

相控阵天气雷达回波数据的对比分析

刘俊^{1,2}, 黄兴友², 何雨岑², 王振会², 王金虎²

(1. 泰州市气象局, 江苏泰州 225300; 2. 南京信息工程大学气象灾害预报预警与评估协同创新中心, 中国气象局气溶胶与云降水重点开放实验室, 南京 210044)

[摘要]相控阵天气雷达系统具有快速扫描的特点, 与目前主流的机械天线雷达相比, 不仅可靠性高, 而且在探测和预警中小尺度灾害性天气系统时, 可以实现快速采集回波数据, 及时反映天气系统的演变。本文在介绍 X 波段相控阵天气雷达系统及地基外场试验基础上, 与 X 波段机械天线的天气雷达系统回波数据进行比较, 分析在脉宽为 $6\mu\text{s}$ 和 $1\mu\text{s}$ 两种探测模式下回波强度之间的差异, 通过散点图和概率分布图反映相控阵天气雷达的回波强度和径向速度数据对比情况。结果表明: (1) 脉宽 $6\mu\text{s}$ 、 $1\mu\text{s}$ 探测模式下, X 波段相控阵天气雷达与常规天气雷达有比较接近的探测能力和可靠的数据质量; 在远距离处, 相控阵天气雷达的回波数据呈现层次结构清晰、轮廓显著的特性; (2) 宽波束以及波束宽度展宽等特性, 平滑了相控阵天气雷达的回波强度, 改变回波结构, 弱回波区面积减小, 强回波区增大; (3) 天线增益不均匀影响相控阵雷达数据质量, 理论上可以用 $1/(\cos\theta\cos\varphi)$ 的增益修正因子对回波强度进行修订。

关键词: 相控阵天气雷达; 脉冲压缩; 对比分析; 数据质量

中图分类号: P412.25

1 引言

为了监测和追踪快速演变的中小尺度天气系统, 需要快速测量的探测设备, 天气雷达是比较理想的主动探测系统。我国目前已经布网的新一代天气雷达大大提高了对灾害性天气的监测和预警能力^[1-8], 但在保证测量资料质量可靠(需要一定数量的样本进行平均)的前提下, 获取一幅反映降水系统三维结构的雷达体积扫描资料(Volumetric data), 费时约 6 分钟。对于监测、预警和研究发展迅速的中小尺度天气系统而言, 这限制了对快速变化信息的捕捉。6 分钟的雷达取样时间主要受制于气象雷达天线系统的方位转动和俯仰转动速度。通过马达机械地驱动“庞大的”天线系统, 并做到快速定位是很困难的。好在军事上早开始了相控阵天线的研究和应用^[9], 通过相干电磁波的合成, 实现电磁波波束的空间定向, 而不需要机械转动天线的阵面。这种电子扫描方式的相控阵天线技术, 是实现天气雷达快速探测的良好技术方案。

上世纪六十年代开始, 国内开始开展了对机载雷达的攻关研究。在四十多年的研发历程中, 先后研发了普通脉冲体制、脉冲多普勒体制、相控阵体制、脉冲压缩体制等各种体制的机载雷达。九十年代初, 国内机载雷达技术走向成熟, 先后研制了几十种各种用途的机载火控雷达、机载预警雷达, 并在各种机载雷达上加装了气象探测模式, 对气象目标、湍流检测技术进行了理论研究和电路试验, 取得了大量宝贵数据^[10]。随着采用相控阵技术的机载雷达技术走向成熟, 气象雷达科技工作者开始着手于机载型相控阵天气雷达系统关键技术攻关研究^[11-28]。本文在介绍相控阵天气雷达系统基础上对机载型 X-波段相控阵天气雷达系统的试验数据进行了处理, 对比分析了相控阵天气雷达和 X 波段机械式天线天气雷达的同步观测数据。分析表明, 相控阵雷达和机械抛物面天线雷达的测量

本文已被《高原气象》录用, 即将发表, 稿号: 20130576

资助课题: 国家高技术研究发展计划 863 项目(2007AA061901)

作者简介: 刘俊(1988—), 男, 江苏南京人, 硕士, 研究方向: 雷达气象学。E-mail: liujun198802@126.com

数据比较一致，反映了相控阵雷达的数据可靠性。

2 相控阵天气雷达系统简介

2.1 相控阵天线的基本原理

不同辐射源的电磁波能够汇聚叠加，这正是多单元的相控阵天线工作的理论基础^[29]。图 1 展示了一维相控阵天线的工作原理。图 1.a 中，N 个相距 d 的天线单元以相同的初相、频率及振幅发射电磁信号，各个单元信号的波前(如虚线所示)一致前行，在正前方的远场区域中的任一点，这 N 个完全相同的信号同时到达，相当于天线“指向”前方。图 1.b 的情况稍有不同，各单元信号的初相位不同，相邻单元有 θ 的相移，且满足 $\theta = \frac{2\pi \times d \times \sin(\phi)}{\lambda}$ 。那么，这 N 个天线单元的合成电磁波

的波前(图 1.b 中虚线)不再与天线单元的连线(一维阵列)平行，而是构成一个角度 Φ ， Φ 的变化反映了天线“指向”的变化(如以阵列的法线方位参考，图 1.a 的扫描角度为 0 度，图 1.b 的扫描角度为 $90-\Phi$ 度)。由于 Φ 与 θ 是相关联的，改变相邻天线单元的相移 θ ，就改变了天线的指向，亦即由天线单元的初始相位控制天线的指向，这就是相控阵天线的基本工作原理。

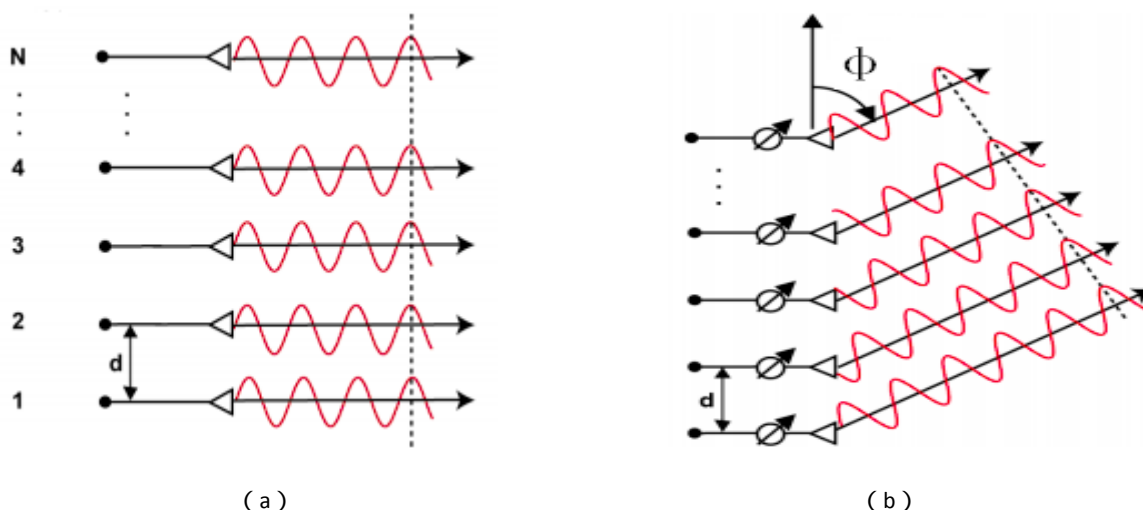


图 1 相控阵天线相位扫描原理示意图

Fig.1 Working principle demonstration of a phased-array antenna

在实际相控阵天线中，天线单元通常呈二维阵列分布，彼此之间相距一定的距离，每个单元都和一个移相器结合在一起。在天线中心的统一控制下，根据待扫描的角度要求和各个天线单元的空间位置，计算出每个移相器应该产生的相移量，然后发送到相应的移相器，实现指定角度的扫描。由于三角函数的周期性， θ 变化 360 度时，不影响阵列天线的指向，所以，每个移相器只要具备 0~360 度的移相能力即可。

2.2 相控阵雷达系统

该系统主要采用相控阵天线技术的无源相控阵 X 波段天气雷达系统(图 2)，它由无源相控阵天线单元、发射单元、接收单元、处理单元、供电单元和馈线组件以及连接波导、单元支架等组成。与机械扫描雷达一样均为集中式的发射机和接收机，仅在阵列中的每一个天线单元上接入一个移相器，通过控制各移相器的移相量来改变波束指向，实现电子扫描。正常工作模式下，发射单元

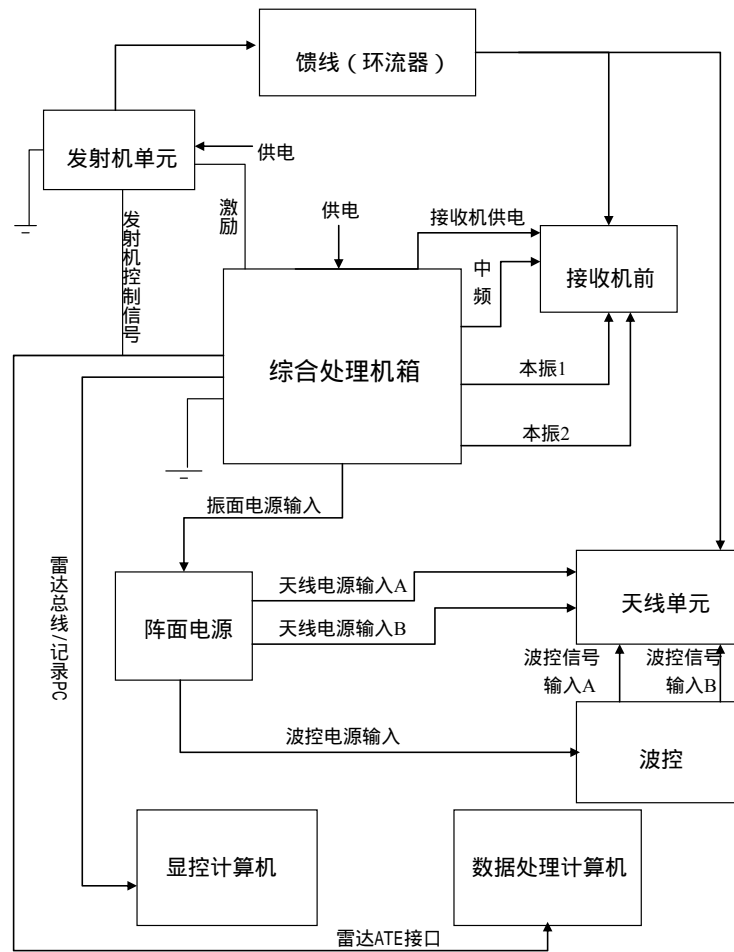


图 2 X 波段机载相控阵天气雷达系统框图

Fig.2 Schematic diagram of the X-band airborne weather radar system

根据处理机控制、将处理单元中频综器产生的雷达载频低功率信号放大送至天线，在天线中经过一定角度的移相后向外辐射，以便合成期望的波束形状和指向。辐射出的电磁波被传播路径上的云雨粒频采样），数字信号由处理单元中的并行处理器进行 FFT/PPP 处理，获取目标的强度、速度、谱宽等原始数据，原始数据再经雷达数据处理模块进行处理，以回波图像和数据文件的形式反映降水天气的情况。

3 外场试验结果与分析

3.1 外场试验及对比方法概述

2012 年 6 月底至 8 月初,观测试验场布置了三部 X 波段天气雷达,分别是机载相控阵天气雷达、中国船舶重工集团公司第 724 研究所的车载式移动天气雷达和上海市气象局车载式双偏振多普勒天气雷达(购于美国 EEC 公司)。这三部 X 波段雷达进行同步观测,获得了 6 月底至 7 月中旬梅雨过程和 8 月初受 9 号台风“ 苏拉 ”、10 号台风“ 达维 ” 的共同影响下的强降水过程数据。

我国相控阵天气雷达正处在起步阶段,为了衡量其探测性能以及数据可靠性,可以利用常规多普勒天气雷达采集到的数据为基准与之进行对比。张志强^[30]提出了三种对比方法,分别为直接对比法、格点对比法以及对应点对比法。直接对比法,即用采集到的两部雷达的 PPI 数据进行直接对比,但要求两个雷达位置基本一致、采用相同的扫描模式、并且时间上基本同步;格点对比法,能把

不同的雷达数据插值到同一高度层对比其相交区域,这种方法能很好的找到其对应点,但是不同雷达的库长与波束宽度不同,可能会产生插值误差;另外一种方法,在两部雷达扫描的相交区域,对比“同一目标”的回波数进行分析、不进行插值处理。杨金红等^[14]、黄兴友等^[18]采用直接对比法、分别分析了美国的个例及我国的个例情况,研究相控阵天气雷达的探测能力;周海光^[31]提出利用相邻雷达等距离线垂直剖面内的网格数据进行对比分析,这与格点对比法相似;胡明宝等^[32]采用对应点对比法分析双偏振多普勒天气雷达与 CINRAD-SA 资料,探究 S 波段双偏振多普勒天气雷达探测性能。在本研究的外场试验中,三部雷达位置、扫描方式基本一致,所以本文采用直接对比法分析相控阵天气雷达回波资料的可靠性。

3.2 试验资料分析

3.2.1 资料预处理

外场试验基地上,机载相控阵天气雷达、724 所车载天气雷达、上海车载天气雷达一字排开,机载相控阵天气雷达和 724 所车载天气雷达相距 30 米(小于雷达库长),上海车载天气雷达位于两者之间。它们的天线高度分别为 2.27 米、3.6 米、4.7 米;天线平面法线方向方位角度分别为 199.34°、197.82°、198.04°;天线平面法线方向俯仰角度分别为 0.94°、-0.55°、无测量值。

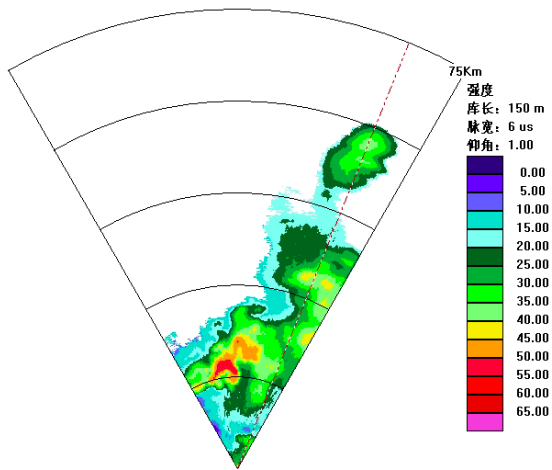
表 1 机载相控阵天气雷达与 724 所车载天气雷达参数

Table 1 Parameters of the X-band airborne phased array weather radar and X-band on-wheel weather radar of 724th Institute

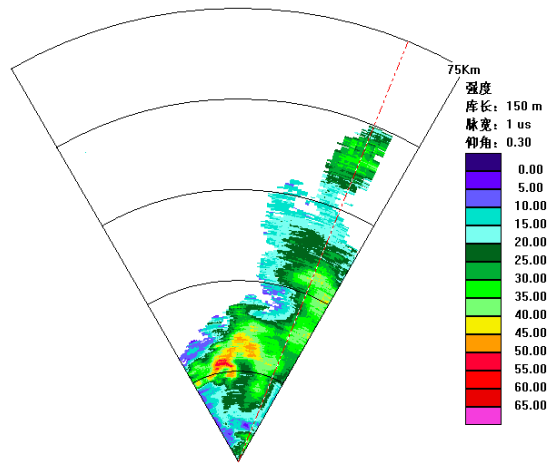
机载相控阵天气雷达	724 所车载天气雷达
平面阵列天线、电子扫描	抛物面天线、机械扫描
方位扫描范围 ±60°	360°
峰值功率 <10kw	75kw
增益 <40dB	40dB
库长 75m、150m	150m、300m
波束宽度 <4°(水平)、<3°(垂直)	1.4°
脉冲宽度 1μs、6μs(脉冲压缩模式下的脉宽)	1μs
最大探测距离 75km、120km、150km、240km	75km、150km

三部雷达位置、扫描方式基本一致,回波强度对比分析采用直接对比法,分析两部雷达相同方位上所有距离库的回波数据(备注:由于上海车载天气雷达数据导出有问题,本文只对相控阵天气雷达与 724 所车载天气雷达进行对比研究)。由于这两部雷达距离很近,几乎处于“同一”位置,可以认为某一目标在两部雷达坐标系中的方位角、仰角和径向距离是一致的,因此可以很方便地得到空间某点(“目标”)在两部雷达中对应格点(方位、仰角和径向距离)的回波数据,而不需进行空间插值处理。考虑雷达信号本身涨落、雷达之间方位和距离的微小误差以及降水系统的演变和移动等因素,采用散点图和概率分布图比较法^[33]分析回波强度和径向速度资料的质量。

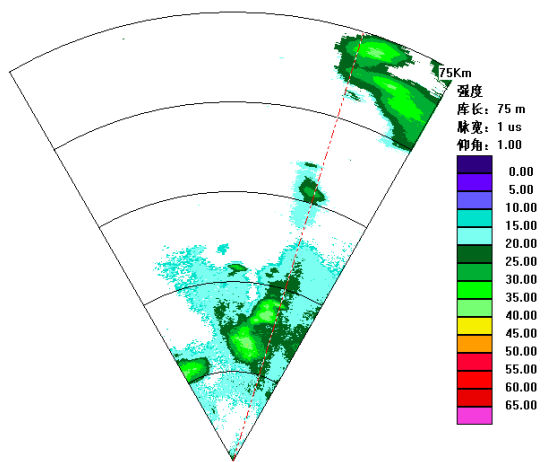
根据天线相对高度、法线方向方位角、俯仰角等信息,对两部雷达观测值进行方位、俯仰匹配处理(图 3)。从表 1 可知,机载相控阵天气雷达波束宽度远大于 724 所车载天气雷达的波束宽度,进行数据对比时需要考虑波束宽度的差异。为了进行合理的对比,首先对 724 所车载天气雷达数据进行平滑处理,按机载相控阵天气雷达波束宽度,对 724 所的车载天气雷达数据的几个相邻径向和几个仰角进行滑动平均,“仿造”两部雷达的取样体积近似一致的情况,在此基础上再进行对比分析。平滑处理结果见图 3.b、3.d,数据获取时间分别为 2012 年 7 月 1 日 15 时 50 分和 15 时 33 分。



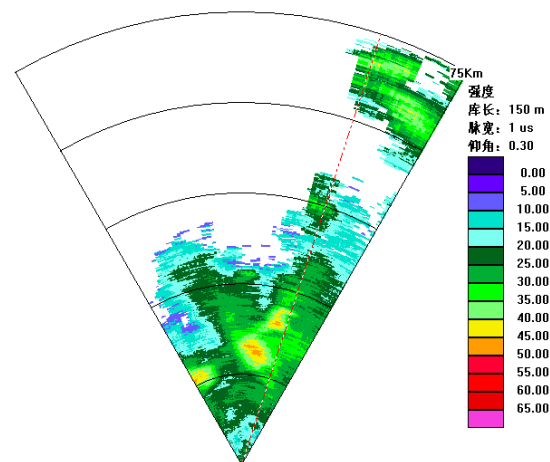
(a)



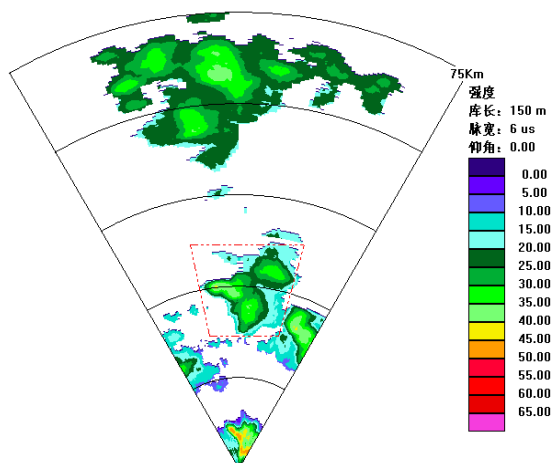
(b)



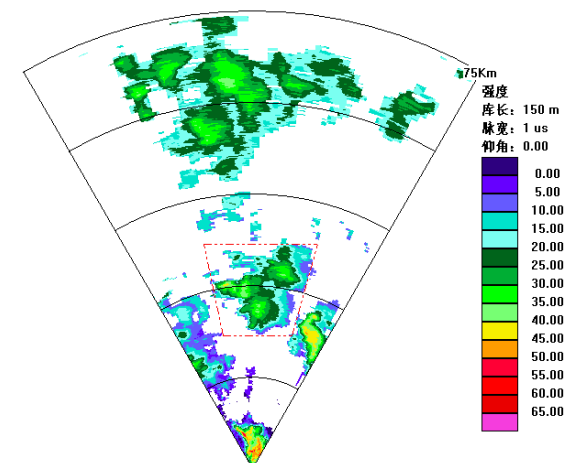
(c)



(d)



(e)



(f)

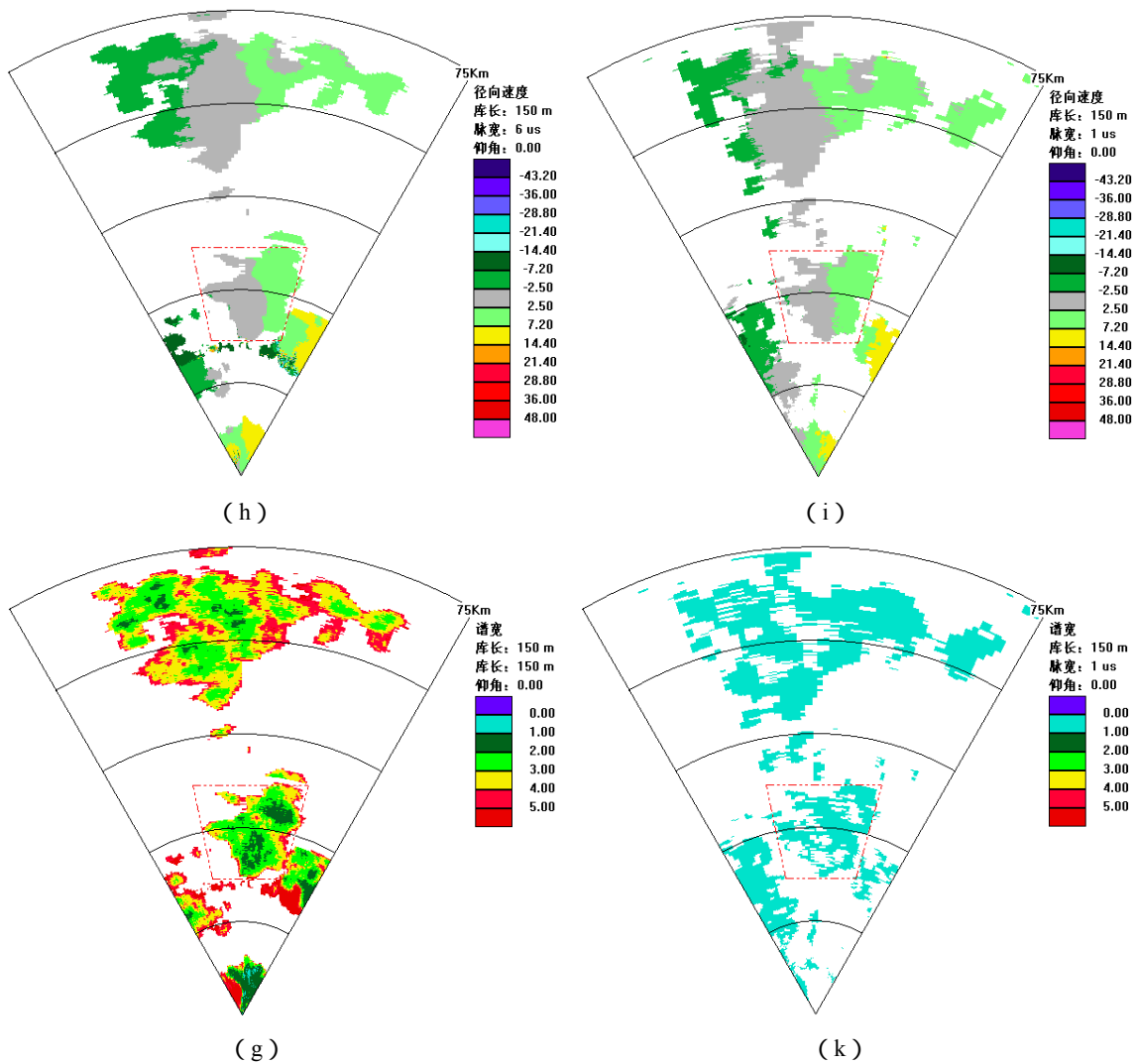


图3 雷达回波对比图,机载相控阵天气雷达脉宽 $6\mu\text{s}$ 反射率因子(a)、脉宽 $1\mu\text{s}$ 反射率因子(c);平滑处理后724所车载天气雷达脉宽 $1\mu\text{s}$ 反射率因子(b)、(d);机载相控阵天气雷达脉宽 $6\mu\text{s}$ 反射率因子(e)、径向速度(h)、谱宽(g);724所车载天气雷达脉宽 $1\mu\text{s}$ 反射率因子(f)、径向速度(i)、谱宽(k)

Fig.3 Measurement comparisons. (a) and (c) denote reflectivity factor measured with $6\mu\text{s}$ pulse or $1\mu\text{s}$ pulse width by X-band phased-array antenna weather radar(XPAR).(e),(h) and (g) denote respectively reflectivity factor, radial velocity and spectrum width measured with $6\mu\text{s}$ pulse width by XPAR. (b) and (d) denote the smoothed reflectivity factor measured with $1\mu\text{s}$ pulse width by the 724th Institute owned X-band weather radar(XRAD). (f), (i) and (k) denote respectively reflectivity factor, radial velocity and spectrum width measured by XRAD.

3.2.2 回波强度对比分析

相控阵天气雷达有两种工作方式：分别是脉冲压缩方式和通常的脉冲不压缩方式，对应的脉冲宽度分别是 $6\mu\text{s}$ 和 $1\mu\text{s}$ 。脉冲压缩技术很早就应用在军事雷达中，Doviak^[34]和Zrinc^[35]曾探讨它在气象雷达中的应用问题。采用脉冲压缩技术的好处是“相当于增大了发射能量”，便于探测远距离的降水，且保持“窄脉冲”情况下的距离分辨率；在脉冲压缩模式下的高速采样特性，可以用于提高信噪比（因为有更多的相干累积样本）或加快天线扫描速度。在小功率的机载雷达或连续波雷达系

统中应用脉冲压缩技术，可达到“大功率”雷达的探测效果、甚至更好，但对接收端的滤波器设计有很高的技术要求。

本文分别将两种脉宽下相控阵雷达探测的数据与724所天气雷达 $1\mu\text{s}$ 脉宽下的数据进行了对比。图3(图3.a、3.b、3.c、3.d)反映的是2012年7月1日15时30分和15时46分两部雷达的同步观测结果。按机载相控阵天气雷达脉宽不同分两组进行对比。第一组为机载相控阵天气雷达脉宽 $6\mu\text{s}$ (图3.a)回波数据与724所车载天气雷达脉宽 $1\mu\text{s}$ (图3.b)回波数据对比；第二组为机载相控阵天气雷达脉宽 $1\mu\text{s}$ (图3.c)回波数据与724所车载天气雷达脉宽 $1\mu\text{s}$ (图3.d)回波数据对比。两组数据选取径向方位分别为 202° 和 198° ，见图3.a、3.b、3.c、3.d中红虚线。分析表明机载相控阵天气雷达在脉宽为 $6\mu\text{s}$ (脉压模式)、 $1\mu\text{s}$ 探测模式下都具有常规天气雷达的探测能力和较高的数据可靠性。

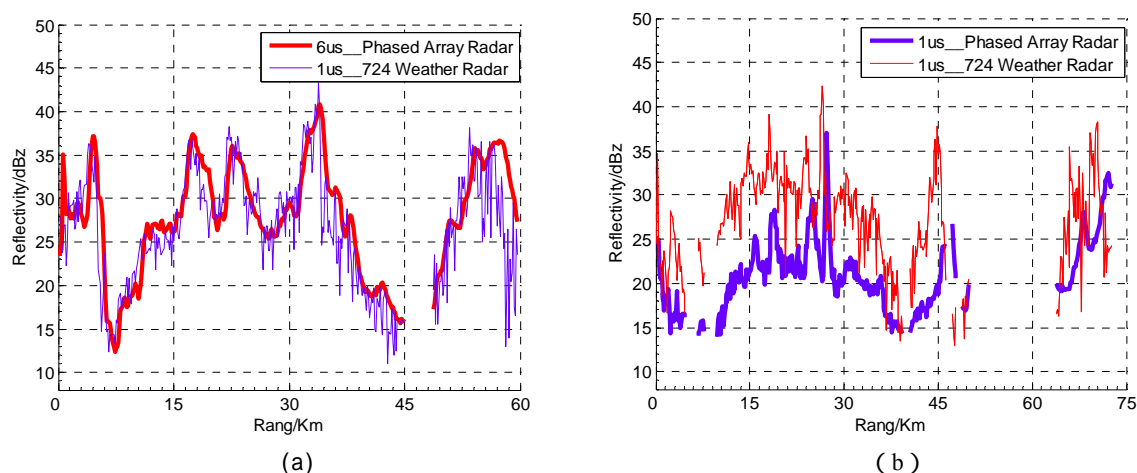


图4 机载相控阵天气雷达脉宽 $6\mu\text{s}$ (脉冲压缩工作模式)、脉宽 $1\mu\text{s}$ 径向回波强度对比(a)、(b)

Fig. 4 Radial velocity comparison for X-band phased array antenna radar (XPAR) and the 724th Institute owned weather radar (XRAD). (a) Case of $6\mu\text{s}$ pulse width for XPAR and $1\mu\text{s}$ pulse width for XRAD, (b) case of $1\mu\text{s}$ pulse width for XPAR and XRAD.

图4分别给出机载相控阵天气雷达脉宽 $6\mu\text{s}$ 、 $1\mu\text{s}$ 时两部雷达最临近时刻回波强度对比图，横坐标表示雷达探测距离(单位: km)，纵坐标表示雷达测量的回波强度值(单位: dBZ)。图4.a中，红色实线表示机载相控阵天气雷达脉宽 $6\mu\text{s}$ 观测值，蓝色实线表示724所车载天气雷达观测值。两条曲线变化趋势整体一致，说明两部雷达观测值有很好的相关性；随着探测距离增加，两曲线几乎重叠，说明在该探测模式下，两部雷达回波强度差异较小；红色曲线比较平滑，蓝色曲线锯齿状比较明显，说明机载相控阵天气雷达具有平滑回波特性；远距离探测(52km)，红色曲线结构性较完整，呈现先下降后抬升再下降趋势，蓝色曲线呈现直线下降趋势，说明较远距离探测，机载相控阵天气雷达回波层次结构清晰度高于常规天气雷达，回波图像效果好，但其“平滑”作用使小尺度的回波结构被滤除，见图3.a、3.b。图4.b中蓝色实线表示机载相控阵天气雷达脉宽 $1\mu\text{s}$ 观测值，红色实线表示724所车载天气雷达观测值。图中表明：两部雷达观测值仍具有很好的相关性；机载相控阵天气雷达仍有平滑回波特性；远距离探测，机载相控阵天气雷达回波层次结构仍较清晰，回波图像效果好(图3.c、3.d)。唯一区别是红色曲线几乎一直位于蓝色曲线之上，说明机载相控阵天气雷达观测值低于724所车载天气雷达，且两者回波强度差异较大，这个差异是由于雷达参数的改变引起的，后文会进一步说明。

为了更精确反映两部雷达回波强度差异以及机载相控阵天气雷达不同模式之间差异，针对两组对比研究，计算了两部雷达在相同方位上回波强度的平均偏差、标准差、相关系数^[32,36]。第一组对比数据（图 4.a），由于两部雷达数据获取时间几乎吻合，采用径向上所有数据进行统计分析。第二组对比数据（图 4.b），由于两部雷达数据获取时间临近，且径向速度为-6m/s 至-15m/s。因此采用径向上 15km 至 45km 数据（径向速度较小区域）进行统计分析，且需将 724 车载天气雷达数据朝远离雷达方向沿径向滑动。统计分析结果见表 2。

表 2 两部雷达径向回波强度统计分析

Table 2 Statistics result of radial reflectivity factor for XPAR and XRAD

对比组别	第一组（脉宽 6μs）	第二组（脉宽 1μs）
平均偏差（dBZ）	1.30	6.90
标准差	4.60	2.90
相关系数	0.85	0.83

标准差表示偏差的离散程度，标准差越大表明两部雷达测量的回波强度差值分布越不集中；相关系数表示两部雷达观测值的一致程度，相关系数越大表明两者越接近。表 2 可见，第一组数据的标准差大于第二组数据标准差，说明机载相控阵天气雷达脉宽 6μs 时对数据平滑程度大于脉宽 1μs，即机载相控阵天气雷达脉宽为 1μs 数据比脉宽为 6μs 数据更加精细；机载相控阵天气雷达脉宽 6μs 时，回波强度比 724 车载天气雷达强约 1dBZ，脉宽 1μs 时，回波强度比 724 所车载天气雷达弱约 7dBZ，说明脉宽 6μs 模式下，两者差异小；脉宽 1μs 模式下，反之。相关系数较大，说明两组对比结果具有较好的可信度。常规气象业务雷达要求反射率因子误差小于 1dBZ，7dBZ 的回波强度差异值得深究。通过检查相控阵天气雷达的基数据，发现脉宽 1μs 和 6μs 探测模式下反射率修正常数均为 -78.5，即脉宽 1μs 探测模式下雷达常数设置成脉宽 6μs 探测模式下雷达常数，这显然是个错误。根据雷达方程^[37]可知，雷达常数为 $C(\text{dB}) = 10\lg[2.69 \times \lambda^2 / (P_t \tau \theta \phi)] - G_t - G_r + 160 + L_e$ （其中 λ 为雷达发射波长、 P_t 为发射峰值功率、 G_t 天线发射增益、 G_r 为天线接收增益、 τ 为雷达发射脉冲宽度、 θ 为垂直方向波束宽度、 ϕ 为水平方向波束宽度、 L_e 为包括馈线损耗的系统损耗）。雷达常数 C 与脉冲宽度 τ 成反比。对于脉宽 1μs 模式下探测，雷达常数比脉宽 6μs 模式高 $10 \cdot \lg 6\text{dB}$ （约 7.8dB）。因此，脉宽 1μs 探测模式下，通过软件后处理，对雷达测量值增大 7.8dB。于是，脉宽 1μs 和 6μs 探测模式下，两部雷达回波强度差异值分别为 0.9dBZ（6.90 dBZ-7.8 dB）、1.3dBZ。考虑两组对比数据采用临近时间观测值，且强降水系统具有快速移动与演变等特性，存在 0.9dBZ、1.3dBZ 差异值是合理的。上述对比分析结果很大程度上表明机载相控阵天气雷达在脉宽 1μs、6μs 探测模式下具有常规天气雷达探测能力，且其探测数据可靠性较高。

3.2.3 相控阵天线增益不均匀回波强度修正

相控阵天线的优势是扫描快，指向准确，可靠性好，但缺点也存在，首先是成本高，再次是波束宽度随天线增益的不均匀性。对于我国新一代 S 波段多普勒天气雷达，波束宽度大约 1 度，增益呈空间高斯分布，在波束内可认为是一致的。但试验使用的相控阵天线系统，方位和俯仰波束宽度分别约为 4 度和 3 度，在 100km 处，天线主波瓣的水平跨距和垂直跨距分别达到了 7km 和 5km，在这么大的空间范围内，天线增益的不均匀性很明显（参见表 3），在实际探测中需要考虑。根据 Knorr, J.B^[38]研究，方位角 θ 、俯仰角 φ 时，相控阵天气雷达的方程为：

$$Z = \frac{1024 \ln 2 \cdot L_e L_a R^2 \lambda^2 P_r}{P_t G_0 \theta_{B0} \phi_{B0} c \tau \pi^3 |k|^2} \cdot \left(\frac{\lambda}{\lambda_0}\right)^2 \cdot \frac{1}{\cos \theta \cos \varphi} \quad (1)$$

式中, P_r 为接收机输入端接收功率, L_a 为双程大气衰减因子, L_e 为包括馈线损耗的系统损耗, R 为目标与雷达之间距离, G_0 、 λ_0 为基准频率 f_0 对应的增益和波长, θ_{B0} 、 φ_{B0} 分别为波束指向为 0 波位时水平波束宽度、垂直波束宽度。(1) 为考虑雷达频率捷变、天线增益、脉冲宽度等因素的二维相控阵天气雷达方程。与常规雷达气象方程相较, (λ/λ_0) 、 $1/\cos\theta\cos\varphi$ 为二维相控阵天气雷达修正项。对于该相控阵天气雷达而言, 频率捷变范围远小于基准频率 ($(\lambda/\lambda_0)^2 \approx 1$), 只需考虑第二项对雷达回波强度影响, 其修正量见表 3。表 3 不难看出, 这是一个关于对角线对称的矩阵, 所以修正量有相当一部分是重复计算的, 只需计算上三角阵或下三角阵即可。当扫描角小于 15° 时, 相控阵雷达的有效照射体积变化较小, 测量得到的回波强度误差较小, 且修正量低于 0.5dB , 所以当扫描角较小时可以不予修正。地基试验时由于相控阵天气雷达仍在研发中, 控制方位角度的显控系统计算错误(机载飞行试验前已经纠正该错误), 造成方位角有 $(9.5/15)$ 倍的缩小量, 即方位最大范围从 $\pm 60^\circ$ 缩小到 $\pm 38^\circ$ 。由表 3 知, 角度为 40° 时, 回波强度最大修正量为 2dB ; 且由图 4 可知, 该相控阵天气雷达脉宽为 $1\mu\text{s}$ 、 $6\mu\text{s}$ 探测模式下具有较强的平滑作用, 因此很难通过两部雷达回波强度差值随方位角度变化分析天线增益不均匀带来的影响, 如果两部雷达的波束宽度和距离分辨率相同, 则可以进行天线增益不均匀影响的定量评估, 所以只能从理论上进行相控阵雷达回波强度修正, 修正量随空间位置变化参考表 3。

表 3 二维相控阵天气雷达回波强度修正量(单位: dB)

Table 3 Corrections for reflectivity factor of phased array antenna radar with angular shift to the normal direction of the panel

	0°	8°	16°	32°	40°	48°	56°
0°	0	0.042	0.172	0.715	1.157	1.745	2.524
8°	0.042	0.085	0.214	0.758	1.200	1.787	2.567
16°	0.172	0.214	0.343	0.887	1.329	1.916	2.696
32°	0.715	0.758	0.887	1.432	1.873	2.461	3.240
40°	1.157	1.200	1.329	1.873	2.315	2.902	3.682
48°	1.745	1.787	1.916	2.461	2.902	3.490	4.269
56°	2.524	2.567	2.696	3.240	3.682	4.269	5.049

3.2.4 探测资料质量分析

相控阵天气雷达具有宽波束、随着波束指向角的增大波束展宽天线增益下降等特点, 会影响其探测数据质量。为进一步分析其探测资料质量, 选取 2012 年 8 月 3 日 10 时 39 分个例数据(见图 3.e、3.f、3.h、3.i、3.g、3.k 红框区域), 采用点对点散点图对比法和概率分布比较法。图 5 给出两部雷达回波强度散点图、概率分布图和径向速度散点图、概率分布图。图 5.a、5.c 横坐标分别表示机载相控阵天气雷达反射率因子(单位: dBZ)和径向速度(单位: $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$), 纵坐标分别表示 724 车载天气雷达反射率因子(单位: dBZ)和径向速度(单位: $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$); 图 5.b、5.d 横坐标分别表示雷达反射率因子(单位: dBZ)和径向速度(单位: $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$), 纵坐标表示其概率值(单位: %)。从图 5.a、5.c 中可以看出, 两部雷达反射率因子和径向速度点对点值都比较集中在斜率为 1 的直线两侧, 说明两部雷达观测值一致性较好, 即机载相控阵天气雷达数据质量较可靠, 具有和常规 X 波段天气雷达一致的探测能力, 且其探测数据可靠性较高。从概率分布图来看(图 5.b、5.d), 两部雷达反射率因子和径向速度曲线趋势基本吻合, 尤其径向速度概率分布图, 两部雷达吻合程度更高。5.b 中反射率因子值小于 13dBZ 的区域中, 机载相控阵天气雷达值低于 724 所车载天气雷达; 13dBZ 至 22dBZ 之间, 机载相控阵天气雷达值高于 724 所车载天气雷达。表明机载相控阵天气雷达平滑作用改变回波结构, 减少了弱回波区面积, 增加了较强回波区面积。此数据质量分析结论与杨金红等^[14]研究美国相控阵天气雷达(PAR)灵敏度对比结果一致。相对谱宽观测结果(图 3.g、3.k)而言, 机载相控阵天气雷达观测值比 724 所车载雷达大约 $3\sim 5\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。图 3.k 中 724 所车载天气雷达谱宽

数据探测信息缺失较严重，无法对比分析机载相控阵天气雷达谱宽数据。

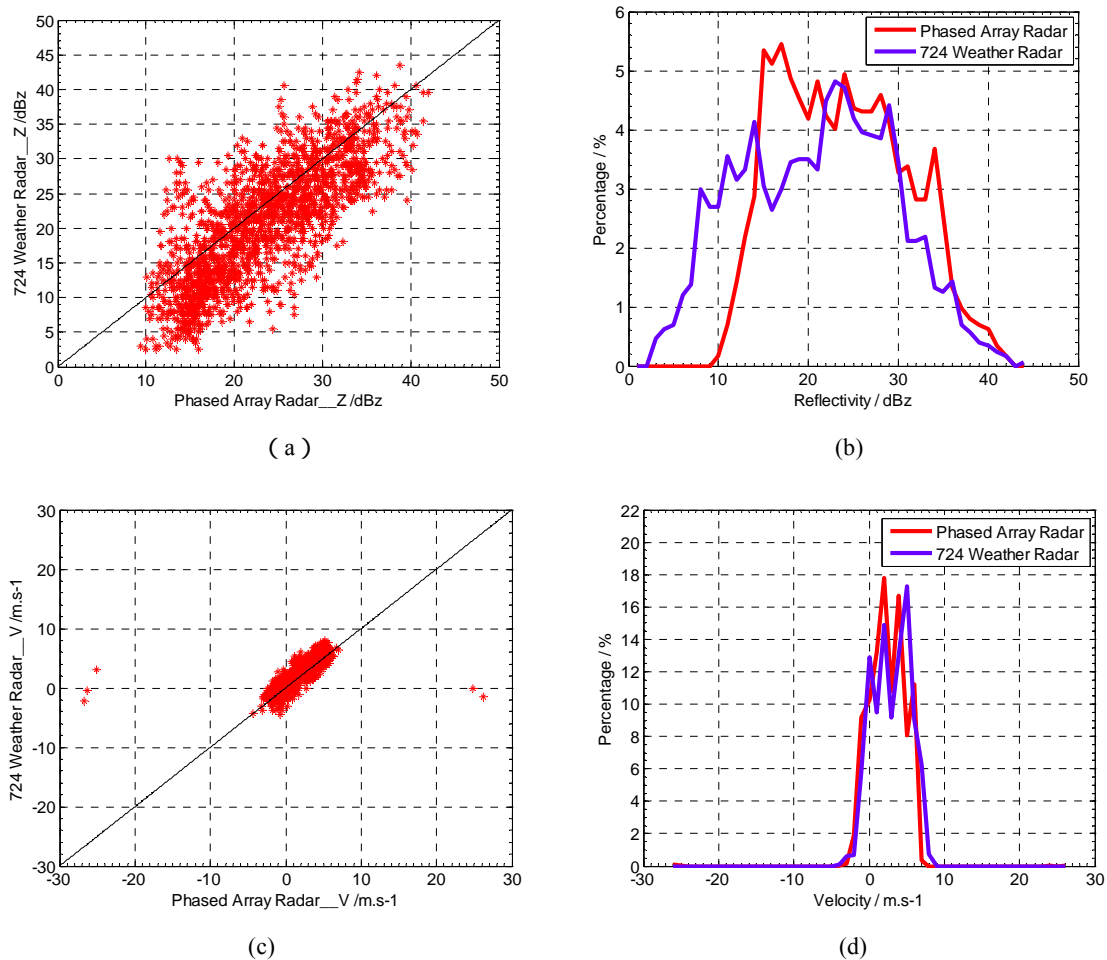


图5 8月3日10时39分，两部雷达反射率因子散点分布图(a) 概率分布图(b)；径向速度散点图(c) 概率分布图(d)

Fig 5 Scatter plot of measurements by XPAR and XRAD at 10:39, 3rd August, 2012. (a) reflectivity factor (b) percentage of reflectivity factor capturing (c) radial velocity (d) percentage of radial velocity capturing

4 结论与展望

本文针对2012年6~8月地基外场试验数据，对比分析机载相控阵天气雷达不同探测模式下的数据质量，初步得出以下结论：

(1) 脉宽为 $6\mu\text{s}$ (脉冲压缩模式) $1\mu\text{s}$ 探测模式下，机载相控阵天气雷达都具有与常规天气雷达一致的探测能力和较高的数据可靠性。与机械扫描式天气雷达相比，脉宽 $6\mu\text{s}$ 探测模式下，相关系数为 0.85，平均偏差为 1.3dBZ；脉宽为 $1\mu\text{s}$ 探测模式下，相关系数为 0.83， $10 \cdot \lg 6 \text{ dB}$ (7.8dB) 为系统误差修正量，修正后平均偏差为 0.9dBZ。

(2) 相控阵天气雷达波束宽度较宽以及波束展宽特性，对数据质量产生一定影响。具体表现为：通过两部雷达径向速度、谱宽数据的对比分析发现：径向速度受其影响较小，谱宽影响较大；云、降水回波强度在一定程度上被平滑，且脉宽 $6\mu\text{s}$ 探测模式下平滑程度大于脉宽 $1\mu\text{s}$ 模式。平滑结果表现为：改变回波结构，弱回波面积减少，较强回波面积增加。

(3) 远距离探测, 机载相控阵天气雷达相较机械扫描式天气雷达而言, 其回波强度保持层次结构清晰、轮廓显著等特征, 回波图像效果好, 但其平滑特性可能会滤除小尺度的回波特征、造成降水分布的“大众化”, 局地特性难以体现。

(4) 针对相控阵雷达回波强度受天线增益不均匀的影响, 从气象雷达方程出发, 引入雷达回波强度修正量 ($1/\cos\theta\cos\varphi$), 计算了不同方位角、仰角下的修正量, 作为相控阵雷达回波强度订正的理论参考值。

通过对比分析 X 波段控阵天气雷达系统在脉冲压缩模式和非脉冲压缩模式的回波数据, 可以认为具备相控阵天线技术、双 PRF 技术、脉冲压缩等模式的机载型雷达, 在探测灾害天气方面, 具有良好的应用前景。如果增加天线收发单元数量、实现多波束探测技术, 则可以大幅度提高雷达数据采集率^[39], 更好地监测快速变化的中小尺度天气过程的发生、发展及演变, 但多波束同时扫描会造成“旁瓣污染”问题, 需要进一步解决。

参考文献

- [1] 俞小鼎, 王迎春, 徐明轩, 等. 新一代天气雷达与强对流天气预警[J]. 高原气象, 2005, 24(3): 753-761.
- [2] 朱立娟, 龚建东. QIQC 技术在雷达反演 VAD 廓线资料退模糊中的应用研究[J]. 高原气象, 2006, 25(5): 862-869.
- [3] 马学谦, 董万胜, 楚荣忠, 等. X 波段双线偏振多普勒天气雷达降雨定量估算试验[J]. 高原气象, 2008, 27(2): 382-391.
- [4] 杨毅, 邱崇践, 龚建东, 等. 同化多普勒风场资料的两种方法比较[J]. 高原气象, 2007, 26(3): 247-256.
- [5] 杨毅, 邱崇践. 利用多普勒资料分析一次强降水的中尺度流场[J]. 高原气象, 2006, 25(5): 925-931.
- [6] 周海光. 2008 年 8 月 1~2 日滁州大暴雨双多普勒雷达三维风场反演的初步结果[J]. 高原气象, 2009, 28(6): 1422-1433.
- [7] 段云霞, 邵爱梅, 杨毅. 利用多普勒天气雷达资料对一次台风流程结构分析[J]. 高原气象, 2010, 29(1): 187-196.
- [8] 史朝, 何建新, 李学华, 等. X 波段天气雷达地物回波的双线偏振参量特征分析及应用[J]. 高原气象, 2013, 32(5): 1478-1484.
- [9] 张光义, 赵玉洁. 相控阵雷达技术[M]. 北京: 电子工业出版社, 2006, 2-3.
- [10] 高玉春. 机载气象雷达探测系统总体关键技术研究[D]. 北京, 北京邮电大学. 2009.
- [11] 张越. 相控阵技术在天气雷达中的应用[J]. 现代雷达, 2003, 25(12): 23-25.
- [12] 张子良, 郑国光, 刘一峰. 相控阵天气雷达脉压距离旁瓣抑制研究[J]. 现代雷达, 2008, 30(5): 37-40.
- [13] 杨金红, 高玉春, 程明虎, 等. 相控阵技术在大气探测中的应用及面临的挑战[J]. 地球科学进展, 2008, 23(2): 142-150.
- [14] 杨金红, 高玉春, 程明虎, 等. 相控阵天气雷达与多普勒雷达的探测精度与探测能力对比研究[J]. 气象, 2008, 34(5): 44-51, 129.
- [15] 高玉春, 杨金红, 程明虎, 等. 相控阵天气雷达扫描方式研究[J]. 电子学报, 2009, 37(3): 485-488.
- [16] 杨金红, 高玉春, 程明虎, 等. 相控阵天气雷达波束特性[J]. 应用气象学报, 2009, 20(1): 119-123.
- [17] 胡明宝, 贾晓星. 风廓线雷达有源相控阵天线的设计与实现[J]. 解放军理工大学学报: 自然科学版, 2009, (10)S: 84-89.
- [18] 黄兴友, 徐海军. 相控阵天气雷达与多普勒雷达回波的对比分析[J]. 安徽农业科学, 2010, 38(25): 13873-13875.
- [19] 张志强, 刘黎平. 相控阵技术在天气雷达中的初步应用[J]. 高原气象, 2011, 30(4): 1102-1107.
- [20] 张志强, 刘黎平. S 波段相控阵天气雷达与新一代天气雷达探测云回波强度及结构误差的模拟分析[J]. 气象学报, 2011, 69(4): 729-735.
- [21] 周海光. 机载多普勒天气雷达及应用研究进展[J]. 地球科学进展, 2010, 25(5): 453-458.
- [22] 魏鸣, 张思进, 刘佳, 等. 机载气象雷达扫描的理想模型仿真算法[J]. 大气科学学报, 2011, 34(1): 28-35.
- [23] 王凯, 严勇. 舰载相控阵雷达在气象探测中的应用[J]. 现代雷达, 2009, 31(6): 5-7.
- [24] 严勇. 相控阵天气雷达回波强度订正研究[J]. 现代雷达, 2013, 35(5): 26-29.

- [25]段寿元,史勇义,弓宇恒.利用相控阵雷达实现气象探测[J].现代雷达,2013,35(2):4-6.
- [26]张子良,郑国光,葛文忠,等.平面相控阵脉冲压缩的雷达气象方程[J].南京信息工程大学学报:自然科学版,2013,5(5):426-431.
- [27]张子良.相控阵天气雷达关键技术研究[D].南京,南京信息工程大学,2012.
- [28]王强.相控阵天气雷达系统研究[D].南京,南京理工大学,2010.
- [29]Constantine A. Balanis, Antenna Theory, Analysis and Design, 3rd edition, Jon Wiley & Sons, Inc.,2005.
- [30]张志强.相控阵天气雷达强度探测与评估方法研究[D].北京,中国气象科学研究院,2011.
- [31]周海光.新一代多普勒天气雷达网探测数据对比分析系统[J].计算机应用,2011,33(1):270-275.
- [32]胡明宝,赵景志,夏文梅,等.双偏振多普勒天气雷达和CINRAD-SA对比分析[J].现代雷达,2012,34(1):5-19.
- [33]程明虎,刘黎平,张沛源,等.暴雨系统的多普勒雷达反演理论和方法[M].北京:气象出版社,2004:39-44.
- [34]Skolnik MI. Introduction to Radar Systems. McGraw-Hill, New York, USA, 1980.
- [35]Doviak RJ, Zrnic DS. Doppler Radar and Weather Observations, Academic Press, San Diego, California, USA, 1993.
- [36]肖艳娇,刘黎平,杨洪平.区域雷达网同步观测对比分析[J].气象学报,2007,65(6):919-926.
- [37]张培昌,杜秉玉,戴铁丕.雷达气象学[M].北京:气象出版社,2000,11.
- [38]Knorr,J.B. Weather Radar Equation Correction for Frequency Agile and Phased Array Radars. Aerospace and Electronic Systems[J], IEEE ,2007:1220 -1227.
- [39]张光义.多波束形成技术在相控阵雷达中的应用[J].现代雷达,2007,29(8):1-6.

Comparative analysis of X-band phased array antenna weather radar measurements

Liu Jun^{1,2}, Huang Xingyou², He Yuqin², Wang Zhenhui², Wang Jinhu²

(1. Taizhou Meteorological Bureau, Taizhou, Jiangsu 225300; 2. Collaborative Innovation Center on Forecast and Evaluation of Meteorological Disasters, Key Laboratory for Aerosol-Cloud-Precipitation of China Meteorological Administration, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing, China, 210044)

[Abstract]: Compared with the mechanical antenna weather-radar, the phased array antenna weather radar system has its special features of fast scanning and reliable data, which play an essential role in monitoring and warning meso-scale severe weather system. The parameters and characteristics of the X-band phased array antenna radar system (XPAR) as well as its activities in surface-based field campaigns are introduced. Measurements by XPAR and X-band mechanical antenna radar (XRAD) are compared including the measurement difference between 1 μ s and 6 μ s pulse widths of the XPAR itself. The analysis based on comparisons shows (1) The measurements from XPAR with pulse width of 1 μ s and 6 μ s (pulse compression mode) are close to the measurements from XRAD, XPAR with pulse compression mode has even better data quality and good echo image particularly at distant region. (2) Due to the broad beam width, the XPAR reflectivity factor is smooth, the weak echo area decreases and strong echo area increases. (3) The non-uniform antenna gain of XPAR has influence on data quality, but can be theoretically compensated by a gain factor of $1/(\cos\theta\cos\varphi)$ for correcting radar reflectivity factor.

Key words: phased array weather radar; pulse compression; comparative analysis; data quality