

吴志根, 杨礼敏, 王勤典, 等. 移动 X 波段双线偏振多普勒气象雷达及其关键技术分析[J]. 气象, 2010, 36(8): 126-133.

移动 X 波段双线偏振多普勒 气象雷达及其关键技术分析^{*}

吴志根¹ 杨礼敏² 王勤典² 诸兆庆² 黄云峰² 胡 平² 沈利峰¹ 尹春光²

1 上海市气象局, 上海 200030

2 上海市气象信息与技术支持中心, 上海 200030

提 要: 文章描述了上海引进的移动 X 波段双线偏振多普勒气象雷达系统的主要性能和显著技术特点, 着重分析了该雷达系统为了获取有效和可靠的双线偏振探测数据, 如差分反射率 Z_{DR} 、传播相位 K_{DP} 、差分相位 Φ_{DP} 和相关系数 ρ_{HV} 等所采用的关键技术和措施, 其中包括: 200 kW 超强峰值功率; 平均 40 dB 以上中频相参地杂波抑制能力; 95 dB 至 100 dB 大线性动态范围及其 -112 dBm ($1 \mu\text{s}$ 脉宽) 高灵敏度接收机; 31.25 m 精细距离分辨率; EDGE5.0 多功能应用软件包; 在天线仰角轴上组合安装双偏振波导、接收机和信号处理系统的创新设计; 良好的野外机动探测性能等。文章还给出了实测个例资料并指出该雷达的新颖设计理念和实现的关键技术值得国内在同类型气象雷达的设计制造中学习和借鉴。

关键词: 关键技术, 移动雷达, 杂波抑制, 峰值功率, 双线偏振, 中频相参

X-Band Mobile Dual-Polarized Doppler Weather Radar and Analysis of Several Key Techniques Adopted

WU Zhigen¹ YANG Limin² WANG Qindian² ZHU Zhaoqing²
HUANG Yunfeng² HU Ping² SHEN Lifeng¹ YIN Chunguang²

1 Shanghai Meteorological Bureau, Shanghai 200030

2 Shanghai Meteorological Information and Technical Support Centre, Shanghai 200030

Abstract: The major advanced features and performances of Shanghai imported mobile X-band dual-polarized Doppler weather radar system have been described in this paper. Detailed analysis and comparisons of the radar specifications and the technical measures adopted between the imported mobile radar and the same domestic type have also been conducted in order to indicate that these super specifications and technical measures realized already in the import one are necessary and important for obtaining better quality-based dual-polarized parameters, such as Z_{DR} , K_{DP} , Φ_{DP} , ρ_{HV} etc. All those mentioned above in the imported weather radar include 200 kW peak power output, over 40 dB averaging ground clutter suppression in the IF coherence system, 95 dB to 100 dB receiver linear dynamic range and ≤ -112 dBm receiver sensitivity ($1 \mu\text{s}$ pulse width), with the finest 31.25-m range bin resolution, innovated and patented antenna mounted receiver (AMR) technique, as well as integrated EDGE5.0 software package providing varieties of radar products. It has also illustrated some images acquired by this mobile radar from the field observation. The paper indicated finally that all the advanced aspects achieved in this imported mobile radar are worthy to be learned and followed by domestic weather radar manufacturers.

Key words: key techniques, mobile radar, clutter suppression, peak power, dual linear polarization, IF coherence

* 上海市发改委“加密自动气象站和辅助天气雷达建设项目”资助

2009 年 7 月 20 日收稿; 2010 年 3 月 25 日收修定稿

第一作者: 吴志根, 从事气象综合探测技术研究. Email: zgwu@smb.gov.cn

引言

X 波段移动气象雷达是探测中小尺度强对流天气系统内部精细结构并且获得高时空分辨率数据的有效工具之一。自从问世以来,移动 X 波段气象雷达已经在各种野外科学试验中取得了巨大的成功。在此值得一提的是美国用 DOW (Doppler On Wheel) 系列车载 X 波段气象雷达^[1]开展了一系列龙卷追风^[2]活动以及对多个登陆飓风的野外探测试验,获取了大量的个例资料和实测精细数据,为进一步深入研究这类中小尺度强对流灾害性天气系统奠定了基础^[3-4]。此外,美国强风暴实验室(NSSL)等单位联合研制的 SMART 移动雷达^[5]多年来在中小尺度灾害性天气系统探测,各种野外试验以及资料的应用上也堪称典范。

另外,美国的研究指出已建的 WSR-88D 气象雷达网无法探测到低层(0~3 km)大气中出现的各种中小尺度天气现象的物理过程和精细特征。为了从根本上解决 3 km 高度以下气象雷达网的探测覆盖盲区,美国于 2003 年制定了协同适应(Collaborative Adaptive Sensing of the Atmosphere CASA)X 波段小气象雷达组网试验计划方案^[6],准备用 10 年时间在本土建成覆盖全国的低空雷达探测网,用以研究龙卷、下击暴流,并开展雷暴早期预警,以形成对气象雷达网探测的补充。同时进行雾、冻雨和降雪等灾害天气的形成及维持机理的研究,改进临近预报准确率和数值模式的预报精度。日本在东京地区已经建成了由多部 X 波段多普勒小气象雷达组成的探测网^[7-8],用于监视暴雨和低层风灾,为特大型城市气象灾害防御开创了一条新的有效途径。

近年来国内新一代多普勒气象雷达(CINRAD)的组网及业务化运行日趋完善,CINRAD 探测资料在中小尺度强烈灾害性天气系统的监测预警^[9-12]、人工影响天气^[13]等领域的应用与研究中取得了显著成效。但是如何进一步提高现有气象雷达的探测能力和精准度仍是重点工作。在现阶段,应用双线偏振技术^[14]是提高多普勒气象雷达探测能力的最有效的办法之一。利用移动 X 波段气象雷达作为大雷达网探测的补充^[27],对登陆台风进行精细观测,重大户外活动现场气象保障和参与各种突发事件的应急响应等已经形成了共识。

上海市气象局的 X 波段车载移动气象雷达于

2007 年下半年建成,并在重大气象服务及其野外观测试验中发挥了积极作用。在下面的章节中将分别介绍该雷达的主要性能以及为提升移动雷达野外实战能力和获取有效可靠的双线偏振探测数据而采取的关键技术和措施,希望能够对今后的工作有所帮助和启发。

1 X 波段移动雷达的主要性能

上海移动 X 波段双线偏振多普勒气象雷达系统由美国 EEC 公司的 DWSR-2001X-SDP/M 型气象雷达、VOLVO 卡车、数据通信(车)、辅助子系统共四大部分构成。技术人员根据移动雷达的探测特点、实际要求及已有的经验,对该移动雷达系统总的设备配备及集成方案进行了设计、修改,并且直接参与了在 VOLVO 卡车平台上的安装和调试。通过野外实战的检验,表明整个移动雷达系统的集成是合理可靠的。

选用 VOLVO 卡车作为移动平台主要考虑,一是该品牌卡车故障率低而且性价比高;二是车辆性能优良,发动机功率为 380 匹马力,6 轮驱动,最高时速可达 $120 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$,且采用气动装置进行整车调平、升降及避震,比较符合国内的道路条件以及野外恶劣天气条件下工作;三是车辆维修、保养等技术支持便捷。图 1 是该移动气象雷达的外观照片,其长宽高分别是 $10 \text{ m} \times 2.5 \text{ m} \times 4.1 \text{ m}$ 。从 VOLVO 卡车驾驶舱向后依次是雷达工作舱、可升降天线舱、柴油发电机舱,在前部车厢顶装有 WXT510 型 6 要素自动气象站、GPS 导航定位仪、旋转实景探头。移动雷达车还装有一套液压水平调整系统,其 4 个液压伸缩金属支架均安装在卡车的底盘钢梁上。其



图 1 上海 X 波段移动雷达系统外观

Fig. 1 A close-up view of Shanghai DWSR-2001X-SDP/M radar

控制器安装在驾驶舱内,且与 VOLVO 卡车的手刹车控制电路融为一体,以确保卡车行进和停放时的安全。卡车燃油箱是专门定制的,其容量大且与雷达发电机油箱有管道相连,可作为备份油箱使用。通常一次性加满柴油,在野外可连续开机工作 48 小时以上。另外,该燃油箱在雷达车移动时还起到了使车体保持平衡的作用。

移动雷达工作舱面积近 8 m^2 。舱内装有雷达发射控制机柜、UPS 机柜、部分波导馈线、机舱配电箱、A 和 B 二台工作站及配置的四个系统显示屏及二个与气象台值班室远程相通的实景监测大屏。舱内还装有内实景探头一个,通讯控制器一套,二台共三匹功率的制冷/热空调器。舱内全部设备与舱底及舱壁的连接均采取了减震避震措施。

在可升降天线舱里面,直径 2.4 m 的抛物面雷达天线连同其底座和伺服系统一起安装在一台单臂剪式液压升降机上,并且直接将它连在装有安全保护限位开关的 $2.3 \text{ m} \times 2.7 \text{ m}$ 的升降平台上,同时采用规定的方位/仰角在天线升降舱内固定安置天线。升降天线舱右侧装有门,工作人员可手持控制开关方便地对雷达天线平台进行上升或下降操作。

尾部的柴油发电机舱内主要装有一台 SDMO 型 38 kW 功率的柴油发电机和整个移动系统的市电网及柴油机发电供电的切换箱。本移动雷达采用单相 220 V 电源,总的用电载荷约 9 kW 。

表 1 是 VOLVO 卡车平台上集成的全部分系统。以下是对各个部分主要性能的描述。

在通信分系统中,本移动雷达设有本地控制以及远程同步显示和应用的功能。目前与本移动气象雷达配套的卫星通信车已经完成移动雷达探测资料/指挥调度指令与远程指挥中心之间的卫星上/下行双向传输功能测试,同时还有 3G 通信网络作为整个移动雷达系统的备份。该雷达车上二个旋转实景监测探头的视频画面也可通过上述方式传到中心气象台预报值班室,使得移动雷达的实景监测系统与现存的远程可视会商系统相融合。

该移动系统安装的美国 ComNav 公司的导航定位仪具有 GPS 定位、电子陀螺定向和可编程等先进功能。实际使用中该车载 GPS 定位与 Google Earth 定位比对后仅相差几米,其电子陀螺的定向精度优于 0.5° 。

该移动系统的核心部分是美国的 DWSR-2001X-SDP/M 型气象雷达,其计算机系统是二台

装有 EDGE5.0 应用软件包的本地主控 A 工作站和本地(远程)控制 B 工作站,用网络方式连接。该雷达本身的控制和显示均采用触摸屏方式,详见图 2 所示。图中上排 4 个红色触摸键依次是本地/远程切换键、调制器电源开关、伺服电源开关和高压辐射开关。右上角是脉冲宽度选择键。5 个仪表盘分别给出高压电源电压/电流、方位/仰角、磁控管电流的实时显示。该触摸屏上还有多个雷达重要参数监测指示器,如实时指示;发射机柜温度、调制器温度、驻波比、脉冲重复频率等。这些参数正常时指示器为绿色,有故障时则显示红色。这种直观、醒目的显示给实际使用带来了方便。该雷达的实时信号处理采用了双 EDRP-9 高速信号处理卡,具有很强的实时信号处理能力,即便是发射脉冲在 $0.2 \mu\text{s}$ 脉宽且高 PRF 时也无需降低天线的转速。

表 1 上海移动 X 波段双线偏振多普勒气象雷达系统集成示意

Table 1 All integrated sub-systems on Shanghai X-band mobile dual-polarized weather radar

通讯和数据传输子系统	X 波段双线偏振多普勒气象雷达子系统		移动探测辅助子系统
卫星通信	天线升降机系统	天线和伺服系统	GPS 导航定位仪
	雷达发射机	雷达接收机、信号处理器和天馈系统	应急照明
	发电柴油机组	雷达控制显示柜	内外实景监测及远程可视系统
3G 通信	市电及配电系统	雷达本地(远程)主控 A、B 工作站和应用软件	自动气象站
	UPS 供电和制冷	EDGE5.0 软件包	液压平衡系统
	VOLVO 卡车集成平台		



图 2 移动雷达系统控制机柜触摸屏
Fig. 2 The touching screen in Shanghai DWSR-2001X-SDP/M radar system

该移动雷达还有以下几点需要指出:

(1) 一旦雷达系统上电后, GPS 定位仪和电子陀螺自动定位、定向并将这些数据传到 A 工作站,由应用系统的地图软件自动调整底图取向后,生成

以当前雷达地理位置为中心的叠加在 GIS 底图上的 PPI 扫描范围,而且随着光标的移动显示经纬度数值。若雷达移动的直线距离较前一次观测位置大于 1500 km 时,应用软件则自动重新生成 GIS 底图并重新叠加 PPI 扫描范围。

(2) 机舱内的 A 工作站是实时控制和人机交互的主操作平台,雷达的所有控制功能均可通过它来实现。操作人员可以按照指挥部的命令结合当地的天气状况,选择雷达工作参数、天线扫描模式、产品生成种类并且保存和传输资料。同时舱内的 B 工作站通过网络连接,实现分布式功能并且进行雷达数据和产品的拓展应用。其中包括:实时数据的存放、各类应用产品的生成和多种应用接口功能,如用户自编算法的调试、各种产品显示格式以及基数据存放格式的转换等。该移动雷达系统还配置了一台(可配多台)远程工作站,其功能与车载 B 工作站相同。远程遥控指令/数据等经过卫星到通信车再与移动雷达车进行实时双向链接,在远程即可看到移动雷达的产品并可同步开展应用。

(3) 由于该移动雷达系统还集成了远程实景监测和可视会商系统,所以在气象台预报值班室随时都可实时看到移动雷达车厢里的情况以及探测点处的天气,便于远程指挥和作业调度。该雷达车在野外的架设时间约为 1 小时,观测结束后雷达车恢复至可转场的时间约为 40 分钟,人员配备 3~4 人。

(4) 该移动雷达以高性能 PC 计算机为工作平台,采用 LINUX SuSe 操作系统。安装了经过几十

年持续专业开发与经验积累的 EDGE5.0 应用软件包,其功能齐全、性能可靠、运行稳定。该引进的移动雷达系统共有应用软件及产品 30 多种,如:水凝体分类(HMC)、回波三维立体显示(XSEC)、风切变(SHEAR)及洪涝预警(SUBC)等。

(5) 该移动雷达可获得的探测数据包括:非订正反射率(水平、垂直)、订正反射率(水平、垂直)、径向速度(水平、垂直)、谱宽(水平、垂直)以及 Z_{DR} 、 Φ_{DP} 、 K_{DP} 和 ρ_{HV} 等。图 3 中的照片是该移动雷达在 2009 年 6 月 30 日 16 时 18 分探测到的一次受稳定梅雨锋切变线影响产生的强降水回波及相同时刻的几种双线偏振产品。当时陆上实测到的地面 14 时至 20 时最大降雨量是宝山站 36 mm,其次浦东站是 24 mm。有研究表明,在纯降雨情况下偏振变量的特点是: Z_H 值随雨强增大而变大; Z_{DR} 为正值且当出现大雨滴时达到 3~5 dB; K_{DP} 值一般小于 1°/km,含大雨滴时可达 2.5°/km; ρ_{HV} 在纯雨滴或纯小冰粒时其值约为 0.97~0.98。通过分析本例中 Z_{DR} 、 ρ_{HV} 、 K_{DP} 图与反射率 Z_H 图的配合情况并结合地面实况后可确定,这是一次纯降雨的过程。其主要特点是: Z_H 值图上大于 28 dB 回波区的主体部分在海上; Z_{DR} 图则以 0.3 dB 小的正值为主,其分布与 Z_H 基本对应,绿色至黄色(0.9~1.9 dB)所示的 Z_{DR} 大区比较零碎,但与 Z_H 的高反射率区基本吻合; ρ_{HV} 图中 0.97 以上的高值区也与前二者的对应区域相匹配;在 K_{DP} 图中与高反射率区相对应的出现值为 1.9°/km 的区域比较零碎,但仍表示有大雨滴存在。

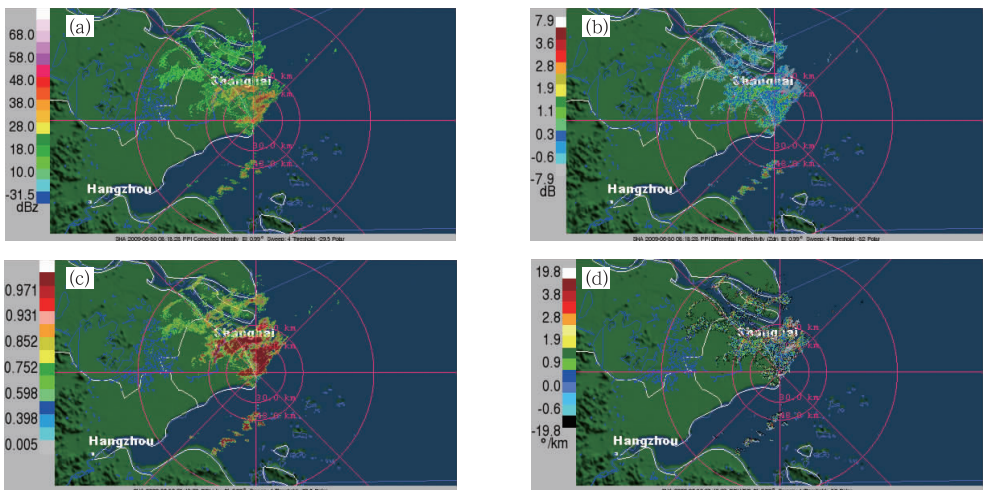


图 3 2009 年 6 月 30 日 16:18:23,仰角 0.99°反射率因子 Z(a);差分反射率 Z_{DR} (b);相关系数 ρ_{HV} (c);差分传播相位 K_{DP} (d)

Fig. 3 Reflectivity Z (a); Differential Reflectivity Z_{DR} (b); Correlation Coefficient ρ_{HV} (c); Specific Differential Phase K_{DP} (d) detected at 16:18:23 on June 30, 2009, Elevation:0.99°

2 双线偏振关键技术分析

双线偏振雷达的主要作用是:改善雷达测雨的精度,提高识别冰雹的准确率,了解回波中降水粒子的相态及形状,确定雨滴谱参数^[15]。2002 年美国偏振气象雷达联合野外试验的结果^[16]表明,通过与试验区地面雨量计实测值的对比,多个偏振参数组合的 1 小时总降水定量测量的 Z-R 算法在点上和面

上的估计精度分别比用单个参数的雷达雨量估计算法提高了 1.7 倍和 3.7 倍。然而,这些结果的获得完全是建立在双线偏振雷达探测参数有效可靠的基础上的。为了确保双线偏振雷达探测参数的有效可靠以及使得移动雷达具有优良的野外探测性能,该引进的 X 波段雷达采用了许多先进的技术与措施。表 2 给出了该进口移动 X 波段雷达验收时实测的部分主要技术指标和性能与国内同类产品的情況对比,其具体分析如下:

表 2 上海移动 X 波段雷达部分性能指标与国内同类产品的比较
Table 2 Comparison of some key-parameters and performances between Shanghai mobile dual-polarized weather radar and the sort of radar manufactured domestically

序号	性能和指标项目	引进的移动 X 波段雷达指标测试值	国内同类型 X 波段雷达指标设计值
1	发射机峰值功率	单通道 218 kW 双通道 109 kW	单通道 75 kW 双通道 37.5 kW
2	接收机线性动态范围	0.2 μ s, 0.5 μ s, 1 μ s, 2 μ s 脉宽时为 95~100 dB	90 dB
3	地物杂波抑制	≥ 40 dB(磁控管体制)	> 50 dB(速调管体制)
4	双通道隔离度	> 40 dB*(非实测值)	> 35 dB
5	接收机灵敏度(水平通道和垂直通道)	≤ -109 dBm (0.2 μ s) ≤ -108 dBm (0.5 μ s) ≤ -112 dBm (1.0 μ s) ≤ -115 dBm (2.0 μ s)	≤ -107 dBm (0.5 μ s) ≤ -110 dBm (1.0 μ s)
6	精细化探测能力	31.25 m(0.2 μ s) 62.50 m(0.5 μ s)	一般为 1 μ s,极少数雷达有 0.5 μ s
7	接收机/信号处理与天馈系统	AMR 技术专利,将接收机、信号处理及双线偏振波导集成按装在天线俯仰轴上	接收机和信号处理器按传统设计装在雷达工作舱内
8	天线抗风能力和移动车总重量	贝壳状脱卸式天线罩,10 级风可工作,12 级风不损坏。车辆总重量 16.5 t	无天线罩,8 级风可工作,10 级风不损坏;车辆总重量 7.5 t

(1) 对于同时发射接收的双线偏振雷达而言,除了需要对双线偏振测量参数如 Z_{DR} 等在光路上的衰减进行订正^[17-19]以外,还须在雷达设计或工程化时尽可能使得 H 和 V 二个通道的特性完全相同,其中包括:增益、插损、相位、驻波、天线指向和波束特性等保持一致,以求减小系统性误差和衰减。为了实现这一目标,该进口雷达设计了 AMR(Antenna Mounted Receiver)专利技术,将接收机/信号处理器以及双线偏振波导全部集成在雷达天线的仰角轴上。其结构详见图 4 所示。该专利设计的优点是,去除了信号从天线传到雷达车厢内接收机的这段高频电缆。这样一方面大幅度降低了电缆的插损(约 0.6 dB)、驻波和相位造成的 H 和 V 二个通道特性不一致对双线偏振参数测量的影响。另一方面,由于回波信号传输路径缩短,衰减减少,降低了双通道信号被外界或是互相电磁干扰的机会,提高了信号的质量,同时还有利于雷达对弱信号的检测。而传统做法是将接收机/信号处理器等安放在雷达机舱内,从天线引下通到机舱里的高频电缆至少比



图 4 移动雷达接收机/信号处理器机箱及天馈系统照片

Fig. 4 The illustration of DWSR-2001 X-SDP/M radar patented Antenna Mounted Receiver(AMR) technique.

现行设计要多用两根,除了有前面分析提出的问题外,还增加了移动雷达架设时的时间。另外,在该雷达的应用实战中,曾经发生过连接双通道 T/R 限幅器和低噪声放大器的两根半刚性射频同轴电缆因雷达车行进颠簸损坏,新做的两根电缆的插入损耗值

不相同,而造成 Z_{DR} 测值不正确的情况。这说明两个通道的一致性非常重要,任何细小的差别,都会造成偏振数据的误差和不可靠。野外实战表明,该移动雷达采用 AMR 技术的接收机箱的密封性能是好的,而且箱内用半导体温控制冷技术是有效的,维护保养也十分方便。

(2) 美国在 WSR-88D 雷达上的研究和试验结果表明,双线偏振的关键参数 Z_{DR} 、 Φ_{DP} 等的精度或准确性与回波的信噪比成正比^[20-21]。所以该进口雷达的另一大亮点是:采用先进的退模糊技术,实现大功率发射,有效地改善和提高了回波的信噪比。从表 2 可知,该 X 波段双线偏振多普勒气象雷达的发射机峰值功率为 200 kW,其 SAT 验收测试结果见表 3,这相当于 C 波段雷达的发射功率,对比目前国内同类 X 波段气象雷达一般都为 75 kW。显然在双线偏振参数的测量中,若被测对象其他条件相同,则该进口雷达探测回波的信噪比提高了约 4.6 dB。有研究指出,X 波段雷达单程的衰减率和差分衰减率比 S 波段和 C 波段雷达的衰减分别大 2 个数量级和 1 个数量级^[22],即使是在小雨的情况下 X 波段雷达接收到的功率也会大幅度下降,从而影响雷达反射率和差分反射率的数据质量。但是由于该 X 波段雷达发射功率大,探测距离远,不仅可显著提高对弱回波信号的检测能力,而且还增强了雷达本身的抗干扰性能。此外,提高接收机线性动态范围和灵敏度也可改善回波的信噪比。一般气象雷达回波强度变化范围大致在 95 dB 左右,国内同类型雷达接收机的线性动态范围的典型值为 90 dB。该移动雷达系统的测试结果表明,当脉宽为 0.2 μs 、0.5 μs 、1 μs 和 2 μs 时其值均落在 95~100 dB 范围,超

过国内指标。从表 2 还可知,该进口雷达的接收机灵敏度实测值也明显优于国内产品的设计指标值,其中 0.5 μs 脉宽时高 1 dBm,1.0 μs 脉宽时高出 2 dBm。分析认为,采用高灵敏度接收机是为了探测到有效的信号强度相对较弱的双线偏振数据。例如,交替发射雷达在对退极化因子 L_{DR} 进行测量时,由于 Z_{HV} 要比 Z_{HH} 小 2 至 3 个数量级,在大部分雨滴区 $L_{DR} < -25$ dB,故要求双线偏振雷达接收机的灵敏度很高,否则测不出 L_{DR} 的值。又如, Z_{DR} 的典型值仅在 -2 dB 至 +5 dB 范围,不同降水的 Z_{DR} 值又可以仅差十分之几分贝,且影响 Z_{DR} 值精度的原因很多,对其精度要求很高。所以,双线偏振气象雷达除了探测水凝体反射率等大信号之外,更为重要的是必须在设计时如何周密的考虑保证对相对弱的偏振信号的有效测量。表 4 给出的是双线偏振气象雷达在探测不同的目标情况下,雷达偏振参数的典型取值范围。从该表可知,几乎所有的雷达双偏振参数的测量精度要求都非常高。因此,采用先进技术,实现高水平的关键技术指标,大幅提升双线偏振气象雷达本身的探测能力,最终达到精确测量双线偏振参数的目的是至关重要的。

表 3 移动雷达峰值功率验收实测记录

Table 3 Recorded peak power output during DWSR-2001 X-SDP/M radar Site Acceptance Test (SAT)

测试参数	验收测值			要求和限制
脉冲宽度/ μs	0.220	0.500	1.024	$\pm 10\%$
脉冲重复频率/PRF	1012	1012	254	1012 ± 1 Hz, 253 ± 1 Hz
射频频率/MHz	9470	9470	9470	
耦合器衰减/dB	32.51	32.51	32.51	
功率计读数/dB	83.25	83.3	83.47	83 ± 0.5
峰值功率/kW	218	218	218	> 200 kW

表 4 不同目标情况下偏振参数的取值范围^[23]

Table 4 Polarization parameters and their values for a variety of targets^[23]

雷达偏振参数	云	毛毛雨	雨	雪	融化的雪	冰雹	精度要求
雷达反射因子 Z /dBz	-30~20	10~20	20~55	10~40	<45	40~77	<1 dB
差分反射率 Z_{DR} /dB	0	0	0.5~4	0~3	0~3	-0.5~0.5	<0.1 dB
差分相位 $K_{DP}/^\circ/\text{km}$	0	0	0~10	0~2	0~2	-1~1	<1 $^\circ$ /km
线性退偏振比 L_{DR} /dB	<-34	<-34	-27~-34		-13~-18	<-20~-10	<1 dB
相关系数 ρ_{HV}	<0.9	<0.9	>0.95	0.8~>0.95		0.9~0.95	~0.005

(3) 地物杂波抑制能力的优劣直接影响雷达反射率和速度测量的精度,进而最终会影响偏振参数的测量。对于 X 波段的雷达而言,探测距离相对较近,地物杂波干扰严重。因此,地物杂波抑制能力是一个特别需要在雷达设计制造时重点加以关注的技术指标。地物杂波抑制能力可用雷达系统的相位噪

声来表示,其简化的公式为 $CS_{ab} = -20 \log(\Delta\theta)$ 。其中 $\Delta\theta$ 的单位是弧度。该移动雷达系统属磁控管振荡型发射机,由于采用了新的数字中频接收相参技术,大大消除了由磁控管及其他振荡器引起的相位抖动和频率不稳的问题。实测平均地物杂波抑制在 40 dB 以上,对应的相位噪声优于 0.57° ,极值时

地物杂波抑制可达 46 dB。国内同类型雷达的杂波抑制仅为 30 dB 左右,对应相位噪声约为 2.0° 。表 2 中列出的是速调管体制下大于 50 dB 的地物杂波抑制指标。显然,该进口磁控管发射机雷达的地杂波抑制能力接近于速调管体制的雷达,但制造成本则大大低于速调管发射体制的雷达。目前国外研究的高斯模型自适应滤波(GMAP)技术^[24],在同类型磁控管 X 波段双线偏振雷达上的地物杂波抑制能力的试验中已可达到 50 dB 的水平^[25]。另外,由于磁控管体制雷达初始相位的随机性,可降低回波出现距离折迭影响的几率。

(4) 双通道正交耦合隔离器的隔离度的优劣会直接影响双线偏振参数,如 Z_{DR} 的测量精度。若隔离度指标太低,其雷达探测的后果是:有一小部分发射功率,漏进另一种偏振通道,并且被同时发射出去。从而引起 Z_H 及 Z_V 的误差,最终使 Z_{DR} 产生误差。国内先期研制成功的同时发射接收的双线偏振雷达通道隔离度的实测值为 33 dB^[26],目前新建系统的隔离度指标要求大于 40 dB。在表 2 中对该指标打 * 号表示不是实测值。但是,在毛毛雨天气条件下,通过交换该引进雷达 H 和 V 二个通道的接收电缆,用发射水平信号,接收垂直信号的方法,对降水粒子的退偏振效应做了测量和检验,结果垂直通道没有回波信号。这表明小的雨滴呈球形状,基本上无交叉极化散射,证明该雷达的通道隔离度是好的。

(5) 精细化探测是移动雷达应该具备的最主要特性之一。雷达发射脉冲宽度越窄,则距离分辨率就越高,且脉宽窄则雷达盲区半径也小。这对探测中小尺度强烈灾害性天气系统,如:强阵风锋微尺度结构、龙卷、水平直径小于 4 km 的涡度、干线、辐合线和雷暴出流前沿等精细结构和其内部的变化,提高短时临近预警预报能力是非常有利的。该引进的 X 波段移动雷达最窄的发射脉冲宽度是 $0.2 \mu\text{s}$,相应的距离分辨率为 31.25 m。目前国内雷达一般的脉宽为 $1 \mu\text{s}$ (距离分辨率 150 m),极少数雷达设计有 $0.5 \mu\text{s}$ 脉宽(距离分辨率 75 m),所以该移动雷达的精细探测能力比国产同类型雷达更胜出一筹。

(6) 抗风能力是检验移动雷达野外工作性能的又一个重要指标。该移动雷达在抗风上采取了三项具体的措施,即:配备了贝壳形脱卸式雷达天线防风罩,有效地减小了风的影响;加强了天线底座中齿轮力度和马达功率;增加了 VOLVO 卡车总的配重重

量。从表 2 可知,该雷达的抗风指标是 10 级风时可工作,12 级风时不损坏,明显高于国内同类产品的抗风指标。此外,一体化的天线防风罩的设计和独特的天线外形设计,还可有效地减小风在水平和垂直发射时引起的波束指向变化对差分反射率 Z_{DR} 、差分相位 Φ_{DP} 的影响。

3 小 结

通过以上对上海移动雷达主要性能介绍及其主要技术指标的对比分析,认为该引进的 X 波段移动双线偏振多普勒气象雷达所具备的性能以及在其上实现的关键技术指标和措施,完全是为了追求达到两个方面更好的效果:其一是使该移动雷达能够获得更可靠、更精确的双线偏振测量数据;其二是提升 X 波段移动雷达野外作业、精细观测和应急机动方面的能力。目前上海对该引进的移动 X 波段双线偏振多普勒气象雷达的应用研究尚处于起步阶段,文章对该雷达的几个主要关键技术指标的分析也是初步的,还有大量的工作需要继续深入开展,其中包括:移动 X 波段双线偏振气象雷达系统的标定和校准、双线偏振测量数据的精度订正、探测资料的质量控制技术、移动 X 波段双线偏振气象雷达野外(应急)观测方法以及与移动双线偏振气象雷达运行相配套的管理措施等。但是完全有理由相信,在该雷达上实现的这些关键技术和新颖的设计理念,值得国内在改进同类型气象雷达性能的设计制造中学习和借鉴。同时,文章对于如何去选择质量优、性能好的移动 X 波段双线偏振多普勒气象雷达也具有一定的参考作用。

参考文献

- [1] Wurman J. Tornadoes observed by the Doppler on wheels radar[J]. Visualizat. 1999,2,1.
- [2] Burgess D, Mqagsig M, Wurman J, et al. Radar observation of the 3 May 1999 Oklahoma City tornado[J]. Weather and Forecasting, 2002, 17:456-471.
- [3] Wurman J. The multiple-vortex structure of a tornado[J]. Weather and Forecasting, 2002,17:473-505.
- [4] Wurman J, Straka J, Rasmussen E. Design and deployment of a portable, pencil-beam, pulsed, 3-cm Doppler radar[J]. Atmos. & Oceanic Tech, 1997,14:1502-1512.
- [5] Michael I Biggerstaff, Louis J Wicher, Jerry Guynes. The shared mobile atmospheric research and teaching radar[J]. Bulletin of The American Meteorological Society, 2005, 9:

- 1263.
- [6] Brotzge J. and Droegemeier K, McLaughlin David J. Collaborative adaptive sensing of the atmosphere (CASA): New radar system for improving analysis and forecasting of surface weather conditions[C]. Notes: Many of these papers were presented at the TRB 85th Annual Meeting in January, 2006; 145-151.
- [7] Chandrasekar, V. McLaughlin D. V., Brotzge J, et al. Distributed collaborative adaptive radar network: The first results from the CASA IP-1 testbed Proc. International Symposium on X-band weather radar network: The first results from the CASA IP-1 testbed Proc. International Symposium on X-band weather radar network[C]. Challenge the severe storm. Tsukuba, Japan.
- [8] Masayuki Maki, et al. X-band polarimetric radar network in the Tokyo Metropolitan Area-X-NET[C]. Proc. of Fifth European Conf. on Radar in Meteorology and Hydrology.
- [9] 张沛源, 杨洪平, 胡绍萍. 新一代天气雷达在临近预报和灾害性天气警报中的应用[J]. 气象, 2008, 34(1): 3-11.
- [10] 张志强, 刘黎平, 王红艳, 等. 华北区域四部雷达探测强度与定位一致性分析[J]. 气象, 2008, 34(9): 22-27.
- [11] 万蓉, 郑国光, 王斌, 等. 利用多普勒雷达速度资料检验三维中小尺度模式流场[J]. 气象, 2009, 35(1): 3-8.
- [12] 金巍, 曲岩, 安来友. 超级单体引发的龙卷天气过程分析[J]. 气象, 2009, 35(3): 36-41.
- [13] 王斌, 向玉春, 张鸿雁. 一次对流降水过程增雨催化时机的模拟分析和雷达识别[J]. 气象, 2008, 34(1): 35-40.
- [14] Doviak R J, Bringi V. Ryzhkov A. Considerations for polarimetric upgrades to operational WSR-88D radars[J]. J Atmos & Oceanic Tech, 2000, 17(3): 257-278.
- [15] Bringi V N, Goddard J W F, and Cherry S M. Comparison of dual polarization radar measurements of rain with ground-based disdrometer measurements[J]. J Appl Meteor, 21: 252-256.
- [16] Alexander V Ryzhkov, Terry J Schuur, Dusan S Zrnica. The joint polarization experiment [J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 2005, (7): 809.
- [17] 何宇翔, 吕达仁, 肖辉. X 波段双线极化雷达差分反射率的衰减订正[J]. 高原气象, 2009, 28(3): 607-616.
- [18] Testud J, Le Bouar E, E Obligis. The rain profiling algorithm applied to polarimetric weather radar [J]. J Atmos & Oceanic Tech, 2000, 17(3): 332-356.
- [19] 刘黎平, 徐宝祥. 双线偏振雷达雨区衰减订正问题的模拟计算与讨论[J]. 高原气象, 1992, 11(3): 235-240.
- [20] Melnikov V M, Zrnica D S, Doviak R J, et al. Calibration and performance analysis of NSSL's polarimetric WSR-88D[R]. National Severe Storms Laboratory, 77 pp.
- [21] Bringi V N, V Chandrasekar. Polarimetric Doppler Weather Radar: Principles and Applications[R]. Cambridge University Press, 2001.
- [22] Park S G, M Maki, K Iwanami. Correction of radar reflectivity and differential reflectivity for rain attenuation at X band. Part II: Evaluation and application[J]. Atmos. & Oceanic Tech, 2005, 22(11): 1633-1655.
- [23] Ronald E Rinehart. Radar for Meteorologist, Fourth Edition from Rinehart Publications PO Box 30800 Columbia, MO 65203-3800 USA, 2004, 228.
- [24] Siggia A and Passarelli J. Gaussian model adaptive processing (GMAP) for improved ground clutter cancellation and moment calculation[R]. 2004 in European Conference on radar in meteorology and Hydrology, pp. 67-73.
- [25] Nitin Bharadwaj and V Chandrasekar. Waveform design considerations for CASA radar network[R]. Proceedings of ERAD 2006.
- [26] 王致君, 楚荣忠. X 波段双通道同时收发式多普勒偏振天气雷达[J]. 高原气象, 2007, 26(1): 135-140.
- [27] 陈晓辉, 曹俊武, 胡志群, 等. 车载 X 波段双线偏振多普勒天气雷达及其数据处理系统[J]. 气象, 2010, 36(7): 116-125.