

文章编号: 2096-1618(2025)03-0278-08

减轻 C 波段天气雷达 DPRF 测速误差的算法研究及应用

王旭^{1,2}, 杨昱菲¹, 肖潇¹, 谢承华³, 史朝^{1,2}, 王海江^{1,2}

(1. 成都信息工程大学电子工程学院, 四川 成都 610225; 2. 中国气象局大气探测重点开放实验室, 四川 成都 610225; 3. 成都远望探测技术有限公司, 四川 成都 610213)

摘要:多普勒天气雷达不存在一个 PRF 能同时最大化不模糊速度和不模糊距离, 这就是“多普勒两难”问题。在研究和业务应用中, 需要对雷达数据进行退距离折叠和速度模糊处理才能用于数值天气预报模型、观测分析以及恶劣天气探测。针对此问题, 双脉冲重复频率 (Dual-PRF, DPRF) 算法使用两个不同的 PRT 依次采集两个均匀的时间序列, 并组合根据每个时间序列估算得到的速度, 获得一个新的速度估计值, 这一估值对应着更大的最大不模糊速度, 能够有效扩展测速区间, 减少速度模糊现象。但是, 使用 DPRF 算法在高切变区容易出现径向速度估计误差。基于线性插值和 Savitzky-Golay 滤波器创建平滑的多普勒径向速度, 通过将每个距离库的径向速度与该平滑后的速度进行比较, 识别错误数据, 并根据特定的错误特征进行校正。使用中国云南昆明 CINRAD/CC 型雷达 DPRF 速度数据对该算法进行测试和分析, 结果表明: 该算法能够识别并校正 DPRF 中大部分的速度误差点, 有效减轻 DPRF 的测速误差。

关键词:天气雷达; DPRF; Savitzky-Golay 滤波器; 径向速度; 误差校正

中图分类号: TN959.4

文献标志码: A

doi: 10.16836/j.cnki.jcuit.2025.03.004

0 引言

多普勒天气雷达的径向速度信息不仅可以用于灾害性天气的分析和预警, 还可用于地物杂波抑制、垂直风廓线反演以及通过同化改善数值预报模式初始场等。但在多普勒天气雷达径向速度资料的实际应用中, 数据易受距离折叠和速度模糊的影响, 此问题可通过 DPRF 法改善^[1-2]。中国布网的 SC、CC 和 CD 型 C 波段新一代多普勒天气雷达的所有仰角都采用 DPRF 技术估测径向速度, SA 和 SB 型 S 波段雷达也曾在最低两个仰角使用 DPRF 技术扩展最大不模糊速度, 当使用 C 波段雷达探测风速较大的强对流天气时, 其出现速度模糊的可能性更大, 对 DPRF 探测模式的依赖性更大。

DPRF 算法以不同的 PRT 依次采集两个均匀的时间序列数据, 再根据每个时间序列数据计算得到径向速度, 将两个速度组合起来反演得到一个新的径向速度估值, 其对应着更大的最大不模糊速度, 此种方式可以减轻速度模糊的影响。使用 DPRF 模式进行数据采集时, 对两种时间序列的组合, 有内在的空间连续性要求, 这使得机械扫描雷达在高切变区容易出现径向速度估计误差, 经常出现较大的正负速度交替跳变的奇异值, 尤其是对波长较短的 C 波段天气雷达而言。

对 DPRF 中正负速度交替跳变的产生原因以及如

何减轻其影响, 国内外学者进行了大量的研究。Joe 等^[3]分析了随机测量误差、气象特性和杂波对 DPRF 径向速度资料的影响。Holleman 等^[4]通过计算 DPRF 径向速度与其局地中值速度的差值, 发现速度奇异值的局地偏差与两个单脉冲重复频率对应的最大不模糊速度相关。杨川等^[5]通过分析 CINRAD-CC 型雷达的径向速度资料发现速度奇异值的局地跳变幅度约为扩展后的最大不模糊速度。梁海河等^[6]使用 K-邻域频数法对 DPRF 方法中出现的速度误差进行校正, 虽然能简单地滤除奇异值, 但仅对误差数据点进行了平滑, 没有从根本上对速度误差进行校正, 而且奇异值与其修正值之间忽略了模糊速度与其真实速度之间的应有关系。Joe 等^[3]使用中值滤波和拉普拉斯算子法对 DPRF 速度误差进行校正, 以降低速度资料空间分辨率为代价平滑部分有用的小尺度风场信息。肖艳姣等^[7]采用三步式的 DPRF 径向速度资料质量控制算法, 剔除速度资料中的孤立噪声并修正模糊速度和奇异速度值, 既保留原始速度资料的空间分辨率, 又具有空间连续性, 但可能对龙卷等小尺度切变的识别造成影响。Altube 等^[8]提出使用相位空间中的圆统计识别和修正 DPRF 测速误差, 提高了径向速度的准确性, 能够在严重混叠的情况下准确检测和修正 DPRF 误差, 但该技术只能处理由混叠引起的异常值, 对于其他成因的异常值, 如距离或速度测量误差等并不适用。Alford 等^[9]提出一种自动识别和校正 DPRF 测速误差的算法, 使用 Savitzky-Golay 滤波器 (下称 SG 滤波器)

创建一个平滑的多普勒径向速度,通过将每个距离库的速度与该平滑的速度进行比较,识别出错误数据,并根据特定的错误特征进行校正,该算法改进了以前的算法在校正成片错误速度方面的不足。

本文主要研究基于 SG 滤波器自动识别校正 DPRF 测速误差的算法原理及实现过程,并将该算法用于校正实际采集的 C 波段雷达 DPRF 模式的速度数据,然后通过对比校正前后的径向速度图和径向速度数据分析该算法校正测速误差的效果。

1 基于 SG 滤波器自动识别和校正 DPRF 测速误差的算法原理

1.1 DPRF 技术

多普勒天气雷达可通过径向速度回波特征推断大气流场的空间分布。雷达脉冲重复频率 PRF 决定载波脉冲序列参数所对应的频谱参数,从而影响信号处理分析时每条谱线的间隔。多普勒频移定义如下:

$$f = \frac{2V_0}{\lambda} \quad (1)$$

其中: f 为多普勒频移, V_0 为目标的径向速度, λ 为雷达波长。由于受到奈奎斯特采样定理的影响,若多普勒频移大于 PRF,即 $f > \text{PRF}$,或者目标的径向速度 $V_0 > \lambda \times \text{PRF} / 2$ 时,速度估测值会因收发谱线相重叠而产生模糊^[10]。

雷达能不模糊测量的最大平均径向速度为最大不模糊速度,其定义如下:

$$V_{\max} = \frac{\lambda \times \text{PRF}}{4} \quad (2)$$

其中 V_{\max} 为最大不模糊速度。

一个发射脉冲在下一个发射脉冲发出前能向前传播并返回雷达的最长距离为最大不模糊距离,其定义如下:

$$R_{\max} = \frac{c}{2 \times \text{PRF}} \quad (3)$$

其中: R_{\max} 为最大不模糊距离, c 为光速。

出现速度模糊时,目标探测到的径向速度 V_0 与真实的径向速度 V_r 之间的关系为

$$V_r = V_0 \pm 2nV_{\max} \quad (4)$$

其中: n 为整数,取值为 1, 2, 3, ...。

DPRF 发射两组交替的脉冲序列用于估测速度,假设两组脉冲序列对应的脉冲重复频率 PRF 分别为较低的 PRF_1 和较高的 PRF_2 ,对应的最大不模糊速度分别为 $V_{1\max}$ 和 $V_{2\max}$,通过组合两种不同 PRF 模式下的测量速度,最大不模糊速度得到扩展,扩展后的最大不模糊速度 V_{\max} :

$$V_{\max} = \frac{V_{2\max}}{\frac{V_{2\max}}{V_{1\max}} - 1} \quad (5)$$

可知,扩展速度的大小由两种 PRF 模式下的最大不模糊速度的比值决定,在 $0 < V_{2\max}/V_{1\max} - 1 < 1$,即 $1 < V_{2\max}/V_{1\max} < 2$ 的条件下, $V_{2\max}$ 和 $V_{1\max}$ 越接近,扩展后的最大不模糊速度 V_{\max} 越大,出现速度模糊的可能性越小。在多普勒雷达的应用中, PRF_2 和 PRF_1 的比值通常选择相邻互质的整数,即满足:

$$\frac{V_{2\max}}{V_{1\max}} = \frac{\text{PRF}_2}{\text{PRF}_1} = \frac{N+1}{N} \quad (6)$$

其中: N 为整数,常取 2, 3 和 4。当 $N=2$ 时,最大不模糊速度扩展为 $2V_{2\max}$,当 $N=3$ 时,最大不模糊速度扩展为 $3V_{2\max}$ 。

DPRF 技术中的误差点通常指周围都是准确径向速度估计值的局部跳变点,特别容易出现在高方位风切变的区域。其误差条件如下:

$$\left| \frac{V_2 \text{PRT}_2 - V_1 \text{PRT}_1}{\text{PRT}_2 - \text{PRT}_1} - V_2 \right| > V_{2\max} \quad (7)$$

其中: $V_{2\max}$ 是对应 PRF_2 的最大不模糊速度, V_1 是对应 PRF_1 的多普勒速度, V_2 是对应 PRF_2 的多普勒速度。其中 PRT 的选择满足特殊比值,由式(6)给出。

DPRF 技术引入的真实速度与估测速度值之间的误差特征定义为

$$\text{error} = 2nV_{\max} \quad (8)$$

其中: n 的取值限制为 1, 2 和 3,因为大多数情况不需要更高值的整数,如果需要, n 可以取更大的值。在大多数情况下, DPRF 中产生的速度误差的大小为 $\pm 2nV_{2\max}$ 或 $\pm 2nV_{1\max}$ (其中 $n=1, 2, 3, \dots$)。

1.2 基于 SG 滤波器的 DPRF 速度误差点的识别和校正原理

1.2.1 线性插值

一般情况下,雷达数据的时间序列数据集中会存在数据缺失,缺失量的多少在一定程度上会影响后续误差校正算法性能评价的客观性。本算法使用一维线性插值原理分别对径向速度数据进行方位插值和径向插值。

线性插值算法利用时间序列与观测值之间的等比关系补全缺失值。假设速度函数 $V(x)$,为了用简单的方法计算函数 $V(x)$ 的函数值,将函数划分为 n 个区间,假设时间序列 x 在区间端点的值为 $x_1, \dots, x_i, x_{i+1}, \dots, x_n$,已知对应区间端点速度值 $V(x_0), \dots, V(x_i), V(x_{i+1}), \dots, V(x_n)$,采取点 $(x_i, V(x_i))$ 和点 $(x_{i+1}, V(x_{i+1}))$ 连接的直线替代原函数,有:

$$V(x) = V(x_i) + \frac{V(x_{i+1}) - V(x_i)}{x_{i+1} - x_i} \cdot (x - x_i) \quad (9)$$

应用中,为确保数据在数据域边缘附近可用,需要对每个方位上的速度数据进行线性插值以填充缺失数据的位置。应用的线性插值算法不会改变多普勒速度,只是沿径向或方位在缺失数据的区域进行线性插值。例如,给定第 p 个径向,已知该径向上第 q 个距离库和第 $q+3$ 个距离库对应的速度值分别为 $V(p,q)$ 和 $V(p,q+3)$,第 $q+1$ 个、第 $q+2$ 个距离库速度样点值 $V(p,q+1)$ 和 $V(p,q+2)$ 丢失,则可以先将已知速度数据 $V(p,q)$ 和 $V(p,q+3)$ 利用线性插值算法计算得到的估计值替代缺失值 $V(p,q+1)$,再通过计算 $V(p,q+1)$ 和 $V(p,q+3)$ 的均值对第 $q+2$ 个距离库进行插值:

$$V(p,q+1)=\frac{V(p,q)+V(p,q+3)}{2}$$
$$V(p,q+2)=\frac{V(p,q+1)+V(p,q+3)}{2}$$

(10)

由式(10)可见,若数据缺失位点位于径向的两端,则该插值算法无法进行估测。天气雷达扫描回波数据在靠近雷达部分数据点密集,远离雷达位置数据点稀疏,故先对较小距离库的缺失值进行插值处理。

1.2.2 SG 滤波器

SG 滤波器在时域内基于局域多项式通过移动窗口利用最小二乘法拟合消除信号中的噪声。采用 SG 滤波器可以直接处理来自时间域内的数据平滑问题。

假设一个窗口内的速度数据为 $V(i), i=-m, \cdots, 0, \cdots, m$, 即 $V(i)$ 包含 $2m+1$ 个数据,构造一个 n 阶多项式拟合曲线:

$$f_i=\sum_{k=0}^nb_ki^k=b_0+b_1i+b_2i^2+\cdots+b_ni^n$$

(11)

其中: b 为多项式系数, k 为多项式阶次, i 为多项式权数。

速度数据与拟合多项式之间存在均方误差 ε 为

$$\varepsilon=\sum_{i=-m}^m[f_i-V(i)]^2=\sum_{i=-m}^m[\sum_{k=0}^nb_ki^k-V(i)]^2$$

(12)

使用最小二乘法,要使拟合结果最好,则均方误差 ε 应最小,可将 ε 各项系数的导数设为 0,即:

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial b_r}=0,(r=0,1,2,\cdots,n)$$

(13)

通过式(11)和(12)可得:

$$\sum_{k=0}^nb_k\sum_{i=-m}^mi^{k+r}=\sum_{r=-m}^mV(i)i^r$$

(14)

由于速度数据 $V(i)$ 已知,则只需给定拟合的窗口大小 m 和多项式的阶次 n 即可求解多项式各项系数 b_k 。根据拟合得到的多项式用于求取该窗口内的中心点估计值,并通过不断移动窗口重复操作求取后续的点。进一步求解后发现:

$$f_i\Big|_{i=0}=b_0=a_0$$
$$\frac{df_i}{di}\Big|_{i=0}=b_1=a_1$$
$$\frac{d^2f_i}{di^2}\Big|_{i=0}=2b_2=a_2$$

:

$$\frac{d^nf_i}{di^n}\Big|_{i=0}=n!b_n=a_n$$

(15)

根据式(15), a_n 相当于对速度数据进行一次 FIR 滤波,即输入与滤波器的单位冲激响应进行卷积可得到输出:

$$a_n=\sum_{i=-m}^mh(i)V(n-i)$$

(16)

Savitzky 等^[11]根据这一特点制定了卷积系数表,只需查表通过卷积系数就可求解 b_k ,提高时间效率。本算法使用 SG 滤波器平滑减轻速度误差,同时保留真实速度的一般局部特征,卷积系数见表 1。

表 1 SG 卷积系数表

POINTS	13	11	9	7
-06	110			
-05	-198	18		
-04	-160	-45	15	
-03	110	-10	-55	5
-02	390	60	30	-30
-01	600	120	135	75
00	677	143	179	131
01	600	120	135	75
02	390	60	30	-30
03	110	-10	-55	5
04	-160	-45	15	
05	-198	18		
06	110			
NORM	2431	429	429	231

1.2.3 构建差分速度场

算法中,还需构建 3 个速度差分场。分别将方位和径向线性插值后的数据经过 SG 滤波器后,保留径向和方位滤波后的速度场,并通过平均这两个速度场创建第三个速度场。从原始多普勒速度场中减去滤波后的速度场,可以构建 3 个“速度差分场”,即径向差分场、方位差分场和平均差分场。

1.2.4 识别和校正速度误差

为识别误差,距离库中差值 δ 接近 0 m/s 的速度点被认为是真实值。为确保正确的速度在校正误差过程中不被处理,首先用正态分布独立地拟合径向和方位差分场,并用于确定要对哪些速度进行校正。本算法中,平均差分场用于误差识别。但首先通过检查单个径向和方位差分场限定考虑校正的速度,即平均差分场中的速度仅在其各自的径向(方位)差分场值大于径向(方位)正态分布标准偏差的 ± 3 倍时才对其进行校正。若采用的标准偏差较小,往往会导致部分速度错误混叠到间隔中。另一方面,若奈奎斯特速度很小,但分布的标准偏差很大,可能需要更小的间隔。因此,若径向和方位 3 倍的标准偏差均高于较大的奈奎斯特

速度,则用较小的奈奎斯特速度替代3倍的标准偏差作为判定依据。平均差分场中速度接近 $\pm 2nV_{2\max}$ 和 $\pm 2nV_{1\max}$ (其中 $n=1,2,3$)时需进一步检查,误差点可通过下式检索:

$$|\delta - \text{error}| < V_{1\max} + V_{2\max} \quad (17)$$

其中: δ 是差值,此处代表平均差分场中的值,error由式(4)给出。

对搜索到的误差点通过 $\pm 2nV_{2\max}$ 和 $\pm 2nV_{1\max}$ (其中 $n=1,2,3$)进行校正。

当 $\delta > 0$ 时,对距离库中满足条件 $(2nV_{2\max} \text{ 或 } 2nV_{1\max}) - (V_{2\max} + V_{1\max}) < \delta < (2nV_{2\max} \text{ 或 } 2nV_{1\max}) + (V_{2\max} + V_{1\max})$ 的速度点通过减去 $2nV_{2\max}$ 或 $2nV_{1\max}$ 进行校正。

当 $\delta < 0$ 时,对距离库中满足条件 $-[(2nV_{2\max} \text{ 或 } 2nV_{1\max}) + (V_{2\max} + V_{1\max})] < \delta < -[(2nV_{2\max} \text{ 或 } 2nV_{1\max}) - (V_{2\max} + V_{1\max})]$ 的速度点通过加上 $2nV_{2\max}$ 或 $2nV_{1\max}$ 进行校正。

由此,会产生6组解,将校正中的每组可能解记录下来。通过将每组可能解减去重新计算的平均速度场,得到6组新的平均差分场,对于每个距离库,平均差分场中值最小的解被视为最终解,并保留校正值。

以上算法实现的流程如图1所示。

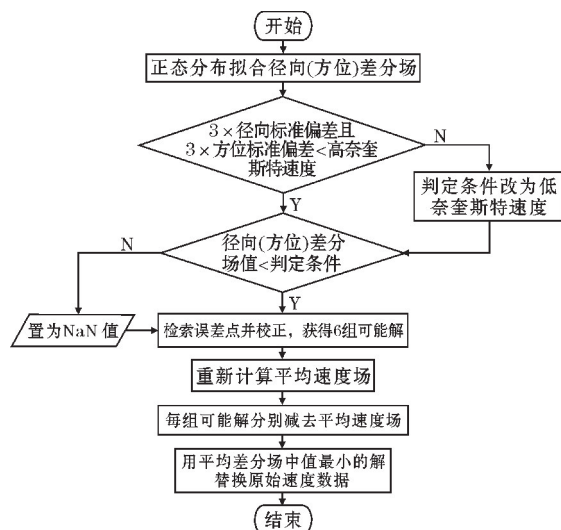


图1 识别和校正速度误差算法实现流程图

一旦在前一步中校正了所有速度,就更新记录的多普勒速度。下一步重复上述相同的步骤,但使用不同的径向和方位滤波器窗口大小。较短的长度用于校正随机分布的测速误差,较长的长度用于校正成片的和紧凑的随机测速误差。

1.3 算法实现步骤

整体算法实现的流程如图2所示。针对DPRF数据进行以下处理:线性插值、SG滤波、构建差分场以及识别和校正速度误差。

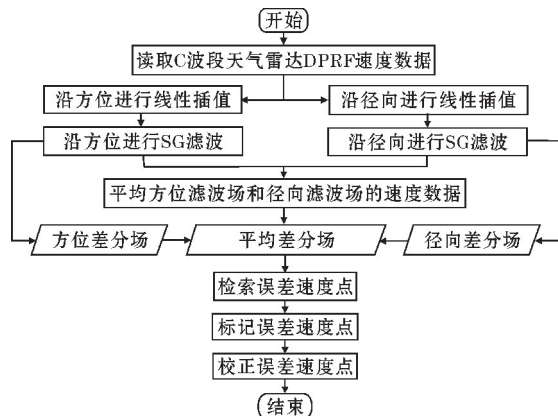


图2 减轻DPRF测速误差算法实现流程图

2 实例分析

使用中国布网的CC型号新一代天气雷达数据验证分析基于SG滤波器自动识别和校正DPRF测速误差算法的效果。

2.1 实例一

所采用的数据为雷达某体扫时刻第一层仰角的DPRF模式径向速度数据,如图3所示,可以看出:黄色矩形区域内存在成片且杂乱的正负速度跳变的奇异值和孤立噪声点,紫色矩形区域内回波边缘夹杂着一些速度奇异值。由于速度资料质量较差,严重影响了速度的连续性,使得径向速度资料在具体分析等方面变得困难,因此需要进行测速误差的校正。

对图3(a)所用数据采用本文所述算法进行测速误差的识别和校正,此样例数据使用设定阶次为3,径向滤波窗口大小为11,方位滤波窗口大小为5的SG滤波器。在一次测速误差校正完毕后,更新校正后的多普勒速度,然后更改滤波器窗口大小,重复进行校正步骤。如前文所述,较大的窗口用于校正成片的和紧密排列的测速误差,较小的窗口用于校正随机分布的测速误差。

图3(b)为经过数据处理后得到的误差速度点标识图,红色部分为误差速度点,此时标识点上的数据已经进行了修正。但仍需根据修正后得到的几组解与剔除误差点后获得的新滤波场作差,通过新的平均差分场中的数据进一步判断最终解。图3(c)为剔除误差速度点后的原始速度场,与原始速度场对比发现,在单次校正步骤中仅有小部分误差速度点未被识别。

图3(d)为校正后速度场。通过与图3(a)结合对比可以看出,在回波边缘附近的点,以及径向和方位速度梯度大的切变点周围的点被正确识别和校正。但同样也可以观测到图3(a)中黄色矩形部分在结果图中仍存在少数明显的速度不连续,这也是今后改进算法时处理的重点。

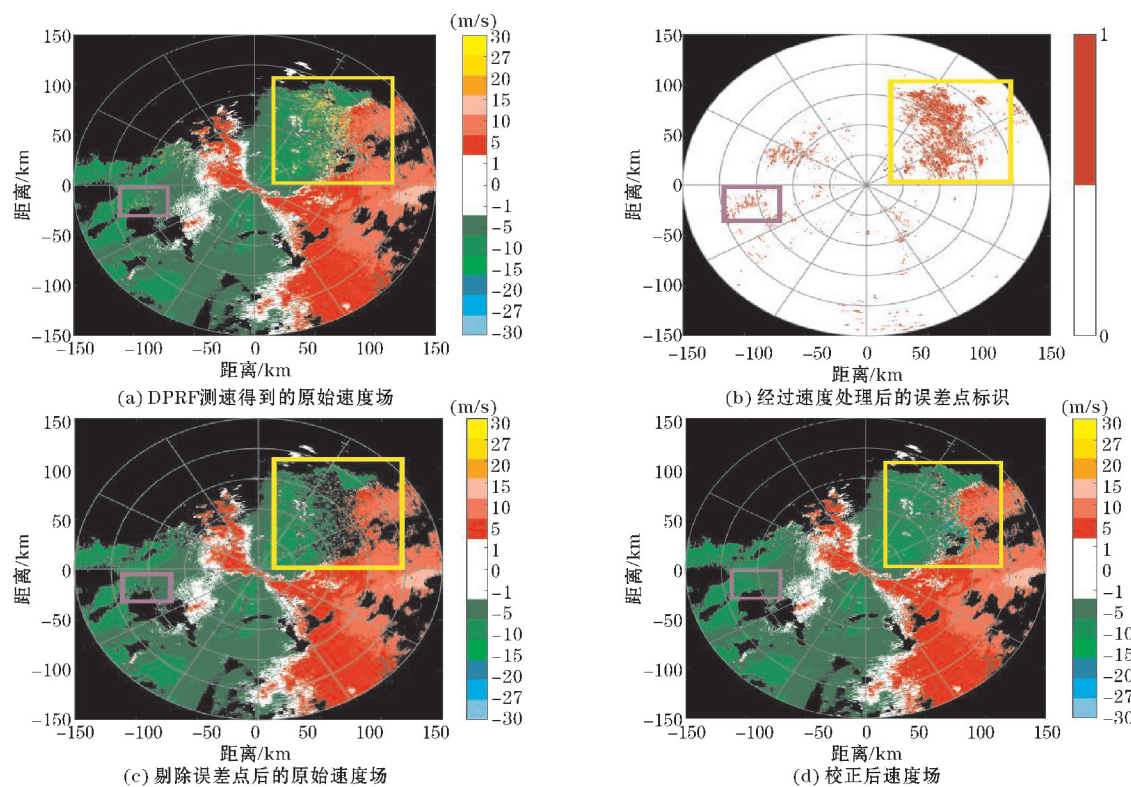


图3 2007年7月26日0时9分最低仰角 DPRF 测速误差校正过程中的速度场

图4为图3(a)黄色矩形区域识别与校正前后速度场的局部放大图。图4(a)为原始速度场,可以明显观察到图中有许多无效数据点,且在无效数据点附近存在较为密集的速度奇异值聚落。通过本文算法进行处理后,得到图4(b)校正后速度场,从视觉上看,似乎所有的误差速度点都被本文算法正确识别,在零值附近的正值和负值跳变的速度奇异值(约-27 m/s和约

16 m/s)得到明显修正。为了定量分析算法的性能,选取实例一第56°方位角30~60 km距离的速度数据进行分析可得图5,该样本组位于图4区域。在该区域内,速度值大都分布在-10 m/s附近,但也夹杂着异常的抖动数据。经过校正处理后,从-10 m/s左右跳变到15~20 m/s的速度奇异值得到修正,校正后的速度更加连续。

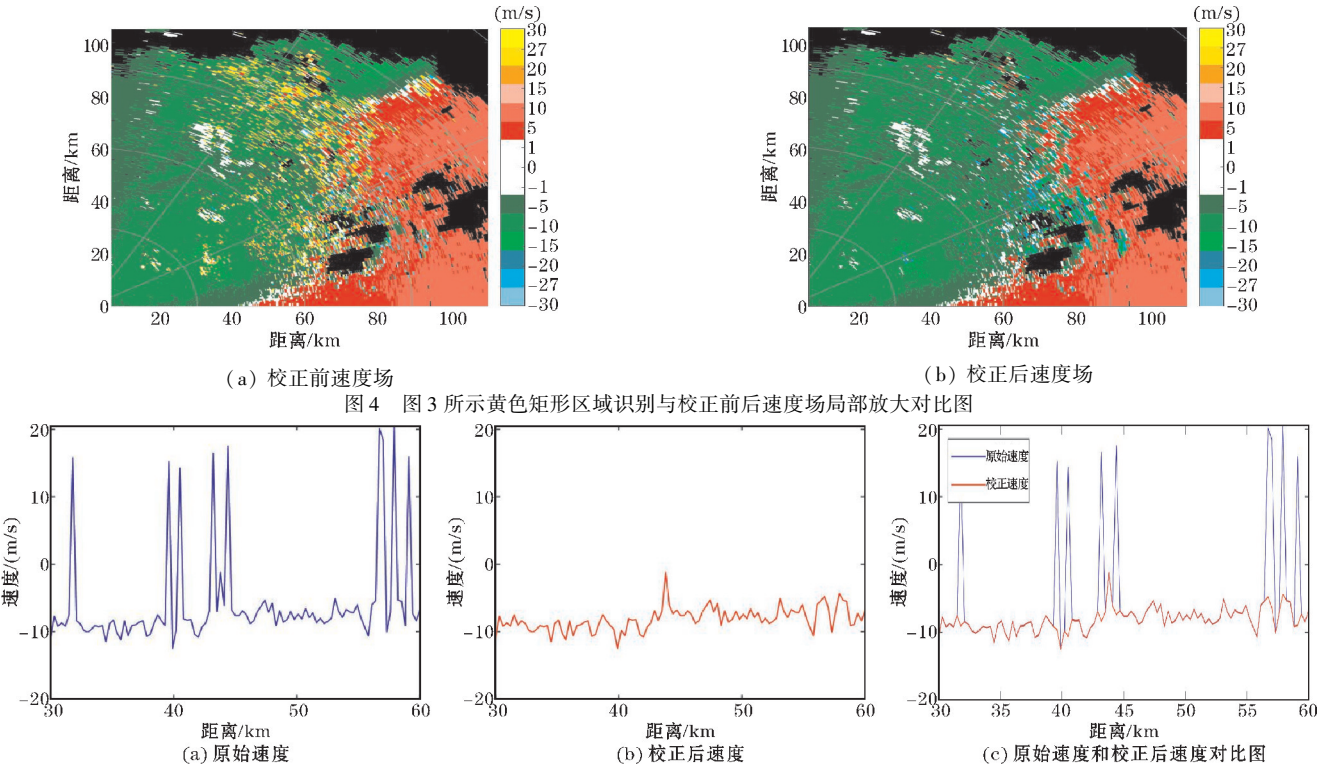


图4 图3所示黄色矩形区域识别与校正前后速度场局部放大对比图

图5 方位分析实例一中56°方位角30~60 km距离校正前后速度数据

图 6 为实例—第 85 km 距离 30°~70°方位角的速度数据,该样本组位于图 4 区域。不难看出该区域内

由-5 m/s左右跳变到20 m/s左右的速度奇异值都得到了修正,保证了速度的连续性。

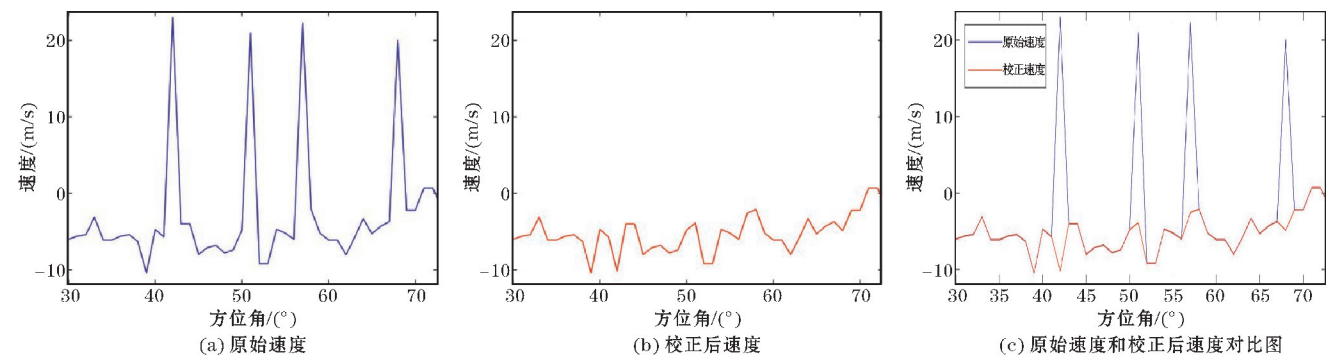


图 6 距离分析实例一中第 85 km 距离 30°~70°方位角校正前后速度数据

可通过计算数据校正前的标准差(σ_0)、校正后的标准差(σ_1)反映数据校正前后的离散程度。图 5 和图 6 所对应数据校正前后的标准差如表 2 所示。

表 2 图 5 和图 6 对应数据校正前后的标准差

对应数据	σ_0	σ_1
图 5	7.45	1.72
图 6	8.14	2.32

可以看出校正后标准差远小于校正前标准差,这表明校正后的数据更为集中,有效地校正了原始速度数据中偏差较大的奇异值,数据连续性有明显改善。

2.2 实例二

所采用的数据为雷达某体扫时刻第二层仰角的 DPRF 模式径向速度数据,校正前后及过程中的结果如图 7 所示。

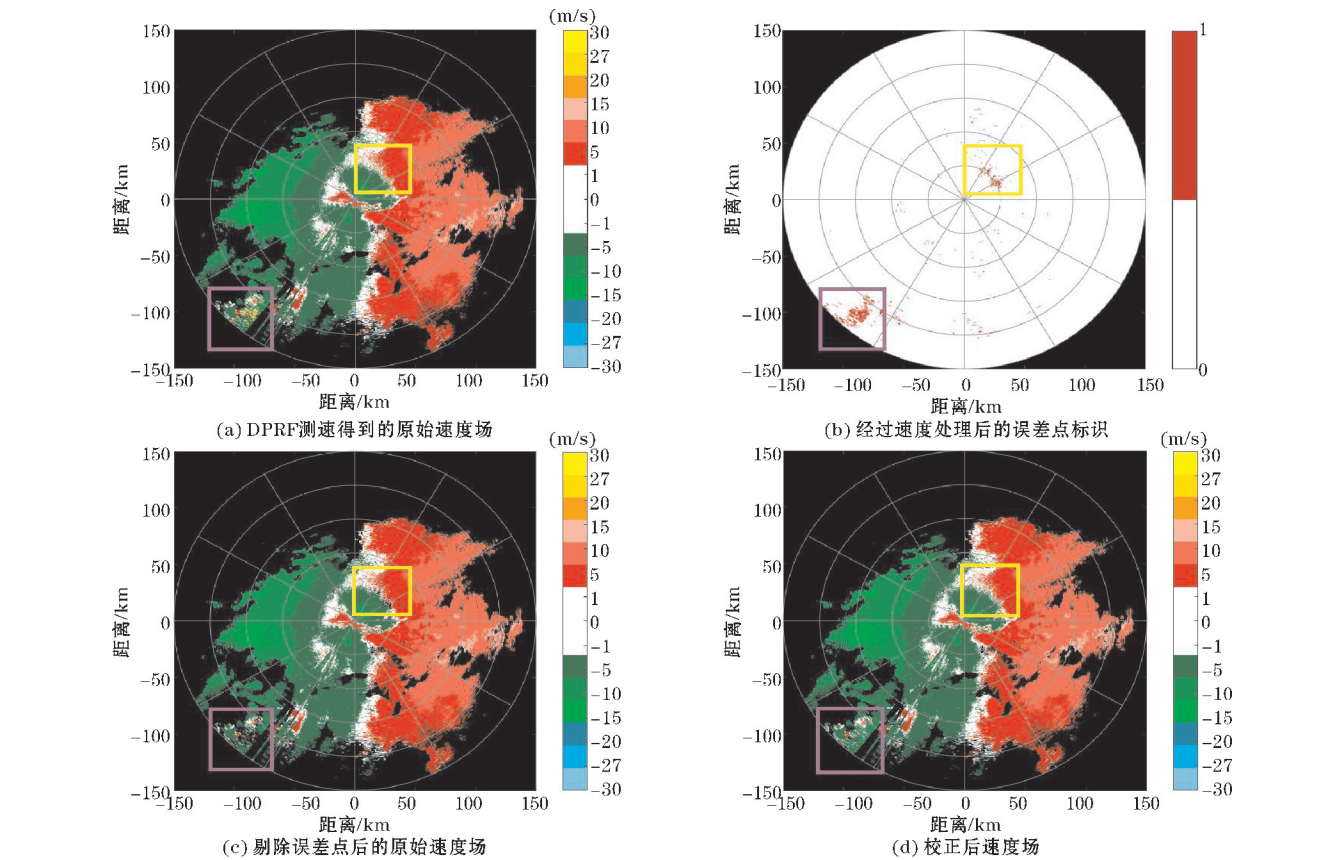
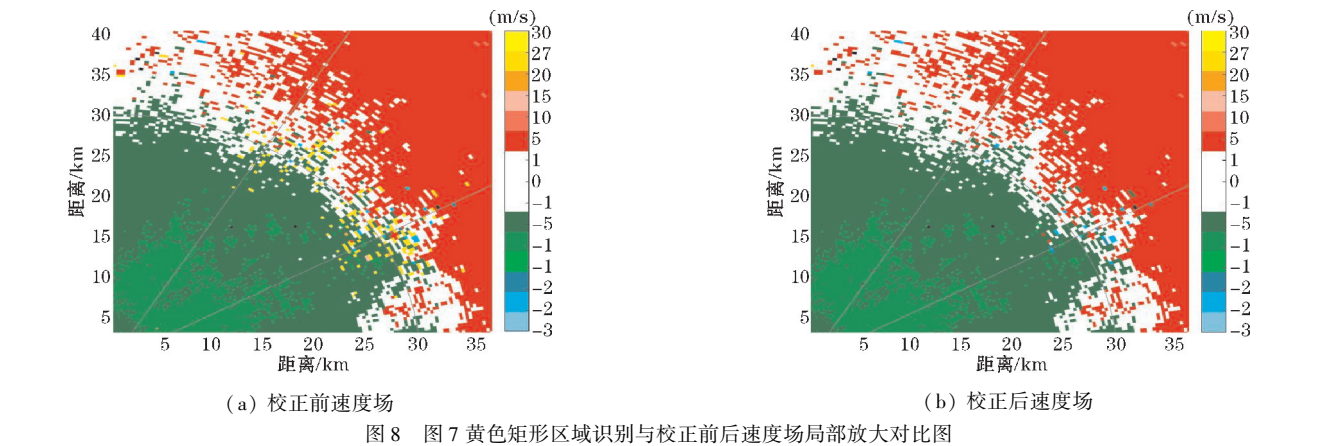


图 7 2007 年 7 月 26 日 0 时 9 分第二层仰角 DPRF 测速误差校正过程中的速度场

图 8 为图 7(a)黄色矩形区域识别与校正前后速度场的局部放大图。从图 8 可以看出大部分处于正负

速度值过渡的边缘区域的速度奇异值得到校正。



同样,为定量分析该局部速度数据的连续性和校正效果,选取第 32 km 距离 40° ~ 100° 方位角的速度数据,该样本组位于图 8 所示区域,得到图 9。大部分速度奇异值被校正至 0 值附近,个别误差点未能被识别。

选取第 58° 方位角 10 ~ 60 km 距离的速度数据,该样本组位于图 8 区域,校正效果如图 10 所示,应用该算法后,所有的速度奇异值都得到了校正。

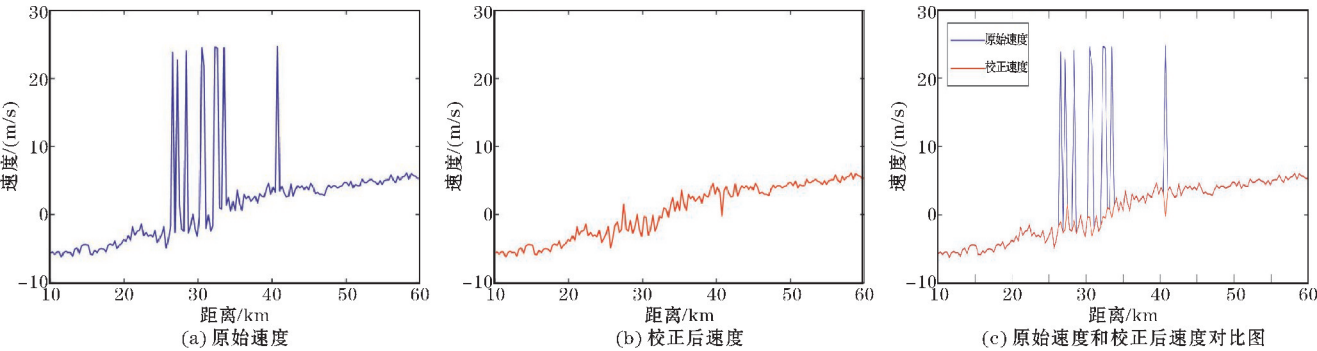
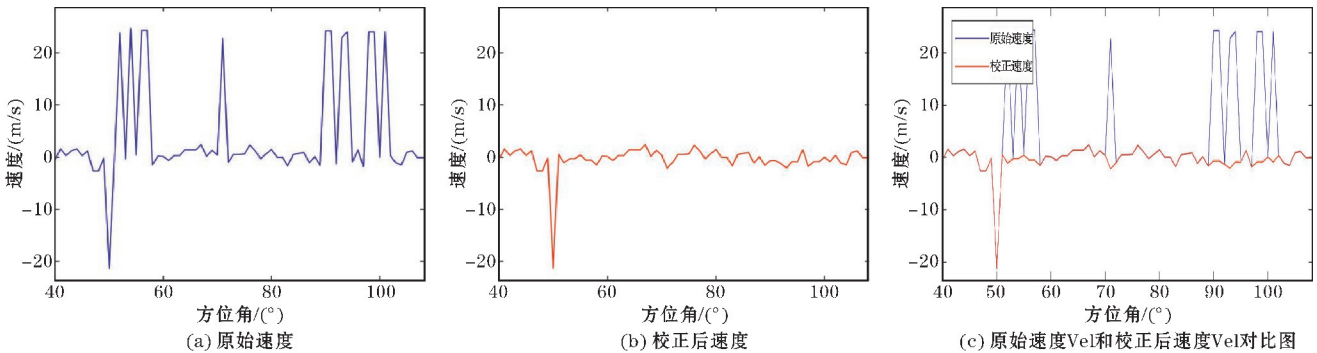


图 9 ~ 10 所对应数据校正前后标准差如表 3 所示。

表 3 图 9 ~ 10 中对应数据校正前后的标准差		
对应数据	σ_0	σ_1
图 9	10.03	3.02
图 10	6.6	3.96

与实例一选取部分相同,数据校正后标准差远小于校正前标准差,数据更集中,数据连续性有明显改善。

3 结束语

针对如何优化 DPRF 在扩展多普勒天气雷达的最

大不模糊速度过程中存在的正负速度交替跳变的速度奇异值问题,给出基于 SG 滤波器自动识别和校正 DPRF 测速误差的算法,该算法能有效校正成片误差速度。着重介绍该算法的原理和实现过程,在结果分析中论证该算法在识别和校正速度奇异值、保证速度连续性方面的效果,以 C 波段雷达回波实例验证其在识别和校正成片测速误差方面的优越性。当然,由于该算法需要某种程度的空间连续性来确定适当的速度特征,因此无法校正最初混叠到速度间隔的孤立速度点。通过本文算法进行测速误差点的识别可以基本忽略误判的情况,但在识别过程中仍然可能存在被忽略

的速度奇异值,究其原因如下:一是检索误差速度点的判断条件过于严格,部分误差数据特征不满足式(7);二是径向速度数据中一条径向上靠近雷达最大不模糊探测距离的距离库中的速度奇异值点可能被忽略。故在今后的研究中需要从提升识别精确度方面着手研究。

参考文献:

- [1] Sirmans D, Zrníc D, Bumgarner B. Extension of maximum unambiguous Doppler velocity by use of two sampling rates (for meteorological pulse Doppler radar) [C]. Conference on Radar Meteorology, 17th, Seattle, Wash, 1976:23–28.
- [2] Dazhang T. Evaluation of alternative-PRF method for extending the range of unambiguous Doppler velocity [C]. 22nd Conf. on Radar Meteor, 1984:523–527.
- [3] Joe P, May P T. Correction of dual PRF velocity errors for operational Doppler weather radars [J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 2003, 20(4):429–442.
- [4] Holleman I, Beekhuis H. Analysis and Correction of Dual PRF Velocity Data [J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 2003, 20(4):443–453.
- [5] 杨川, 刘黎平, 胡志群, 等. C波段多普勒雷达双

PRF 模式速度混淆区识别和处理方法研究 [J]. 气象学报, 2012, 70(4):875–886.

- [6] 梁海河, 张沛源, 葛润生. 多普勒天气雷达风场退模糊方法的研究 [J]. 应用气象学报, 2002, 13(5):591–599.
- [7] 肖艳姣, 万玉发, 王志斌. 多普勒天气雷达双 PRF 径向速度资料质量控制 [J]. 高原气象, 2016, 35(4):1112–1122.
- [8] Altube P, Bech J, Argemí O, et al. Correction of dual-PRF Doppler velocity outliers in the presence of aliasing [J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 2017, 34(7):1529–1543.
- [9] Alford A A, Biggerstaff M I, Ziegler C L, et al. A Method for Correcting Staggered Pulse Repetition Time (PRT) and Dual Pulse Repetition Frequency (PRF) Processor Errors in Research Radar Datasets [J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 2022, 39(11):1763–1780.
- [10] 张磊, 张继东, 曹立新. 利用双脉冲重复频率解速度模糊的初步探讨 [J]. 新疆气象, 2004(1):25–26.
- [11] Savitzky Abraham, Golay M J E. Smoothing and Differentiation of Data by Simplified Least Squares Procedures [J]. Analytical Chemistry, 1964, 36(8):1627–1639.

Research and Application of Algorithm for Mitigating DPRF Velocity Measurement Error in C-band Weather Radar

WANG Xu^{1,2}, YANG Yufei¹, XIAO Xiao¹, XIE Chenghua³, SHI Zhao^{1,2}, WANG Haijiang^{1,2}

(1. College of Electronic Engineering, Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610225, China; 2. Key Laboratory of Atmospheric Sounding, China Meteorological Administration, Chengdu 610225, China; 3. Chengdu Yuanwang Detection Technology Co. Ltd., Chengdu 610213 China)

Abstract: Doppler weather radar faces the "Doppler Dilemma" problem where there is no single Pulse Repetition Frequency (PRF) that can simultaneously maximize unambiguous velocity and unambiguous range. In both research and operational applications, radar data usually needs to undergo range folding and velocity aliasing processing to be used in numerical weather prediction models, observational analysis, and severe weather detection. To address this issue, the Dual-Pulse Repetition Frequency (DPRF) algorithm uses two different Pulse Repetition Times to sequentially collect two uniformly spaced time series and combines the velocity estimates obtained from each time series to obtain a new velocity estimate that corresponds to a larger maximum unambiguous velocity. This effectively extends the velocity measurement range and reduces velocity aliasing. However, using the DPRF algorithm can lead to estimation errors in radial velocity in areas with high variability. This paper presents a method based on linear interpolation and a Savitzky-Golay filter to create a smooth Doppler radial velocity. By comparing the radial velocity for each range gate with the smoothed velocity, erroneous data points are identified and corrected based on specific error characteristics. The algorithm is tested and analyzed using DPRF velocity data from the CINRAD/CC type radar in Kunming, Yunnan, China. The results show that the algorithm can identify and correct most velocity error points in the DPRF, effectively reducing the velocity estimation error associated with DPRF.

Keywords: weather radar; DPRF; Savitzky-Golay filter; radial velocity; error correction