

一种抗噪声的天气雷达速度退模糊新算法^{* 1}

楚志刚¹ 银燕^{1,2} 顾松山²

CHU Zhigang¹ YIN Yan^{1,2} GU Songshan²

1. 南京信息工程大学,气象灾害教育部重点实验室,南京,210044

2. 南京信息工程大学,中国气象局气溶胶与云降水重点开放实验室,南京,210044

1. *Key Laboratory of Meteorological Disaster of Ministry of Education, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China*

2. *Key Laboratory for Aerosol-Cloud-Precipitation of China Meteorological Administration, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China*

2012-11-29 收稿,2013-04-07 改回.

楚志刚,银燕,顾松山.2013.一种抗噪声的天气雷达速度退模糊新算法.气象学报,71(4):743-753

Chu Zhigang, Yin Yan, Gu Songshan. 2013. A new anti-noise dealiasing algorithm for weather radar velocities. *Acta Meteorologica Sinica*, 71(4): 743-753

Abstract Velocity aliasing is an important factor affecting the data quality of Doppler weather radar. A new anti-noise dealiasing algorithm (AND) was proposed to solve the ambiguity. Based on the spatial continuity, the AND utilizes a lossless continuous noise suppression scheme. It consists of three steps: noise separation, fitting-curve dealiasing, and noise restoration. Validation by 4 CINRAD-SA stations \times 3 years of full ambiguous volume files (>40000) shows that: (1) AND was better than the WSR-88D dealiasing algorithm. It had a correct rate 30% higher than that by the WSR-88D dealiasing algorithm; (2) the correct rate of full ambiguous volume files were 89.4%, with the correct rate for typhoon, strong convection and weak convection reached 92.9%.

Key words Weather radar, Radial velocity, Velocity dealiasing, Noise suppression, Quality control

摘要 径向速度模糊是影响多普勒天气雷达资料质量的一个重要因素。针对模糊的问题,提出了一种抗噪声的速度退模糊新算法:基于速度场的空间连续性,采用无损的连续噪声抑制方案,由噪声分离、曲线拟合退模糊和噪声恢复3个步骤组成。用CINRAD-SA雷达4站3a的全部模糊数据(>40000 个体扫文件)进行验证,结果表明:(1)抗噪声的速度退模糊新算法明显优于WSR-88D退模糊算法,正确率比其高30%;(2)以体扫文件为单位的退模糊正确率为89.4%,其中,台风、强对流和弱对流的退模糊正确率达92.9%。

关键词 天气雷达, 径向速度, 速度退模糊, 噪声抑制, 质量控制

中图法分类号 P412.25

1 引言

径向速度是新一代天气雷达获取的观测资料之一,广泛应用于资料同化、临近预报、强对流预警、大

风灾害预警等领域(刘黎平等,2004;陶祖钰,1992;王丽荣等,2007;徐芬等,2007;杨毅等,2008;郑媛媛等,2004)。但速度模糊的问题使风场反演产品和同化结果变得不可靠,在很大程度上限制了速度资

* 资助课题:公益性行业(气象)科研专项(GYHY201106044)、国家自然科学基金项目(40975037)和江苏高校优势学科建设工程资助项目(PAPD)。

作者简介:楚志刚,主要从事天气雷达资料处理与应用研究。E-mail:chuzhigang@gmail.com

通讯作者:银燕,主要从事云降水物理学及大气气溶胶研究。E-mail:yinyan@nuist.edu.cn

料的使用,阻碍了风场反演和资料同化方法的研究。

速度模糊的产生原因是天气雷达通过测量脉冲间的相位变化得到目标物的径向速度,测速范围为 $(-V_{\max}, +V_{\max})$, V_{\max} 被称为奈奎斯特(Nyquist)速度或最大不模糊速度

$$V_{\max} = \frac{\lambda F_{\text{PR}}}{4} \quad (1)$$

其中, λ 为雷达波长, F_{PR} 为脉冲重复频率。如果真实速度 V_{T} 超出 $\pm V_{\max}$,测量的径向速度 V_{r} 会折叠到 $\pm V_{\max}$ 范围内。 V_{T} 与 V_{r} 的关系为

$$V_{\text{T}} = V_{\text{r}} \pm 2nV_{\max} \quad (n = 0, 1, 2, \dots) \quad (2)$$

如果真实的径向风速 V_{T} 满足 $|V_{\text{T}}| < V_{\max}$, $n = 0$,则 $V_{\text{T}} = V_{\text{r}}$;如果真实的径向风速 $|V_{\text{T}}| > V_{\max}$, $n \neq 0$, $V_{\text{T}} \neq V_{\text{r}}$,就发生了速度模糊。 n 被称为奈奎斯特数,求解 n 的过程被称为速度退模糊。

为了解决速度模糊的问题,在过去的30多年里中外学者提出了多个速度退模糊算法。Ray等(1977)提出了第一个一维退模糊算法,假设径向上速度是服从正态分布的,参照这个分布校正模糊。Bargen等(1980)提出了另一个一维退模糊方法,在径向的初始点是不模糊的假设下,用多点速度平均值校正模糊。Hennington(1981)提出一个用外部风场做参照的退模糊算法。一维退模糊算法受缺测、噪声和风切变影响大,且存在初始模糊的问题,用外部风场作参照又存在时空分辨率与雷达不匹配的问题(James, et al, 2001),因此,这3个方法解决模糊问题的能力是有限的。但是,这种“点-块”和“点-风场”比较的思路被之后的算法所借鉴,“点-块”比较法被扩展到二维、三维、四维,“点-风场”比较法中的外部风场被替换成雷达反演的环境风场或模式风场。

Merritt(1984)提出了第一个二维算法,将速度场分为不同的区域,通过识别区域的边界校正模糊,用风场模型解决孤立回波的问题。之后,Boren等(1986)对Merritt(1984)的算法进行了改进。Bergen等(1988)基于Merritt(1984)的方法,设计了质量控制方法,填补缺测、抑制噪声,并将算法扩展到了三维。Eilts等(1990)借鉴了Bargen(1980)和Hennington(1981)的方法,提出了二维的速度退模糊算法,该算法已被应用于WSR-88D雷达业务,并被引入到中国新一代天气雷达网中。之后,He等(2012)从质量控制、初始模糊、执行方向、错误检查

4方面对其进行了改进。James等(2001)借鉴Eilts(1990)算法,增加了仰角和时间维,提出了一个四维算法,用仰角和时间维解决初始模糊问题。梁海河等(2002)提出了另一个二维方法,用“K邻域频数法”滤波,用双径向-双切向退模糊。Zhang等(2006)提出了2DMPDA(2D Multipass Dealiasing Algorithm)方法,用搜索弱风区来解决初始模糊问题。之后,仰美霖等(2011)在质量控制方法上对2DMPDA进行改进。

另一类算法是以切向拟合的简谐曲线为参照的退模糊算法。陶祖钰等(1993)、刘淑媛等(2003)、朱立娟等(2006)分别提出用速度方位显示(Velocity Azimuth Display, VAD)(Lhermitte, et al, 1961; Browning, et al, 1986)环境风场作为参照校正模糊的算法。由于模糊点的存在会影响到速度方位显示的结果,所以,Tabary等(2001)提出了修正速度方位显示(Modified Velocity Azimuth Display, MVAD)方法,利用径向速度的方位梯度来拟合环境风场,可以在有模糊的情况下,得出正确的结果。Gong等(2003)提出了用修正速度方位显示和速度方位显示校正模糊的算法。张少波等(2007)、Xu等(2011)对Gong(2003)方法做了改进。速度方位显示或修正速度方位显示退模糊算法的优点是抗干扰能力强,缺点是对切向资料覆盖率要求高,不能准确描述大尺度的非线性风场和局部的小尺度风切变。

还有一类算法是将速度模糊的问题转换成其他等价的问题。Jing等(1993)提出了二维退模糊算法,将退模糊问题转化成求解不连续边界的线性方程组的极值问题。Witt等(2009)对二维退模糊算法进行了改进。刘晓阳等(1992)和方德贤等(2007)提出了用搜索模糊边界来区分模糊区和不模糊区,进而校正模糊的算法。Li等(2010)提出了用搜索0速度线,区分正、负速度区,用符号是否一致校正模糊的算法。这类算法具有一定的抗干扰能力,但一旦判别错误,也会“污染”大片数据。

上述的速度退模糊算法存在两个问题。一是连续噪声抑制问题。速度退模糊算法依赖速度场的连续性。当速度场不连续时,退模糊算法会失效而产生错误结果。退模糊错误有两种情况:模糊数据未校正和不模糊数据变成模糊数据(或模糊数据变成更模糊数据)。后一种错误是退模糊算法的负效应,在本文中称之为“污染”。一个“污染”错误出现后,

常常会沿径向和切向传播,使更多的数据被破坏。假如没有“污染”,退模糊算法对数据质量的改善作用一定是正的,但由于它的存在,这种改善作用就变得不确定,这也是退模糊算法在应用中遇到的主要问题。产生“污染”的主要原因是连续噪声,即多个噪声点连续排列或噪声点数大于非噪声点数的局部区域。Bergen 等(1988)和 Witt 等(2009)指出,地物区、低信噪比区和高谱宽区的连续噪声的危害是很大的。由于连续噪声局部点数占优的分布特点,使得依赖于周围点分布的局部滤波(Bergen, et al, 1988)、平滑(Boren, et al, 1986)、统计(梁海河等, 2002)的质量控制方法不但无效,而且,会使连续噪声变得更连续。对于连续噪声的抑制方法主要有地物区噪声的抑制方法(仰美霖等, 2011)、低信噪比区噪声的抑制方法(James, et al, 2001; Gong, et al, 2003)、高谱宽区噪声的抑制方法(He, et al, 2012)。由于难以准确区分噪声点和非噪声点,所以,这类方法会误删部分非噪声点,损伤风场的信息(Bergen, et al, 1988),因此,对这类方法的使用是比较谨慎的。综上所述,连续噪声的危害是大的,传统退模糊算法对其抑制的能力是有限的。因此,在退模糊过程中如何既能有效抑制连续噪声,又不损伤风场的信息成了减少退模糊算法负效应,提升退模糊能力的关键。

二是算法验证的问题。速度退模糊算法研究的目的是为了解决实时业务中速度模糊的问题,为后续的风场分析、产品反演和资料同化服务。由于退模糊算法流程复杂,从方法上难以直接比较出优劣,所以算法结果验证成了反映算法性能的重要指标。传统退模糊算法的验证样本数据是基于个例的,评分方法是局部评分。从验证数据的选择上,传统的退模糊算法都是用的个例数据,除梁海河等(2002)的验证数据集包括小两个例外,其他算法均使用台风、龙卷、飏线、暴雨等强对流个例验证。根据 CIN-RAD-SA 连续观测的资料统计,在云雨回波文件中 15%左右是模糊的,3/4 的模糊发生在弱天气回波中,12 月至 4 月是模糊的高发期,因此,传统算法的验证数据集选择的样本少,类型和时间代表性较差。从评分方法上看,有点正确率评分(Eilts, et al, 1990)和层正确率评分(仰美霖等, 2011),这种局部评分的方法,没有考虑到后续风场产品反演和资料同化的需求。如风场反演方法是以体扫文件为输入

的,其关心的是退模糊后以文件为单位的正确率。不同的评分方法结果差异也很大,以 James 等(2001)的算法为例,从其文献中给出的详细验证数据可见,同一方法同一验证数据集,以点正确率评分为 97%,以层正确率评分为 93%,以文件正确率评分仅为 44%。综上所述,传统退模糊方法的个例验证和局部评分结果难以反映算法的实际性能和应用潜力。因此,用业务连续数据验证,并从反演和同化角度评分将是解决这一问题的关键。

基于以上两个问题,本文采用了无损的连续噪声抑制方案,提出了一种抗噪声的速度退模糊新算法,并用 4 站 3 a 的全部模糊体扫文件对抗噪声的速度退模糊算法进行验证,用文件正确率评分,给出了验证和对比结果。

2 抗噪声速度退模糊算法描述

抗噪声速度退模糊算法是一个三维的速度退模糊新算法,连续噪声的抑制是其最主要的特征。连续噪声的抑制采用“分离-恢复”方案,可以在不损失任何非噪声数据的情况下,减小连续噪声对退模糊过程的影响,因此,也是一种无损的连续噪声抑制方法。算法由噪声分离、曲线拟合退模糊、噪声恢复 3 个步骤组成,用弱风区搜索法+修正速度方位显示(MVAD)+速度方位显示(VAD)解决初始模糊的问题(图 1)。第 1 步是噪声分离。根据噪声点分布的特点设计,使用严格的阈值尽可能多地把噪声点分离出来。第 2 步是曲线拟合退模糊。经过噪声分离后,速度场中噪声虽然大量减少,但残留的噪声仍然会影响退模糊过程。所以,抗噪声的速度退模糊算法使用三条拟合曲线的方法进一步抑制残留的噪声,同时抑制了“污染”错误的传播。第 3 步是噪声恢复。分离出来的噪声中包含非噪声点,为了保持速度场的原分布,这一步将噪声逐点恢复到原位置并校正模糊。

2.1 噪声分离(第 1 步)

噪声的产生原因是多方面的,可由地物、低信噪比、气象目标的高脉动(高谱宽)、生物、电磁干扰、距离折叠、超折射、测量误差等引起。其中,有些噪声并非真正意义的噪声,如地物区噪声,而是真实的测量值,但由于其与气象目标的径向速度差异较大,从连续性的角度来看,认为其是噪声。噪声分离由三个分离器实现,分别用于分离地物区、低信噪比区和

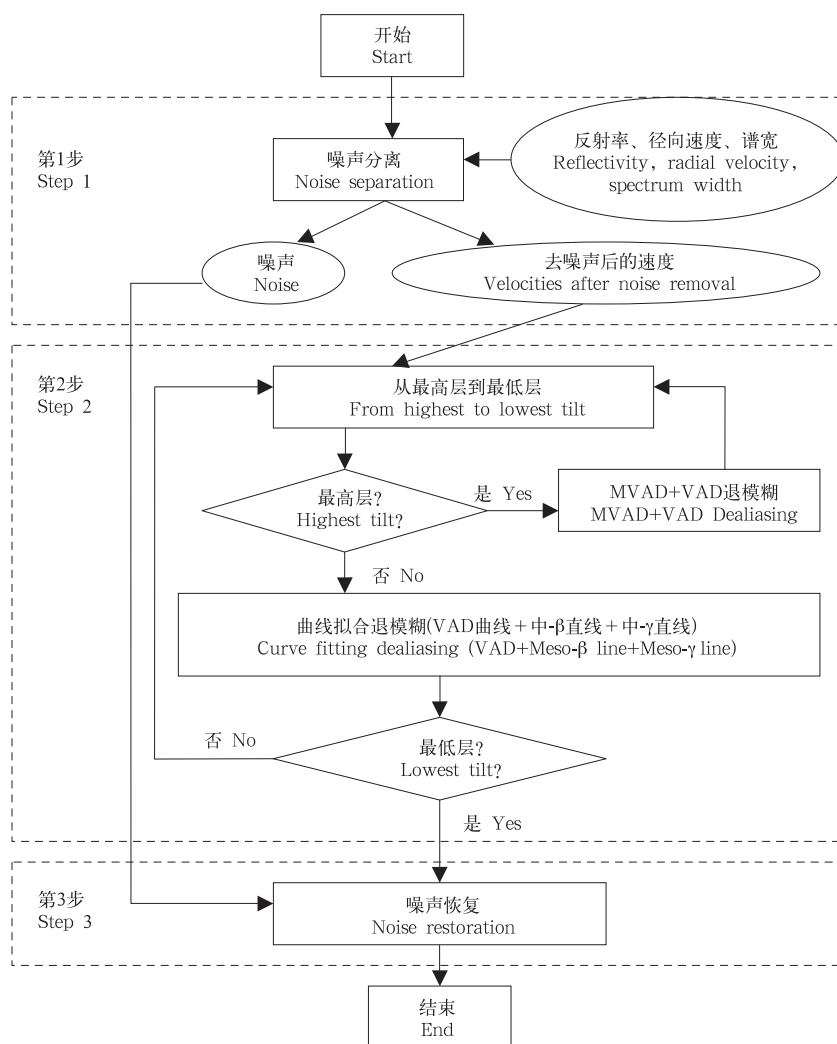


图1 抗噪声的速度退模糊算法流程

Fig. 1 Main flowchart for the AND algorithm

高谱宽区的连续噪声。

2.1.1 地物噪声分离器

地物区噪声较多,尤其是在低仰角的观测数据中,对退模糊算法影响很大(Bergen, et al, 1988)。地物分固定地物和超折射地物两种。对固定地物噪声的分离是设定3个条件:一是高度小于阈值 T_{height} (默认值为 1.5 km);二是反射率大于阈值 T_{dBz} (默认值为 20.0 dBz);三是速度绝对值小于 T_{vel} (默认值为 5.0 m/s)。将满足这3个条件的速度点分离出来,相应位置用缺测代替。对超折射地物噪声的分离是采用垂直结构比较法,用 T_{cappi} (默认值为 3.0 km)高度作参考平面计算反射率垂直梯度,将垂直梯度大于阈值 T_{vz} (默认值为 15.0 dBz/km)的速度点分离出来,相应位置用缺测代替。

2.1.2 低信噪比噪声分离器

低信噪比使测量结果不可靠易形成噪声,如弱回波区或远距离回波边缘。对低信噪比区噪声的分离,借鉴 Gong 等(2003)的方法,首先利用式(3)计算信噪比 R_{SN}

$$R_{\text{SN}} = Z - 20\lg R + C \quad (3)$$

其中, Z 为雷达反射率因子, R 为距离, C 为与雷达参数有关的常数。然后将信噪比小于阈值 T_{SNR} (默认值为 5.0 dB)的速度点分离出来,相应位置用缺测值代替。

2.1.3 高谱宽噪声分离器

谱宽表征气象目标径向速度的瞬时脉动。高谱宽说明目标物的速度瞬时的变化较快,有可能是风场变化剧烈,也可能是受其他信号的干扰。对高谱

宽区噪声的分离,借鉴 He 等(2012)的方法,将谱宽值大于阈值 T_{sw} (默认值为 8.0 m/s)的速度点分离出来,相应位置用缺测值代替。

2.2 曲线拟合退模糊(第2步)

2.2.1 基本流程

退模糊在三维空间进行,顺序在仰角上是从高仰角到低仰角,在层上是从初始径向起顺时针执行,在径向上是从雷达中心到最远处。退模糊时,首先计算当前位置的参考值,然后依据参考值判断模糊,并恢复当前点的真实速度值,最后对当前点进行错误检查。

2.2.2 计算参考值

用已正确退模糊的数据拟合 3 条曲线:沿径向的中 β 直线(20—200 km, 阈值可调)、中 γ 直线(2—20 km, 阈值可调)和沿切向的速度方位显示曲线(图 2)。EL0 表示当前层; EL1 表示上一层; 箭头指向的 A 点是表示当前点, 即当前需要处理的模糊情况未知的点, P 点表示当前径向上已退模糊的点; U 点表示上一层与 A 点同方位角的已退模糊的点; R 点是上一层与 A 点同一高度的已退模糊的点。用 P 和 U 点在不同距离(尺度)上拟合中 β 直线和中 γ 直线; 用 R 点拟合速度方位显示曲线。然后, 用 3 条曲线外推当前点位置的估计参考值为 V_β 、 V_γ 和 V_{vad} , 以拟合标准方差 r_{ms_β} 、 r_{ms_γ} 和 $r_{ms_{vad}}$ 为权重, 通过式(4), 得到当前点的退模糊参考值 V_{ref}

$$V_{ref} = \frac{\frac{V_\beta}{r_{ms_\beta}} + \frac{V_\gamma}{r_{ms_\gamma}} + \frac{V_{vad}}{r_{ms_{vad}}}}{\frac{1}{r_{ms_\beta}} + \frac{1}{r_{ms_\gamma}} + \frac{1}{r_{ms_{vad}}}} \quad (4)$$

多拟合曲线加权计算参考值的方法能综合利用切向和径向信息,有一定的抗噪声干扰能力,且可以动态匹配不同尺度的风场,有利于增强抗噪声的速度退模糊算法的稳定性和适应性。

2.2.3 初始问题的处理

退模糊算法初始时,由于所有点的模糊情况都是未知的,所以,容易出现初始模糊的问题。最高仰角层是抗噪声速度退模糊算法的初始层,处理方法与其他层不同。借鉴 Zhang 等(2006)搜索弱风区的方法,找到一个模糊概率最小的径向作为初始径向,以初始径向为起点,顺时针依次退模糊每一根径向。退模糊时,沿切向拟合一条速度方位显示曲线和一条修正速度方位显示曲线,选择标准方差小的一条作为参考曲线,外推得到当前点位置的参考值 γ , 依据 γ 恢复当前点的真实速度值并进行错误检

查。初始层的数据经过噪声分离后,噪声已经大量减少,且由于最高仰角层切向数据的水平距离小和覆盖率高,因此可以满足速度方位显示和修正速度方位显示曲线的要求。

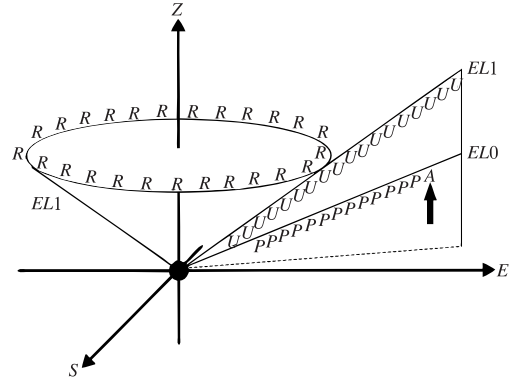


图 2 曲线拟合的所有参与点示意图

Fig. 2 Schematic diagram for the points involved in the curve fitting

2.2.4 错误检查

错误检查能在一定程度上避免错误扩散。抗噪声的速度退模糊算法在当前点退模糊后,立即进行错误检查。方法是计算当前点退模糊后的值与参考值 r 之差,如果差值的绝对值大于阈值 T_{dif} (默认值为 10.0 m/s),则认为当前点是残留噪声,将其分离到噪声数据中,当前位置用缺测值填补。

2.3 噪声恢复(第3步)

噪声恢复是为了保持径向速度场的原始分布,为后续的其他质量控制、反演、同化算法提供完整的风场信息。恢复的噪声包括第 1 步分离和第 2 步未通过错误检查的,其中,既有噪声数据,也有大量被误认为噪声的数据。在噪声恢复的同时进行退模糊处理,使恢复点与周围点保持连续。退模糊过程与第 2 步类似,但参与拟合的数据点更多,对一个点的处理要用到上、中、下 3 层的数据,且恢复后的数据不作为拟合的参与点。

2.4 算法流程的个例说明

为了更直观地描述抗噪声速度退模糊算法,特别是噪声“分离-恢复”的过程,以福州雷达 2009 年 4 月 7 日 04 时 55 分(世界时,下同)的仰角 9.9°速度图为例,展示每一步处理后速度场的变化情况。从图 3a 可见,原始速度图中,在 60 km 范围内,存在大量的地物噪声(白色),在雷达的东北向有一个蓝色的模糊区,在雷达的西南向有两个黄色的模糊

区。从反射率图 3d 可见,回波是无降水的层状云回波,反射率值较小,出现低信噪比噪声的概率较大。从谱宽场(图 3g)可见,雷达的东北、东、南、西南 4 个方向,存在大量谱宽较大的点,对应的速度图上存在高谱宽噪声。图 3a 的退模糊是有挑战性的,尤其是邻近地物噪声的两个黄色模糊区。

抗噪声的速度退模糊算法的第 1 步中,首先分离地物噪声,将图 3a 分为 3b 和 3c。从图 3c 可见,大部分的地物噪声被分离出来,同时在方位 150°也误判了一些非噪声数据。接着是分离低信噪比噪声,分离后图 3b 变为图 3e。分离出来的低信噪比噪声与图 3c 合并,成为图 3f。对比图 3b、e 可见,分离的低信噪比噪声,大都分布在回波的边缘,同时一些孤立的小回波块也被分离。最后是分离高谱宽噪声,分离后图 3e 变为图 3h。分离出来的高谱宽噪声与图 3f 合并,成为图 3i。对比图 3e、h 可见,分离的高谱宽噪声,大都分布在回波内部且数量较多。所有噪声都保存在图 3i 中,由于采用了严格的阈值,分离出来的噪声中,包含了较多的非噪声数据,也有模糊的非噪声数据。用严格的阈值分离噪声主要是为了尽可能减少噪声对第 2 步曲线拟合退模糊的影响。由于噪声会引起退模糊错误,而退模糊错误通常具有传播性。因此,减少噪声的干扰,对算法性能的提升具有重要作用。

经过第 1 步噪声分离后,图 3h 中噪声数量已经大量减少。接着,进行第 2 步曲线拟合退模糊,将图 3h 变为图 3j。从图 3j 可见,雷达东北向的蓝色模糊区和西南向黄色模糊区已经被正确处理,无错误出现。

最后,在第 3 步中,将图 3i 中的噪声逐点恢复到图 3j 中,并以图 3j 为参考,判断每一恢复点的类别。如果恢复点是模糊的非噪声点,则进行退模糊处理,最终形成图 3k。对比图 3i、k 可见,图 3i 中模糊的非噪声点均被正确退模糊,同时不模糊的非噪声点也被正确恢复到原位置。对比图 3a、k 可见,经过抗噪声的速度退模糊后,图 3a 中所有的模糊数据均被正确处理,不模糊数据未受影响,同时,图 3k 保

持了原有速度场的分布,未增删任何数据点。

3 抗噪声速度退模糊算法的验证

3.1 验证数据集及验证方法

用 CINRAD-SA 雷达数据对抗噪声速度退模糊算法进行验证。雷达波长约为 10 cm;速度场的径向分辨率为 0.25 km,方位分辨率高于 1°;最大不模糊速度 V_{\max} 为 27—32 m/s;6 min 生成一个体扫文件;体扫文件有 9 个仰角,分别为 0.5°、1.5°、2.4°、3.4°、4.3°、6.0°、9.9°、14.6°和 19.5°。

验证数据集由福州、温州、合肥、武汉 4 部雷达 2008—2010 年全部有模糊的 42849 个体扫文件组成。将模糊文件分为 5 类,分别是台风、晴空、层状云(< 30 dBz)、弱对流(30—50 dBz)和强对流(50 dBz)(表 1)。

表 1 验证数据集的构成

文件	台风	晴空	层状云	弱对流	强对流
个数	2184	1162	6515	24141	8847
占百分比	5.1%	2.7%	15.2%	56.3%	20.7%

验证方法是采用人工验证的方式,以体扫文件为单位,用文件正确率评分。退模糊后体扫文件的所有层均无错误的评定为正确,否则评定为错误。

3.2 验证结果

经过验证,有 38296 个模糊文件被正确处理,退模糊正确率为 89.4%(表 2)。台风、强对流、弱对流类型退模糊正确率较高,晴空类型退模糊正确率次之,层状云类型退模糊正确率较低。正确率的高低与径向速度场的连续程度有关,台风、强对流、弱对流类型回波面积大,噪声点和缺测点少,连续性好;层状云类型回波弱,回波面积小,噪声和缺测点多,连续性差。晴空类回波最弱且有大量噪声,但由于其回波集中,在一定程度上抵消了噪声的干扰,所以,其连续性介于二者之间。

由于使用的数据集来自于业务雷达的连续 3 a 观测数据,所以,验证结果在一定程度上能体现抗噪

表 2 抗噪声速度退模糊算法检验结果

Table 2 The verification results of AND

文件数	台风	晴空	层状云	弱对流	强对流	合计
模糊文件	2184	1162	6515	24141	8847	42849
正确退模糊文件	2067	940	4683	22243	8363	38296
正确率	94.6%	80.9%	71.9%	92.1%	94.5%	89.4%

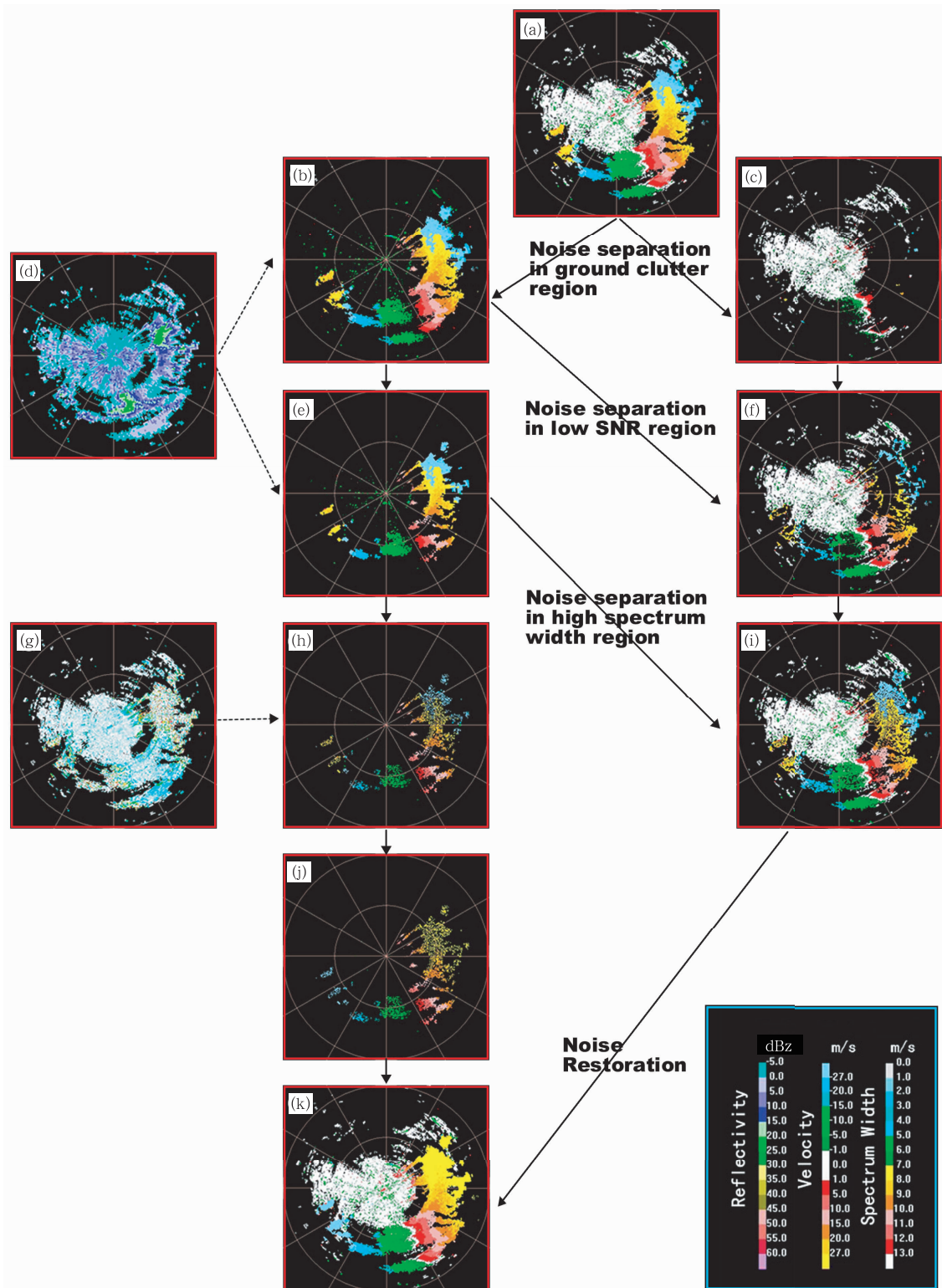


图3 福州雷达2009年4月7日04时55分抗噪声的速度退模糊流程
 (a. 原始速度, b. 去地物噪声的速度, c. 地物噪声, d. 原始反射率, e. 去信噪比噪声的速度, f. 地物和信噪比噪声, g. 原始谱宽, h. 去高谱宽噪声的速度, i. 地物、信噪比和高谱宽噪声, j. 第2步退模糊后速度, k. 最终退模糊后速度; 仰角 9.9°)

Fig. 3 Case description for the AND process

- (a. Raw velocity, b. Velocity after removal of noise in ground clutter region, c. Noise in ground clutter region,
- d. Raw reflectivity, e. Velocity after removal of noise in low SNR region, f. Noise in ground clutter and low SNR region,
- g. Raw spectrum width, h. Velocity after removal of noise in high spectrum width region,
- i. Noise in ground clutter, low SNR and high spectrum width region, j. Dealised velocity after Step 2,
- k. Final dealised velocity; 9.9° elevation angle, 04:55 UTC 07 Apr 2009, Fuzhou radar)

声的速度退模糊算法的应用潜力。综合表 1、2 分析,台风、强对流和弱对流 3 种类型占总模糊数据的 82.1%,其总退模糊正确率为 92.9%。因此,可以初步认为,抗噪声速度退模糊算法对业务雷达数据中 80%的模糊数据退模糊正确率 $>90\%$;对 20%的层状云模糊数据,退模糊正确率在 70%—80%。

3.3 与速度退模糊算法比较

Eilts 等(1990)提出的速度退模糊算法(通常简称为 VDA)是 WSR-88D 的业务化退模糊算法,并被引入到中国的新一代天气雷达业务软件包中。用福州雷达 2009 年的模糊体扫文件(1784 个)分别统计抗噪声速度退模糊算法和 VDA 算法的文件退模糊正确率。结果表明,抗噪声速度退模糊算法的正确率为 87.7%;VDA 算法的正确率为 57.8%。VDA 退模糊后,有 752 个文件存在错误,其中,353 个(占错误文件的 46.9%)发生了“污染”,即不模糊数据变成了模糊数据。抗噪声速度退模糊后,有 220 个文件存在错误,其中,仅有 11 个(占错误文件的 5.0%)发生了“污染”。

这种退模糊结果的差异,主要原因是噪声抑制能力的不同。VDA 算法对噪声抑制能力较弱,所以,受噪声干扰其退模糊正确率不高,且出现了很多“污染”错误。“污染”错误经过传播扩散后,会破坏大片不模糊的数据,使退模糊后的数据难以理解和使用,这也是 VDA 算法在应用中遇到的最大问题。由于抗噪声速度退模糊算法采用了抗噪声技术,相对于 VDA 算法退模糊正确率有明显的提高(从

57.8%提高到 87.7%),且“污染”错误的比例有较大幅度的降低(从 46.9%降低到 5.0%)。

3.4 执行时间

在 PC 机(CPU 为 Intel i7-2600K)上,退模糊一个体扫文件的平均执行时间为 33.4 s(约 3.7 s/层),最小执行时间为 7.0 s,最大执行时间为 180.7 s。由于退模糊过程中进行了大量的曲线拟合计算,所以,抗噪声速度退模糊算法比传统算法消耗了更多的执行时间。对于 6 min 的体扫文件时间间隔,平均运行时间是可以接受的,但最大执行时间偏长。

3.5 个 例

选择 3 个抗噪声速度退模糊算法退模糊的个例,模糊类型分别是晴空、层状云和龙卷。图 4a、b 是武汉雷达 2010 年 4 月 11 日 18 时 15 分观测的仰角 1.5° 的晴空回波反射率和速度。图 4b 中箭头 A、B 所指的区域是模糊区域,退模糊后图 4c 中相应二个区域的模糊都已正确校正,没有出现“污染”错误。图 5a、b 是武汉雷达 2008 年 1 月 28 日 11 时 06 分观测的仰角 6.0° 的层状云回波反射率和速度。回波呈环状分布,云体较薄,无降水发生。环境风速约 60 m/s,模糊比较严重,图 5b 中 A 和 B 所指的模糊区域占整体回波面积的近 1/2,模糊区域出现了模糊的伪 0 速度线(方位 60° 和 240° 附近的白色线)。退模糊后,从图 5c 可见,抗噪声的速度退模糊算法正确地恢复了模糊风场的真实值且不模糊区域未受影响。图 6a、b 是南京雷达 2007 年 7 月 3 日 08 时

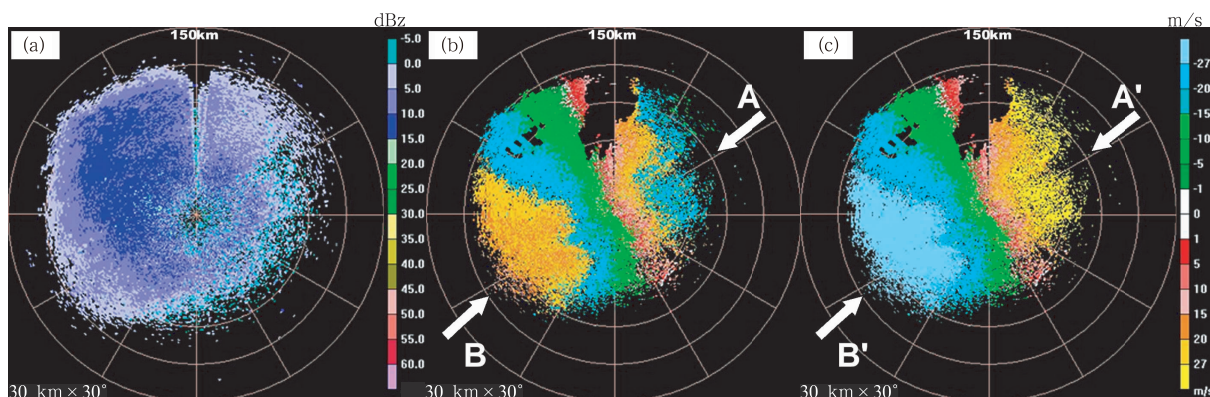


图 4 武汉雷达 2010 年 4 月 11 日 18 时 15 分晴空退模糊
(a. 反射率, b. 径向速度, c. 退模糊后径向速度;仰角 1.5°)

Fig. 4 Dealiasing case of clear air. (a) Reflectivity, (b) Radial velocity, and (c) Dealiased radial velocity (1.5° elevation angle, 18:15 UTC 11 Apr 2010, Wuhan radar)

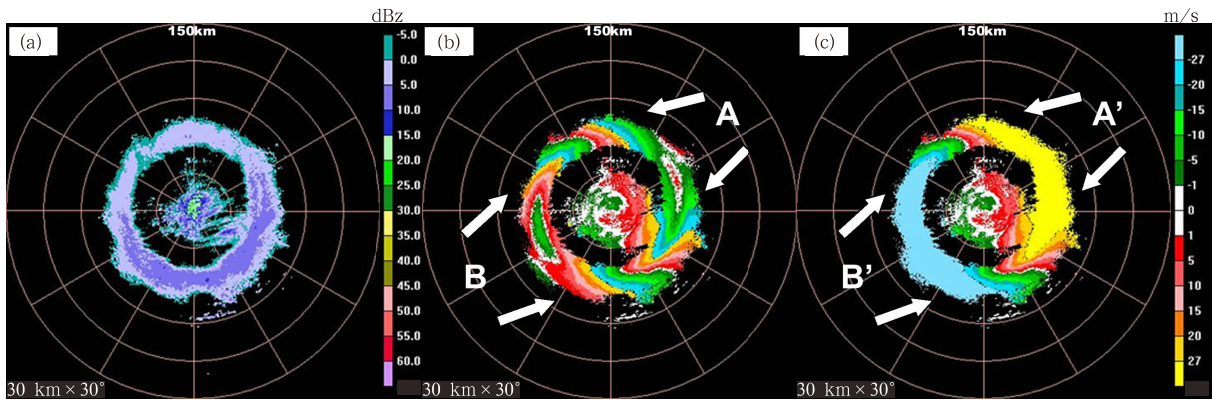


图5 武汉雷达2008年1月28日11时06分层状云退模糊
(a. 反射率, b. 径向速度, c. 退模糊后径向速度; 仰角 6.0°)

Fig. 5 Dealiasing case of stratus. (a) Reflectivity, (b) Radial velocity, and (c) Dealiased radial velocity (6.0° elevation angle, 11:06 UTC 28 Jan 2008, Wuhan radar)

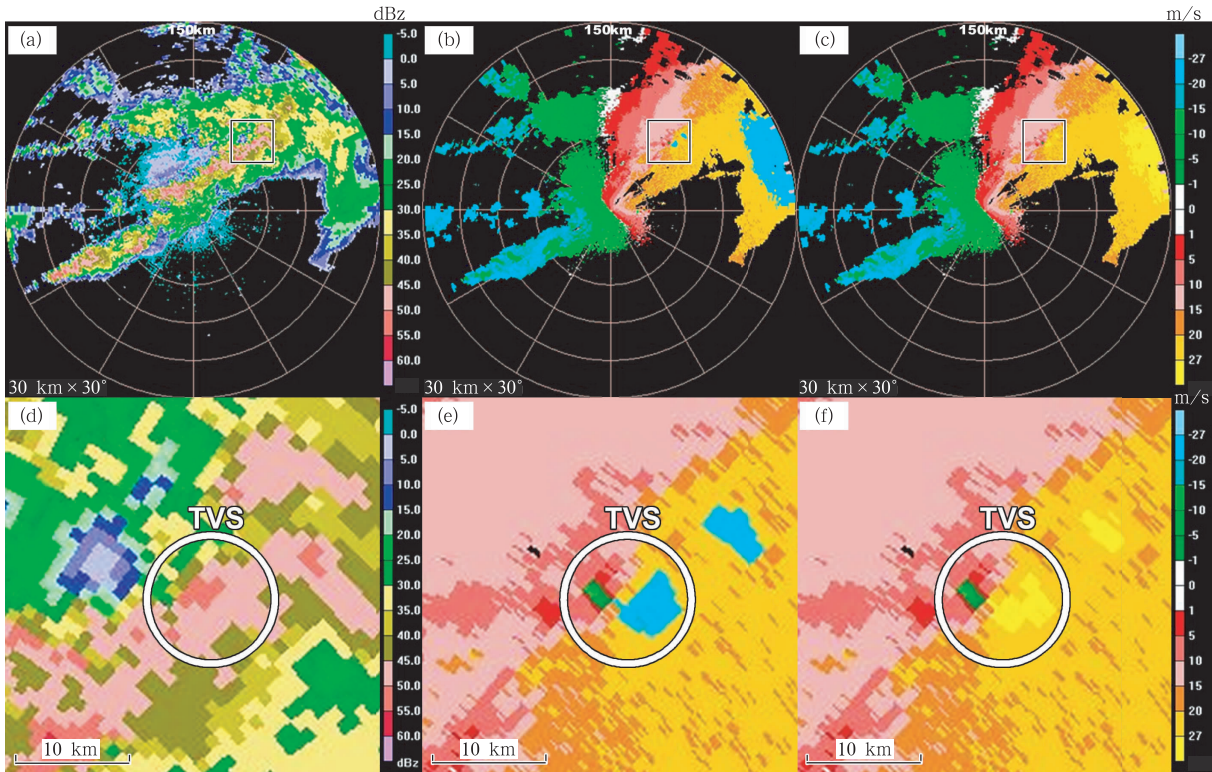


图6 南京雷达2007年7月3日08时54分龙卷退模糊
(a. 反射率, b. 径向速度, c. 退模糊后径向速度, d. 龙卷区域反射率, e. 龙卷区域径向速度, f. 龙卷区域退模糊后径向速度; 仰角 1.5°)

Fig. 6 Dealiasing case of tornado. (a) Reflectivity, (b) Radial velocity, (c) Dealiased radial velocity, (d) Reflectivity in the tornado area, (e) Radial velocity in the tornado area, and (f) Dealiased radial velocity in the tornado area (1.5° elevation angle, 08:54 UTC 3 Jul 2007, Nanjing radar)

54分观测的仰角 1.5° 龙卷反射率和速度。图6c是抗噪声的速度退模糊后的速度。为了可以清晰地分析龙卷, 将图6a、b、c中黑色方框区域分别放大为图

6d、e、f, 并用白色圆圈标注龙卷的位置。从图6a可见, 这是一次飏线过程, 在速度图6b中有两个区域出现了模糊, 一个在黑色方框中, 一个在方位角

45°—90°、径向距离 120—150 km 的区域。退模糊后(图 6c)两个区域已正确校正且不模糊区域未受影响。进一步分析龙卷区域,图 6e 中白色圆内有一龙卷涡旋,龙卷的负速度区由于环境风场的叠加而变得较小(绿色);在龙卷的正速度区,由于风速大,出现了模糊(浅蓝色),如果不退模糊,龙卷涡旋算法不仅无法正确识别,还可能在右下方识别出一个错误的龙卷涡旋。经过抗噪声速度退模糊,从图 6f 可见,龙卷区域的正速度区的模糊被正确恢复(黄色),同时龙卷负速度区(绿色)未受影响。

4 结 论

针对传统速度退模糊算法的连续噪声抑制问题,提出了一种新的抗噪声速度自动退模糊算法——抗噪声速度退模糊算法。该算法采用了无损的“分离-恢复”噪声抑制方案,对噪声尤其是连续噪声抑制效果明显,提高了退模糊正确率,同时降低了“污染”错误的出现概率。退模糊时采用了多尺度曲线拟合加权方法,能自适应不同尺度的局部风场特征;退模糊后径向速度场保持原有的分布,在位置上与原数据一一对应,在数值上除了退模糊变化外,不改变任何一点的值,有利于后续的其他质量控制、产品反演和资料同化算法的处理。

针对传统速度退模糊算法验证的问题,选取 CINRAD-SA 业务雷达的 4 站共 3 a 的全部有模糊的体扫文件(>40000 个)对抗噪声速度退模糊算法进行了验证,既包括常见的强对流、弱对流和台风类型模糊,也包括被传统算法忽略的层状云类型模糊,还包括了少见的晴空和龙卷类型模糊。验证结果表明:以文件为单位退模糊正确率为 89.4%,其中,对台风、强对流和弱对流类型的退模糊正确率达 92.9%。抗噪声速度退模糊算法明显优于 WSR-88D 的 VDA 算法,退模糊正确率比其高 30%,且“污染”错误的比例有较大幅度的降低。

抗噪声速度退模糊算法存在的不足是:(1)对层状云类型退模糊正确率低。由于层状云,特别是无降水的层状云,回波面积小且不连续,受缺测点干扰较大,常常无法找到有效参考点,退模糊更难。这也是退模糊算法普遍存在的问题。(2)对高仰角的孤立强对流类型退模糊能力有限。抗噪声速度退模糊算法由于采用多曲线拟合的技术,与传统算法相比它需要更多的参考点。在处理高仰角的孤立强对流

模糊时,会出现由于参考点少而无法识别模糊的情况。(3)执行时间长。曲线拟合需要进行更多的数值计算,所以抗噪声速度退模糊算法相对于传统算法需要更长的执行时间。尤其是最大执行时间达到了 3 min,这不利于算法在实时业务环境的应用。这 3 个不足未来还需要进一步讨论和优化。

致谢:感谢中国气象局气象干部培训学院费海燕和国家气象信息中心提供的天气雷达资料,感谢国家气象卫星中心刘瑞霞对论文的指导和帮助。

参考文献

- 方德贤,刘国庆,董新宁等. 2007. 区域生长法在多普勒天气雷达速度场分析中的应用. 南京大学学报(自然科学版), 43(1): 102-110
- 梁海河,张沛源,葛润生. 2002. 多普勒天气雷达风场退模糊方法的研究. 应用气象学报, 13(5): 591-599
- 刘黎平,邵爱梅,葛润生等. 2004. 一次混合云暴雨过程风场中尺度结构的双多普勒雷达观测研究. 大气科学, 28(2): 278-284
- 刘淑媛,王洪庆,陶祖钰等. 2003. 一种简易的多普勒雷达速度模糊纠正技术. 应用气象学报, 14(5): 111-118
- 刘晓阳,张培昌,顾松山. 1992. 用折叠线跟踪算法去除多卜勒速度折叠. 南京气象学院学报, 15(4): 493-499
- 陶祖钰. 1992. 从单 Doppler 速度场反演风矢量场的 VAP 方法. 气象学报, 50(1): 81-90
- 陶祖钰,石坚. 1993. 多普勒速度模糊的切向消除技术. 应用气象学报, 4(2): 145-153
- 王丽荣,胡志群,汤达章等. 2007. 多普勒雷达径向速度资料在对流天气预报中的应用. 气象科学, 27(6): 695-701
- 徐芬,夏文梅,胡志群等. 2007. 多普勒天气雷达风场产品在螺旋度计算中的应用. 气象科学, 27(5): 495-501
- 仰美霖,刘黎平,苏德斌等. 2011. 二维多途径退速度模糊算法的应用及效果研究. 气象, 37(2): 203-212
- 杨毅,邱崇践,龚建东等. 2008. 三维变分和物理初始化方法相结合同化多普勒雷达资料的试验研究. 气象学报, 66(4): 479-488
- 张少波,陆汉城,张鹏等. 2007. 基于 MVAD 技术的多普勒雷达径向速度退模糊方法的改进研究. 热带气象学报, 23(5): 497-504
- 郑媛媛,俞小鼎,方翀等. 2004. 一次典型超级单体风暴的多普勒天气雷达观测分析. 气象学报, 62(3): 317-328
- 朱立娟,龚建东. 2006. OIQC 技术在雷达反演 VAD 廓线资料退模糊中的应用研究. 高原气象, 25(5): 862-869
- Bergen D W, Brown R C. 1980. Interactive radar velocity unfolding // Preprints, 19th Conf. on Radar Meteorology. Miami, FL, Amer Meteor Soc, 278-283
- Bergen W R, Albers S C. 1988. Two- and three- dimensional dealiasing of Doppler radar velocities. J Atmos Ocean Technol, 5(2): 305-319

- Boren T A, Cruz J R, Znic D S. 1986. An artificial intelligence approach to Doppler radar velocity dealiasing // Preprints, 23rd Conf. on Radar Meteorology. Snowmass, CO, Amer Meteor Soc, 107-110
- Browning K A, Wexler R. 1986. The determination of kinematic properties of a wind field using Doppler radar. *J Appl Meteor*, 7(1): 105-113
- Eilts M D, Smith S D. 1990. Efficient dealiasing of Doppler velocities using local environment constraints. *J Atmos Ocean Technol*, 7(1): 118-128
- Gong J D, Wang L L, Xu Q. 2003. A three-step dealiasing method for Doppler velocity data quality control. *J Atmos Ocean Technol*, 20(12): 1738-1748
- He G X, Li G, Zou X L, et al. 2012. Applications of a velocity dealiasing scheme to data from the China new generation weather radar system (CINRAD). *Wea Forecasting*, 27(1): 218-230
- Hennington L. 1981. Reducing the effects of Doppler radar ambiguities. *J Appl Meteor*, 20(12): 1543-1546
- James C N, Houze R A. 2001. A real-time four-dimensional Doppler dealiasing scheme. *J Atmos Ocean Technol*, 18(10): 1674-1683
- Jing Z Q, Wiener G. 1993. Two-dimensional dealiasing of Doppler velocities. *J Atmos Ocean Technol*, 10(6): 798-808
- Lhermitte R M, Atlas D. 1961. Precipitation motion by pulse Doppler radar // Preprints, 9th Conf. on Weather Radar. Boston, Amer Meteor Soc, 218-223
- Li N, Wei M. 2010. An automated velocity dealiasing method based on searching for zero isodops. *Quart J Roy Meteor Soc*, 136(651): 1572-1582
- Merritt M W. 1984. Automatic velocity dealiasing for real-time applications // Preprints, 22nd Conf. on Radar Meteorology. Zurich, Switzerland, Amer Meteor Soc, 528-533
- Ray P S, Ziegler C. 1977. De-aliasing first-moment Doppler estimates. *J Appl Meteor*, 16(5): 563-564
- Tabary P, Scialom G, Germann U. 2001. Real-time retrieval of the wind from aliased velocities measured by Doppler radars. *J Atmos Ocean Technol*, 18(6): 875-882
- Witt A, Brown R A, Jing Z Q. 2009. Performance of a new velocity dealiasing algorithm for the WSR-88D // Preprints, 34th Conf. on Radar Meteorology. Williamsburg, VA, Amer Meteor Soc, P4. 8
- Xu Q, Nai K, Wei L, et al. 2011. A VAD-based dealiasing method for radar velocity data quality control. *J Atmos Ocean Technol*, 28(1): 50-62
- Zhang J, Wang S X. 2006. An automated 2D multipass Doppler radar velocity dealiasing scheme. *J Atmos Ocean Technol*, 23(9): 1239-1248