

气象业务发展对新一代天气雷达技术性能提升的要求

高玉春

(中国气象局气象探测中心, 北京 100081)

摘要: 在中国新一代天气雷达建设和业务应用中, 雷达技术性能不断提高, 为进一步改进灾害性天气监测发挥了重要作用。主要从雷达技术性能提升角度, 介绍了为提高雷达实时观测质量采取的技术, 以及在业务发展中的作用。

关键词: 新一代, 天气雷达, 技术性能, 业务发展

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2017.03.002

Requirements of Meteorological Operational Development for the Technical Performance Improvement of CINRAD

Gao Yuchun

(Meteorological Observation Centre of China Meteorological Administration, Beijing 100081)

Abstract: The construction and operational application of China New Generation Weather Radar (CINRAD) as well as improvement in radar performance play an important role in disastrous weather monitoring. This paper introduces the employed technologies in order to enhance real time radar observation quality and the role in operational development with the perspective of radar technical performance improvement.

Keywords: new generation, weather radar, technical performance, operational development

0 引言

天气雷达作为灾害性天气监测的有力工具, 在防灾减灾中发挥着重要作用。作为短临预报的主要观测设备, 无论从预报角度还是监测角度, 其已成为气象工作者日常使用的工具。

随着国民经济的发展, 对灾害性天气的监测要求越来越高。中国气象局从20世纪末开始进行全国新一代天气雷达网建设^[1], 对雷达的技术性能参数等提出了高指标要求^[2-3]。与以前常规天气雷达几十部建设规模具有显著不同的是, 新一代天气雷达网是由上百部雷达组成的天气雷达观测网。对于雷达本身技术来说, 如何保证上百部雷达的技术性能指标, 保证稳定的运行能力, 都带来了新的挑战。

针对雷达在气象业务中的应用特点, 必须从需求出发, 提出对雷达系统的总体要求, 这是雷达在业务中发挥作用的关键。新一代天气雷达的应用是从单部雷达的局地监测应用, 走向大面积监测降水的组网应

用, 特别是对暴雨、强风、台风、飚线及超级对流单体等灾害性天气系统的监测能力。中国新一代天气雷达网是继美国下一代天气雷达网之后在世界上雷达数量最多的天气雷达网, 美国投入业务使用的天气雷达有165部, 中国新一代天气雷达网计划由216部雷达组成, 实际雷达数量预计还会更多。

新一代天气雷达系统是根据气象需求进行设计和制造的。从气象需求角度看, 要求雷达的工作方式为连续运转方式, 达到汛期不停机, 关键过程不漏过, 重大天气必工作的严格要求。同时要求获得晴空大气回波和降水回波的三维结构。作为天气雷达应用的最显著的特点, 需要获得量化的回波反射率。作为多普勒雷达, 还要获取径向速度值。对于雷达组网还需要保证雷达工作时互相不干扰, 不同雷达观测同一区域时, 回波反射率要一致。复杂的扫描方式要求雷达系统从发射、接收、伺服、信号处理和气象产品生成等各部分统一协调工作。按照业务观测要求, 在降水条件下定性获得半径450 km、定量获得半径230 km, 时间间隔为5~6 min的降水回波三维结构数据; 晴空条件下间隔10 min内获得半径50 km的晴空回波。获取雷达实时回波图提供给使用者, 是雷达应用的主要特

收稿日期: 2016年3月1日; 修回日期: 2017年1月9日

作者: 高玉春(1961—), Email: gycaoc@cma.gov.cn

资助信息: 新一代天气雷达工程建设项目

点,随着雷达用途的增加,应用范围也在逐步扩大。

1 雷达技术性能提升的关键技术

新一代天气雷达建设是按照人口密度、国民经济的发展程度和天气现象分布特点开展的,在东部地区雷达站密度高,西部密度相对稀疏。面对雷达网特点,在雷达系统设计中,必须考虑多种因素,确保雷达稳定工作,相互间电磁干扰小,需要考虑提高雷达性能的措施和技术。

1.1 抑制发射信号带外频谱,提高组网雷达工作兼容能力

雷达是具有电磁波发射能力的设备,存在着干扰其他无线电设备的情况。为了减少雷达干扰其他无线电设备正常工作,需要雷达发射频谱所占带宽尽量窄,以容纳更多的无线电设备在有限频谱带内使用。电磁波频谱是一个有限的资源,国家把无线电频谱管理作为战略资源对待^[4]。

新一代天气雷达使用S和C波段进行工作,特别是S波段雷达的频带范围为2.7~2.9 GHz,在这个频带当中,除了气象雷达外,还有导航雷达、军用雷达共同使用这个频带。所以对于单部雷达来说,如何合理使用这个频段的资源是雷达正常工作的关键。对雷达发射的带外谱提出严格限制,可以在有限频带内,容纳更多不同发射频率的雷达工作,同时保证雷达发射信号不被其他雷达作为干扰接收。雷达发射频谱带宽在满足要求的前提下,越窄越好。过去由于雷达数量少,频谱资源不紧张,所以在常规天气雷达中没有采用有效控制发射频谱杂散电平的技术,带外谱几乎没有得到有效的控制。在新一代雷达中使用两种技术解决带外谱抑制。第一种在时域中采用控制调制脉冲波形,通过枕形脉冲调制,来降低所占频带宽度^[5-6]。发射频谱宽度和调制脉宽的上升沿和下降沿相关,越陡峭的上升沿和下降沿,造成雷达发射所占频谱带宽越宽,所以采用略微缓慢的上升沿和下降沿脉宽技术,可以有效减少发射带宽,从而提高频谱资源的容量。另一种在频域中使用带通滤波技术,在发射机速调管信号输入前安装无源带通滤波器,改善发射频谱^[7-8]。这两种技术都可实现发射频谱带宽变窄,可以有效抑制带外谱。这两种技术的应用,使每部雷达所占发射带宽减少,可以减少相邻同频段天气雷达的互相干扰,同时在有效频谱范围(如2.7~2.9 GHz),可以容纳更多的发射源,也就是更多的雷达数量。

随着频谱资源的紧张,近年来无线电管理部门开始严格管理。尽量减少雷达的无用发射,减少所占用的带宽,是雷达作为无线电设备获取执照所必须的要

求。在我国民用雷达中,目前只有气象雷达按照国际上对频谱资源的有效利用方式进行设计,对发射频谱进行了有效控制,有效地抑制带外频谱。由于新一代天气雷达的频谱特性已经提前达到要求,保证了新一代天气雷达顺利获得国家无线电管理部门的设台执照,从而保证天气雷达在监测灾害性天气中得到应用。

1.2 提高雷达的可靠性,提升了天气系统的追踪能力

新一代天气雷达是按照连续开机观测的要求进行设计,与过去常规天气雷达的定时观测明显不同。通过对影响雷达可靠运行的关键部件进行不断改进,新一代天气雷达的稳定性逐年提高,由雷达网建设初期的无故障运行时间设计标准为MTBF300 h,提高到实际统计为MTBF1000 h以上^[9]。雷达出现高故障的部位主要为伺服、发射机部分^[10]。积极改进雷达的部件性能、筛选器件、改进设计,是提高雷达稳定运行的重要手段,比如将雷达伺服中的直流碳刷式电机改成交流无碳刷电机,消除了碳刷损耗大造成频繁故障的隐患。在发射机提高调制器等高压组件的可靠性设计,采用关键部件的降额使用,合理布线,避免高压打火发生等手段,提高了高压组件的使用寿命。

雷达连续运行能力不断提高,特别是在台风监测中,连续几天不间断工作,为登陆台风的位置、回波范围、回波强度的预测发挥重要作用。多年的运行结果统计,由于雷达运行稳定性的提高,对登陆台风的监测没有漏掉一个。

1.3 在线实时自动标定技术的应用,提高了天气雷达获取数据的准确性

作为天气雷达,获得定量的反射率数值是必要要求,不同反射率数值代表不同的降雨强度,所以量化的应用对于天气雷达系统提出高标准要求,即定量测量的准确性。雷达测量降水回波涨落理论研究指出,云雨目标的回波强度的测量误差由雷达脉冲累积次数决定^[11],其他由雷达本身精度确定。为了确保定量测量精度,对雷达气象方程中参与回波强度计算的雷达参数进行分析,其中天线增益、脉冲宽度等属于比较稳定的参数项,可以认为是常量。容易影响回波强度估值精度的主要是发射功率、接收系统增益等参数。

在新一代天气雷达系统中,针对估值精度影响比较大的几项参数,需要在每次体扫前进行检测,增加了机内检测设备,主要有机内的信号源、噪声源、功率检测探头等。雷达发射机采用真空管技术,发射功率随时间是发生变化的,发射功率的变化对于反射率估值影响较大,发射功率下降一半,可以带来3 dB的误差。另外接收机增益的变化也会影响到估值结果。

与常规天气雷达相比, 新一代天气雷达增加了实时在线标定功能, 为了得到准确的反射率数值, 需要实时在线获取发射机的功率, 通过噪声电平的检查和噪声温度的变化, 判定接收机的工作状态, 通过检测支路输出的信号强度与理论计算值的比较来修正雷达参数的变化, 从而得到修正后的正确反射率数值, 这个过程为实时自动标定回波强度。多普勒天气雷达具有测量径向速度的能力, 在线检查中通过改变机内信号源的相位或频率变化, 来检查接收系统能否得到准确的速度信息^[12]。由于雷达系统自身的特性, 在长时间的运行中雷达的参数会有变化, 所以新一代雷达通过每次体扫之间的间隔进行相关的标定和性能检测, 确保雷达数据的准确性。雷达在线实时标定技术是新一代天气雷达与过去常规天气雷达定时人工标定技术相比, 在保证回波数据估值精度上大大提高。当然这种技术的实现, 虽然会导致雷达设备成本增加, 但是保证了观测数据的质量, 从应用上看是十分必要的。

1.4 实时监测运行状态, 保证雷达工作的稳定性

现代雷达的性能和功能不断提高, 雷达系统工作状态的监测从人工定时检查, 上升为在雷达系统中设置机内检测装置。过去常规天气雷达对于实时监测雷达工作状态基本是一个空白。新一代天气雷达采用的实时监测系统, 以秒级间隔对雷达运行状态进行检测, 相当于给雷达安装了一个健康诊断系统, 特别是对由高压装置组成的发射机和由复杂机电结构组成的伺服系统实现了在线监测。在实时监测雷达运行状态的同时, 可以根据雷达状态数据, 判断雷达是否处于正常运行状态, 如正常可继续保持设备运行; 当判断为严重故障时, 监测系统发出指令, 雷达自动停止运行, 并向使用者发出报警信息, 可以避免雷达发生重大故障, 可将故障现象消灭在萌芽状态。当出现雷达定量测量参数发生不正常变化时, 也发出报警信息, 用户可根据问题的严重程度, 进行雷达系统的维护和维修, 保证雷达运行的观测质量。

雷达故障检测点分布在微波组件、发射机系统、接收机系统、伺服系统中, 监测点有近百个, 故障报警根据类别总共有六百多种^[13]。

1.5 提升雷达系统关键指标, 有助于提高雷达数据质量

在雷达回波观测中, 地物杂波对气象信号的干扰影响大, 为了消除地物杂波的影响, 需要提高雷达系统的相位稳定性, 也就是降低相位噪声, 这个参数对雷达消除地物杂波的能力影响最大, 雷达消除地物杂波的影响, 是根据多普勒信息进行的, 即地物杂波是静止的, 其移动速度理论上为零, 但是地物上的植被

受到风的影响产生摆动, 不是静止的, 只是植被的摆动速度非常小。这样根据速度近似为零的原理, 剔除移动速度近似为零的信号, 作为地物信号消除。

相位稳定性间接反映速度大小, 根据公式, 速度变化 $=V_{\max} \cdot \Phi / 180^\circ$, $L = -20 \log(\sin \Phi)$ ^[14], $I = -20 \log(\Phi)$ ^[15] (Φ 为相位噪声, L 为地物对消能力, I 为改善因子), 相位噪声 Φ 越小越好。例如, 对于S波段波长为10 cm, 脉冲重复频率为1000 Hz时, $V_{\max} = 25$ m/s。通过测量值求取 $\Phi = \arctan(I/Q)$ ^[14], 求取 I 、 Q 数据的相位变化 Φ 值为 0.15° 时, 计算得出雷达设备自身产生的速度变化值为 0.02 m/s, $L = -51.6$ dB。根据新一代雷达实际测试情况, 验证了影响相位稳定性的关键参数分布在频率综合器和发射系统的相位稳定性上, 数字电路部分影响较小。从信号角度上讲, 就是信号的抖动问题, 减少这种抖动需要提高关键部件指标, 从雷达系统的多个环节减少信号抖动。影响信号稳定性有多个环节, 各部分的贡献不一致, 美国的下一代天气雷达从发射机的射频、滤波器和调制器, 接收机的放大器、相位检波和A/D变换器等对整机改善因子的贡献进行过估计, 可以达到 -54 dB^[16]。而整机改善因子, 是衡量相位稳定性的指标之一。这些年的技术进步, 新一代天气雷达通过改进雷达发射机硬件性能, 接收机实现中频数字化后, 目前实测的系统相位噪声, 在 0.08° 以内, 根据上述公式, L 可以优于 -56 dB, 整机极限改善因子 I 优于 -57 dB, 即理论上可以消除 56 dB强度的地物杂波。在实际工作中受到探测环境因素的影响, 以及滤波器凹口宽度的影响, 一般可以达到 50 dB以上, 基本上可以消除大部分地物杂波的影响。通过地物杂波的有效消除, 从雷达回波图上可以得到基本上只反映晴空大气及其降水的回波状况。过去常规天气雷达整机相位噪声由于受到当时磁控管技术的影响, 相位噪声不理想, 没有这个指标要求。

1.6 雷达信号处理能力增强, 提高雷达数据的处理精度

随着超大规模集成电路的广泛应用, 以及半导体器件性能的大幅度提升, 限制雷达数据处理速度和精度的问题得到解决。在接收机实现中频数字化后, 采样频率可以以 80 MHz速度对回波信号进行A/D变换。早期的雷达接收机采用模拟中频, 在视频才可以实现数字化, 当时的A/D采用频率为 600 KHz, 8 bit量化, 现在是 80 MHz, 16 bit量化。中频数字化的优势可以解决接收系统原来模拟器件存在的不稳定问题、AGC数控衰减器带来的相位和幅度的误差, 性能的提升十分显著。

在雷达信号处理中, 早期由于器件性能低, 采用

脉冲对处理算法 (PPP) 得到多普勒的信息, 现在器件性能提高, 不论处理速度和量化位数都大幅提高, 采用数字正交相位检波及频域的FFT算法来代替时域的PPP算法, 可提高回波估值精度。对地物杂波的消除算法、超折射地物回波的剔除, 都可以由高速信号处理器来实现, 为改善提高雷达数据质量带来明显优势。早期新一代雷达的信号处理, 局限性比较大, 杂波消除采用预置杂波图方式, 在预置的杂波位置对回波进行地物消除处理, 由于季节和大气的变化, 预置杂波图位置不准, 会出现杂波消除不准确, 早期的回波图上仔细观察可以看到回波变化的不连续性, 这是杂波预置图不准造成天气回波误消除引起的。目前的技术可以在实时状态下, 对采集到的每一距离库的数据进行滤波处理, 处理的效果良好^[17]。

1.7 雷达灵敏度提升, 提高晴空回波和弱降水回波的发现能力

雷达系统的灵敏度取决于雷达的发射功率、天线大小、接收系统的噪声系数以及对目标物的发射脉冲的积累次数。新一代天气雷达S波段雷达, 与过去的常规S波段天气雷达相比, 天线直径由3.66 m增大到8.54 m, 脉冲发射功率由500 kW增加到750 kW, 接收机噪声系数由4~5 dB降低到2~3 dB, 可以使天气雷达探测能力比常规雷达提高10 dB左右^[18]。采用和常规雷达同样的脉冲累积次数, 新一代天气雷达可以探测到弱回波和晴空回波, 晴空回波范围可以达到半径50 km, 特别是降水回波发生前的晴空回波的获取, 为临近预报提供了非常有用的信息^[19-20]。

1.8 雷达动态范围扩大, 提升了同时探测强弱降水的能力

气象目标物在雷达系统中的信号幅度变化估计可达到100 dB以上, 常规雷达接收系统的动态范围一般为40~70 dB左右。由于动态范围的限制, 强降水出现后, 接收系统达到饱和状态, 为了看到强回波, 采用衰减信号强度的方式, 又导致弱回波被衰减看不到。由于回波探测不准, 不能及时提醒观测人员, 造成探测能力不足。在新一代天气雷达接收系统中模拟接收部分的动态范围已经达到85 dB以上动态范围, 制约动态范围的数字接收部分, 随着A/D位数增加到16位, 其理论动态范围可以达到96 dB (每增加1位, 可增加6 dB动态), 考虑到受噪声等因素的影响, 接收系统的动态范围可达85 dB以上。动态范围的提升, 可以同时观测到强回波和弱回波, 对于发现强回波, 特别是冰雹类的强回波以及短时强降水提供了很好的监测手段。从这些年的资料上看, 在强天气产生过程中,

S波段和C波段新一代天气雷达同时可观测到阵风锋弱回波与强降水回波。

1.9 确保雷达网的数据均一性, 便于雷达拼图应用

新一代天气雷达网由200多部雷达组成, 雷达组网应用是新一代雷达的显著特点, 包括全国的、区域的、以及针对某个天气过程的沿途路径的拼图。在保证组网雷达的空间观测一致性的手段分为两个, 一个是空间位置指向的一致性, 一个是空间位置回波反射率的一致性。保证空间位置指向一致性的方式是采取太阳噪声作为信号源, 根据太阳的位置及雷达观测到太阳噪声的时间, 来推算空间指向, 确保方位和仰角的指向误差在0.3°以内。对于反射率一致性, 是通过雷达主要参数定标及正确的距离订正保证每部雷达回波反射率的准确。最新探索采用太阳噪声强度作为雷达网强度标定检验的信号源^[21], 由于太阳噪声强度较弱, 其结果只能作为参考。

在雷达拼图应用中, 从技术上来讲, 设备本身提供了这个能力, 确保雷达网反射率标定的一致性, 特别是同波段、不同型号雷达在相同距离观测同一空间位置分布均匀的降水回波反射率, 在不考虑复杂情况下, 其观测的数值应该基本一致。经过试验, 不同的雷达, 比如山东境内的S波段两个型号, 济南SA和滨州SC雷达观测同一降水回波时, 反射率强度的一致性较好^[22]。雷达相互间的反射率数据的一致性, 是发挥雷达网整体效益的关键因素。

1.10 复杂的雷达系统, 提供易用的气象产品

雷达系统是复杂的电子设备, 涉及无线电工程、信息工程、通信工程以及机电一体化。从雷达的工作方式来看, 具有电磁波的发射能力、接收能力、目标物的定位能力、解析目标物的结构特征。天气雷达将电磁波信号发射到空间中, 得到空间降水回波的后向散射信息, 通过接收系统的混频获取中频信号, 经过对中频信号的数字化处理和下变频处理, 得到IQ信号, 通过对这种数字化信息的处理, 得到回波的强度信息、速度信息等。随着计算机能力的飞跃发展, 原来影响雷达数据处理的瓶颈得到解决, 快速的处理能力可以在雷达获得实时复杂信息时, 立即加工成易识别的回波彩色图像, 使用者可以解译回波图像给出的信息, 同时雷达系统将气象学家提供的识别算法, 经过复杂运算, 给出代表不同天气特征的报警信息, 比如龙卷、中尺度气旋、冰雹, 供使用者参考, 用于预警预测中。同时在一定假设条件下, 根据径向速度推导获取的VAD数据, 可用于探空资料的补充^[23]。表1给出了新一代天气雷达与常规天气雷达功能和性能参

表1 雷达主要功能性能参数比较
Table 1 Radar specification

内容	新一代天气雷达		常规天气雷达	
	S波段	C波段	S波段714型雷达	C波段713型雷达
	时域脉冲整形技术			
带外谱抑制	-40 dBc, 带宽 11.5 MHz (美军标要求15.5 MHz) -50 dBc 带宽 15.5 MHz (美军标要求26 MHz)	-40 dBc, 带宽 11.2 MHz (美军标要求19.6 MHz) -50 dBc 带宽 16.84 MHz (美军标要求34.8 MHz)	无	无
天线罩直径	11.9 m	6.8 m	6.5 m	无
天线直径	8.6 m	4.4 m	4 m	3.7 m
天线波束宽度	1°	1°	1.5°	1.2°
天线增益	44 dB	43 dB	37 dB	42 dB
脉冲宽度	1, 1.57, 2, 4 μs	0.83, 1, 2 μs	1, 3 μs	2 μs
发射功率	650 kW	250 kW	600 kW	250 kW
脉冲重复周期	300~1200 Hz	300~1200 Hz	200 Hz	200 Hz
发射机极限改善因子	52 dB	49 dB	无要求	无要求
地物对消能力	50 dB	47 dB	无要求	无要求
最小可测信号	-112 dBm	-110 dBm	-112 dBm	-98 dBm (无参放)
真空管类型	速调管		磁控管	
真空管寿命	上万小时		几百小时	
接收机动态范围	90 dB		70 dB	60 dB
接收系统动态	85 dB		60 dB	55 dB
工作方式	连续扫描, 自动, 手动		定时扫描, 手动	
获取信息	强度、速度、谱宽		强度	
数字化技术	中频数字化, 16 bit, 80 MHz		视频数字化, 8 bit, 1 MHz	
信号处理	高速, 单板, PPP, FFT		低速, 多板机箱, DVIP	
计算机	高档PC机		IS-68K, VAX-11/750小型机	
机内在线监测	有		无	
机内在线标定	有		无	
气象产品	30		5	

数^[24-27]比较。

2 促进业务发展

新一代天气雷达的技术性能不断提升, 特别是以体扫模式为主的自动扫描连续观测方式, 为天气监测提供了极其便利的手段。稳定的性能, 提供准确的数据可为决策提供很有力的支持。

2.1 实时监测发挥作用

雷达连续给出天气回波的发展演变过程, 每间隔6 min可以得到同一仰角下的回波数据更新, 通过回波的演变, 可以得到回波发生发展的实况, 为决策部门提供依据。对于监测的天气现象来说, 可以是降水、冰雹、龙卷、大风等。从监测的尺度上讲, 雷达网多部雷达的监测, 全国雷达拼图、区域雷达拼图可以监测大范围的回波变化。可以用单部雷达资料的精确跟踪接力方式对回波降水区域进行精确定位。比如台风登陆之前, 采用沿海雷达区域拼图, 得到一定地理范围内的台风位置的初步定位, 再用单部雷达对台风移动路径进行连续跟踪, 在台风登陆过程中, 通过对台

风眼位置的定位, 结合自动气象站、卫星资料综合判断获得登陆位置。

2.2 临近预报发挥作用

雷达是临近预报的有力工具, 通过连续监测降水回波移向移速, 可以开展0~2 h的外推预报, 不仅气象台利用雷达资料做临近预报, 如彩云天气等民间公司, 成功地利用其优势, 通过对雷达数据挖掘和图像处理技术来进行分钟级别天气预报的应用, 在全国范围内, 预测分钟级别的降雨状况, 1 h的降水预报, 为百姓提供了相当便利的服务。

利用雷达观测资料做临近预报, 已经为奥运会、国庆阅兵等露天重大活动组织提供气象保障。雷达的局地化应用是其一大特点, 利用雷达回波反射率, 开展定量估测降水, 可以为当地的洪涝做出判断, 根据上游天气状况为水库开闸泄洪提供重要的决策依据。

2.2 灾后分析提供重要依据

由于气象条件的变化造成的重大损失往往事先不可预知, 通过对雷达观测的历史数据进行回放分析,

可以对当时产生灾情的气象条件提供依据, 尤其雷达观测具有很高的时空分辨率, 特别是在局地其他观测设备缺乏实况数据的条件下, 发挥其特殊的重要性, 在东方之星号客轮翻沉事故、北京“7·21”暴雨等分析中都提供了雷达观测实况数据, 为做出正确结论提供了重要的手段。

2.3 新应用领域

高质量的雷达资料, 尤其是可以获取弱回波信号的能力, 在火灾监测、飞船回收轨迹跟踪、鸟群迁徙等领域都开展了探索性工作。

引入雷达资料用于资料同化^[28-29], 预示雷达资料在资料同化中将会有潜在的、更大的应用价值。利用多年雷达资料的积累开展雷达气候研究, 在城市临近预报中开展应用^[30]。

在天气业务发展, 强调了雷达资料的应用。目前在短时临近预报系统项目(SWAN)和新一代天气雷达软件工程项目(ROSE)中, 雷达资料的应用是重点, 特别是SWAN是临近预报的平台, 雷达资料发挥着重要作用。

新一代天气雷达可以获取多普勒径向速度, 经过一定的假设条件, 得到VAD风场, 这是一个新的应用领域, 中国气象局气象探测中心推出了根据多部雷达VAD风场制作的天气雷达组合风场显示产品(WID), 这可以作为一天两次常规探空资料的补充。

3 结论

新一代天气雷达系统投入业务应用以来, 可以在预先设置情况下完成PPI、RHI以及体扫工作方式, 监测雷达运行状态, 对定量测量信息进行不断订正, 确保数据的准确性, 雷达系统是一种高度智能化的设备, 这种智能化的设备取决于各种技术的应用, 特别是可编程装置的出现, 大量的算法可在设备上实现, 在完成复杂计算后, 可提供给用户清晰的二维平面或三维立体图像, 由于雷达性能不断提升, 能够提供清晰的降水回波图像, 促进了雷达在气象中的广泛应用。大量实例资料表明新一代天气雷达具有对大尺度和中小尺度天气系统的监测能力^[31]。新一代天气雷达比常规天气雷达在性能指标方面大幅度的提升, 一方面是现代电子技术发展带来的优势, 另一方面是因为雷达在天气监测中的作用, 气象部门所提出的需求对于雷达系统功能的设计提供了重要的参考依据。需求牵引, 技术进步, 产生了具有国际先进水平的业务使用多普勒天气雷达, 它充分考虑了多普勒天气雷达在气象业务系统中的使用特点, 整个雷达系统的工作按照预先设定的模式进行工作, 使用人员只需要在雷达系统的

总控制台进行少量的干预, 而把大量的精力放在雷达图像终端, 对雷达回波图像进行分析, 从而对天气状况的进一步发展进行预测。高质量的雷达探测数据得到广泛应用, 已成为监测、预报与服务必备的有效工具。

参考文献

- [1] 许小峰. 中国新一代多普勒天气雷达网的建设与技术应用. 中国工程科学, 2003, 5(6): 8-14.
- [2] 葛润生, 张冲源, 王顺生, 等. 新一代天气雷达系统功能规格需求书. 北京: 中国气象局, 1997.
- [3] 高玉春, 潘新民, 黄晓, 等. 新一代天气雷达系统功能规格需求书(修订版). 北京: 中国气象局, 2010.
- [4] 易龙. 无形的战略资源——浅论无线电频谱资源的战略意义. 中国无线电, 2010, (8): 24-25.
- [5] 郑新, 熊晓楠, 蒋拥军. 脉冲雷达发射机频谱控制的研究. 现代雷达, 2000, 22(1): 71-77.
- [6] 范青, 王丽珍. 基于时域脉冲整形的雷达频谱控制方法. 现代雷达, 2010, 32(8): 77-80.
- [7] 安克武, 黄晓, 周长江. 新疆新一代天气雷达加装带通滤波器后激励信号频谱分析. 气象科技, 37(3): 341-344.
- [8] 范青, 王举. 基于滤波器技术的脉冲雷达频谱控制方法. 气象水文装备, 2009, 20(4): 32-34.
- [9] 裴翀, 石城, 邵楠, 等. 新一代天气雷达运行能力评估研究. 科学通报, 2011, 2(3): 336-341.
- [10] 杨金红, 高玉春, 柴秀梅. 新一代天气雷达运行保障能力分析. 气象科技, 2014, 42(1): 31-37.
- [11] 张培昌, 杜秉玉, 戴铁丕. 雷达气象学: 第二版. 北京: 气象出版社, 2016: 158-159.
- [12] 高玉春. CINRAD在线自动标定和在线监控功能的实现//中国气象学会. 海峡两岸气象科学技术研讨会论文集汇编. 北京: 中国气象学会, 2004.
- [13] 北京敏视达雷达有限公司. CINRAD/SA使用手册. 北京: 北京敏视达雷达有限公司, 2013.
- [14] 中国气象局气象探测中心. 新一代天气雷达测试大纲. 北京: 中国气象局气象探测中心, 2011.
- [15] Skolnik M I. 雷达手册: 第三版. 南京电子技术研究所, 译. 北京: 电子工业出版社, 2010: 80-81.
- [16] Heiss W H, 等. NEXRAD: 下一代天气雷达(WSR-88D). 纪承军, 译. 气象科技, 1991, (6): 74-80.
- [17] 张建云, 张持岸, 孙召平. 用频域滤波和双PRF技术提高新一代天气雷达数据质量. 气象科技进展, 2012, 1(1): 6-11.
- [18] 葛润生, 朱晓燕, 姜海燕. 提高多普勒天气雷达晴空探测能力的一种方法. 应用气象学报, 2000, 11(3): 257-263.
- [19] 管理, 魏鸣, 吴昊. 晴空湍流在强天气过程临近预报中的应用研究. 科学技术与工程, 2014, 14(31): 1671-1815.
- [20] 王丽荣, 卞韬, 苏运涛, 等. 晴空回波在强对流天气临近预报中的应用. 应用气象学报, 2010, 21(5): 606-612.
- [21] 周红根, 吴艳峰, 曹德煜, 等. 基于太阳噪声气象雷达接收系统标定检验. 现代雷达, 2015, 37(9): 18-21.
- [22] 吴书君. 气象软件包应用情况. 新一代天气雷达软件移植技术研讨会, 北京, 2003年7月14日. 北京: 中国气象局重点工程项目办公室, 2003.
- [23] 薛双青, 杨洪平, 高玉春, 等. VAD反演风与探空资料的对比分析. 气象科学, 2010, 30(6): 856-861.
- [24] 王强. 综合气象观测: 上. 北京: 气象出版社, 2012: 432-437.
- [25] 王顺生. 714天气雷达. 气象科技, 1985, (1): 84-88.
- [26] 胡定廉. 樊启恭 713型气象雷达. 气象科技资料, 1978, (1): 1-5.
- [27] 葛润生. CAMS数字化天气雷达系统. 气象, 1987, (2): 33-36.
- [28] 朱立娟, 龚建东, 李泽椿. 资料同化中雷达VAD风质量控制研究. 高原气象, 2012, 31(6): 1731-1738.
- [29] 高郁东, 万齐林, 何金海. 三维变分同化雷达视风速的改进方案及其数值试验. 气象学报, 2011, 69(4): 631-643.
- [30] 陈明轩, 王迎春, 高峰, 等. 雷达气候研究进展及其在城市区域强天气临近预报中的应用. 气象科技进展, 2014, 4(5): 31-41.
- [31] 李柏, 古庆同, 李瑞义, 等. 新一代天气雷达灾害性天气监测能力分析及其未来发展. 气象, 39(3): 265-280.