

用频域滤波和双PRF技术 提高新一代天气雷达数据质量

张建云 张持岸 孙召平
(北京敏视达雷达有限公司, 北京 100085)

摘要: 使用频域滤波和双PRF技术在Linux操作系统下进行了提高新一代天气雷达抑制超折射能力、减轻速度模糊及改进反射率/速度数据质量的研究工作, 新的信号处理算法通过在天津和上海青浦SA雷达半年的业务运行, 证明基于Linux操作系统的雷达控制软件的稳定性和对病毒的防疫能力优于基于Windows的。通过对实际观测资料分析得出: (1) 频域滤波算法对超折射和地物回波有良好的抑制作用, 而对天气回波的影响很小, 性能优于现有SA的技术; (2) 双PRF技术有效减轻了速度模糊, 提高了速度场数据质量。上述研究结果不仅可直接应用于新一代天气雷达系统, 还可应用于人工影响天气和山洪地质灾害项目中的X波段天气雷达。

关键词: 滤波, 超折射, 双PRF, 速度模糊

Frequency Domain Filter and Dual PRF Improvement-Data Quality of SA Radar

Zhang Jianyun, Zhang Chian, Sun Zhaoping
(Beijing Metstar Radar Co., Ltd., Beijing 100085)

Abstract: This paper examines the application research of frequency domain filter and Dual Pulse Repetition Frequency (DPRF) techniques under Linux operating system which enhance the ability of rejecting anomalous refraction, easing velocity fuzziness and the improvement of reflectivity/velocity data quality of CINRAD/SA Weather Radar. By operating the new signal processor on SA radar in Tianjin and Qingpu District of Shanghai for half a year, it is proved that the stability and the anti-virus ability of radar control software under Linux system surpass those operated under Windows system. It can be concluded by analyzing the real data that (1) Frequency domain filter has a strong function on anomalous refraction and ground echo wave with a minor influence on radar echo which shows that the performance is better than current SA technology; (2) DPRF effectively mitigates velocity fuzziness and improves velocity field quality. The above results can not only be applied to the weather radar of a new generation but also an X-band Doppler weather radar for Weather Modification and Mountain-Flood Disaster Forecast Project.

Key words: filter, anomalous refraction, dual PRF, velocity fuzziness

1 引言

目前我国新一代天气雷达(CINRAD/SA型, 北京敏视达雷达有限公司生产, 以下简称SA型雷达)相比国际先进水平的雷达主要存在三个方面的不足: 一是操作系统仍使用稳定性和安全性差、病毒防护能力弱、应用软件开放性及其扩展性差、网络功能弱的Windows; 二是无有效技术方法抑制超折射回波^[1,2]; 三是在大面积强回波情况下径向速度场资料中存在大面积距离折叠和局部速度折叠区域^[3]。

北京敏视达雷达有限公司在气象行业专项和中国

收稿日期: 2011年9月15日; 修回日期: 2011年9月30日
第一作者: 张建云(1962—), Email: jianyuan.zhang@metstar.net
资助信息: 新一代天气雷达升级主要技术研究
(GYHY200906034); 中国气象局新一代
天气雷达建设业务软件项目二期

气象局新一代天气雷达建设业务软件项目二期的资助下, 经过近3年的研究开发, 取得了基于Linux操作系统的雷达控制/监控和标定标校的软件系统(RDASC, Radar Data Acquisition and Status Control), 抑制超折射回波的新型频域滤波技术和扩展速度值域范围的双PRF(Pulse Repetition Frequency, 脉冲重复频率)技术成果。

研发成果已在天津和上海青浦SA型雷达上分别运行7个多月和4个多月, 试验表明软件系统稳定可靠; 频域滤波有效抑制了超折射回波, 地物抑制能力优于现有系统; 双PRF技术解决了径向速度图的紫色问题, 减轻了速度折叠, 改善了147~153km的径向速度场的的数据质量。

2 新一代天气雷达操作系统软件的升级

目前我国新一代天气雷达使用的软件操作系统均

为微软公司的Windows系列产品，其缺点是稳定性和安全性差、病毒防护能力弱、应用软件扩展性差、网络功能弱，系统死机、系统崩溃、被病毒攻击的现象时有发生，软件故障平均1次/月/系统，对天气雷达的自动、稳定、连续运行造成不良的影响。

广泛应用于银行、证券、保险等行业的Linux操作系统稳定可靠、网络功能强大、安全性和开放性好、应用软件升级或扩展性能好、软件系统病毒免疫力好、异步/同步多任务体制功能强大。近年来随着世界各国对天气雷达稳定性的要求越来越高，国际上业务天气雷达均要求使用Linux的操作系统。为满足国内外用户的需求和进一步提高我国天气雷达软件系统的稳定性、可靠性和扩展性，敏视达公司经过近3年的努力，成功开发了基于Linux操作系统的雷达控制、标定标校和监控雷达的软件系统（RDASC）^[4]，该研发成果已在天津和上海青浦SA型雷达上分别运行7个多月和4个多月，未发生任何异常，系统运行稳定可靠。

下面陈述的抑制超折射回波的新型频域滤波技术和扩展速度值域范围的双PRF技术均基于Linux操作系统。

3 使用新型频域滤波技术提高新一代天气雷达对超折射回波的抑制能力

目前在新一代天气雷达反射率数据质量上存在的最主要问题是超折射回波。由于超折射回波的位置不确定，区域大小不确定，强度大小不确定，现有的滤波技术无法对其进行有效抑制，加上气象预报人员较难识别，给气象预报人员充分应用雷达反射率资料和人工影响天气的作业效果带来较大的影响。

为了减小超折射回波对气象预报人员的影响和提高我国天气雷达在信号处理上的技术水平，敏视达在学习国际上先进滤波技术^[5,6]的基础上，经过几年努力已成功完成基于频域信号处理算法的新型滤波技术^[7,8]，该滤波技术可有效抑制超折射回波，并且对气象回波的影响很小，同时对地物的抑制能力优于WSR-88D（Weather Service Radar, 美国新一代天气雷达，以下简称88D）算法^[9]。

新的滤波算法充分利用了现代计算机强大的计算能力，将信号处理部分从专业的信号处理器移植到了主机，直接处理数字化的IQ数据。利用地物杂波能量集中于零频和谱宽远小于天气信号的两个重要特征，将IQ数据通过FFT变换转换到频域，实时动态计算数据中包含的地物杂波的强度等级，自适应的选择不同的滤波窗口（Rectangle, Hamming, Blackman）来滤波，这就保证算法可以自动适应各种天气情况。下面是具体的案例和分析。

3.1 新型频域滤波算法对超折射回波抑制能力实例与分析

比较图1a和b可知，图1a中三个黄色椭圆圈里的回波均为超折射回波。因为地物回波的位置不随天

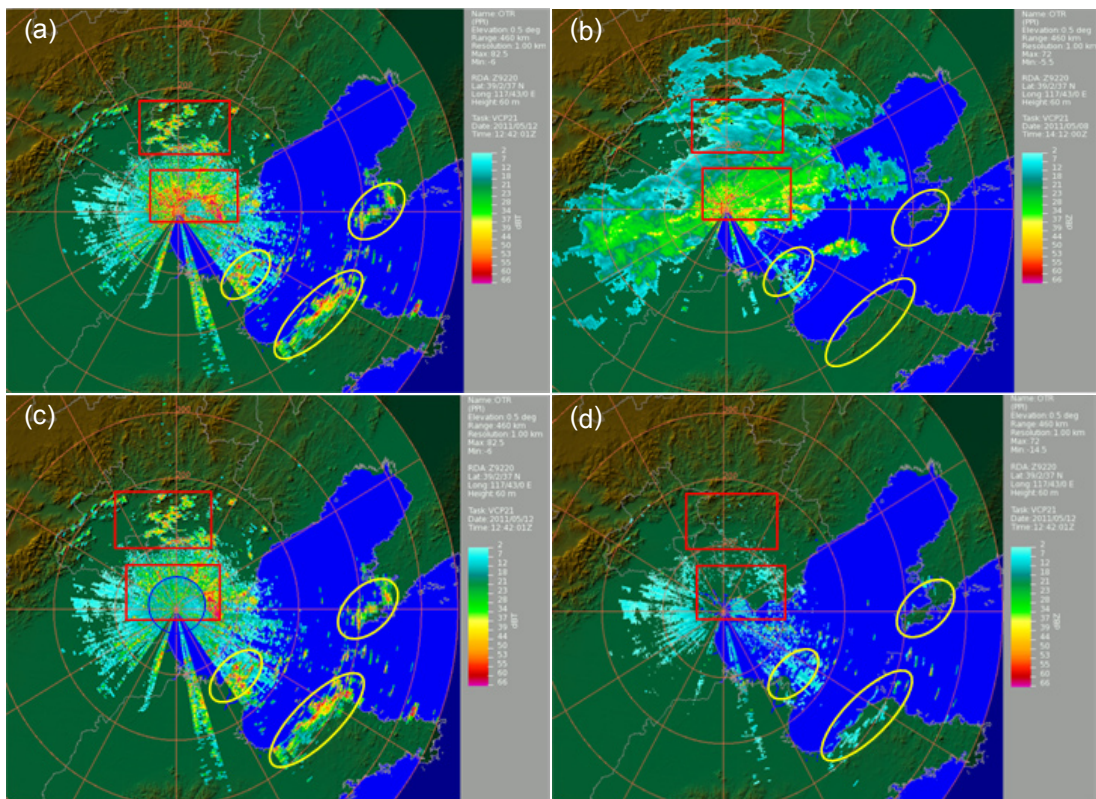


图1 频域滤波和88D滤波技术对超折射回波抑制能力比较

(a)，(c)和(d)分别为天津SA雷达2011年5月8日晴空情况下无滤波处理，雷达站50km范围内使用88D滤波处理（(c)中蓝色圆圈内区域使用88D滤波处理）和全程使用新型频域滤波处理后得到的反射率图；(b)是5月8日天津SA雷达降水情况下无滤波处理的反射率图

气和时间变化，而在图1b中三个黄色椭圆圈里无回波，且椭圆圈内的回波与地形匹配，因此图1a中三个黄色椭圆圈里的回波均为超折射回波。

比较图1a和c可知，经过88D滤波处理后，图1c中黄色椭圆圈里的回波大小和强度与图1a中的一样，说明88D滤波算法对超折射回波不起任何作用。这是因为88D的滤波算法使用IIR技术，其算法对零速度气象回波的影响较大，为了减小滤波算法对气象回波的影响，每个雷达系统均有与自己的周边环境相适应的滤波图，88D滤波算法仅对有地物存在的位置上的回波数据进行滤波处理。由于超折射回波的空间位置不固定，无法把其位置信息加入到雷达系统的滤波图

中，因此，88D滤波处理技术对超折射回波不起任何作用。

比较图1a和d中三个黄色椭圆圈里的回波强度和大小可知，滤波前黄色椭圆圈里的回波强度最大值为67dBz，使用全程频域滤波处理后黄色椭圆圈里的回波强度最大值为12dBz，频域滤波对超折射的抑制能力为55dBz，说明全程新型频域滤波对超折射回波的抑制能力很强。

3.2 新型频域滤波对气象回波的影响实例与分析

位置A在图2a和b中无回波；而在c和d中位置A处的回波强度均为31dBz。由于位置A在晴空无滤波和使用全程频域滤波处理情况下（图2a和b中位置A）均

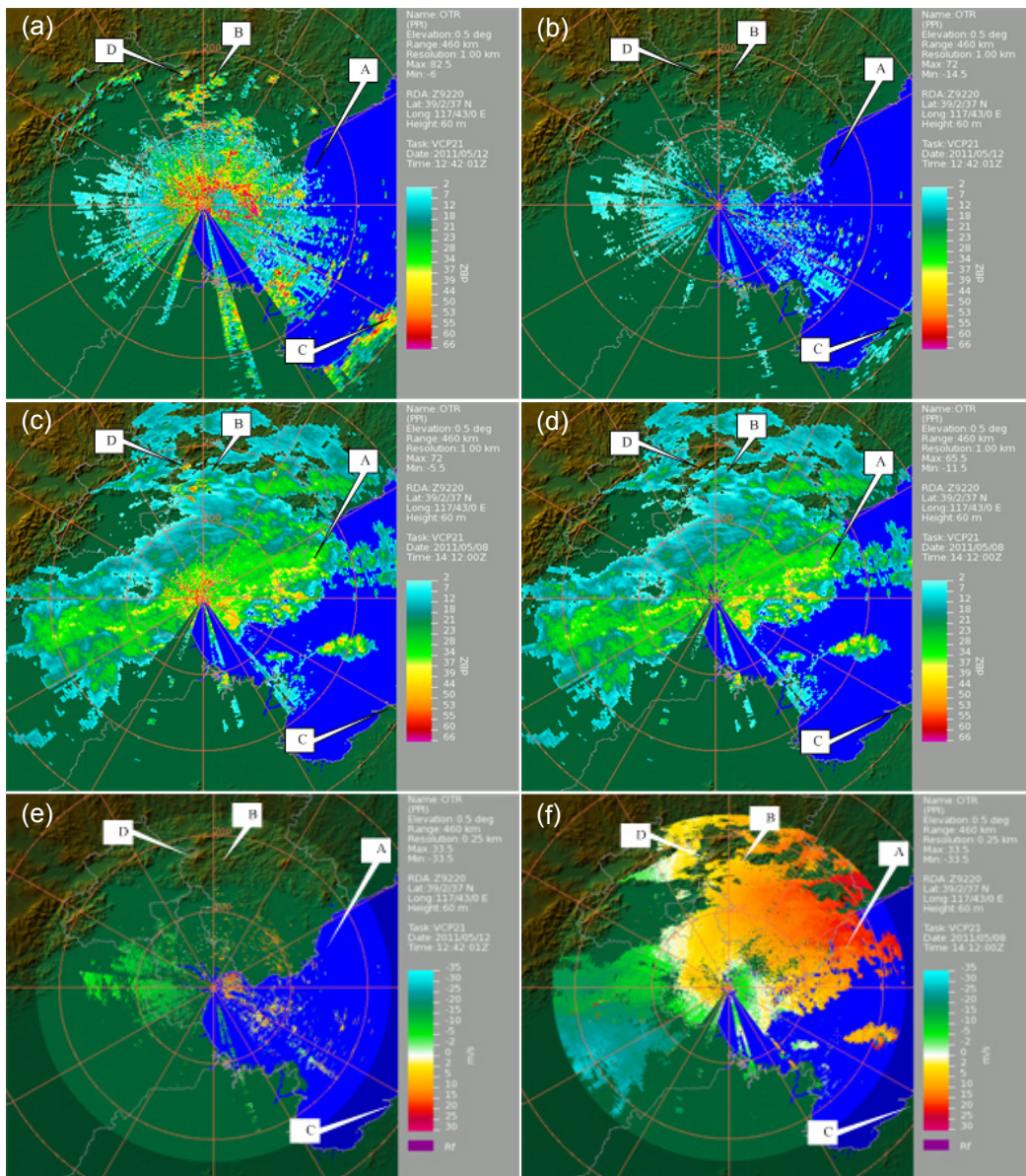


图2 新型频域滤波技术对降水回波的影响

(a) 和 (b) 分别为天津SA雷达2011年5月12日晴空情况下无滤波处理和使用全程新型频域滤波技术后的反射率图；

(c) 和 (d) 分别是天津SA雷达在5月8日降水情况下无滤波处理和使用全程新型频域滤波技术后的反射率图；

(e) 为 (a) 和 (b) 对应的速度图，(f) 为 (c) 和 (d) 对应的速度图

无回波，而在有降水情况下无滤波和使用全程频域滤波处理情况下（图2c和d中位置A）的回波强度值均为31dBz，说明图2c和d中位置A的回波是纯天气回波，且频域滤波对气象回波的影响很小。

位置B在图2a中的值为22dBz，在图2b中无回波，在图2c和d中位置B处的回波强度分别为17和16.5dBz。由于位置B在晴空无滤波和使用全程频域滤波处理情况下（图2a和b中位置B）分别为22dBz和无回波，说明位置B产生的地物回波强度为22dBz；而在有降水无滤波情况下（图2c位置B）的回波强度为17dBz，说明当位置B上有天气过程时，地物与天气共同产生的回波强度为17dBz；经全程频域滤波处理后图2d中位置B的回波强度为16.5dBz，说明新型频域滤波技术在地物与天气回波混合的情况下仍可有效抑制地物并保留天气回波。

位置C在图2a中的值为67dBz，在图2b, c和d中无回波。说明在图2a中位置C的回波是超折射引起的，并且新型频域滤波对超折射回波的抑制能力为67dBz。

位置D在图2a中的值为48dBz，在图2b中无回波，在图2c中的值为48.5dBz，在图2d中无回波。说明无论晴天还是雨天，新型频域滤波对地物回波的抑制能力不随天气变化。

表1给出了图2中各种情况下新型频域滤波技术对不同种类回波的作用效果。从表中可得到：(1) 新型频域滤波对气象回波的影响很小；(2) 地物与天气回波混合时，新型频域滤波仍可有效抑制地物并保留天气回波；(3) 新型频域滤波对超折射回波的抑制能力为67dBz；(4) 新型频域滤波对地物回波的抑制能力不随天气变化。

表1 新型频域滤波技术对不同种类回波的作用效果

位置编号	方位 (°)	距离 (km)	图2a 晴空无滤波处理 (dBz)	图2b 晴空全程频域滤波处理 (dBz)	图2c 降水无滤波处理 (dBz)	图2d 降水全程频域滤波处理 (dBz)	回波属性
A	66	160	无回波	无回波	31	31	降水
B	6	162	22	无回波	17	16.5	地物+降水
C	122	275	67	无回波	无回波	无回波	超折射
D	354	174	48	无回波	48.5	无回波	地物

3.3 新型频域滤波对地物回波抑制能力实例与分析

比较图3a和b，在图3a中雷达站附近地物的回波强度可达70dBz，经过全程新型频域滤波技术处理后（图3b）雷达站附近遗留的地物回波最大值

18dBz，显示频域滤波技术对雷达站附近地物回波的抑制能力可达52dBz。比较图3a和图3c，在图3a中雷达站附近地物的回波强度可达70dBz，经过88D滤波技术处理后（图3c）雷达站附近遗留的地物回波最大值为39dBz，说明88D滤波技术对雷达站附近地物回波的抑制能力仅为31dBz。综上所述，对雷达站附近的地物抑制能力上频域滤波技术较88D滤波技术好21dBz；两种滤波技术对远距离地物回波的抑制能力都很强，抑制能力可达60dBz。

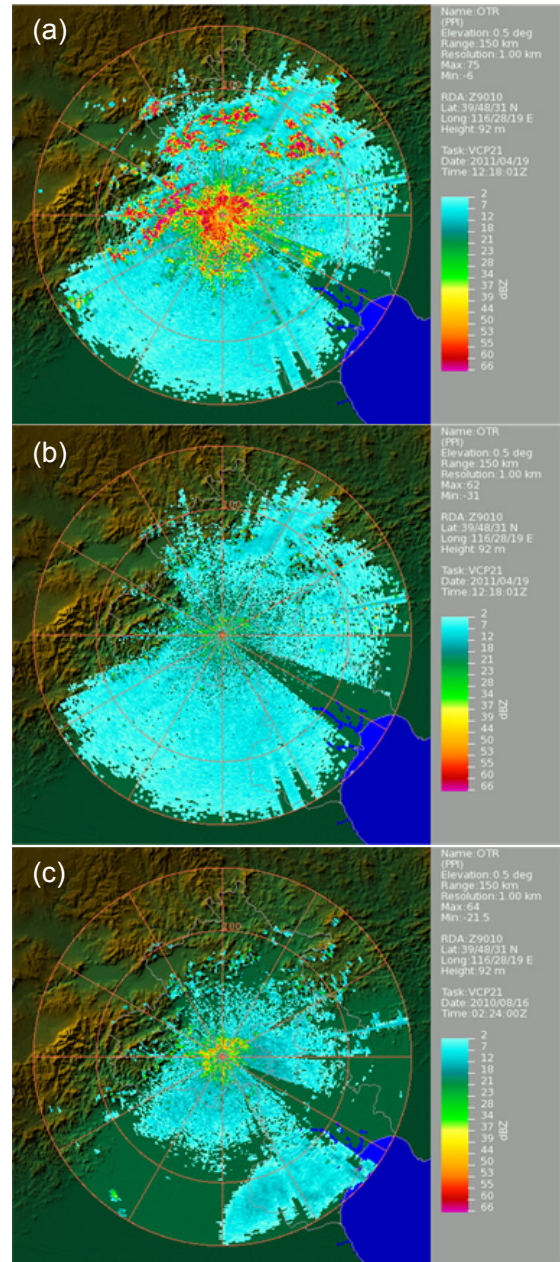


图3 新型频域滤波和88D滤波技术对地物抑制的能力比较 (a) (2011年4月19日), (b) (2011年4月19日) 和 (c) (2010年8月16日) 分别为北京SA雷达晴空情况下无滤波处理, 使用全程新型频域滤波和使用88D滤波技术处理后的反射率图

4 使用双PRF技术改进速度场质量

目前SA雷达的速度场主要存在三个严重问题：一是在大面积回波情况下，速度场产品中，由于使用1013Hz的重复频率，尽管不模糊速度值可达 $\pm 27\text{m/s}$ ，但导致大于147km的速度区域存在大量紫色区域；二是受多普勒脉冲雷达重复频率不够高的限制，通常S波段天气雷达的最大不模糊速度 $\pm 27\text{m/s}$ ，在强风和台风情况下存在速度模糊情况；三是由于使用88D速度范围扩展技术，147~153km范围的速度场资料时有缺失。上述问题严重影响了气象预报人员充分利用速度场资料对天气的准确预报。为了提高和改善SA雷达径向速度的数据质量，敏视达公司在认真调研国际上天气雷达对径向速度处理技术的基础上，在气象行业专项和中国气象局新一代天气雷达建设业务软件项目的支持下，经过近3年的努力增加了双PRF技术对速度场的处理，有效解决了现有速度场产品存在的问题。系统仍保留了88D对速度场的处理技术。

下面给出实例与分析。

Linux下的新型RDASC及双PRF算法已在天津雷达系统上试运行7个多月，在上青浦雷达系统上使用

超过4个月，均未出现异常情况，径向速度基数据质量得到明显提高。

图4为天津SA雷达使用88D单PRF和双PRF技术获得的径向速度图，图4a是2011年4月1日05:20:50（UTC，世界标准时间）使用88D单PRF算法获得的径向速度图，仰角为 0.4° ，其中使用的脉冲重复频率PRF为1013Hz，最大不模糊距离为147km，最大不模糊速度为 $\pm 27\text{m/s}$ ；图4b是2011年4月1日05:13:19（UTC）使用双PRF算法获得的径向速度图，仰角为 0.4° ，使用的脉冲重复频率PRF为644和429Hz，采用脉冲组交替扫描方式，其不模糊距离为230km，最大不模糊速度可达 $\pm 33.5\text{m/s}$ 。

从图4a中方位角 $300^\circ \sim 30^\circ$ 、距离147~152km的大部分区域无数据或是紫色。图4b在与图4a对应的上述区域里可以看到合理的速度场数据，显示经过双PRF技术处理得到的速度场资料质量明显优于88D技术的结果。另雷达站附近也存在大量的紫色区域。紫色区域产生的原因见图5a和图5b的分析。由于两幅图数据采集的时间相隔7分30秒，速度场之间有微小差异。

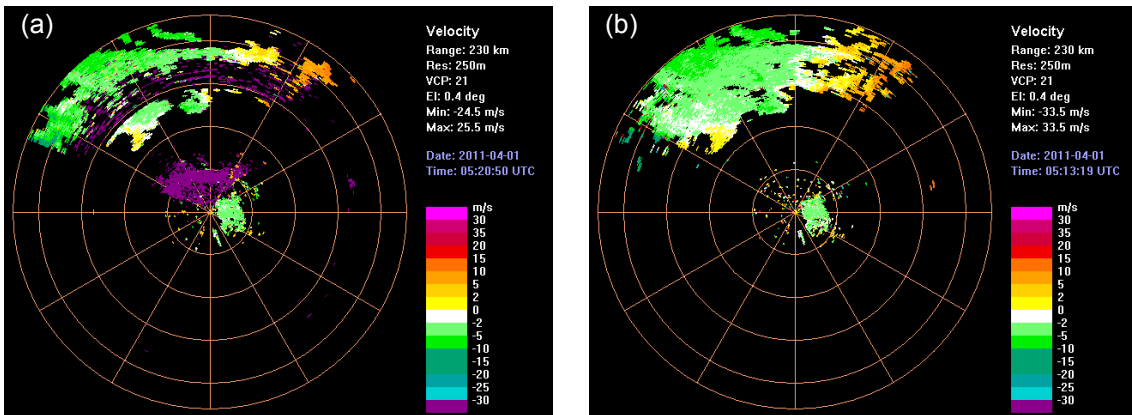


图4 天津SA雷达2011年4月1日使用单PRF（88D算法）（a）和双PRF（b）技术得到的径向速度图

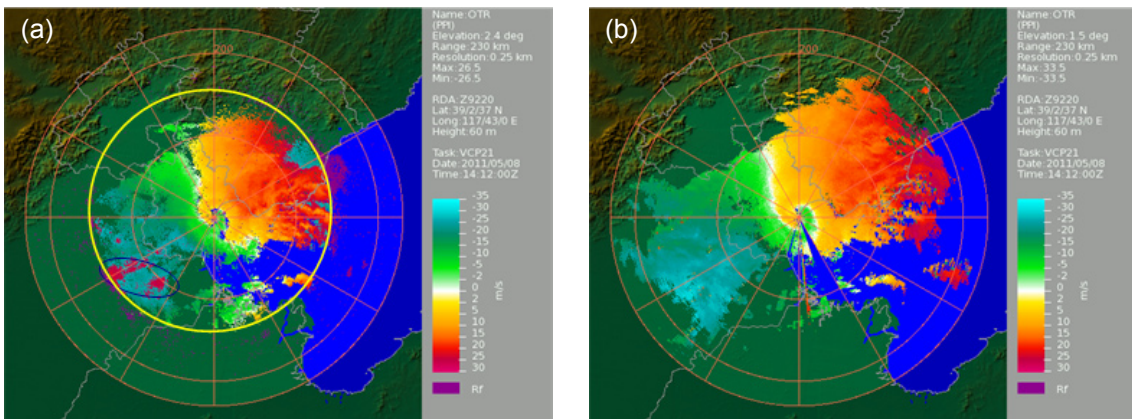


图5 天津SA雷达2011年5月8日使用单PRF（88D算法）（a）与双PRF（b）技术得到的径向速度图

图5a是天津雷达2011年5月8日使用88D单PRF算法获得的径向速度图，仰角为 2.4° ，使用的PRF为1013Hz，最大不模糊距离为147km（图5a中的黄色圆），最大不模糊速度为 $\pm 27\text{m/s}$ 。图中的蓝色椭圆内冷色速度区域中有两片红色区域，显示速度折叠已发生，说明红色区域里的天气系统速度大于 -27m/s 的最大不模糊速度。另外还可看到147km之外的速度场均为紫色，其原因在于1013Hz的重复频率仅能直接获得1~147km范围内的速度场，148~230km范围的速度场需要使用88D扩展算法得到，即1~83km的功率值与148~230km的功率值逐一比较，若两端的功率相当，则两端的速度值均用紫色表示；若近端的功率值明显大于远端的，则近端用探测的速度值，而远端则用紫色表示；若远端的功率值明显大于近端的，则远端用探测的速度值，而近端则用紫色表示。在大面积回波情况下，88D的速度扩展算法必然导致速度场产品存在大量紫色区域。由于雷达站附近全是回波且功率强于147km之外的回波强度，所以由88D算法得到的147km之外的速度均为紫色。

图5b是天津雷达2011年5月8日使用644和429Hz双PRF算法获得的径向速度图，仰角为 1.5° ，不模糊距离为230km，最大不模糊速度可达 $\pm 33.5\text{m/s}$ 。从图中可以看到，在图5a中左下角的速度模糊已不再存在；由于采用的双PRF不模糊距离是230km，不模糊速度

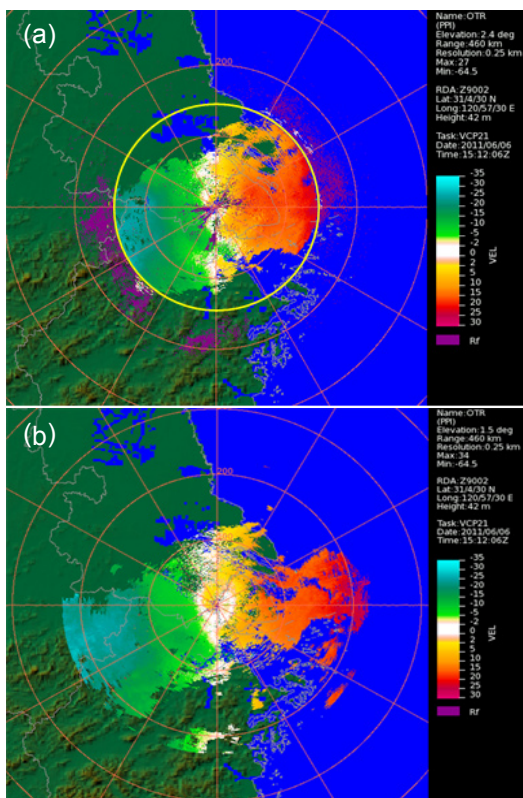


图6 上海青浦SA雷达2011年6月6日使用88D单PRF (a) 和双PRF (b) 技术得到的径向速度图

已达 $\pm 33.5\text{m/s}$ ，不需要使用功率法进行速度的距离扩展，所以速度场中不会再有紫色出现。

图6a是上海青浦SA雷达使用88D单PRF算法获得的径向速度图，其他参数与图5a一致，从图中看到147km之外的速度场几乎全是紫色。雷达站附近也有一些零星的紫色斑点。图6b是上海青浦SA雷达使用双PRF算法获得的径向速度图，其他参数与图5b一致，从图中未看到速度模糊和紫色区域。

目前在天津和上海青浦SA系统上用的双PRF采用3/2的速度展宽模式，即PRF使用644和429Hz，不模糊距离仍为230km，不模糊速度 $\pm 33.5\text{m/s}$ 。但是在观测台风时，为了避免速度折叠还可以使用4/3（脉冲重复频率为644和483Hz）或5/4（脉冲重复频率为644和515Hz）的双PRF速度展宽模式，这样其不模糊距离仍为230km，但最大不模糊速度可分别达到 ± 50 ， $\pm 66\text{m/s}$ 。

5 结论

使用基于Linux的RDASC软件、新型频域滤波和双PRF技术的信号处理算法后：

(1) 提高了雷达软件系统稳定性、抗病毒能力和软件扩展性。

(2) 有效减轻了超折射回波的强度和影响，地物抑制能力优于88D算法，对气象回波的影响小于88D算法。

(3) 解决了径向速度图的紫色问题，减轻了速度折叠，改善了147~153km的径向速度场的的数据质量。

升级后的天津和上海青浦SA雷达的软件稳定性和可靠性明显增强，超折射和地物回波对基数据的影响显著减小，系统的最大不模糊速度得到有效扩展，基数据的质量明显提高。

参考文献

- [1] 刁秀广, 朱君鉴, 杨传凤, 等. CINRAD/SA雷达超折射回波抑制技术分析与应用. 气象科技, 2006, 34(5): 620.
- [2] 孟昭林, 王红艳. 新一代多普勒天气雷达提高产品数据质量的途径与方法. 气象科技, 2006, 34(z1): 85-89.
- [3] 潘新民, 熊毅, 柴秀梅, 等. 新一代天气雷达退数据模糊方法探讨. 气象与环境科学, 2010, 33(1): 60-62.
- [4] 梁海河, Jin Z Q, 徐宝祥. NEXRAD的技术升级和发展方向. 气象, 2006, 32(1): 3-11.
- [5] Siggia A D, Passarelli R E Jr. Gaussian model adaptive processing (GMAP) for improved ground clutter cancellation and moment calculation. 3th European Conference on Radar Meteorology (ERAD), 2004: 67-73.
- [6] Tortes S M, Zrnic D S. Ground clutter canceling with a regression filter. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 1999, 16(10): 1364-1372.
- [7] Sirmans D, Bumgarner B. Numerical comparison of five mean frequency estimators. Journal of Applied Meteorology, 1975, 14: 991-1003.
- [8] Doviak R J, Zrnic D S. Doppler Radar and Weather Observations. New York: Academic Press Inc., 1993.
- [9] Groginsky H L, Glover K M. Weather radar canceller design. 19th Conference on Radar Meteorology, 1980: 192-198.