

苏添记,葛俊祥,章火宝.中国双偏振天气雷达系统发展综述[J].海洋气象学报,2018,38(1):62-68.
Su Tianji,Ge Junxiang,Zhang Huobao.Review of dual polarization weather radar system development in China [J].Journal of Marine Meteorology,2018,38(1):62-68. DOI:10.19513/j.cnki.issn2096-3599.2018.01.008.(in Chinese)

中国双偏振天气雷达系统发展综述

苏添记^{1,2},葛俊祥²,章火宝¹

(1. 烟台市气象局,山东烟台 264003; 2. 南京信息工程大学电子与信息工程学院,江苏南京 210044)

摘要:回顾了近 30 年来中国双线偏振天气雷达的研究进展,着重从雷达数据质量控制和雷达偏振参量的测量精度两大方面进行详细叙述。阐述了目前主要通过提高双偏振天气雷达的系统性能,降低系统误差,抑制雷达地物杂波,来提高雷达数据质量和测量精度,而双通道一致性和极化隔离度是双偏振天气雷达系统最主要的性能指标;描述了双偏振天气雷达系统及其产品应用新进展。

关键词:双偏振;天气雷达;气象观测

中图分类号: TN959.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 2096-3599(2018)01-0062-07

DOI:10.19513/j.cnki.issn2096-3599.2018.01.008

Review of dual polarization weather radar system development in China

SU Tianji^{1,2}, GE Junxiang², ZHANG Huobao¹

(1. Yantai Meteorological Bureau, Yantai 264003, China; 2. School of Electronic and Information Engineering, Nanjiang University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China)

Abstract This paper reviews the research progresses of dual polarization weather radar in China with emphasis on radar data quality control and the measurement accuracy of radar polarization parameters in recent 30 years. It is elaborated that the radar data quality and the accuracy of radar polarization parameter measurements are mainly improved by means of system improvement, system error reduction, and radar ground clutter suppression. The double channel consistency and polarization isolation is the most important performance indicators of dual polarization weather radar. The new progresses of dual polarization weather radar system and its applications are also discussed.

Key words dual polarization; weather radar; meteorological observation

引言

1976 年, Seliga and Brangi^[1] 提出双线偏振雷达设想, 之后, 美国、欧洲、日本等均发展了自己的双线偏振雷达用于天气观测^[2-4]。1989 年, 中国科学院兰州高原大气物理研究所(现中国科学院寒区旱区环境与工程研究所)在 713 雷达的基础上进行双偏振改造, 研制出了国内首部双线偏振天气雷达

(C 波段, 图 1)^[5], 以此为平台, 刘黎平、王致君、张鸿发等多位学者在双线偏振天气雷达的探测理论, 雷达数据质量控制, 雷达产品在定量测量降水量与降水粒子相态识别等方面做了大量的研究工作^[6-9], 为中国双线偏振天气雷达的发展奠定了基础。进入 21 世纪, 随着国内新一代多普勒天气雷达布网的逐步完善, 在这些雷达的基础上进行双偏振改造的研究工作也已展开^[10-11]。中国气象科学研

收稿日期: 2016-10-28; 修订日期: 2018-01-06

基金项目: 国家自然科学基金项目(41375120); 山东省气象局重点科研项目(2016sdqxz06)

作者简介: 苏添记, 男, 工程师, 主要从事气象雷达运行保障工作, timkysho@126.com。

通信作者: 葛俊祥, 男, 教授, 主要从事雷达系统、微波毫米波及天线理论与技术研究, jxge@nuist.edu.cn。

究院、中科院寒区旱区环境与工程研究所等科研院所和一些天气雷达厂家相继研制或改造出了 X、C 和 S 波段的双线偏振多普勒天气雷达^[12-15]。与第一部双线偏振天气雷达相比,这些雷达具有更高的测量精度,且具备多普勒功能。

双偏振天气雷达相比单偏振天气雷达,能获取更多的观测参量,这些双偏振参量在雷达定量测量降水、降水粒子的相态识别、杂波抑制等方面应用广泛,其性能比单偏振天气雷达更优越。郑佳锋等^[16]利用双偏振天气雷达在 12 次降水过程中进行定量测量降水试验,对比了单偏振参量测雨方程和双偏振参量测雨方程之间的区别,并使用 174 个自动雨量站数据进行效果检验,结果表明,在大雨以上量级的降水中,使用双偏振天气雷达进行定量测量降水的误差比单偏振雷达明显降低。魏庆等^[17]的试验结果也表明,在降水强度 $>5 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 时,双偏振天气雷达定量测量降水的误差明显比 SA 新一代天气雷达(单偏振)要好。程周杰等^[18]利用双偏振雷达探测数据结合温度廓线数据反演云粒子相态,得出了层状云在不同发展阶段的不同高度上水凝物的各种相态,反演出的相态共计 11 种。史朝等^[19]通过统计分析降水和晴空条件下双偏振天气雷达的探测数据,发现地物和降水回波的偏振参量具有明显差异,利用这些差异特性设定杂波抑制阈值实现了地物杂波识别。双线偏振天气雷达的这些应用,必须依赖于其系统的稳定性能和准确的探测数据。

本文从雷达数据质量控制和雷达偏振参量的测量精度两大方面,对双偏振天气雷达系统在中国的发展进行详细叙述,并描述了双偏振天气雷达的研究新进展,展望未来的发展趋势。

1 双偏振天气雷达系统及技术指标

与单偏振(一般为水平偏振)天气雷达系统相

比,双偏振天气雷达系统增加了一条垂直发射通道和垂直接收通道。水平和垂直双通道的各项性能指标应一致,通道间加装正交隔离器实现严格隔离。中国首部双偏振天气雷达系由单偏振的 713 雷达改装而来,在水平通道的基础上加装垂直通道(图 1 虚线部分),由大功率微波开关(环流器)实现双通道隔离^[5]。

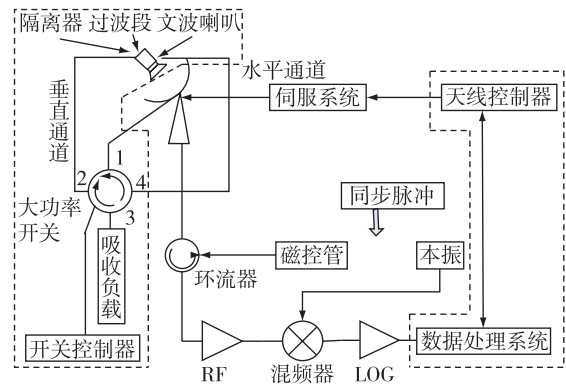


图 1 中国首部双偏振天气雷达工作原理框图
Fig.1 Block diagram of the first dual-linear polarization weather radar in China

双偏振天气雷达的主要技术指标有双通道一致性、双通道极化隔离度以及偏振参量的测量精度。双通道一致性要求双通道的增益、天线波瓣宽度等参数尽量相同,双通道极化隔离度越大越好。双偏振天气雷达测量的偏振参量主要有差分反射率因子 Z_{dr} , 差分传播相移 Φ_{dp} , 差分传播相移率 K_{dp} , 零滞后互相关系数 $\rho(0)_{hv}$ 等。随着技术的不断进步,这些技术指标将不断得到提高,与第一部双线偏振天气雷达相比,由北京敏视达雷达有限公司在 2014 年生产的同为 C 波段双偏振多普勒天气雷达的 NUIST-CDP 有更好的技术指标,且具备多普勒功能(表 1)。

表 1 NUIST-CDP 与中国首部双线偏振天气雷达主要技术指标

Table 1 Parameters of NUIST-CDP and the first dual-linear polarization weather radar in China

双线偏振天气雷达	波段	天线直径/m	波瓣宽度/ (°)	双通道增益差/dB	双通道交叉极化隔离度/dB	接收机动态范围/dB	可测双偏振参量及精度
中国首部	C	3.8	1.2	0.5	23.5	60	$Z_{dr}/0.2 \text{ dB}$
NUIST-CDP	C	8.5	0.54	0.1	40	90	$Z_{dr}/0.2 \text{ dB}; \Phi_{dp}/2^\circ;$ $K_{dp}/(0.2^\circ \cdot \text{km}^{-1}); \rho(0)_{hv}/0.01$

2 雷达数据质量控制

雷达数据质量受地物杂波污染、雷达系统误差和随机误差、降水粒子的不均匀导致的回波信号涨落等因素的影响。双线偏振天气雷达测量的偏振量如差分反射率因子 Z_{dr} 、差分传播相移率 K_{dp} 以及零滞后互相关系数 $\rho(0)_{hv}$ 等都是小值量,对同一目标,这些双偏振参量比单偏振天气雷达的反射率因子、平均径向速度值要小 1~2 个数量级,因此,对双线偏振天气雷达系统提出了更高的性能要求。

2.1 地物杂波的识别和抑制

目前,地物杂波对雷达目标信号的影响是无法根除的。双偏振雷达抑制地物杂波的方法主要是利用地物杂波与降水回波的统计特征间的区别,设计滤波器予以剔除。刘黎平和王致君^[20]在统计了 15 次对流云和 13 次层状云降雨以及晴空条件下 10 个立体扫描的地物回波的水平反射率因子 Z_h 和差分反射率因子 Z_{dr} 分布的基础上,得出结论:在不同

的区域,降雨回波 Z_{dr} 大于零,且 Z_h 增大 Z_{dr} 也增大;地物回波 Z_{dr} 大部分为负;降雨回波的 Z_h 和 Z_{dr} 空间变化率较小,而地物回波的 Z_h 和 Z_{dr} 空间变化率则较大。根据 Z_h 、 Z_{dr} 的不同分布及空间变化规律,通过设定一定的阈值来设计一个剔除地物回波的模式,在国内首部双线偏振天气雷达实测资料的应用中取得了较好的效果。曹俊武^[21]利用美国 KOUN 双线偏振多普勒天气雷达观测资料,分析了降水和地物回波的偏振参量特性。 Z_h 、 Z_{dr} 的特性与前述基本相同,另外还分析了降水和地物的零滞后互相关系数 $\rho(0)_{hv}$ 的不同特性,降水的 $\rho(0)_{hv}$ 一般在 0.95 以上,而地物的 $\rho(0)_{hv}$ 一般在 0.8 以下。以此为基础,不考虑径向速度和谱宽,并且缺乏晴空回波资料的情况下,综合考虑降水和地物回波的 Z_h 、 Z_{dr} 和 $\rho(0)_{hv}$ 不同特性,设定不同的识别阈值,建立了一个地物回波识别模式,通过实测资料的检验,效果较好(图 2)。

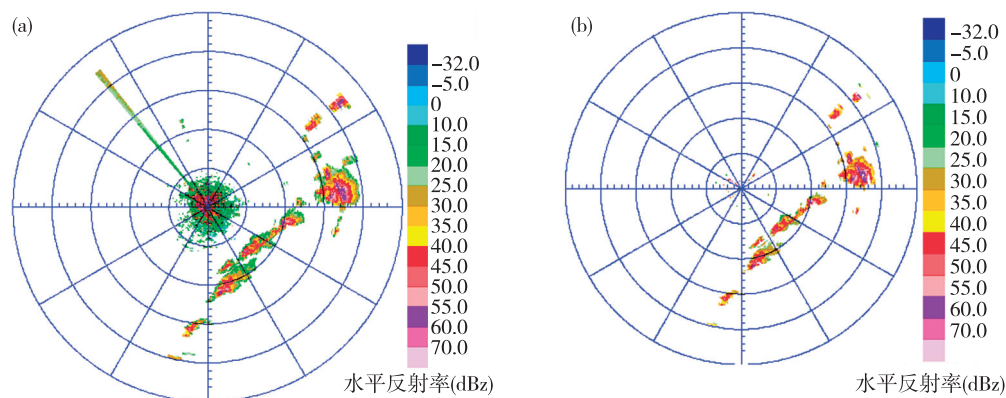


图 2 地物杂波抑制前(a)后(b)的雷达产品(Z_h)图

Fig.2 Radar products before ground clutter suppression (a) and after(b)

杜牧云^[22]、杜牧云等^[23]按纯地物回波和地物与降水混合回波进行分类,构建地物回波识别模式,取强度、速度和偏振特征相关的 8 个雷达参量作为模式的输入参数。对不同类型的地物回波,输入参数设置不同的权重。用模式的输出值来辨别地物回波,验证效果较好。吴欢和黄兴友^[24]利用地物回波区别于降水回波的 Z_h 和 Z_{dr} 特性,并结合地物杂波图识别地物回波。当分辨点被识别为地物,则取该点上空所有的 PPI 层的数据(避开零度层亮带)作最小二乘法拟合得到回波廓线,向下进行数据外推插值,这样就用上层的拟合数据来取代底层的地物回波数据达到地物回波抑制的目的。外场实测数据检验结果显示在一定程度上订正了受地

物杂波污染的底层回波。

2.2 雷达系统误差和标定

与单偏振天气雷达相比,双线偏振天气雷达在性能上有更加严格的要求,而且对具有偏振雷达性能特性的指标提出了相应的误差范围。

基于双线偏振雷达的测量要求,王致君^[25]探讨了天线系统、接收机和数据处理系统的标定。提出了利用系留金属球标定法和小雨标定法对天线两通道的增益进行标定,检查两通道的隔离度。

史朝和何建新^[26]基于某 X 波段双极化多普勒天气雷达系统,分类型对影响不同双极化参量测量的系统误差进行了分析。理论分析得到,双通道信噪比的不一致以及系统噪声功率是引起 Z_{dr} 测量误

差的主要因素,而两路接收通道相位噪声在统计意义上的差异导致了差分传播相移 Φ_{dp} 的误差。而差分传播相移率 K_{dp} 以及零滞后互相关系数 $\rho(0)_{lv}$ 的测量满足无偏性要求,不需要进行标定。依此设计了误差订正算法模块并进行了验证。之后,又以 WSR-98XD 雷达为试验平台,分析得到的 Z_{dr} 系统误差的 3 个主要来源(发射机功率分配不均、馈线插损不一致与双通道接收机增益不一致),进行了信号源法、太阳法、降雨法 3 种标定方法的试验,发现发射机功率分配不均与双路馈线插损不一致所引入的误差较小,且相对稳定^[27]。 Z_{dr} 探测误差主要源自接收机有源通道增益的不一致,且在全动态范围内该误差的起伏与输入信噪比有关。将全动态范围分为大信号段、线性段与小信号段 3 个区间,分别进行误差标定试验,结果表明,接收机有源通道增益不一致引入的误差时间稳定性较差,需要对其进行定时标校。指出相比硬件幅相修正方式,软件方式更适合差分反射率这种细微、且在全动态范围具有非线性特点的误差修正。

徐坤等^[28]利用中科院灾害性天气国家重点实验室的 C 波段和北京市气象局的 X 波段两部双线偏振多普勒天气雷达,分析了各自的观测资料后,提出了一种差分反射率因子的误差订正方法。利用雷达基数据的回波强度反算进入接收机的回波功率,根据预先设置好的每点回波功率对应的差分反射率因子值,对 Z_{dr} 进行订正。另外,在系统信噪比小于 20 dB 时,系统带来的误差不可忽略。

刘蕾^[29]利用四创公司 2007 年研制的 3836 型 C 波段双偏振多普勒天气雷达,分析了能导致差分反射率因子 Z_{dr} 测量误差的雷达系统随机误差,包括有双通道高功率铰链旋转,双通道接收机噪声底增益不一致,天线的交叉极化,极化波束宽度不一致等方面引入的随机误差。设计了一种基于标定源的差分反射率误差修正方法,先检测双偏振通道(包括发射和接收铰链)的一致性(包括幅度和相位),通过外接信号源来进行误差标校。另外,指出了接收机底噪不一致是差分反射率测量误差订正亟需解决的问题。

2.3 双通道一致性和极化隔离度

前述已经指出,双通道的一致性影响着雷达偏振参量的测量误差,魏洪峰^[30]针对双线偏振多普勒天气雷达的双通道一致性的含义、基本要求、决定因素以及对雷达偏振参量的测量影响,提出大功率双路方位关节是决定双通道一致性的关键器件。

通过计算发现,无论双通道的幅度不一致还是相位不一致,都将导致雷达发射信号极化方式的改变,并会分别给差分反射率因子和差分传播相移带来 1.4 倍的误差。王致君^[31]提出,由于偏振雷达获取的圆退偏振比 CDR 、椭圆退偏振比 EDR 、线性退偏振比 LDR 参量变化范围通常在 $-10 \sim -35$ dB 之间变化,要保证探测数据精度,要求双通道隔离度最好 ≤ -35 dB。李喆等^[32]通过理论分析和计算,探讨了双偏振天气雷达在不同的工作模式下,线性退极化比的测量误差对双偏振天气雷达系统极化隔离度的要求,双发双收(SHV)模式要优于 -30 dB。

孟庆春等^[33]分析了天线、接收机、旋转关节、馈线对双通道一致性的影响,并介绍相应的测试方法,同时介绍了天线双通道隔离度的测试方法。使用这些方法对北京市气象局 C 波段双线偏振天气雷达进行了测试,对测试数据进行了分析,结果表明,天线方向图是影响偏振雷达双通道一致性的主要因素;接收机和馈线对双通道一致性的影响可以通过调整或订正参数来减小。

3 雷达偏振参量的测量精度

目前,双线偏振天气雷达测量的偏振量主要有差分反射率因子 Z_{dr} 、差分传播相移 Φ_{dp} 、差分传播相移率 K_{dp} 、线性退偏振比 LDR 以及零滞后互相关系数 $\rho(0)_{lv}$ 等,目前对这些参量的测量精度的研究主要侧重于差分反射率因子 Z_{dr} 和差分传播相移 Φ_{dp} 。

3.1 差分反射率因子的测量精度

差分反射率因子 Z_{dr} 的取值范围一般在 $-3 \sim +5$ dB 之间,其测量精度要求 $0.1 \sim 0.2$ dB。王致君^[34]从雷达的标定误差方面对 Z_{dr} 的测量精度进行了考察,一般要求双通道天线方向图电轴方向偏离小于 0.2° ,第一旁瓣小于 -23 dB,主瓣宽度相差不超过 0.1° ,并且接收特性曲线的标定误差必须小于 0.5 dB^[5]。同时,又从信号处理的角度分析得出,波长为 5.6 cm、脉冲重复频率 PRF 取 $1\ 000$ Hz、脉宽为 $1\ \mu\text{s}$ 、距离积分长度为 1 km 时,双线偏振雷达为了满足 Z_{dr} 的测量精度要求,至少要在一个方位角里采集 54 对触发脉冲的数据进行平均才能达到。刘蕾^[29]利用 3836 型 C 波段双偏振多普勒天气雷达分析能导致差分反射率因子 Z_{dr} 测量误差的雷达系统随机误差时,提出了一种基于标定源的修正方法,在云南洱源、北京和合肥分别进行了探测效果检验,通过对小雨/雪的实际探测结果与一般理论值

比对, Z_{dr} 测量误差最优为 0.5 dB。

3.2 差分传播相移 Φ_{dp} 的测量精度

丁青兰等^[35]从理论公式出发,计算和分析了不同方位平均、距离平均、不同谱宽 σ_v 等因素对差分传播相移 Φ_{dp} 测量精度的影响,并参考 C 波段新一代天气雷达(单偏振)参数,计算结果表明, Φ_{dp} 的测量精度随着样本对数 M 、距离平均区间的增大而减小,随谱宽 σ_v 的增大而增大 ($\sigma_v = 1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时例外),当 $\sigma_v = 3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, $M=64$ 时, Φ_{dp} 的测量精度为 0.823° , 达到要求。曹俊武等^[36]具体介绍了差分传播相移 Φ_{dp} 测量精度的计算方法,在假定其他参数不变的条件下,计算了谱宽、相关系数和雷达波长不变时,不同样本对数所对应的 Φ_{dp} 的测量误差,并以 C 波段 CPDRW 双线偏振雷达在 2008 年实测的一次强降水过程的探测资料作了计算分析,结果表明,实际观测中很难满足均方差 $\delta < 1^\circ$ 的 Φ_{dp} 探测精度要求,还需要对原始探测资料进行预处理。

4 双偏振天气雷达研究新进展

4.1 产品应用

目前,双偏振天气雷达在降水粒子相态识别、雷达定量测量降水方面的应用研究已取得很多成果。汪舵等^[37]利用珠海 S 波段双偏振天气雷达资

料和广东 739 个自动雨量站观测资料,选取两种最优化雷达定量估测降水算法和传统的 $Z-R$ 关系算法,对珠海两次不同类型的降水过程进行雷达定量估测降水效果比对。两种最优化算法是基于相态识别的 HCA-LIQ 算法和(CSU)-ICE 算法,它们都利用了双偏振雷达观测参量对降水进行了相态识别并进行降水区域划分,前者对降水粒子进行了基于模糊逻辑算法的多达 10 种类型的细分,后者只区分液态水区和冰雹混合区。最优化算法依据不同的降水粒子的相态,选择不同的雷达定量估测降水公式。研究表明,由于引入了双偏振测量参量,对不同小时雨量的降水估测,最优化算法比传统 $Z-R$ 关系算法的估测偏差有较大幅度的降低,并且显示出较强的相关性和较好的稳定性。张羽等^[38]的研究也得到了类似的结论。

相对于双偏振天气雷达在雷达定量估测降水方面的应用研究,在降水粒子相态识别方面的研究较少,原因是雷达估测降水很容易找到实况观测数据来验证效果。利用偏振参量的观测值进行物理推断,判断降水云团中的降水粒子相态,是目前可行的方法^[14]。例如,冰雹的双偏振天气雷达回波的典型反射率因子特征是有较大的 Z_h (45 dBz 以上)和较小的 Z_{dr} (接近于 0 甚至是负值),如图 3 所示。

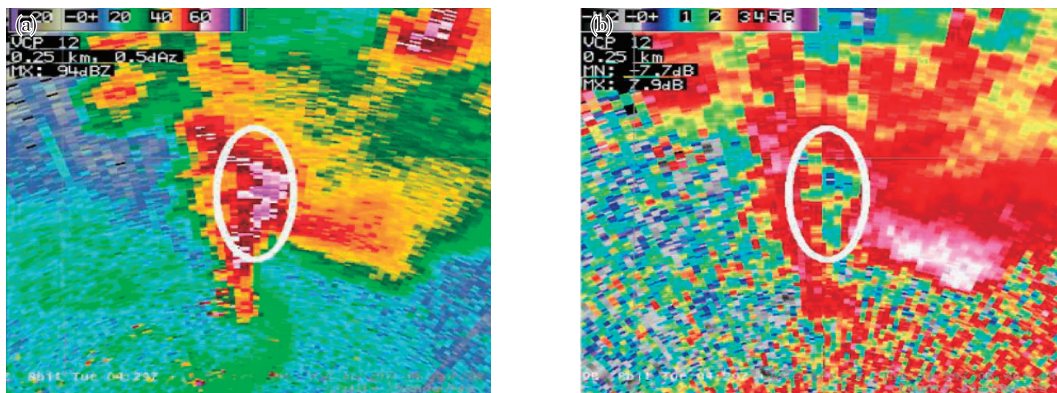


图 3 冰雹的双偏振雷达回波反射率因子特征:较大的 Z_h (a) 和较小的 Z_{dr} (b)

Fig.3 Dual polarization radar echo reflectivity character of hail: larger Z_h (a) and smaller Z_{dr} (b)

4.2 雷达系统

国内业务化的新一代天气雷达(单偏振)将在未来数年内进行双偏振技术升级,双偏振天气雷达能否实现业务化应用,依赖于其性能是否稳定达标。为未来双偏振天气雷达的实时业务化定标提供参考,李喆等^[39]在 2014 年使用机外仪表法、太阳法和小雨法对南京大学 C 波段双偏振天气雷达进行 Z_{dr} 标定,实验与计算的结果表明, Z_{dr} 的测量误差

最大为 0.17 dB。张治国等^[40]对北京房山 X 波段双偏振天气雷达的天线系统、接收系统的双通道一致性进行了测试分析,结果表明,由于接收双通道放大器增益存在的差异而导致双通道动态曲线的不一致,在 50~70 dBz 范围强回波的 Z_{dr} 会被引入 0.25~0.35 dB 的误差,这种误差很难通过调整接收机性能参数进行订正消除,将对探测数据产生不利影响。为保证偏振参量的探测精度,双偏振天气雷

达接收机可处理的回波信号必须有足够高的信噪比。对国内现有的 S、C 和 X 波段双偏振天气雷达, 需确保信噪比 ≥ 20 dB, 赵果等^[41] 以此为基础计算了这些雷达的有效探测距离, 认为我国现有双线偏振天气雷达的有效使用探测范围以 ≤ 100 km 为宜。

近几年, 在北京、上海、广东等大城市和经济发达地区, 布置了很多 S、C 和 X 波段双偏振天气雷达。其中, X 波段双偏振天气雷达因其体积小、成本低的特点, 是目前主要建设的双偏振天气雷达, 与 S、C 波段的新一代天气雷达组网观测, 起填补盲区及精细化探测的作用。另外, 最近几年我国在双线偏振毫米波天气雷达研究方面有较大进展。2015 年南京信息工程大学雷达技术研究所葛俊祥教授率先在我国研制成功地基 94 GHz 毫米波双线偏振多普勒测云雷达系统。该雷达采用单发双收全相参多普勒体制, 双雷达接收机的通道平衡增益误差小于 ± 0.5 dB, 天线采用电磁波正交模理论设计, 其双偏振馈电端口隔离度大于 42 dB。

5 小结

1) 双线偏振多普勒天气雷达在定量测量降水量、降水粒子相态识别、人工影响天气效果评估等方面有重要应用, 是目前正在研究开发的新型天气雷达。

2) 目前, 双线偏振天气雷达在中国的发展总体上仍处于业务应用前的研究、试验阶段, 在雷达系统性能测试评估、IQ 层的雷达数据预处理、雷达偏振参量的测量误差评估等方面仍然需要进行大量的研究工作, 以保证雷达在业务布网后有良好的应用效果。

3) 伴随着双线偏振天气雷达系统的不断发展, 双偏振天气雷达产品的应用研究工作应该及时跟进, 以最大限度地发挥雷达的建设效益。

致谢: 本文所用图表, 除已注明出处外, 图 2 得到了曹俊武博士的帮助, 图 3 来自北京敏视达雷达有限公司产品介绍文档, 在此表示感谢!

参考文献:

- [1] Seliga T A, Bringi V N. Potential use of radar differential reflectivity measurements at orthogonal polarizations for measuring precipitation [J]. J Appl Meteor, 1976, 15: 69-76.
- [2] Schuur T, Ryzhkov A V, Heinselman P, et al. Observation and classification of echoes with the polarimetric WSR-88D radar [R]. Norman, Oklahoma: NOAA/NSSL, 2003: 19-26.
- [3] Collier C G. Radar meteorology in United Kingdom [C]. 22nd Conference on Radar Meteorology, AMS. Zurich, Switzerland, 1984: 1-8.
- [4] Gilet M, Sauvegeot H, Testud J. Weather radar programs in France [C]. 22nd Conference on Radar Meteorology, AMS. Zurich, Switzerland, 1984: 15-20.
- [5] 王致君, 蔡启铭, 徐宝祥. 713 雷达的双线偏振改装 [J]. 高原气象, 1988, 7(2): 177-185.
- [6] 刘黎平, 王致君. 双线偏振天气雷达工作的十年总结 [J]. 大气情报, 1995, 15(4): 30-36.
- [7] 刘黎平, 王致君, 徐宝祥, 等. 我国双线偏振雷达探测理论及应用研究 [J]. 高原气象, 1997, 16(1): 99-104.
- [8] 张鸿发, 徐宝祥, 王致君, 等. 用双线偏振雷达的差分发射率因子 ZDR 技术测量降雨和雨滴谱的研究 [J]. 气象学报, 1996, 54(2): 154-165.
- [9] 王致君, 楚荣忠. 偏振天气雷达在气象中的应用简介 [J]. 干旱气象, 2004, 22(2): 62-68.
- [10] 梁海河, 徐宝祥, 刘黎平, 等. CINRAD/SA 雷达天线的辐射特性分析及其支持双线偏振升级的可行性研究 [J]. 气象学报, 2006, 64(6): 699-708.
- [11] 梁海河, 徐宝祥, 刘黎平, 等. 双偏振天气雷达同时收发模式的一种改进方法 [J]. 大气科学, 2006, 30(4): 635-644.
- [12] 刘黎平, 葛润生. 中国气象科学研究院雷达气象研究 50 年 [J]. 应用气象学报, 2006, 17(6): 682-689.
- [13] 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.
- [14] 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): 5-8.
- [15] 楚志刚, 胡汉峰, 黄兴友, 等. 窄波束 C 波段双偏振多普勒天气雷达及其探测能力分析 [J]. 高原气象, 2017, 36(4): 1072-1081.
- [16] 郑佳锋, 张杰, 朱克云, 等. 双偏振天气雷达测雨误差及水凝物识别分析 [J]. 气象科技, 2014, 42(3): 364-372.
- [17] 魏庆, 胡志群, 刘黎平, 等. C 波段偏振雷达数据预处理及在降水估计中的应用 [J]. 高原气象, 2016, 35(1): 231-243.
- [18] 程周杰, 刘宪勋, 朱亚平. 双偏振雷达对一次水凝物相态演变过程的分析 [J]. 应用气象学报, 2009, 20(5): 594-601.
- [19] 史朝, 何建新, 李兴华, 等. X 波段天气雷达地物回波的双偏振参量特征分析及应用 [J]. 高原气象, 2013, 32(5): 1478-1484.
- [20] 刘黎平, 王致君. 双线偏振雷达探测的云和地物回波的

- 特性及其识别方法[J].高原气象,1996,15(3):303-310.
- [21] 曹俊武.双线偏振多普勒雷达的资料质量控制及降水粒子相态识别方法的研究[D].北京:中国气象科学研究院,2006.
- [22] 杜牧云.双线偏振多普勒雷达资料分析与质量控制[D].成都:成都信息工程学院,2012.
- [23] 杜牧云,刘黎平,胡志群,等.双线偏振多普勒雷达资料质量分析[J].气象学报,2013,71(1):146-158.
- [24] 吴欢,黄兴友.X波段双线偏振雷达回波强度衰减和地物回波识别订正[J].气象科学,2014,34(1):32-38.
- [25] 王致君.数字化天气雷达和双线偏振雷达的标定方法初探[J].高原气象,1996,15(3):381-386.
- [26] 史朝,何建新.双极化多普勒天气雷达系统测量误差分析及系统误差校正方法研究[J].信号处理,2007,23(4A):498-501.
- [27] 史朝,史万里,何建新,等.双极化天气雷达差分反射率的标定[J].现代雷达,2013,35(1):6-10.
- [28] 徐坤,谢明元,刘黎平,等.C、X波段双线偏振多普勒雷达资料质量分析[J].成都信息工程学院学报,2009,24(4):329-332.
- [29] 刘蕾.差分反射率因子的误差分析及基于标定源的修正方法实现[D].合肥:安徽大学,2012.
- [30] 魏洪峰.双线偏振多普勒天气雷达的双通道一致性[J].气象科技,2007,35(5):732-735.
- [31] 王致君.偏振气象雷达发展现状及其应用潜力[J].高原气象,2002,21(5):495-500.
- [32] 李喆,王崇文,高玉春,等.双极化天气雷达的工作模式与极化隔离度[J].气象科技,2014,42(3):378-381.
- [33] 孟庆春,沈永海,苏德斌.双线偏振雷达双通道一致性测试方法研究[J].高原气象,2014,33(5):1440-1447.
- [34] 王致君.双线偏振雷达的设计问题[J].高原气象,1996,15(3):370-380.
- [35] 丁青兰,刘黎平,葛润生,等.双线偏振多普勒雷达测量精度的理论分析[J].应用气象学报,2003,14(1):30-38.
- [36] 曹俊武,胡志群,陈晓辉,等.影响双线偏振雷达相位探测精度的分析[J].高原气象,2011,30(3):817-822.
- [37] 汪舵,刘黎平,吴翀.基于相态识别的S波段双线偏振雷达最优化定量降水估测方法研究[J].气象,2017,43(9):1041-1051.
- [38] 张羽,田聪聪,罗聪.广州双偏振天气雷达在定量降水估测中的初步分析[J].广东气象,2017,39(3):73-76.
- [39] 李喆,李柏,赵坤,等.国产双偏振天气雷达差分反射率测量性能分析[J].气象科技,2016,44(6):855-859.
- [40] 张治国,张曼,仰美霖,等.X波段双线偏振天气雷达双通道一致性测试及分析[J].气象科技,2017,45(5):776-786.
- [41] 赵果,王致君,贾伟,等.双线偏振天气雷达有效探测范围研究[J].高原气象,2016,35(1):244-250.