟风场	u_0 ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	v_0 ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	u_x (10^{-5}s^{-1})	u_y (10^{-5}s^{-1})	v_x (10^{-5}s^{-1})	v_y (10^{-5}s^{-1})	u_{xx} (10^{-10}s^{-2})
	5.0	4.3	1	1	1	1	1
模拟风场	u_{xy} (10^{-10}s^{-2})	u_{yy} (10^{-10}s^{-2})	v_{xx} (10^{-10}s^{-2})	v_{xy} (10^{-10}s^{-2})	v_{yy} (10^{-10}s^{-2})	V_f ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	$\text{div } V_h$ (10^{-5}s^{-2})
	1	1	1	1	1	2	2

其次,本文设计的非线性风场,是通过某一固定距离圈上对 $V_r(\theta)$ 作谐波分析的基础上得到的,所以,此模拟风场上的每一个径向速度都在 VAD 和 EVAD 显示的速度-方位曲线上,此径向速度不含有雷达的机内噪声。为了使模拟风场更加接近实际风场,按照 1.2 节的步骤对上述模拟风场的每一个径向速度加不同信噪比和不同速度谱宽的噪声,模拟得到了带有噪声的径向速度场。从而可以通过数学模拟的方式更好地检验本文建议的 EVAD 方法求得的水平散度的精度。由于计算量太大,本次模拟仅对第一水平层的径向速度加噪声,模拟中用到的假设:①脉冲重复频率 PRF 为 512 Hz,即 Nyquist 频率 F_n 为 256 Hz;②雷达发射波的波长为 10 cm;③信噪比 SNR 的取值范围为 0 ~ 40 dB;④PPP 法中取 64 个脉冲对。

再次,对模拟的第一水平层内带有噪声的径向速度按 1.1 节中的步骤分别用 Srivastava、Matejka 和本文建议的 T-T 法求出平均水平散度。通过按 1.1 节的步骤对式(2)求解,得到的最小二乘回归的系数 $p_1 = \overline{\text{div } V_h}$,即可得到第一水平层内的平均水平散度。最后将 3 种方法得到的平均水平散度,与表 1 中模拟风场所设定的平均水平散度($\text{div } V_h = 2 \times 10^{-5} \text{s}^{-2}$)相比较,通过平均水平散度的相对误差 ε_p ($\varepsilon_p = ((D' - D)/D) \times 100\%$, D 为表 1 中模拟风场所设定的平均水平散度, D' 为对模拟的非线性风场加噪声后得到径向速度场进行 EVAD 分析得到的平均水平散度)来检验本文建议的 EVAD 算法求得的水平散度的精度。

2.2 不同信噪比 SNR、不同速度谱宽 σ_v 条件下,3 种 EVAD 算法的结果分析

模拟回波信号由平均多普勒频率、频率谱宽 σ_f (或速度谱宽 σ_v)、信噪比 SNR 这 3 个参数决定,故速度谱宽、信噪比的变化将引起径向速度以及用 EVAD 方法得到的水平散

度的变化。

(1) 速度谱宽 σ_v 一定 ($\sigma_v = 2$ m/s), 信噪比 SNR 变化

本文分别对模拟的带有 SNR 分别为 35, 20, 15 dB 噪声的 3 个径向速度资料进行 EVAD 分析, 结果见表 2: 当 SNR 减小时, 3 种 EVAD 算法得到的第一层内的平均水平散度以及它的相对误差 ε_D 都随之增加, Srivastava 方法的 ε_D 都大于 10%, 而本文建议的方法 (T-T 法) 的 ε_D 都控制在 10% 以内, 则说明 T-T 法受信噪比的影响最小; 当 SNR 相同时, 水平散度的相对误差由大到小依次为: Srivastava 方法最大, Matejka 方法次之, T-T 法最小; 当 SNR = 15 dB 时, Matejka 方法的 ε_D 比 Srivastava 方法的 ε_D 减小了 6.5%, 但 Matejka 方法的 ε_D 仍大于 10%, 而 T-T 法的 ε_D 不但比 Srivastava 方法的 ε_D 减小了 19.6%, 且 ε_D 小于 10%, 这说明当 SNR 越小, 即噪声大时, T-T 法提高水平散度的精度的幅度越大, 显然, 信噪比小时, 本文建议的方法 (T-T 法) 更能有效的提高水平散度的精度。

表 2 不同 SNR 条件下, 3 种 EVAD 算法的结果对比

SNR (dB)	平均水平散度 $D(10^{-5} \text{ s}^{-1})$			平均水平散度的相对误差 ε_D (%)		
	Srivastava 法	Matejka 法	T-T 法	Srivastava 法	Matejka 法	T-T 法
35	2.506	2.183	2.143	25.3	9.2	7.2
20	2.513	2.190	2.146	25.7	9.5	7.3
15	2.539	2.210	2.148	27.0	10.5	7.4

(2) 信噪比 SNR 一定, 速度谱宽 σ_v 变化

在 SNR = 20 dB, $\sigma_v = 6, 5, 4, 3, 2$ m/s 的条件下, 模拟的 5 个带有噪声的径向速度场, 分别进行 EVAD 分析, 结果如表 3 所示: 当速度谱宽增大时, 3 种方法得到的第一层内的平均水平散度以及它的相对误差 ε_D 都随之增加, 但本文建议的方法 (T-T 法) 得到的 ε_D 基本上控制在 10% 以内, 说明本文建议的方法受谱宽的影响最小; 当谱宽相同时, 水平散度的相对误差由大到小依次为: Srivastava 方法最大, Matejka 方法次之, T-T 法最小; 谱宽越宽, 本文建议的方法 (T-T 法) 提高水平散度精度的幅度越大, 显然, 谱宽大时, 本文建议的方法更能有效的提高水平散度的精度。

表 3 不同谱宽条件下, 3 种 EVAD 算法的结果对比

速度谱宽 ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	平均水平散度 $D(10^{-5} \text{ s}^{-1})$			平均水平散度的相对误差 ε_D (%)		
	Srivastava 法	Matejka 法	T-T 法	Srivastava 法	Matejka 法	T-T 法
6.0	2.957	2.384	2.204	47.9	19.2	10.2
5.0	2.796	2.301	2.186	39.8	15.1	9.3
4.0	2.618	2.283	2.173	30.9	14.2	8.7
3.0	2.557	2.238	2.151	27.9	11.9	7.6
2.0	2.513	2.190	2.146	25.7	9.5	7.3

2.3 非全方位均匀采样和非全方位不均匀采样的条件下, 3 种 EVAD 算法的结果分析

在实际境况下, 测站周围的降水回波分布不均匀, 同一距离圈上存在缺测的情况; 另外在资料使用前必须做质量检验, 剔除奇异点, 这样也会出现一些空隙, 缺测区域。为此, 模拟了两种缺测区域: 随机取的非连续性缺口 (代表积累的 $V_r(\theta)$ 缺测区) 和随机取的连续性缺口 (代表无回波区缺口), 即非全方位不均匀采样和非全方位均匀采样。从而使模

拟风场的速度资料更加接近真实情况。

(1) 随机取非连续性的缺口即非全方位不均匀采样

对模拟的带有 SNR 为 35 dB 噪声的径向速度资料, 随机取非连续缺口分别为 10° 、 20° 、...、 60° 后再进行 EVAD 分析, 结果如表 4 所示: 当缺口增大时, 3 种 EVAD 算法得到的平均水平散度都随之增加, 其中 Matejka 方法和本文建议的方法的平均水平散度缓慢增加; 当缺口相同时, 本文建议的方法(T-T 法)的水平散度最靠近模拟风场设定值($\text{div } V_h = 2 \times 10^{-5} \text{ s}^{-2}$), Matejka 次之, Srivastava 偏离模拟风场设定值的程度最大。显然, 缺测区对 T-T 法得到的水平散度的影响小, 且缺口越大, T-T 法提高水平散度精度的幅度越大, 即本文建议的方法(T-T 法)更能有效的提高水平散度的精度。

表 4 不同非连续性缺口的条件下, 3 种 EVAD 算法的结果对比

缺口 度数	平均水平散度 $D(10^{-5} \text{ s}^{-1})$			平均水平散度的相对误差 $\varepsilon_D(\%)$		
	Srivastava 法	Matejka 法	T-T 法	Srivastava 法	Matejka 法	T-T 法
无缺口	2.506	2.183	2.143	25.3	9.2	7.2
10°	2.822	2.239	2.181	41.1	12.0	9.1
20°	2.829	2.245	2.184	41.5	12.3	9.2
30°	2.869	2.251	2.187	43.5	12.6	9.4
40°	2.903	2.258	2.192	45.2	12.9	9.6
50°	2.965	2.268	2.195	48.3	13.4	9.8
60°	3.080	2.288	2.201	54.0	14.4	10.1

(2) 随机取连续性的缺口即非全方位均匀采样

对模拟的带有 SNR 为 35 dB 噪声的径向速度资料, 随机取 4 个位置不同的 20° 连续性缺口, 分别对带有不同位置的缺口的速度资料进行 EVAD 分析, 结果如表 5 所示: 当缺口位置相同时, 本文建议的方法(T-T 法)的水平散度最靠近模拟风场设定值, Matejka 次之, Srivastava 偏离模拟风场设定值的程度最大。显然, 无回波区对本文建议的方法(T-T 法)得到的水平散度的影响小。

表 5 缺口范围相同但位置不同的条件下, 3 种 EVAD 算法的结果对比

缺口 位置	平均水平散度 $D(10^{-5} \text{ s}^{-1})$			平均水平散度的相对误差 $\varepsilon_D(\%)$		
	Srivastava 法	Matejka 法	T-T 法	Srivastava 法	Matejka 法	T-T 法
$60^\circ \sim 79^\circ$	2.668	2.231	2.171	33.4	11.6	8.6
$100^\circ \sim 119^\circ$	2.783	2.236	2.179	39.2	11.8	9.0
$200^\circ \sim 219^\circ$	2.975	2.271	2.197	48.8	13.6	9.9
$340^\circ \sim 359^\circ$	2.935	2.260	2.194	46.8	13.0	9.7

3 结 论

通过理论分析和对模拟资料的计算分析, 结果表明:

(1) 速度谱宽 σ_v 一定, 与 Srivastava 和 Matejka 的 EVAD 方法相比, 本文建议的方法得到的水平散度受信噪比的影响最小, 并且信噪比越小, 本文建议的方法提高水平散度的精度的幅度越大, 即信噪比小时, 本文建议的方法更能有效的提高水平散度的精度。

(2) 信噪比 SNR 一定,与 Srivastava 和 Matejka 的 EVAD 方法相比,本文建议的方法得到的水平散度受速度谱宽的影响最小,并且谱宽越宽,本文建议的方法提高水平散度的精度的幅度越大,即谱宽大时,本文建议的方法更能有效的提高水平散度的精度。

(3) 与 Srivastava 和 Matejka 的 EVAD 方法相比,缺测区或无回波区对本文建议的方法得到的水平散度的影响最小,且本文建议的方法得到的水平散度精度高。

参考文献

- 1 Caya D, Zawadaki I. VAD analysis of nonlinear wind fields. *At mos Oceanic Technol*, 1992, **9**(10): 575 ~ 587.
- 2 万蓉,汤达章. 两种 VAD 算法的比较及其应用. 南京气象学院学报, 2002, **25**(5): 648 ~ 655.
- 3 万蓉,汤达章,张鹏,等. 非线性风场的 VAD 分析初探. 气象科学, 2002, **23**(3): 314 ~ 323.
- 4 胡明宝,高太长,汤达章. 多普勒雷达资料分析与应用. 北京:解放军出版社, 2000. 104 ~ 114.
- 5 Srivastava R C, Matejka T J, Lorello T J. Doppler radar study of the trailing anvil region associated with a squall line. *At mos Sci*, 1986, **43**: 336 ~ 377.
- 6 Matejka T J, Srivastava R C. An improved version of the extended velocity-azimuth display analysis of single-Doppler radar data. *At mos Oceanic Technol*, 1991, **8**(4): 453 ~ 456.
- 7 Sirmans D, Bumgarner B. Numerical comparison of five mean frequency estimators. *Appl Meteor*, 1975, **14**(9): 991 ~ 1003.

AN IMPROVED METHOD OF EXTENDED VELOCITY-AZIMUTH DISPLAY ANALYSIS TO ENHANCE ACCURACY OF HORIZONTAL DIVERGENCE

Tao Yue¹⁾ Tang Dazhang¹⁾ Xiao Wenan¹⁾ Xia Wenmei²⁾

¹⁾ (Nanjing Institute of Meteorology, Nanjing 210044)

²⁾ (Jiangsu Provincial Meteorology Bureau, Nanjing 210008)

Abstract

The method that have improvements to the previously reported EVAD technique to obtain horizontal divergence are discussed in detail. Sirmans' method of radar simulated precipitation signal is applicable to the nonlinear wind field including the three harmonic, and a Doppler velocity field is obtained that is approximated to the real velocity field. The improved EVAD method, Srivastava's and Matejka's EVAD methods are applicable to this simulated Doppler velocity field, and three methods are compared. Computing results indicate that the accuracy of horizontal divergence is obtained by the improved EVAD method is enhanced at not full azimuth wind field, at different σ_v and SNR.

Key words: EVAD method Numerical simulation Weighting function