

史朝,范凯波,李学华,等. 2013. X波段全固态天气雷达降水探测能力的研究[J]. 大气科学学报,36(3):379-384.

Shi Zhao, Fan Kai-bo, Li Xue-hua, et al. 2013. Study of detection capability of X-band fully solid-state weather radar on precipitation[J]. Trans Atmos Sci, 36(3):379-384. (in Chinese)

X波段全固态天气雷达降水探测能力的研究

史朝^{1,2,3,4}, 范凯波², 李学华^{1,2}, 王旭^{1,2}

(1. 中国气象局大气探测重点开放实验室, 四川 成都 610225; 2. 成都信息工程学院, 四川 成都 610225;
3. 中国科学院水利部成都山地灾害与环境研究所, 四川 成都 610041; 4. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要:以中国气象局大气探测重点开放实验室的X波段全固态天气雷达为试验平台,介绍了雷达距离探测分辨力满足50 m的条件下,通过组合探测模式弥补宽脉冲造成的雷达近场探测盲区;重点分析了由脉冲压缩引入的距离副瓣对气象回波强度探测范围的影响,通过计算说明双向加权是在牺牲峰值发射功率的代价下较大程度地改善主瓣能量泄露,但这种方法并不适宜峰值功率与压缩比有限的应用。进一步引入了自适应旁瓣抑制方法,模拟表明该方法峰值旁瓣抑制能力近似为-50 dB,且主瓣展宽系数接近于1。并与经典的匹配方式和汉明加权失配滤波方式进行了试验对比,弱信号探测改善约4 dB;最后在分析雷达最远探测距离的基础上,通过一次外场观测案例与713型雷达对比了降水探测能力,该固态雷达能够探测150 km范围内强于10 dBz的降水回波。

关键词:全固态;天气雷达;降水探测

中图分类号:P412.25 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-7097(2013)03-0379-06

Study of detection capability of X-band fully solid-state weather radar on precipitation

SHI Zhao^{1,2,3,4}, FAN Kai-bo², LI Xue-hua^{1,2}, WANG Xu^{1,2}

(1. Key Laboratory of Atmospheric Sounding, China Meteorological Administration, Chengdu 610225, China;
2. Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610225, China;
3. Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610041, China;
4. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Based on a test platform of the X-band fully solid-state weather radar at Key Laboratory of Atmospheric Sounding of China Meteorological Administration, this paper introduces that the combination working mode is designed to detect the blind spot of radar near-field detection, which is caused by wide pulse, under the condition of 50 m radar detection distance resolution. This paper mainly analyzes the impact of time sidelobe leaked by main-lobe on detection range of the meteorological echo intensity. Transmission Amplitude Taper will improve the level of sidelobe compression under the loss of peak emission power, however, it is not suitable for limited peak power and low compression factor. Furthermore, an adaptive method is introduced to suppress sidelobe. The simulations show that, using the method, the peak sidelobe suppression is nearly -50 dB, and the main-lobe broadening coefficient is close to 1. Compared with the classic matching method and hamming weighted method, it will improve about 4 dB for the weak signals detection. Finally, based on the analysis of radar detectable maximum distance, the precipitation detection capability of the X-band radar is compared with the 713 radar in a field observation case. It shows that the X-band solid-state radar can detect precipitation echoes stronger than 10

收稿日期:2012-02-13; 改回日期:2012-09-15

基金项目:国家高技术研究发展计划(863计划)项目(2007AA061901)

通信作者:史朝,博士生,讲师,研究方向气象雷达与大气探测, sxz@cuit.edu.cn.

dBz within 150 km.

Key words: fully solid-state; weather radar; precipitation detection

0 引言

天气雷达的稳定性对于高精度的气象观测与物理参数反演是至关重要的(周海光,2010;黄兴友等,2011;魏鸣等,2011)。使用固态发射技术是天气雷达今后发展成为全固态系统的重要技术途径。相比大功率真空发射管,固态器件的稳定性更好,寿命更长。中国气象局气象探测中心对我国新一代多普勒天气雷达运行状况的长期跟踪发现(裴翀等,2010),使用速调管的发射机是故障发生率较高的分系统之一,并且发射管平均寿命仅 10 000 ~ 43 000 h,如果全年连续开机,则每年消耗约一只管子。而固态器件的平均无故障时间可超过五十万小时(斯科尼克,2010)。不仅如此,由于固态器件无需热阴极,进一步节约了预热时间,省去了灯丝电源与钛泵电源等电路,减轻了业务使用期间的老练与保养工作。另外,固态技术还可以满足雷达发射复杂波形以及改善数据质量等要求。

目前,国内外十分重视固态雷达的技术研发与气象探测的应用。日本东芝公司采用自研的微波晶体管研制出了 X 波段与 C 波段全固态天气雷达(Masakazu et al., 2008)。Bharadwaj et al. (2009) 设计了适合于全固态双极化气象雷达观测的发射调制波形。George et al. (2008) 分析了多脉冲方式与双 PRF 法解决宽脉冲线性调频模式下近场探测盲区与速度模糊等问题。不过当前技术条件应用于天气雷达精细化探测需求还面临诸多挑战。目前,一个固态组件提供的输出功率还比较有限,为满足探测需求,一般会并联多个组件进行功率合成。要达到与真空发射管相当输出功率水平,其组件数量将十分庞大且造价昂贵。从可实现性角度考虑,将功率合成方式与脉冲压缩技术相结合,即能满足等效输出功率与探测分辨率要求又可控制组件规模与成本。脉冲压缩技术是确保全固态雷达实现气象探测的关键。

引入脉冲压缩技术的全固态雷达对气象目标探测能力的影响是多方面的:脉冲压缩技术是通过较大的时宽带宽积获取高压缩比以提高回波信噪比水平,大时宽会增加雷达近场探测盲区;脉冲压缩后泄露的距离副瓣将影响弱目标的检测与定量精度;加权处理后的主瓣展宽会降低雷达距离分辨率;由失

配处理造成信噪比降低,进一步影响雷达对降水目标的最远探测距离,等等。这些因素并非孤立存在而是相互关联的,有必要从系统角度分析、试验与改善脉冲压缩技术下的全固态天气雷达对降水观测的实际能力。

本文以中国气象局大气探测重点开放实验室的 X 波段全固态天气雷达为试验平台,重点分析了雷达在空间探测分辨率、低距离副瓣脉冲压缩与降水观测最远探测距离 3 个方面的探测能力。

1 全固态雷达系统参数

X 波段全固态相参天气雷达由低副瓣天馈系统、天线伺服系统、固态发射机、具有固态保护器的高灵敏度大动态数字接收机系统、低相噪频率源、高性能可编程数字信号处理机、控制终端和状态采集装置以及高性能的用户终端和完善的气象产品生成软件等主要部分组成。雷达系统的主要探测参数为降水系统的基本反射率因子、径向速度、与速度谱宽,并具有多种扫描模式切换、实时在线标定、工作状态监视以及故障监测等功能。雷达硬件的主要技术参数见表 1。

表 1 X 波段全固态天气雷达系统参数

Table 1 Parameters for X-band fully solid-state weather radar system

名称	参数值
工作频率	X 波段
天线	旋转抛物面
天线直径	1.6 m
天线扫描方式	PPI、RHI、体扫、扇扫、定点
输出峰值功率	50 W
输出波形	脉冲调制,线性调频
改善因子限制值	55 dB
噪声系数	≤3 dB
线性动态范围	≥90 dB
A/D 采样位数	14 bits
A/D 采样速率	48 MHz
信号处理方式	脉冲压缩 PPP, FFT

2 空间探测分辨率

天气雷达空间探测分辨率主要包含方位、俯仰

角度分辨力与距离分辨力。方位与俯仰角度分辨力取决于天线波束的主瓣宽度,二者乘积与天线增益成反比。为提高增益与角度分辨力,固态雷达天线直径为 1.6 m。天线增益极限值逼近 44 dB,方位与俯仰角度分辨力极限值逼近 0.9°。

距离分辨力与雷达发射带宽成反比,关系为:

$$\Delta R = \frac{C}{2B}$$

其中: C 为光速, B 为发射的调频带宽。在不改变发射功率与发射带宽的条件下,高调频带宽不仅可以提高径向维上探测精细度,还能增大压缩比从而提升气象回波的信噪比水平。固态雷达调频带宽为 3 MHz, -4 dB 处的距离分辨力为 50 m。不过在脉冲压缩过程中为满足抑制距离副瓣的需要,一般会有加权处理,这会导致压缩后的主瓣展宽。那么可以依据展宽系数 k ,进一步调整调频带宽为 kB 。确保展宽后的脉宽不超过距离分辨力要求。表 2 为一些常用加权函数的性能。

表 2 常用加权函数的性能(吴顺君和梅晓春,2008)

Table 2 Capabilities of usual weighted functions

加权函数	峰值旁瓣电平/dB	-3 dB 主瓣展宽系数	信噪比损失/dB
矩形	13.26	1	0
汉明	42.56	1.47	1.34
余弦平方	31.7	1.62	1.76
余弦四次方	47	2.20	2.88

大脉宽发射虽然可以增加总的发射能量,但也会由此增加雷达近场的探测盲区。雷达收发共用一部天线,发射期间无法接收。例如:发射脉宽为 33.3 μ s,最小可探测距离为 5 km。对于探测雷达近场的强天气,这个距离是无法接受的。因而必须进一步设计探测模式,弥补由于大时宽发射线性调频信号所引起最小探测距离增大的不良影响。

组合探测模式是指交替发射宽脉冲线性调频信号与窄脉冲单点频信号。宽脉冲信号用于远距离探测与定量测量,窄脉冲用于对宽脉冲观测盲区的探测。窄脉冲观测降水的有效范围不能小于宽脉冲观测盲区距离。图 1 为在宽度为 0.833 μ s 窄脉冲单点频发射条件下雷达对水相粒子的探测能力。

在峰值功率 50 W 单点频窄脉冲发射条件下,固态雷达可以获得 6 km 处 10 dBz 的最小信号探测能力。窄脉冲模式可以有效观测雷达近场 5 km 宽脉冲探测盲区范围内降水过程。

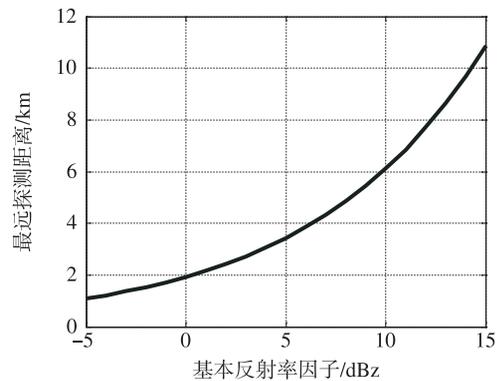


图 1 窄脉冲单点频发射条件下的雷达最远探测距离

Fig. 1 Radar detectable maximum distance under the condition of narrow pulse and single frequency transmission

3 低距离副瓣脉冲压缩

脉冲压缩技术能够满足雷达在不降低距离分辨力的前提下增加发射脉宽来提高平均发射功率,进而改善回波信噪比,扩大最远可探测距离。脉冲压缩技术最适合发射峰值功率受限的情形,在目前的制造技术水平下,固态发射机的峰值输出功率还十分有限,所以为获得理想的探测性能必须采用脉冲压缩技术。

气象雷达应用脉冲压缩技术面临最大的挑战是如何降低距离旁瓣,因为气象目标呈分布式特征,信号变化范围很宽。强回波的旁瓣泄漏会被误认为有目标存在。比如,地物或海杂波的旁瓣泄漏的强度就要比 0.5 mm/h 降水回波强度强得多。所以,气象雷达的峰值旁瓣抑制能力(peak sidelobe level, PSL)要大于 50 dB,理想指标 60 dB。

常用降低距离旁瓣的方法是在接收时采用滤波器系数幅度加权进行失配滤波。该方法特点是以主瓣展宽为代价换取较低的距离旁瓣,常用窗函数的性能如表 2 所示。并且失配方式进行滤波会带来回波信噪比的损失。回波信噪比损失 1 dB,最远探测距离则缩短约 10%,因而必须对设计的窗函数在失配滤波过程中引入的信噪比损失进行估算,这样才能了解雷达由于失配处理而导致的最近探测距离的变化。信噪比损失的估算关系如下:

$$L = \frac{(s^H s) \cdot (h^H h)}{|y(n_c)|^2}$$

其中: s 和 h 分别表示信号和滤波器响应的离散信号; $y(n_c)$ 为信号经失配滤波输出的峰值。选择何种加权函数需兼顾考虑距离旁瓣抑制与信噪比损失

等因素。由表 2 可见,汉明、余弦平方等常用窗函数的 PSL 均小于 50 dB。

如果对发射信号进行幅度加权调制,可减小非涅尔起伏,进一步降低距离旁瓣。该方法的代价是牺牲了部分发射功率。这个技术在 ARMAR 和 APR-2 系统中被采用(Durden et al., 1994; Sadowy et al., 2003),如:发射时信号进行余弦平方加权,接收时的滤波器系数进行汉明函数加权,这种双向加权方式可获得优于 -50 dB 距离旁瓣抑制效果。但该方法对发射功率损失较大且对发射波形调制不易控制,表 3 模拟计算了在接收端滤波系数汉明加窗,发射端信号幅度在四种窗函数调制的条件下的脉冲压缩性能。可以看出双向加权优于 50 dB,但发射加窗一般造成 4 dB 以上的发射功率损失,进而会减小最远可探测距离约 40% 左右。因而在峰值功率有限且时宽带宽积较低的情况下,该方法无法满足最远探测距离需求。

表 3 发射幅度加权调制与接收汉明加权联合抑制距离副瓣

Table 3 Sidelobe suppression under weighted modulated transmission and hamming weighted receiving

发射端加权函数	接收端加权函数	峰值旁瓣电平 (近似值)/dB	-3 dB 主瓣展宽系数(近似值)	发射端平均功率损失/dB
汉宁	汉明	-49.0	2.3	4.24
汉明	汉明	-49.6	2.2	4.02
余弦平方	汉明	-49.0	2.3	4.28
布莱克曼	汉明	-56.0	2.4	5.18

有鉴于此,本文引入了以峰值旁瓣电平和主瓣展宽系数作为约束条件,用迭代最小二乘法(王丽萍和苏涛,2008)设计最小二乘法(least square, LS)自适应旁瓣抑制滤波器。其基本过程如图 2 所示。

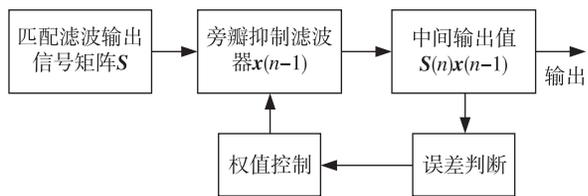


图 2 自适应旁瓣抑制滤波器框图

Fig. 2 Block diagram of adaptive sidelobe suppression filter

模拟验证了自适应滤波抑制效果,参数设置为调频带宽 1.2 MHz,脉宽 33 μs。并与匹配滤波脉冲压缩效果进行了对比(图 3)。

自适应旁瓣抑制滤波器达到了较好的旁瓣抑制

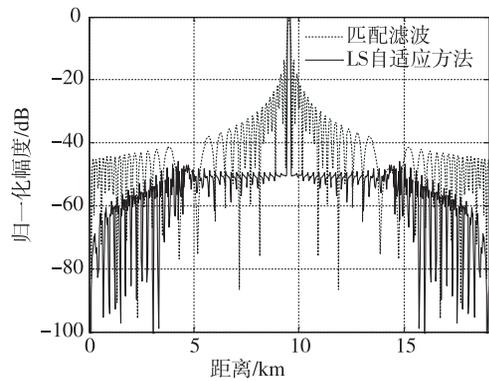


图 3 自适应旁瓣抑制滤波效果

Fig. 3 Adaptive sidelobe suppression filtering effect

效果,峰值旁瓣电平可达到约 50 dB,且 -3 dB 主瓣展宽系数很小,近似为 1,明显低于汉明窗加权理论值为 1.47 的主瓣展宽系数。

进一步验证自适应滤波器对雷达实际回波的单帧 I/Q 数据的处理性能。原始 I/Q 数据分别经过匹配滤波脉压、汉明加权脉压与自适应旁瓣抑制滤波三种处理过程。

由图 4 可见,自适应滤波对旁瓣泄露的实际抑制效果优于匹配与汉明加权方式,减小了由于泄露的旁瓣能量对噪声基底的提升,自适应滤波的噪声基底比其他二者低 4 dB 左右。而汉明加权方式的噪声基底相比匹配方式略有减小,但效果并不明显。另外,自适应滤波的主瓣宽度控制好于汉明加权方式。

脉压后的 I/Q 数据进一步被处理为基本反射率因子(图 5)。三者选择了相同的检测阈值,可以看出匹配脉压方式的噪声基底高于设定的检测阈值,旁瓣泄露的能量不仅提升了噪声基底,而且也增强了弱回波强度,扩大了回波区域。提升阈值虽可消除泄露造成的假回波,但也会削弱甚至淹没弱回

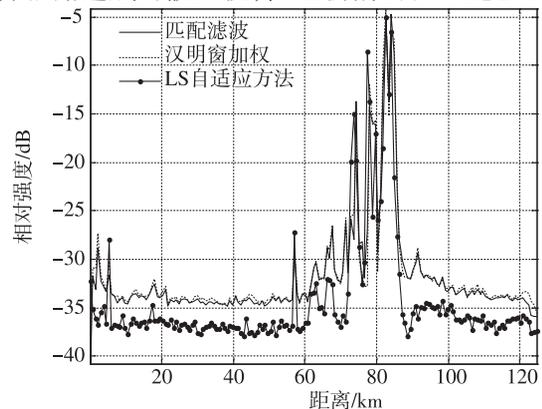


图 4 单帧回波的脉冲压缩效果

Fig. 4 Pulse compression effect of single echo

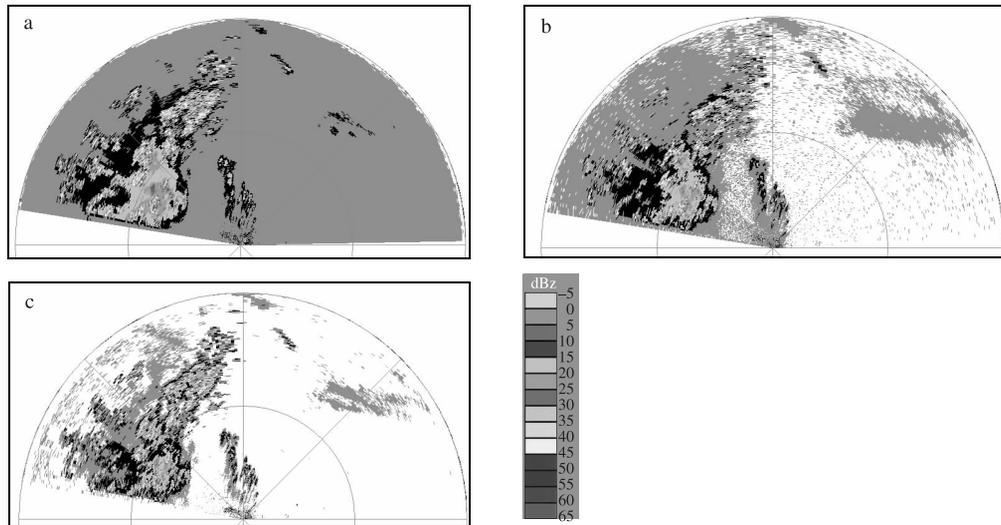


图 5 真实回波脉冲压缩后的反射率(单位: dBz) a. 矩形匹配方式; b. 汉明加权方式; c. 自适应方式

Fig. 5 Reflectivity of real echoes with pulse compression(units: dBz) a. rectangular matched method; b. hamming weighted method; c. adaptive method

波,其结果将造成接收动态范围降低,探测精度下降的不利影响,因而单纯上调阈值无法解决矩形匹配脉压造成的探测困境。由图 5 可以看出,汉明加权方式在弱回波或无回波径向上的噪声基底接近检测阈值,而在出现强回波的径向上,噪声基底由于强目标的旁瓣泄露而略高于阈值。除此,通过对比发现汉明加权的强度估值低于匹配方式 1~2 dB。而自适应滤波方式强目标估值与匹配方式接近,并且弱回波未被高估,噪声基底低于检测阈值。

4 发现降水的最远探测距离

固态雷达能够发现降水目标的最远探测距离直接取决于发射峰值功率、天线增益、接收灵敏度与信号处理检测能力等系统参数。固态雷达可通过增大脉宽、相干积累等方式改善雷达最远探测距离。

由系统噪声系数可知,接收灵敏度为:

$$P_{\min} = -114 + N_F + 10\lg B + 10\lg M。$$

其中: N_F 为接收系统的噪声系数; B 为接收带宽; M 为信号处理的检测因子。设计固态雷达即要考虑最远探测距离,又要兼顾提高雷达的分辨力。该固态雷达选择 3 MHz 作为接收带宽,信号处理通过相干积累改善回波信噪比,降低回波的检测因子。理论上,信号相干积累 N 次,检测因子改善近似 $10\lg N$ dB,并考虑到失配脉压处理引入的信噪比损失 L dB,则检测因子为 $(10\lg N - L)$ dB。固态雷达 PPI 扫描一周约 30 s 左右,雷达在高脉冲重复频率下,可以处理不少于 64 次的回波样本,因而在信号处理

相干积累的作用下,固态雷达进行匹配脉冲压缩后通过相干积累灵敏度改善约 18 dB。

增大脉宽可改善雷达最远作用距离,但也会增加探测盲区。窄脉冲可弥补大脉宽引入的探测盲区,但探测能力有限。为此,图 6 模拟了在 50 W 峰值功率下,不同脉宽与满足观测 5 dBz 目标的最远探测距离的对应关系。可以看出,脉宽在 33.3 μ s 处可以获得 170 km 的探测能力。

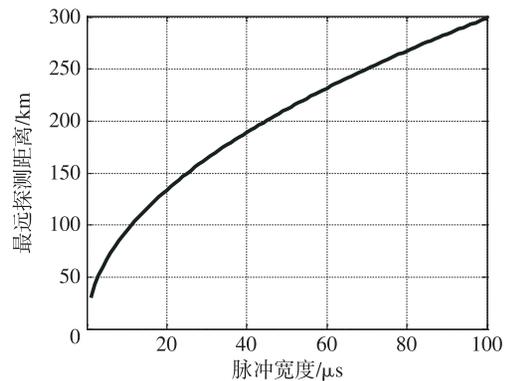


图 6 雷达最远探测距离与固定调频带宽下的发射脉宽的关系

Fig. 6 Relation between radar detectable maximum distance and transmission pulse width under the fixed modulated frequency width

由脉冲压缩性能分析可知,失配处理引入的信噪比损失会低估强度估值,即影响雷达作用距离。相比其他失配滤波方式,匹配脉压方式没有信噪比损失,可获得理想的最远探测距离。在此基础上,使

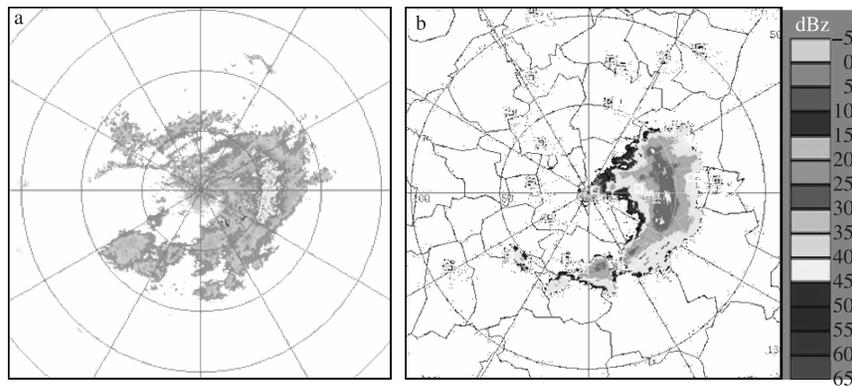


图 7 713 型雷达(a)与固态雷达(b)在渭南地区的探测效果对比

Fig. 7 Comparisons in detecting effect between (a) the 713 weather radar and (b) the solid-state weather radar in Weinan area

用自适应滤波方式进一步改善旁瓣抑制效果。在渭南地区进行外场实验中,固态雷达与 C 波段 713 型雷达进行了探测效果对比。

通过对实际探测结果分析,固态雷达能够发现强于 10 dBz 的降水目标,但对小于 5 dBz 以下的弱回波探测能力明显不够。

5 结论

通过理论分析与试验,全固态天气雷达能够发现并定量测量 150 km 以内强于 10 dBz 的降水回波,弱云回波的探测能力有限。由于采用自适应旁瓣抑制滤波器,脉冲压缩后的峰值旁瓣抑制能力近似 -50 dB。相比经典加权方式,信噪比损失小,且主瓣宽度未明显展宽,对弱回波的改善近似 4 dB。

参考文献:

黄兴友,孙伟,葛文忠,等. 2011. 一次雷暴前后大气折射率的多普勒天气雷达测量试验及结果[J]. 大气科学学报,34(4):433-438.
裴翀,夏元彩,胡学英. 2010. 中美天气雷达速调管性能对比研究[J]. 信息化研究,36(6):1-4.

斯科尼克. 2010. 雷达手册[M]. 北京:电子工业出版社.
王丽萍,苏涛. 2008. 一种迭代加权最小二乘旁瓣抑制滤波器设计[J]. 火控雷达技术,37(1):92-96.
魏鸣,张思进,刘佳,等. 2011. 机载气象雷达扫描的理想模型仿真算法[J]. 大气科学学报,34(1):28-35.
吴顺君,梅晓春. 2008. 雷达信号处理和数据处理技术[M]. 北京:电子工业出版社.
周海光. 2010. 超强台风韦帕(0713)螺旋雨带中尺度结构双多普勒雷达研究[J]. 大气科学学报,33(3):271-284.
Bharadwaj N, Mishra K V, Chandrasekar V. 2009. Waveform considerations for dual-polarization Doppler weather radar with solid-state transmitters [C]//IGARSS IEEE Proceeding. Cape Town: 267-270.
Durden S L, Im E, Li F K, et al. 1994. ARMAR: An airborne rain-mapping radar[J]. J Atmos Oceanic Technol, 11(3):727-737.
George J, Bharadwaj N, Chandrasekar V. 2008. Considerations in pulse compression design for weather radars [C]//IGARSS IEEE Proceeding. Boston: 109-112.
Masakazu W, Mizutani F, Muto R. 2008. Development of 9 GHz band solid-state multi-Parameter weather radar[J]. IEICE Technical Report, 108(318):125-128.
Sadowy G A, Berkun A C, Durden S L, et al. 2003. Development of an advanced airborne precipitation radar [J]. Microwave Journal, 46(1):84-89.

(责任编辑:张福颖)