

马秀梅,李文兆,赵坤,等. 非线性 VAD 反演低层风廓线拟合阶数优化方法. 应用气象学报, 2014, 25(3): 321-329.

非线性 VAD 反演低层风廓线拟合阶数优化方法

马秀梅¹⁾ 李文兆²⁾ 赵坤^{1)*} 唐晓文¹⁾ 杨洪平³⁾

¹⁾(教育部国家中尺度灾害性天气重点实验室/南京大学大气科学学院, 南京 210093)

²⁾(美国国家大气研究中心, 科罗拉多州 80307) ³⁾(中国气象局气象探测中心, 北京 100081)

摘 要

结合理论和 SoWMEX 试验(西南气流试验, Southwest Monsoon Experiment)的连续多普勒天气雷达观测资料和广东省阳江雷达资料, 对非线性速度方位显示(非线性 VAD)方法反演低层低于 2 km 垂直风廓线精度和能力进行定量分析。结果表明: 非线性 VAD 基本能反演出低层风廓线在空间和时间上的演变。但当雷达径向速度数据在方位存在较大的连续性缺测、体积扫描仰角较少时, 因传统非线性 VAD 采用的速度方位显示(VAD)方法拟合阶数和垂直拟合阶数过高, 反演的低层风廓线会存在较大误差, 造成不合理高风速区和风廓线不连续。通过实际观测资料统计分析反演参数对非线性 VAD 的影响, 提出基于连续性数据缺测间隔和不同仰角的多少的 VAD 和垂直拟合阶数动态调整方法。同锋面降水和台风降水两典型个例的实际探空比对显示, 调整后的非线性 VAD 显著改进低层风廓线反演精度, 反演的风廓线结构和变化与实况相符, 反演平均误差小于 $2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

关键词: 非线性 VAD; 低层垂直风廓线; 多普勒天气雷达

引 言

单部多普勒天气雷达仅能观测到径向速度(简称 V_r), 为了获取大气的速度场, 只能基于一定的数学方法或者约束条件进行反演。目前简单、常用的反演方法是 Lhermitte 等^[1]提出的速度方位显示(velocity azimuth display, VAD)方法。Browning 等^[2]对 VAD 方法进行扩展。陶祖钰^[3]提出了基于对称法的计算散度方法, 从而避免了对多普勒速度方位廓线进行插值。刘淑媛等^[4]提出了一种直接由单多普勒天气雷达径向速度计算极坐标散度而无需其他假设的方法。为改进高仰角情况忽略垂直速度造成的 VAD 散度反演误差, Srivastava 等^[5]提出了 EVAD(extended VAD)方法。陶玥等^[6]提出了改善 EVAD 方法来求解散度, 得到的水平散度精度明显提高。Tabary 等^[7]和 Gao 等^[8]考虑到多普勒速度模糊对 VAD 计算的影响, 提出了梯度 VAD 的算法。邵爱梅等^[9]在分析 VAD 反演水平风廓线质量

控制方案时发现, 如连续性缺测资料方位比例超过一定数值(如 40%), 会严重影响 VAD 高阶拟合结果, 造成 VAD 的反演误差。为改善方位资料连续缺测对 VAD 方法的影响, 邓勇等^[10]和尹丽云等^[11]利用 VAD 方法和迭代法, 先后对模拟和实际的速度场进行连续性缺口和非连续性缺口的迭代法填补, 可较好地填补累积缺口在 180° 以内的平面速度场, 迭代前后速度值误差均能控制在 15% 以内。

以上 VAD 方法的共同特征是基于对风的线性假设, 而当实际天气中速度场不满足线性条件时, 线性 VAD 反演的风廓线可能存在较大偏差。Caya 等^[12]提出非线性速度方位显示(nonlinear velocity azimuth display, 以下简称 NVAD)方法, 将 VAD 的公式推广到高阶的非线性项, 以满足实际风廓线呈非线性变化的情况。万蓉等^[13]在此基础上进一步对非线性 VAD 进行了理论探讨, 并以一次实际个例资料, 对非线性风判定条件、反演参数的选取进行了初步分析。

过去国内研究对于 VAD 已有很多探讨和应用^[14-16],

2013-07-04 收到, 2014-01-10 收到再改稿。

资助项目: 国家重点基础研究发展计划项目(2013CB430101)、公益性行业(气象)科研专项(GYHY200906004, GYHY201006007), 国家自然科学基金项目(41275031), 南京雷达气象与强天气开放实验室研究基金(BJG201204)

* 通信作者, email: zhaokun@nju.edu.cn

对于非线性 VAD 理论已经进行了较多分析,但对实际个例的分析和应用还相对较少,其实际应用效果还需要进一步验证。同时,对于实际观测资料,如何最优确定非线性 VAD 反演参数,也需要进行探讨。本文重点利用实际个例多普勒天气雷达资料,分析非线性 VAD 对于低层(低于 2 km)垂直风廓线反演的能力,并探讨在方位存在缺测和垂直仰角较少时如何有效选取 VAD 拟合阶数和垂直方向的拟合阶数,进而改进反演效果。

1 非线性 VAD 方法

对于非线性风场假设,根据 Caya 等^[12]研究,假设仰角 $\alpha=0^\circ$,并且忽略垂直速度,当实际风廓线表示为 $(m-1)$ 阶泰勒展开时,固定距离圈上的风廓线分布可由一个 m 阶的傅氏谐波合成,并且各项系数均为水平距离 r 的函数,在此基础上考虑包含水平速度场在垂直方向上的变化,可以整理出以下傅里叶系数与多普勒天气雷达站位置的水平散度和水平风间的函数关系式:

$$a_0^m(r, z) = \sum_{n=0}^{\eta} \sum_{q=0}^s K_{mq} z^q r^{2n+1}, \quad (1)$$

当 m 为偶数时, $\eta=(m-2)/2$; 当 m 为奇数时, $\eta=(m-3)/2$; $s+(2n+1)=m-1$ 。

$$a_1^m(r, z) = \sum_{n=0}^{\sigma} \sum_{q=0}^s W_{mq} z^q r^{2n}, \quad (2)$$

当 m 为偶数时, $\sigma=(m-2)/2$; 当 m 为奇数时, $\sigma=(m-1)/2$; $s+2n=m-1$ 。

式(1)、(2)中, $K_{00}=(u_x+v_y)/2$, $W_{00}=v_0$, m 表示傅里叶系数的阶数, a_0 表示偶数项傅里叶谐波系数, a_1 表示奇数项傅里叶谐波系数, r 和 z 分别代表水平和垂直距离, n 和 q 为 r 和 z 的乘幂, $\sigma(\eta)$ 和 s 分别为水平方向 r 和垂直方向 z 的最大乘幂^[12]。

2 反演试验

2.1 个例资料和预处理

为研究非线性 VAD 方法在实际个例中的反演精度,利用 2008 年 6 月 2 日 SoWMEX(西南气流试验, Southwest Monsoon Experiment)中一次锋面降水过程收集的多普勒天气雷达和探空资料,以及 2012 年 7 月 23 日台风韦森特(1208)登陆前后广东阳江多普勒天气雷达和探空观测资料,进行风廓线

反演和评估。

SoWMEX 多普勒天气雷达资料来自美国国家大气研究中心(NCAR)的 S 波段双线偏振多普勒天气雷达(简称 S-Pol 雷达),波长为 10 cm,位于我国台湾省高屏溪(22.52°N, 120.43°E),高度为 45 m,包括每 6 min 1 次的体积扫描雷达反射率因子和径向速度数据,观测范围分别为 460 km 和 150 km,径向分辨率为 150 m,方位分辨率为 0.7°。S-Pol 雷达的体积扫描模式分为两种:模式 1 (VCP1), 9 个仰角(0.5°, 1.1°, 1.8°, 2.6°, 3.6°, 4.7°, 6.5°, 9.1° 和 12.8°); 模式 2 (VCP2), 2 个仰角(0.5° 和 1.5°),最大不模糊速度为 26.9 m·s⁻¹。S-Pol 雷达附近探空资料采用我国台湾省屏东每 3 h 1 次的 GPS 加密探空数据。

阳江多普勒天气雷达波长为 10 cm,位于我国广东省阳江市(21.85°N, 111.98°E),高度为 101.6 m,包括 6 min 1 次的体积扫描雷达反射率因子和径向速度数据,观测范围分别为 460 km 和 230 km,径向分辨率分别为 1000 m 和 250 m,方位分辨率为 1.0°,其体积扫描模式为 VCP21,最大不模糊速度与 S-Pol 雷达相同。阳江探空 12 h 1 次。由于雷达资料常受到噪声、非气象回波以及速度模糊的影响,因此在反演风廓线前需对其进行质量控制。图 1 是本研究两个例的多普勒天气雷达和探空站的位置。

2.2 个例 1 反演结果

2008 年 6 月 2 日一锋面系统滞留于我国台湾省南部,南部各地处于不稳定的天气形势之下。6 月 2 日 00:00—24:00(世界时,下同)24 h 累积降水量超过 110 mm,雷达回波(图略)显示有两次较连续的降水过程,第 1 次发生于 6 月 2 日 04:00—09:00,为类似飚线的线状回波;第 2 次降水过程发生于 21:00 后,为系统性的锋面降水。其中 15:00—19:00 S-Pol 雷达也观测到零散降水。

利用非线性 VAD 方法和 S-Pol 雷达资料,反演 2008 年 6 月 2 日 00:00—23:52 的低层垂直风廓线时间演变,时间分辨率为 6 min,垂直分辨率为 100 m。其中,由于地物阻挡导致数据缺失较多,因此 VAD 傅氏展开的最大谐波阶数取四阶,相应的垂直拟合取三阶。为避免资料缺测过多造成的误差,不分析数据点少于 120 个的圈层资料。反演结果(图 2a)显示:05:00 后低层到高层风向均为西南风,且风速有明显增加;13:00 后出现了明显的低层

到高层风向逆转,表明有来自锋后的冷平流;而之后风向重新顺转,且 21:00 风速明显增加。因此可以看到,非线性 VAD 可以捕捉到风速和风向变化的

信息,然而在图 2a 中虚线框内,出现了明显不合理的风速值,表现为 600 m 以上和 200 m 以下出现过大幅度,且最大风速超过 $60 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

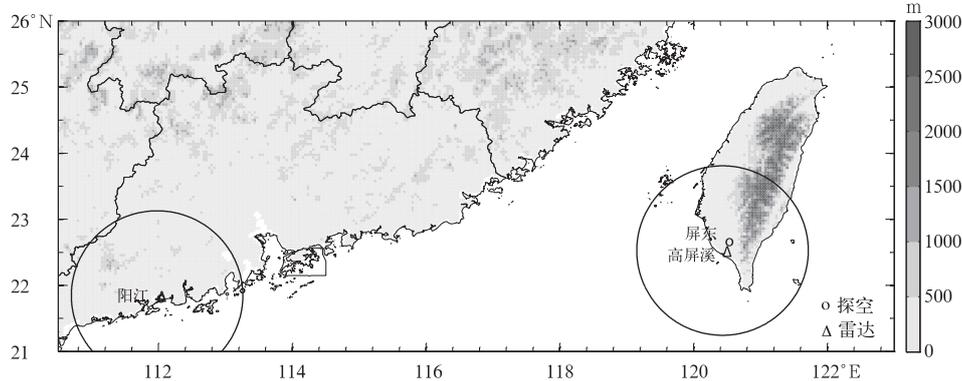


图 1 本研究中两个例多普勒天气雷达和探空站位置
(圆圈代表多普勒天气雷达 150 km 观测半径;阴影表示地形)

Fig. 1 The distribution of radar and sounding stations in this study
(the maximum Doppler range of 150 km, the shaded shows the terrain height)

过去的研究表明,VAD 反演时一个很重要的问题是拟合数据的质量和拟合阶数:邵爱梅等^[9]指出,数据中连续性缺测的大小,会严重影响 VAD 高阶拟合结果,从而影响下一步的非线性拟合系数。由图 1 可知,由于 S-Pol 雷达东面 20 km 以外受中央山脉阻挡,造成低层资料在此方位上的连续缺测。以 2008 年 6 月 2 日 04:00 为例,该时次非线性 VAD 反演风廓线在 600~1200 m 出现明显的风廓线时间不连续和异常大值。对比该时刻 S-Pol 雷达质量控制后的 1.1° 仰角径向速度图(图略),零值线呈西北—东南走向,表明低层风向为西南风,最大风速低于 $8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。另外,因地形阻挡,在距雷达 30 km 外径向速度方位缺测最大超过 120° 。

为了解此数据缺测对拟合的影响,选取 41.85 km 分别进行二至四阶 VAD 拟合,该圈的径向速度方向大致为西南风,最大负速度为 $12 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 左右。结果显示:VAD 拟合出的傅里叶系数(表 1)和雷达观测到的实际径向速度相比,当采用四阶拟合时,拟合出的前几个系数(如 * 所示)明显与实际联系的物理量大小不符,反演的风速仅为 $0.67 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。过去的研究通常用均方根误差来确定拟合阶数^[13],本研究结果表明,在数据存在较大缺测时,并非拟合误差越小,得到的风廓线越准确,而需要综合考虑数据缺测大小、反演风廓线的合理性、拟合误差来确定最优的拟合阶数。

基于此次天气过程,结合 SoWMEX 试验期间观测的其他几个个例的统计分析,提出在进行非线性 VAD 分析时,需根据有效数据点数和连续数据

缺测的大小,对 VAD 拟合阶数进行以下调整:当有效数据点大于 120 时,计算连续数据缺测大小,当连续数据缺测位于 60° 和 90° 之间时,设置 VAD 采用三阶拟合;当连续数据缺测不大于 60° 时,设置 VAD 采用四阶拟合;当连续数据缺测大于 90° 时不进行 VAD 计算。

对比图 2a,根据 VAD 拟合阶数调整后的垂直风廓线显示(图 2b),通过判断连续性缺测的大小计算非线性 VAD 后,多数明显不合理的风速已有所改善,但仍有一些时刻 800 m 以上风速不合理(如 12:00—14:00)。

非线性 VAD 进行四阶非线性拟合时,相当于认为实际风廓线可由三阶泰勒展开表示,即在水平 x, y 方向和垂直 z 方向均为三阶。当数据只有少数几个仰角时,实际观测到的风廓线只是近地面的一个薄层。这时在水平方向,风廓线为三阶非线性变化比较常见,甚至更高阶的风廓线也可能出现。但在垂直方向,由于只观测到了近 2 km 的高度,再要求平均水平风廓线 u, v 随高度 z 变化也是三阶或更高阶函数,这一条件就难以满足。表 2 为水平风速 u 和 v 的非线性在垂直拟合阶数分别为二阶和三阶时的系数表。显然,当垂直高度 z 拟合阶数从三阶降低到二阶后,拟合的各项系数有明显变化,但拟合均方根误差随着 z 拟合阶数降低变化不大。考虑这种情况与 VAD 拟合时相似,即不同数据所具有的数学约束导致拟合阶数受到不同的限制。此时可以分别调整水平和垂直拟合阶数从而得到合理的风廓线。

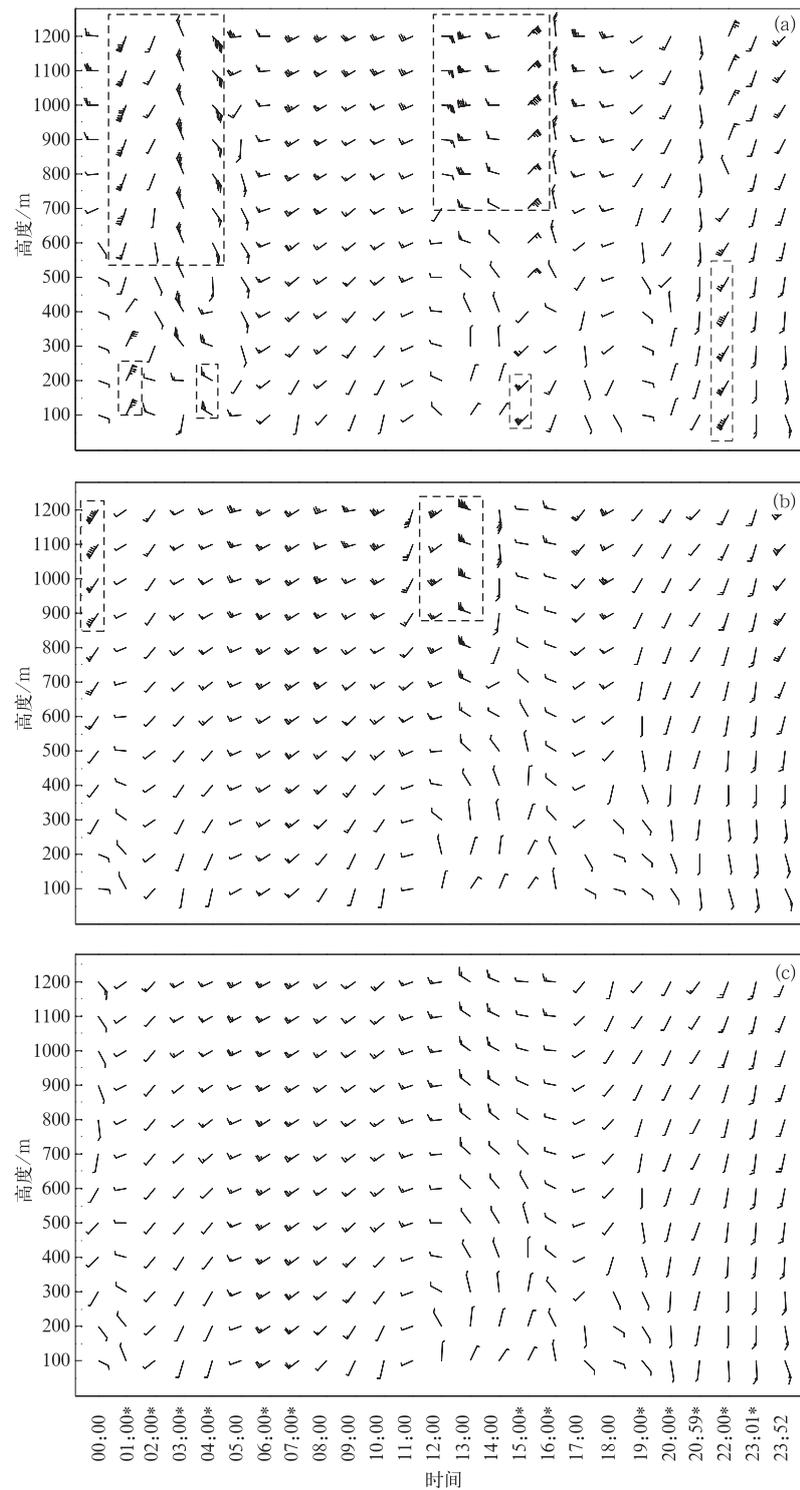


图2 2008年6月2日00:00—23:52 S-Pol雷达反演的非线性VAD垂直风廓线
 (a)不考虑数据缺测,垂直拟合阶数为三阶,(b)考虑数据缺测,
 垂直拟合阶数为三阶,(c)考虑数据缺测,垂直拟合阶数为二阶
 (*表示体扫模式为VCP1,其余为VCP2)

Fig. 2 The vertical wind profile retrieved by nonlinear VAD of S-Pol radar from 0000 UTC to 2352 UTC on 2 June 2008 (a) without considering data absence, the order in z is 3, (b) considering data absence, the order in z is 3, (c) considering data absence, the order in z is 2 (* indicates the VCP1 scan mode, the others are VCP2 scan mode)

表 1 不同阶数傅氏拟合系数以及拟合均方根误差

Table 1 The Fourier coefficients and the approximation error for the VAD with the different number of harmonics

谐波系数	a_0	a_1	b_1	a_2	b_2	a_3	b_3	a_4	b_4	均方根误差/($m \cdot s^{-1}$)
二阶	-0.8	8.3	2.3	-0.3	0.0					2.19
三阶	-1.6	7.2	0.9	-2.0	0.6	-0.3	2.2			1.92
四阶	-5.2*	0.6*	0.3*	-3.1	5.6*	2.7*	3.1	0.5	-1.5	1.87

注: * 表示拟合系数明显与实际联系的物理量大小不符。

表 2 2008 年 6 月 2 日 00:00 仰角为 0.5° 和 1.5° 的水平风速 u 和 v 的非线性 VAD 拟合系数

Table 2 Nonlinear VAD coefficients for u and v with elevation of 0.5° and 1.5° at 0000 UTC 2 June 2008

系数	1	z	z^2	z^3	r^2	$r^2 z$	均方根误差/($m \cdot s^{-1}$)
二阶 u	-2.2	11.6	-11.5		-0.001	0.004	1.32
二阶 v	0.4	-1.5	3.3		0.0006	-0.001	1.12
三阶 u	-2.6	13.4	-24.2	44.0	0.006	-0.024	1.31
三阶 v	0.09	0.09	-7.7	38.1	0.007	-0.026	1.11

重新假设风廓线为水平 x, y 方向的三阶函数, 垂直方向 z 的二阶函数。在降低 z 方向的拟合阶数为二阶之后, 得到的风廓线在 2008 年 6 月 2 日 25 个时刻之内都比较合理(图 2c)。

为了定量评估非线性 VAD 与 VAD 反演的风廓线精度, 选择 2008 年 6 月 2 日 15:00 S-Pol 雷达站附近屏东站的探空观测风, 与 VAD 及调整前的非线性 VAD、调整后的非线性 VAD 进行比较。此时, VAD 计算出的风廓线与探空相比, 在垂直方向

上风速和风向均存在一定的不连续性, 而调整前的非线性 VAD, 风速与风向也存在明显差异, 调整后的非线性 VAD 无论是风向还是风速均与探空吻合很好(图 3)。比较 3 种方法得到的风向和风速的均方根误差: 风向均方根误差相差不大, 分别为 20.2° , 20.2° , 18.3° ; 而调整后的非线性 VAD 风速均方根误差最小, 为 $0.2 m \cdot s^{-1}$, 调整前的非线性 VAD 方法均方根误差最大, 为 $11 m \cdot s^{-1}$; VAD 方法为 $2 m \cdot s^{-1}$ 。

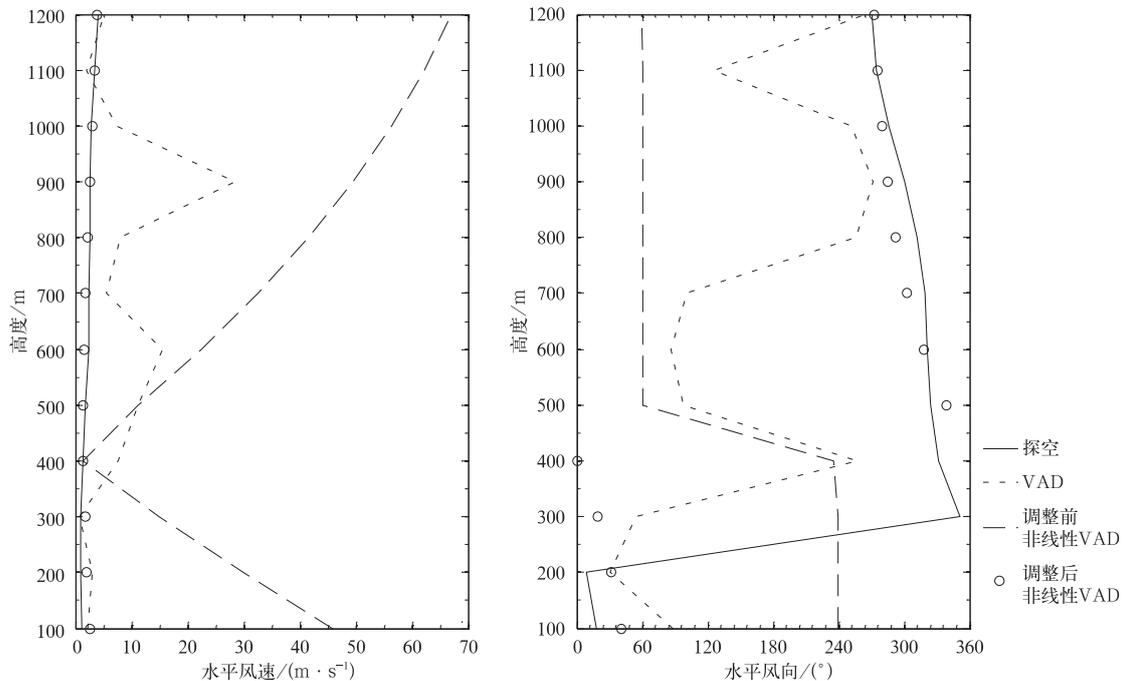


图 3 2008 年 6 月 2 日 15:00 VAD 与非线性 VAD 反演低层风廓线与屏东站 GPS 探空比较

Fig. 3 The low-level wind profile retrieved from VAD and nonliner VAD at 1500 UTC 2 June 2008 as compared with the GPS obseravaion of Pingdong Station

2.3 个例 2 反演结果

个例 2 选取台风韦森特(1208)登陆前 2012 年 7 月 23 日阳江雷达观测资料进行分析。当台风中心与阳江雷达相距较远时(23 日 00:00—13:00),雷达仅观测到台风外围雨带,雷达站附近最大风速约为 $18 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,但有效速度点较少、连续性缺测较大;当台风中心接近雷达时(14:00—24:00),雷达站附近最大速度增加到 $24 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 以上,速度在方位上的分布连续。图 4 是利用非线性 VAD,采用不同

的水平和垂直拟合阶数所计算的底层边界层风廓线。其中图 4a 为不考虑数据缺测,垂直阶数取三阶时非线性 VAD 反演出的垂直风廓线;图 4b 为考虑数据缺测,垂直阶数取三阶后的风廓线。总体而言,两种情况下反演的风廓线都基本反映出台风接近雷达时的低层垂直风廓线变化:风速逐渐增加,风向由台风左前侧的东北风转为台风左侧的偏北风,再转变为西南风。

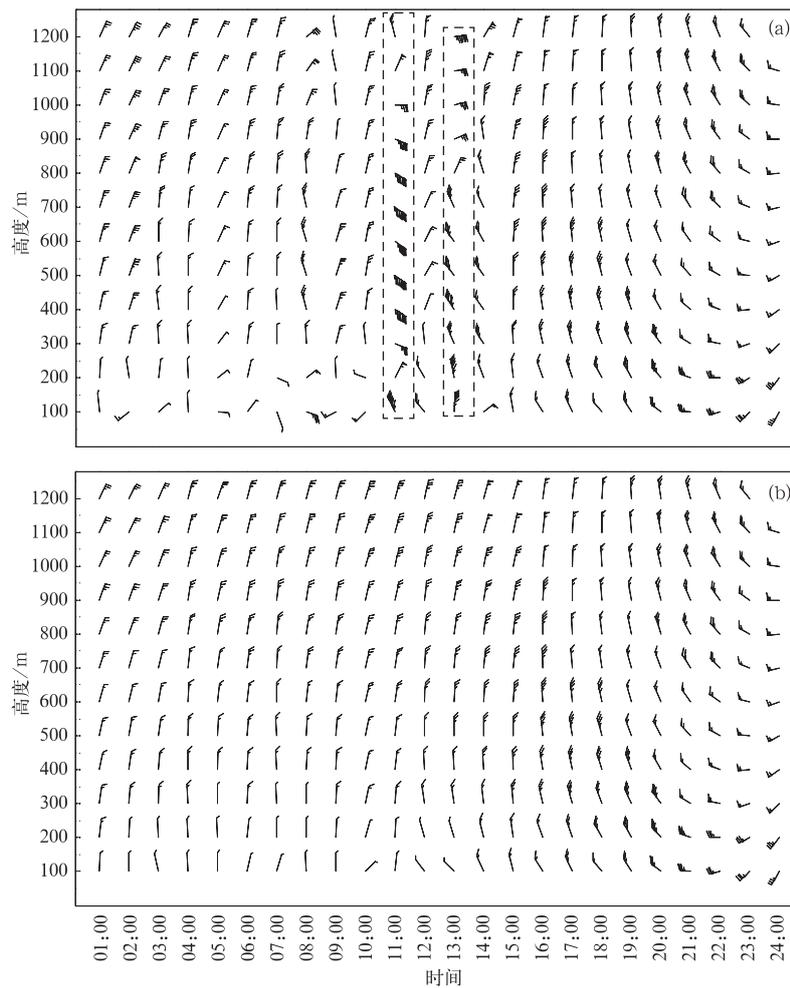


图 4 2012 年 7 月 23 日 01:00—24:00 阳江雷达非线性 VAD 反演出的垂直风廓线
(a)不考虑数据缺测,垂直拟合阶数为三阶,(b)考虑数据缺测,垂直拟合阶数为三阶

Fig. 4 Nonlinear VAD wind profile of Yangjiang radar from
0100 UTC to 2400 UTC on 23 July 2012
(a)without considering data absence,order in z is 3,
(b)considering data absence,order in z is 3

与个例 1 分析类似,图 4a 在 2012 年 7 月 23 日 11:00—13:00 存在明显不合理的风速,低层风速和

风向也不连续。该时间段台风中心与雷达相距较远,径向速度观测连续性数据缺测较大,表明连续性

数据缺测显著降低非线性 VAD 计算精度。在考虑了数据缺测之后风向、风速的变化都比较合理(图 4b)。进一步将垂直方向拟合阶数由三阶降到二阶之后(图略),则风场的改进并不明显。这主要是因为阳江雷达所有时刻体扫均包含 9 个仰角,采用垂直三阶和二阶的拟合差别不大;相反,S-Pol 雷达出现反演误差较大时,通常只有两个仰角观测,因低层

数据量少,造成三阶拟合垂直反演误差大。如人为将阳江雷达观测仰角减少到两个仰角,则仍然会出现不合理风速。将计算出的风廓线与阳江 GTS 探空进行比较显示(图 5),调整后的非线性 VAD 方法精度显著提高,风速和风向的均方根误差分别为 $0.9 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 和 2.2° ,与个例 1 分析结果一致。

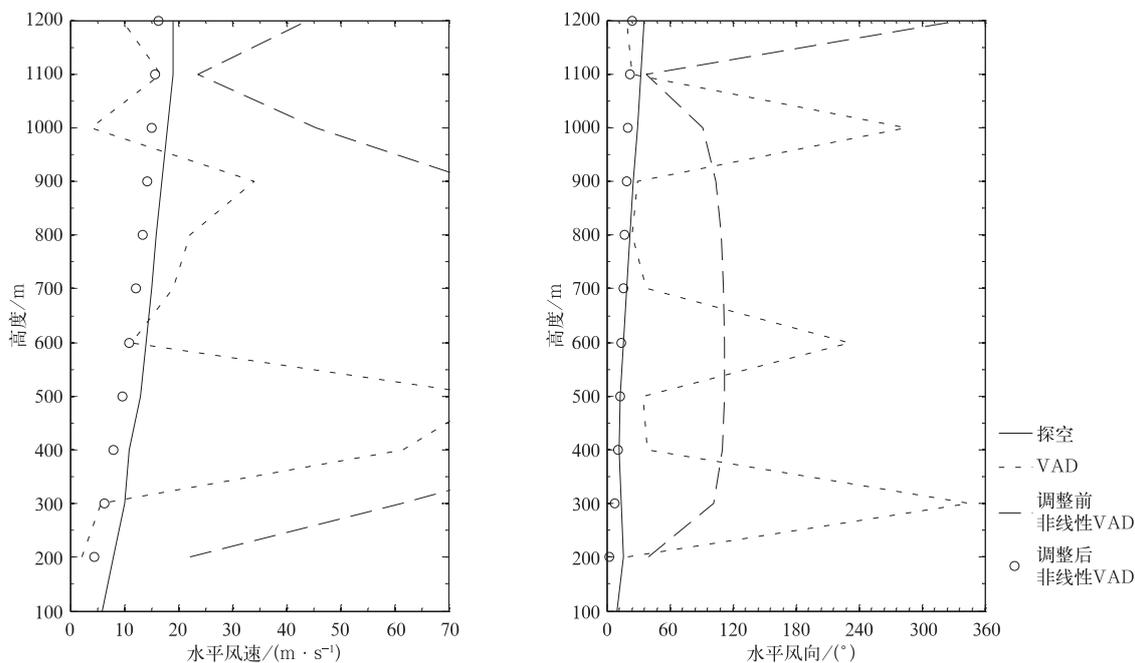


图 5 2012 年 7 月 23 日 11:00 VAD 与非线性 VAD 反演低层风廓线与阳江 GTS 探空比较

Fig. 5 The low-level wind profile retrieved from VAD and nonlinear VAD at 1100 UTC 23 July 2012 as compared with the GTS observation of Yangjiang

3 小 结

本文通过 SowMEX 试验计划期间 S-Pol 雷达观测的一次锋面降水过程和广东省阳江雷达观测的一次台风降水过程资料,利用非线性 VAD 方法对风廓线进行了计算。得到如下主要结论:

1) 非线性 VAD 反演得到的风廓线基本表征了风在垂直方向的空间变化以及时间变化特征。而当雷达观测径向速度由于地物阻挡、覆盖范围等问题存在很大的连续性数据缺失、垂直仰角数较少时,VAD 拟合阶数过大或垂直拟合阶数过大均会导致反演结果失去其本身物理意义。

2) 通过实际观测资料统计分析反演参数对非

线性 VAD 的影响,提出基于连续性数据缺测间隔和不同仰角多少的 VAD 和垂直拟合阶数动态调整方法,显著改进了反演的风廓线结构和连续变化特征。对比两次降水过程雷达反演结果和附近探空显示,经过调整后的非线性 VAD 反演风廓线误差小于 $2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,明显优于调整前的非线性 VAD 结果。

值得注意的是,由于观测资料的限制,本研究仅通过两个典型个例讨论非线性 VAD 反演中的问题,并提出调整方法。未来研究中,将收集大量历史观测资料,通过统计分析,对本文提出的调整非线性 VAD 进一步验证和优化。

致 谢:感谢美国国家大气研究中心(NCAR)提供了 S-Pol 雷达资料及相应探空资料,中国国家气象中心提供了广东省阳江雷达及相应探空资料。

参 考 文 献

- [1] Lhermitte R M, Atlas D. Precipitation Motion by Pulse Doppler. Preprints Ninth Weather Radar Conf, Amer Meteor Soc, 1961: 218-223.
- [2] Browning K A, Wexler R. The determination of kinematic properties of a wind field using Doppler radar. *J Appl Meteor*, 1968, 7: 105-113.
- [3] 陶祖钰. 关于 Doppler 雷达 VAD 技术的讨论. *应用气象学报*, 1995, 6(1): 109-113.
- [4] 刘淑媛, 陶祖钰. 从单多普勒雷达速度场反演散度场. *应用气象学报*, 1999, 10(1): 41-48.
- [5] Srivastava R C, Matejka T J, Lorello T J. Doppler radar study of the trailing anvil region associated with a squall line. *J Atmos Sci*, 1986, 43: 356-377.
- [6] 陶玥, 汤达章, 肖稳安, 等. 改善 EVAD 技术求解散度的方法. *应用气象学报*, 2005, 16(2): 205-212.
- [7] Tabary P, Scialom G, Germann U. Real-time retrieval of the wind from aliased velocities measured by Doppler radars. *J Atmos Oceanic Technol*, 2001, 18: 875-882.
- [8] Gao J, Droegemeier K K, Gong J, et al. A method for retrieving mean horizontal wind profiles from single-Doppler radar observations contaminated by aliasing. *Mon Wea Rev*, 2004, 132: 1399-1409.
- [9] 邵爱梅, 乔小湜, 邱崇践. VAD 技术反演水平风廓线的质量控制标准. *兰州大学学报*, 2009, 45: 57-62.
- [10] 邓勇, 尹丽云, 许迎杰, 等. 多普勒雷达速度场缺测区域填补技术的数值模拟. *气象*, 2010, 36(5): 1-12.
- [11] 尹丽云, 许迎杰, 邓勇, 等. VAD 迭代法对多普勒雷达风场缺测区数据填补的应用研究. *云南大学学报: 自然科学版*, 2011, 33(增刊 II): 359-366.
- [12] Caya D, Zawadzki I. VAD analysis of nonlinear wind fields. *J Atmos Oceanic Technol*, 1992, 9: 575-587.
- [13] 万蓉, 汤达章. 非线性风场的 VAD 分析初探. *气象科学*, 2003, 23(3): 314-323.
- [14] 陆大春, 蒋年冲. VAD 有关产品在临近预报中的应用. *应用气象学报*, 2003, 14(2): 156-160.
- [15] 马清云, 李泽椿, 陶士伟. 单部多普勒天气雷达风场反演及其在数值预报中的应用试验. *应用气象学报*, 2001, 12(4): 487-493.
- [16] 李华宏, 薛纪善, 王曼, 等. 多普勒雷达风廓线的反演及变分同化试验. *应用气象学报*, 2007, 18(1): 50-57.

Optimization of Nonlinear VAD Method in the Low-level Wind Retrieval

Ma Xiumei¹⁾ Lee Wenchau²⁾ Zhao Kun¹⁾ Tang Xiaowen¹⁾ Yang Hongping³⁾

¹⁾ (Key Laboratory of Meso-scale Severe Weather, Ministry of Education, School of Atmospheric Sciences, Nanjing University, Nanjing 210093)

²⁾ (National Center of Atmospheric Research (NCAR), Colorado 80307, USA)

³⁾ (Meteorological Observation Center of CMA, Beijing 100081)

Abstract

The performance of nonlinear velocity azimuth display method in the vertical wind profile retrieval at low levels (below 2 km) is quantitatively examined by combing the theoretical analysis and cases observed by SoWMEX S-Pol radar and Yangjiang radar in Guangdong Province. Results show that the general structure and evolution of the low-level wind profile can be reasonably deduced by traditional nonlinear VAD method. The root mean square error can be used to evaluate orders of velocity azimuth display (VAD) fitting, but small error does not always mean the better performance especially with big continuous data absence, and a specific example is given. When setting the VAD fitting order to 3 instead of 2, coefficients which represent the horizontal wind u and v are closer to the wind derived from radial velocity image. However, when the fitting order comes to 4, coefficients lost their physical meaning. The wind direction differs a lot and the speed is much smaller than the value before. At the same time, the root mean square error decreases compared with the order of 3. Besides, data used in nonlinear VAD fitting come from the whole volume, which decreases quite a lot and leads to nonlinear VAD fitting error when the volume coverage pattern (VCP) only has some lower elevations (e. g. , two elevations). Therefore, the retrieved wind could contain large error in certain situations, such as for a region with large continuous data absence or a volume scan with fewer elevations.

After carefully evaluating the impact of the corresponding parameters on the nonlinear VAD retrievals by analyzing radar measurements, a modified nonlinear VAD method is proposed which takes account of the maximum fitting order in horizontal (VAD) and vertical adaptively according to the size of continuous data absence and the number of sweeps in a volume scan. VAD fitting is abandoned when the data absence is larger than 90° ; the order is set to 3 when the data absence is between 60° and 90° ; and the order is set to 4 when the data absence is smaller than 60° . The order of nonlinear VAD fitting is reduced when the VCP only has low elevations. Apply the method in two cases: One is a front case passing through Taiwan, China, the other is a typhoon case landfall in Guangdong Province, with both of them having nonlinearity in the low level wind profile. The wind profile after adjusted can significantly improve the wind retrieval, as compared with the traditional nonlinear VAD. Both wind speed and direction from modified nonlinear VAD agree with those from sounding observations, with the root mean square of the wind less than $2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, which is obviously better than nonlinear VAD before adjusted.

Key words: nonlinear VAD; low-level vertical wind profile; Doppler radar