

超分辨率处理技术在多普勒天气雷达中的应用探究

何建新^{1,2}, 李兴华^{1,2}

(1. 成都信息工程学院电子工程学院, 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)

摘要: 超分辨率处理技术有利于提高天气雷达对中小尺度气旋和龙卷风等灾害性天气探测能力, 有利于天气雷达获得更精细的天气过程回波特征。文中分析了多普勒天气雷达实现超分辨率的工作原理及一些实际应用问题; 针对其中谱矩估计精度降低的问题, 提出采用距离过采样和白化算法的解决方法, 并给出白化滤波器的设计方法和白化后的谱矩估计算法。雷达仿真和实际数据试验表明, 结合距离过采样及白化技术, 超分辨率技术在多普勒天气雷达中的应用是可行的。

关键词: 超分辨率; 距离过采样; 白化算法; 多普勒天气雷达

中图分类号: TN959.4

文献标志码: A

0 引言

多普勒天气雷达资料是强雷暴、中气旋、龙卷风等灾害性天气精细化预报与预测的重要依据。通常, 雷达系统本身的灵敏度、时空分辨率、信号处理等性能对天气雷达资料质量有很大影响。其中, 时空分辨率是一个重要的影响因素。当中气旋和龙卷风旋涡直径远大于雷达波束宽度时, 通过雷达速度资料可很好地展现其旋涡速度突变特征, 从而容易进行预测与预报; 而当当中气旋和龙卷风旋涡直径小于雷达波束宽度时, 由于波束平滑的影响, 雷达速度突变特征明显变差, 甚至无法显现, 从而造成对此类灾害性天气的漏报, 或预报不及时。此外, 天气雷达方位分辨率是随雷达探测距离增大而逐渐变差, 导致同样尺度的天气过程, 近距离能探测, 远处却无法探测。因此, 天气雷达分辨率的提高有利于小尺度天气过程探测距离范围的增加, 为灾害性天气的及时预报奠定基础。

为了提高天气雷达的分辨率, 很多学者开展了这方面的研究, 并取得一些进展。Zhang, G^[1], 提出利用距离和方位相干技术重新定义天气雷达的分辨率; T You 等^[2-3] 提出利用距离过采样和 CAPON 滤波实现距离分辨率的提高; Galati G, 张凌等^[4-8] 提出利用线性逆卷积的方法实现反射率数据的超分辨率重建。美国强风暴实验室、NOAA 雷达业务中心等研究与业务机构^[9-11] 研究了天气雷达超分辨率技术; 经过近 10 年的数字模型仿真与雷达观测数据验证, 该技术取得了很大进展, 是未来 WSR-88D 业务应用升级的主要技术之一。相对其他超分辨率技术, 该技术在天气雷达应用中, 对信号处理算法的改动较小, 对硬件要求较低, 实现相对容易。文中先分析该超分辨率技术的工作原理及实际应用问题, 然后针对其谱矩估计精度降低问题, 给出了一种过采样和白化技术解决方案, 最后使用雷达仿真和实际数据进行试验验证。

1 超分辨数据处理技术

1.1 超分辨率数据概念

目前, 超分辨率数据技术主要用于 WSR-88D 中。WSR-88D 现有反射率数据的分辨率为 1km 和 1°, 多普勒速度和谱宽数据的分辨率为 250m 和 1°, 通过算法技术把其反射率数据的采样间隔提高到 250m 和 0.5°, 多普勒速度和谱宽数据的采样间隔提高到 250m 和 0.5°, 天气雷达的分辨率获得提高。这种技术称为超分辨率技术。显然, 与现有处理方式不同的是, 超分辨数据处理去除了距离上的 4 个距离库的平均处理, 且把方位数据采样率

从 1° 提高到 0.5° 。因无距离库平均处理, 超分辨率数据的距离分辨率明显得到提高; 当然也带来反射率数据精度降低的问题。在方位上, 虽然天线的固有波束宽度没有改变, 但是方位通过算法处理后, 天线的有效波束宽度减小, 实际方位分辨率得到提高。已有研究表明, 数据分辨率的提高, 可望使天气雷达对中小尺度气旋和龙卷风的远距离探测能力提高 50%, 有效缩短此类灾害性天气的预测和预报时间; 同时超分辨率数据可提供更精细的强风暴反射率特征, 如阵风前锋、钩状回波、边界弱回波区域等, 提高了冰雹、暴雨等天气的识别准确度, 同时也增加了预警与预报决策的时间。

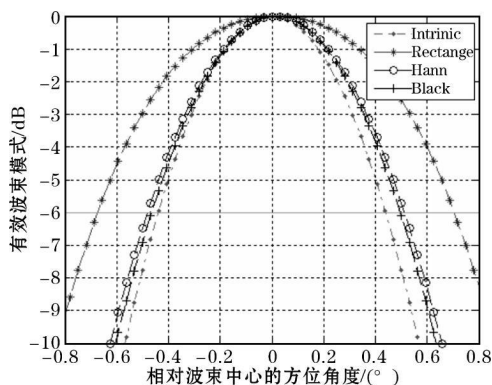
新一代多普勒天气雷达(CINRAD)中各种型号天气雷达虽然距离分辨率有所不同, 但数据处理方式基本类似, 因此, 超分辨率数据技术同样可应用于 CINRAD 中。下面着重分析超分辨率技术中方位分辨率提高的机理。

1.2 方位分辨率的提高

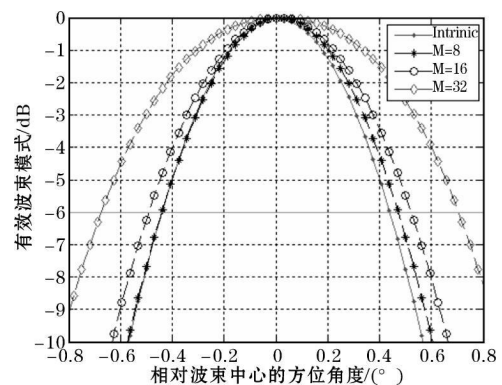
通常, 天气雷达天线固有波束模式直接由天线直径和工作波长决定, 天线旋转扫描时的有效波束模式实际上比其固有波束模式有很大展宽。对于固定仰角作 PPI 扫描的天线来说, 有效波束宽度表示如下^[9-11]:

$$f_{eff}^A(\phi) = \gamma \sum_{m=0}^{M-1} f^A(\phi - m\Delta\phi) d^2(m) \quad (1)$$

其中 ϕ 是相对于波束中心的方位角, $f^A(\phi)$ 是固有双向天线波束模式, γ 是归一化因子, 满足 $f_{eff}^A(0) = 1$, $\Delta\phi$ 是天线在发射脉冲周期时间内天线移动的方位角 ($\Delta\phi = \alpha T_S$, α 是天线旋转速度, T_S 是脉冲重复周期), d 是数据处理窗。从式(1)可知, 天线波束有效模式可理解为天线固有天线模式与数据处理窗平方的卷积, 有效波束宽度的大小与方位数据采样数、数据处理窗等有关; 而方位数据采样数又与天线移动速度和脉冲重复周期有关, 天线移动越快, 脉冲重复周期越短, 则方位数据采样数越多, 有效波束展宽越小, 雷达方位分辨率越高。以 CINRAD/SA 为例, 天线直径为 8.5m, 波长为 0.1m, 以此计算其 6dB 双程固有波束宽度为 0.89° 。图 1(a)和(b)分别给出该型号雷达在不同数据处理窗和方位采样数下的有效波束宽度展宽的结果。其中“Intrinsic”表示未展宽时的固有波束宽度, 由天线直径和雷达波长决定。在数据中加入不同的窗函数, 天线的有效波束宽度展宽程度不一样, 其中矩形窗展宽最大, 达到 1.39° 左右, 汉宁窗和 Black 窗相对较小, 分别为 1.02° 和 0.9° 左右。以 CINRAD/SA 现有处理方式: 数据处理窗相当于进行了矩形窗处理; 显然, 天线有效波束宽度从固有的 0.89° 展宽到 1.39° 左右; 而加汉宁窗和 Black 窗可实现有效波束宽度的减少, 即实现雷达方位分辨率得到一定的提高。从实际雷达来看, 相当于把雷达天线直径从 8.5m 提高到 11.58m 的方位分辨率效果。从图 1(b)同样可看出, 不同采样数对有效波束宽度展宽程度也不一样。采样数越小, 展宽越小, 实现的雷达方位分辨率越高。从雷达实际工作情况来说, 方位采样数不能大幅度降低, 原因之一是天气回波的随机性、波动性不允许; 还有在谱估计算法中, 方位采样数降低, 会导致雷达的平均功率、多普勒速度等估计不准确, 失去应用意义。



(a) 不同窗函数下的有效波束宽度



(b) 不同采样数下的有效波束宽度

图1 不同窗函数和不同采样数下的有效波束宽度

1.3 超分辨数据处理技术的应用分析

从理论分析可知,在超分辨率技术改进后,多普勒天气雷达的距离分辨率和方位分辨率会得到一定改善。在方位上,可把天线有效波束宽度从 1.39° 提高到 1.02° ,相当于把现有天线尺寸提高 1.36 倍,可提高多普勒天气雷达对龙卷气旋等灾害性天气过程的预警能力。

针对国内已布网的多普勒天气雷达,超分辨率数据处理技术若需要加以业务应用,一些业务问题需要加以解决。首先,从超分辨率数据处理技术本身来说,虽然分辨率提高了,但因方位和距离上的数据积累个数的减少,也导致了雷达基数据的计算精度有所下降。解决的办法是采用更先进的信号处理技术,如过采样白化滤波技术,在分辨率提高的同时保持基数据精度不变^[15-16]。因此,超分辨率处理技术的应用需要结合过采样和白化滤波等技术才能达到业务应用的需要。第二,超分辨率数据处理技术以 I/Q 数据为着入点,因此需要多普勒天气雷达的数字中频、信号处理部件的算法处理技术加以升级改进,但不涉及硬件的更改,这对布网的业务雷达在下一步升级改造中,应该说是较为容易实现的。此外,采用超分辨率数据技术后,天气雷达基数据的数据量也增大了 8 倍,这对天气雷达网络的数据传输网络的带宽也是极大的考验;还有基数据量的增大,导致雷达后端部分产品算法的数据输入无法匹配,因此会涉及到一些灾害型天气过程的识别软件及算法的更新。

2 超分辨率后的谱精度提高处理

2.1 白化处理算法

从文献[13-16]可知,雷达回波的等效采样数越多,则谱估计的精度也就越高。在雷达回波方位采样数固定的前提下,要提高回波等效采样数,只能在距离向通过过采样获得更多的回波采样。而通过距离过采样后,同一距离库内的回波信号是相关的,直接进行平均处理,并不能很大程度地提高谱估计性能^[13-16],即采样数提高 L 倍,但等效采样数并不能提高 L 倍,精度也不能提高 L 倍。为了获得更好的效果,通常先用白化算法进行去相关处理。白化算法原理是根据过采样回波信号计算得到一个白化滤波器,通过该滤波器后,使回波信号不相关。回波信号去相关后,等效采样数增多,精度也得到提高。采用白化算法对回波信号去相关的过程可表达如下:

$$X_n = W V_n \quad (2)$$

式中, $V_n = [V(0), V(1), \dots, V(L-1)]^T$, 是 L 个同一距离库内过采样后的回波信号,白化转换前是相关的, L 为过采样倍数; $X_n = [X(0), X(1), \dots, X(L-1)]^T$, 表示 L 个去相关后的回波信号,是后面谱估计算法的输入信号; W 是白化滤波器。显然,白化算法的主要问题在于白化滤波器 W 的求取。根据文献[15],白化滤波器可由如下(3)式和(4)式得到。

$$W = \Lambda^{\frac{1}{2}} U^T \quad (3)$$

$$C_V^{(R)} = U \Lambda U^T \quad (4)$$

其中, $C_V^{(R)}$ 是过采样回波信号归一化相关系数的 Toeplitz 矩阵, Λ 是对角矩阵, 对角位置上的矩阵值为矩阵 $C_V^{(R)}$ 的特征值, U 为酉矩阵, 其列值为矩阵 $C_V^{(R)}$ 的特征向量。矩阵 $C_V^{(R)}$ 定义如下:

$$C_V^{(R)} = \begin{bmatrix} 1 & \rho_V^{(R)}(1) & \dots & \rho_V^{(R)}(L-1) \\ \rho_V^{(R)}(1)^* & 1 & \dots & \rho_V^{(R)}(L-2) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \rho_V^{(R)}(L-1)^* & \rho_V^{(R)}(L-2)^* & \dots & 1 \end{bmatrix}$$

式中:

$$\rho_V^{(R)}(l) = \frac{R_V^{(R)}(l)}{R_V^{(R)}(0)} = \frac{p_m(l) * p_m(-l)}{\sum_{l'=0}^{L-1} p_m^2(l')}$$

其中, $R_V^{(R)}(l)$ 是过采样后同一距离库内回波信号的相关系数, $\rho_V^{(R)}(l)$ 是对 $R_V^{(R)}(l)$ 的归一化处理; $p_m(l)$ 是发射机脉冲包络波形和接收机滤波响应卷积的输出。显然, 由已知的矩阵 $C_V^{(R)}$, 不难估计出白化滤波器 W 。

2.2 白化处理后的谱估计算法

对过采样信号进行白化处理后, 天气雷达的平均功率、多普勒速度及谱宽的估计方法和未白化处理的方面类似, 即通过回波信号的 0 阶和 1 阶自相关函数求取。存在噪声时, 过采样信号白化后的平均功率估计表示如下:

$$S_{whitened} = \frac{1}{LM} \sum_{l=0}^{L-1} \sum_{m=0}^{M-1} |X(l, m)|^2 - N(NEF) \quad (5)$$

式中 N 是因白化处理后噪声增强的功率, L 是距离过采样倍数, M 积累的脉冲个数, $X(l, m)$ 是白化处理后第 m 个脉冲时, 接收的第 l 个过采样回波信号。过采样信号白化后的平均多普勒速度估计表示为:

$$\hat{v}_{whitened} = \frac{\lambda}{4\pi T_s} \arg\left\{R_X^{(T)}(1)\right\} \quad (6)$$

其中 $R_X^{(T)}(1)$ 是过采样信号 $X(l, n)$ 的 1 阶自相关函数, $R_X^{(T)}(1)$ 定义如下:

$$R_X^{(T)}(1) = \frac{1}{L} \sum_{l=0}^{L-1} R_{X_l}^{(T)}(1) = \frac{1}{L(M-1)} \sum_{l=0}^{L-1} \sum_{m=0}^{M-2} X(l, m)X(l, m+1)$$

过采样信号白化后的多普勒谱宽估计表示为:

$$\hat{\sigma}_{v_{whitened}} = \frac{\lambda}{2\pi T_s \sqrt{2}} \left| \ln \left[\frac{S_{whitened}}{|R_X^{(T)}(1)|} \right] \right|^{1/2} \operatorname{sgn} \left[\ln \left[\frac{S_{whitened}}{|R_X^{(T)}(1)|} \right] \right] \quad (7)$$

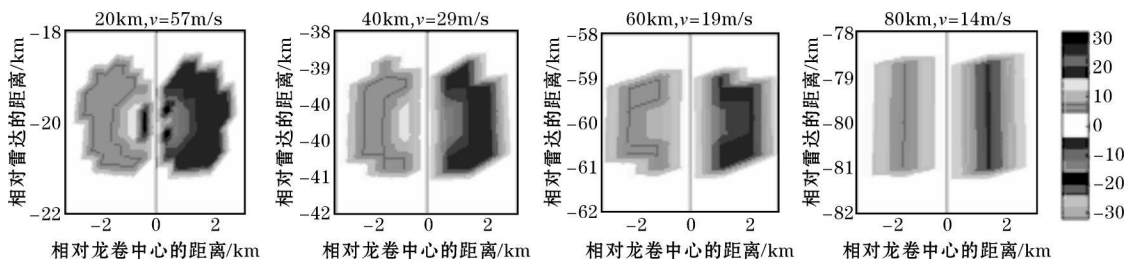
3 试验结果

3.1 仿真数据

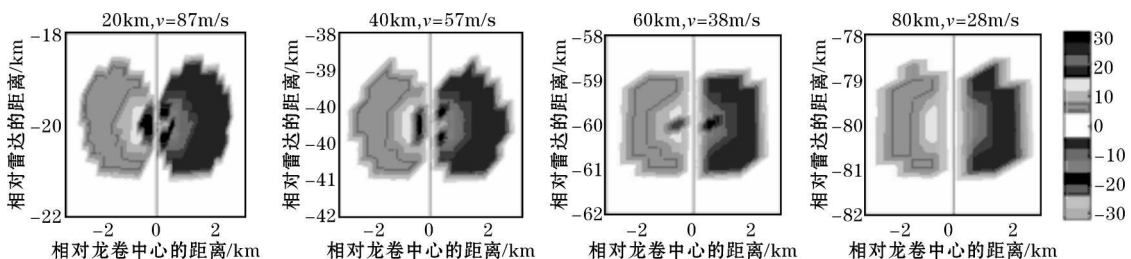
中小尺度气旋是一种典型的灾害性天气过程。试验首先应用数据模拟的方法, 来模拟天气雷达对龙卷气旋观测效果。数据模拟模型采用改进的蓝金组合气旋模式, 该气旋模型以中心轴对称, 表达式如下^[9]:

$$V = V_x (R/R_x)^n$$

V 是半径 R 处的旋转速度, V_x 是半径 R_x 处的峰值速度。当 $R \leq R_x$ 时, $n = 1$, 当 $R \geq R_x$, $n = -0.6$ 。基于改进型的蓝金组合模式, 仿真 B 型龙卷风气旋的观测结果如图 2 所示。



(a) 超分辨率前



(b) 超分辨率后

图 2 超分辨率前、后天气雷达对不同距离的龙卷风 B 仿真观测效果

其中 B 型龙卷风气旋中心直径 200m, 峰值旋转速度 50m/s。龙卷气旋中心峰值速度差是该类天气过程识别的重要特征。图中给出超分辨率前、后, 在天气雷达观测距离 20km, 40km, 60km 和 80km 处的速度观测模拟效果, 并在图上给出龙卷气旋峰值速度差。如在超分辨率前, 雷达观测距离 40km 时, 中心峰值速度差 $v=29\text{km/s}$, 而在超分辨率后, 同样的观测距离, 雷达可以观测到 57m/s 的峰值速度差, 显然观测效果大大提高。对比图 2 中 4 种不同观测距离的超分辨率前后效果, 明显可看出, 在实现超分辨率后, 龙卷风气旋的峰值速度差都比超分辨率前更大, 这非常有利于从天气雷达回波更容易发现龙卷气旋特征。

3.2 雷达数据

由于超分辨率数据技术在处理时需要 I/Q 原始数据, 而不是基数据, 因此本试验的雷达数据主要来源于成都信息工程学院的 WSR-98XD 双极化天气雷达系统。该天气雷达可根据试验需要改变扫描模式, 且可实时存储原始 I/Q 数据。虽然该雷达与 CN IN RAD/SA 天气雷达在波段和距离分辨率上有所差别, 但用超分辨率处理技术作类似处理, 还是能体现超分辨率的实际处理效果。图 3 给出该雷达在 2011 年 8 月 18 日一次强降雨天气过程的超分辨率前后的反射率及速度处理结果。从图 3 可看出, 超分辨率后的反射率观测效果明显比起分辨率前的观测效果更加精细, 更能反映回波的细节。当然, 从速度结果看, 无法看出明显的差别, 因为该天气过程速度场变化特征不明显。

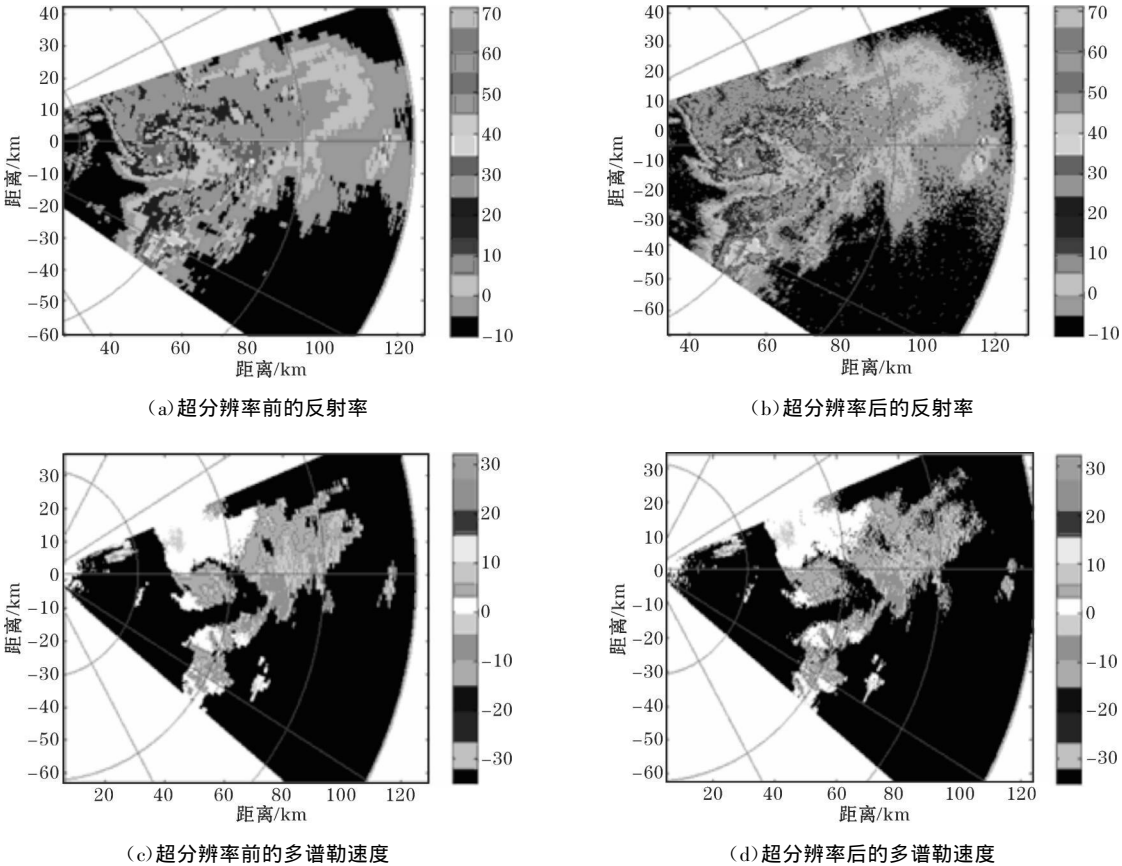


图 3 超分辨率前、后天气雷达反射率与多普勒速度的试验效果

为了验证距离过采样和白化算法的效果, 首先必须获得距离过采样数据, 而 WSR-98XD 雷达本身的数字中频和 IQ 存储功能并不能满足。因此, 试验中, 设计了一个天气雷达同步试验装置。该装置在提供雷达模拟中频信号、同步采样时钟和天线角度的条件下, 能和雷达同步工作, 并存储距离过采样数据。图 4 是通过该装置采集数据的处理结果。其中图 4(a)和(b)分别是超分辨率前后的反射率数据。由图可知, 超分辨率处理后, 反射率数据精细程度提高, 原本被平滑的强回波点增多。但明显也可看出, 回波边界杂乱点增多。分析其原因, 则主要是由于反射率计算过程中, 方位采样数降低, 估计精度下降的缘故。图 4(c)和(d)分别是超分辨率后, 过采样倍数

$L=3$ 和 $L=5$ 时的白化处理结果。很明显, 经过白化处理后, 回波边界起伏的杂乱点明显减少, 边界轮廓也比以前更为清晰, 这说明距离过采样和白化技术是有一定效果。

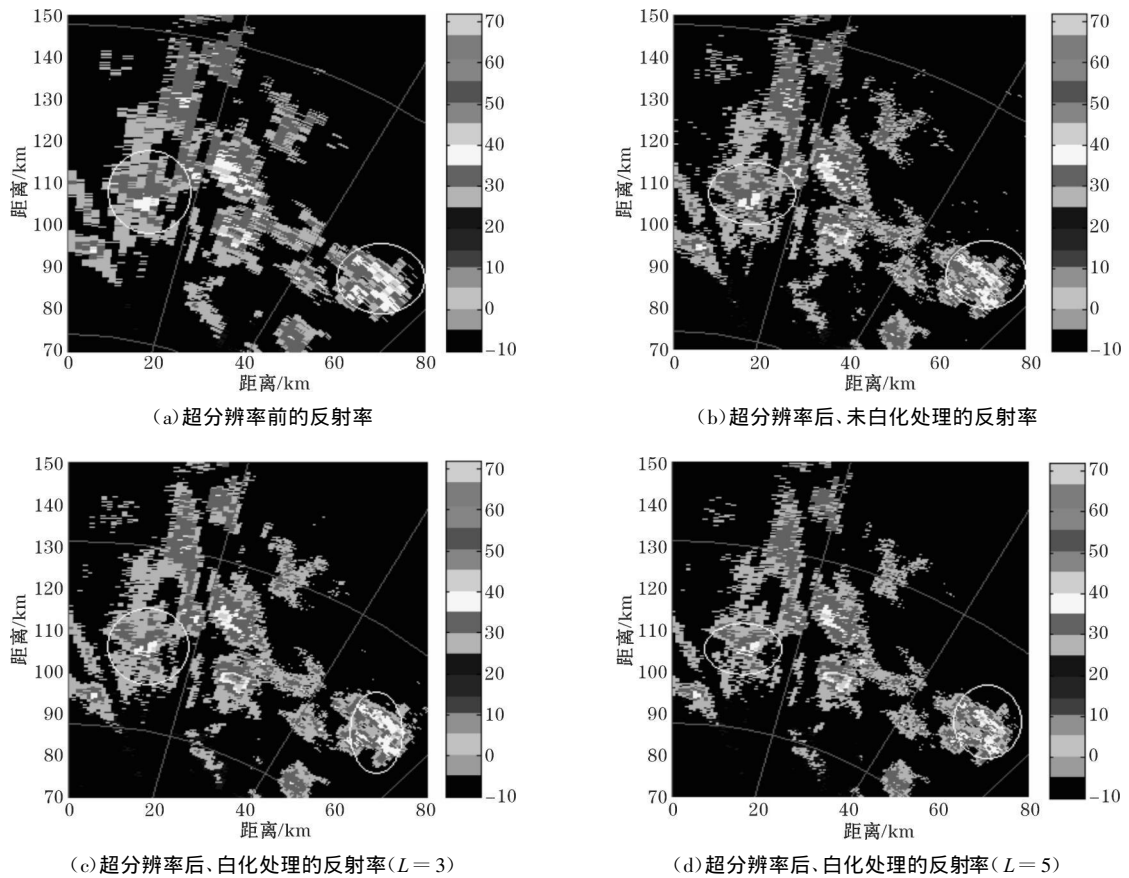


图4 超分辨率后, 白化算法处理的反射率对比结果

4 结束语

文中针对超分辨率技术在 CINRAD 应用的原理及一些应用问题作了详细介绍与分析。在反射率计算时, 超分辨率技术去除了原来距离上 4 个点的平均处理, 使雷达距离分辨率得到提高。在方位上, 通过数据加窗或采样数的减少, 使雷达有效波束宽度的展宽得以降低, 即实际工作的有效波束宽度得到减少, 从而实现方位分辨率的提高。文中还分析了因超分辨率技术带来的基数据精度降低、算法改进及数据带宽增大等一系列实际应用问题, 并针对基数据精度降低这一问题, 提出利用距离过采样和白化处理的方法这一解决方案。白化处理方案的实质是通过距离过采样的手段, 先是获得更多相关的回波样本, 然后通过白化滤波去除其相关性, 达到回波等效采样数的提高, 最终实现谱矩估计精度的提高。文中最后通过雷达仿真数据和实际数据分别验证了超分辨率技术在多普勒速度和反射率观测上的超分辨率效果; 同时, 也给出白化处理后的观测效果。试验表明, 结合距离过采样和白化处理技术, 超分辨率技术在多普勒天气雷达中具有一定的可行性。当然, 值得一提的是, 因在试验过程中, 未能采集到比较好的速度数据, 因此, 通过雷达实际数据, 对多普勒速度的超分辨率结果不明显, 这需要今后进一步试验。

参考文献:

- [1] Zhang G, T Y Yu, R J Doviak. Angular and range interferometry to refine weather radar resolution[J]. Radio Sci., 2005, 40(10): 1-10.

- [2] T You, G Zhang, A B Chalamalasetti, et al. Resolution enhancement technique using range oversampling[J]. J. Atmos. Oceanic Technol. 2006, 23: 228—240.
- [3] 何建新, 李学华, 史朝, 等. 天气雷达距离分辨率提高方法研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2008, 22: 49—52.
- [4] Galati G, M Naldi, M Ferri. Reconstruction of the spatial distribution of radar reflectivity of precipitation through linear-inversion techniques[J]. Radar, Sonar and Navigation, IEE Proceedings —, 1996, 143: 375—382.
- [5] 张凌, 杨硕文, 刘锦丽, 等. 一种反演雷达波束内不均匀反射率场的方法[J]. 遥感学报, 1998, 3(2): 81—89.
- [6] 李学华, 何建新, 何子述. 天气雷达反射率数据方位分辨率提高技术[J]. 计算机工程与应用, 2011, 47(8).
- [7] Li Xuehua, He Jianxin, He Zishu. Geostationary weather radar super-resolution modelling and reconstruction process[J]. Int. J. Simulation and Process Modelling, 2012, 7: 81—88.
- [8] Li Xuehua, Jianxin, He Zishu. Weather radar range and angular super-resolution reconstruction technique on oversampled reflectivity data[J]. Journal of Information & Computational Science, 2011, 8(13): 2553—2562.
- [9] Brown R A, V T Wood, D Simans. Improved tornado detection using simulated and actual WSR-88D data with enhanced resolution[J]. J. Atmos. Oceanic Technol., 2002, 19: 1759—1771.
- [10] Rodger A, Brown R, Bradley A, et al. Improved Detection of Severe Storms Using Experimental Fine-Resolution WSR-88D Measurements[J]. J. Atmos. Oceanic Technol., 2005, 20: 3—14.
- [11] Torres S, C D Curtis. Initial implementation of super-resolution data on the NEXRAD network[A]. 23rd Conference on IIPS, 2007.
- [12] Wood V T, R A Brown. Effects of radar sampling on single-Doppler velocity signatures of mesocyclones and tornadoes[J]. Wea. Forecasting, 1997, 12: 928—938.
- [13] Zrnic D S, R J Doviak. Effective antenna pattern of scanning radars[J]. IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst., 1978, 12(5): 551—555.
- [14] Doviak R, D S Zrnic. Doppler radar and weather observations[M]. San Diego: Academic Press, 1993.
- [15] Torres S M, D S Zrnic. Whitening in range to improve weather radar spectral moment estimates. Part I: Formulation and simulation[J]. J. Atmos. Oceanic Technol., 2003, 20: 1433—1448.
- [16] Torres S M, C D Curtis, J R Cruz. Pseudowhitening of weather radar signals to improve spectral moment and polarimetric variable estimates at low signal-to-noise ratios[J]. 2004, 42(5): 941—949.

Discuss of the Application of Super-resolution Technique in Doppler Weather Radar

HE Jian-xin^{1,2}, LI Xue-hua^{1,2}

(1. School of Electronic Engineering, Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610225, China; 2. CMA Key Laboratory of Atmospheric Sounding, Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610225, China)

Abstract: Super resolution processing technology can be beneficial to improve the severe weather detection ability of the weather radar for small-scale mesocyclone and tornado, and is also helpful for weather radar to get much finer characteristics of weather echo. In this paper, the method of super resolution technique and its problem for application have been analyzed. Aiming at the decrease of the accuracy in spectral estimation, a method of range oversampling and whitening technique has been proposed to resolve it and the detailed design of whitening filter and the algorithm of spectral estimation after whitening has been given in this paper. Experiments of simulated data and radar actual data have tested the super-resolution technique combined with range oversampling and whitening technique is feasible in application of Doppler weather radar.

Key words: super resolution; range oversampling; whitening algorithm; Doppler weather radar