

MaXPoI雷达及在人影探测业务中的应用

姚振东 余勇 杜雨铭 李建 王烁 苏德斌

(成都信息工程大学, 中国气象局大气探测重点实验室, 成都 610023)

摘要: 成都信息工程大学科研团队以全球广泛应用的X波段磁控管天气雷达为蓝本, 主导研制了基于大功率长寿磁控管发射机与接收相参体制一体化结构的X波段双偏振多普勒天气雷达系统MaXPoI。该雷达系统在75 km处的观测灵敏度优于-10 dBz, 最大程度地解决了速度精度与速度模糊问题, 具有反射率因子 Z_h 、差分反射率 Z_{dr} 、相关系数 ρ_{HV} 、差分相移率 ϕ_{DP} (或称比相差, K_{DP})、平均多普勒速度 (V) 和速度谱宽 (W) 等6种物理量测量参数, 这些参数可以确保数据质量可控, 并形成多种气象产品。该雷达系统在贵州省气象部门构建基层人工影响天气科学作业和管理模式——“威宁模式”的工作中, 充分发挥了强对流天气监测预警方面的优势, 其丰富的高时空分辨率雷达产品为天气雷达与高炮火箭智能联动的人工影响天气作业指挥提供有效依据, 能够有效提升人工影响天气作业质量。

关键词: 双偏振, 多普勒, 接收相参, 降水观测, 人工影响天气

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2022.02.006

MaXPoI Weather Radar and Application in Observation of Weather Modification

Yao Zhendong, She Yong, Du Yuming, Li Jian, Wang Shuo, Su Debin

(Key Laboratory of Atmospheric Sounding, Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610023)

Abstract: MaXPoI, a kind of dual-polarization Doppler weather radar, which is developed by a group from Chengdu University of Information Technology, is designed based on the X-band weather radar distributed in the developed countries. The radar is characterized by observational sensitivity better than -10 dBz at 75 km, and the advantage of identification of range fold by the coherent-on-receive technology. The radar have the abilities of detection of 6 kind variables, they are reflectivity Z_h , differential reflectivity Z_{dr} , co-polar correlation coefficient ρ_{HV} , differential phase ϕ_{DP} (rate, K_{DP}), average Doppler velocity V , and velocity spectral width W . These parameters can ensure that the data quality control, and form a variety of meteorological products. The radar, which has the prominent abilities of monitoring, forecasting and warning of severe convective weather, plays a significant role in the construction of Weining mode, a command management and operation of weather modification in Weining County. According to its abundant high spatiotemporal resolution products, the weather modification command system could conduct rocket and artillery seeding operation intelligently by monitor. It can effectively improve the quality of weather modification operation, and has practical significance to improve the level of meteorological disaster prevention and mitigation.

Keywords: dual-polarization, Doppler, coherent-on-receive, observation for precipitation, weather modification.

0 引言

2013年7月, 世界气象组织(WMO)人工影响天气研究专家委员会主席报告指出, 全球42个国家开展人工影响天气的云播种计划^[1], 这些工作在人工影响天气工作及科研方面产生了积极影响。2018年, WMO关于全球增雨活动的报告, 提出了各种气象雷

达在人工增雨工作中的重要作用, 并给出了有关测量参数的使用方法^[2], 是人工影响天气的作业决策和效果评估的重要依据。事实上, 自20世纪80年代使用多普勒天气雷达开始, 相关领域学者及专家对雷达测量降水和多普勒速度的性能与业务运行方法进行了研究和归纳^[3]。到1983年, 从NCAR的CP-2改造雷达首次获得了双偏振观测数据以来^[4], Bringi博士和V. Chandrasekar博士对双偏振天气雷达的电磁波探测机理、数据处理以及应用等问题一些研究进行了综合论述^[5]。随后的三十多年, 对双偏振天气雷达在大气观测中的应用, 双偏振雷达的研制与多普勒天气雷达的双偏振升级, 以及双偏振天气雷达的标定与数据质

收稿日期: 2020年9月24日; 修回日期: 2020年10月20日

第一作者: 姚振东(1964—), Email: dspyzd@cuit.edu.cn

资助信息: 公益性行业(气象)科研专项(GYHY201306072);

国家自然科学基金项目(41475033, 42075001);

四川省省属高校科研创新团队项目(14TD0019)

量控制等开展了大量研究工作，并且取得了丰硕的研究成果，同时对双偏振天气雷达的生产和应用起到了更好、更有效的促进作用，使得该领域显示出十分繁荣的景象。2019年，在*Radar Polarimetry for Weather Observations*一书中^[6]，作者对双偏振天气雷达在天气系统观测的宏微观特征量度进行了全面总结。综合上，双偏振雷达可以实现降水目标分类(HCA)，定量测量降水(QPE)，水凝物微物理特征检测(如雨滴谱Raindrop Size Distributions，雪粒子谱Snow Size Distributions)，云和降水中液/固态含水量测定(LWC/IWC)，中尺度强对流(MCSs)信标指示(如龙卷、超级单体)，非气象目标信标指示(如虫/鸟生物信标、烟柱-森林火灾信标、沙尘信标、火山灰信标等)。考虑到在一定信噪比条件下，相位与幅度无关的特点，差分传播相移率成为降水衰减补偿与部分波束遮挡补偿的依据；利用双偏振观测参数可方便地识别与处理地杂波与海杂波。

人工影响天气工作很大程度上是对云的观测结果进行推断后开展的。因此，云雷达也是人影工作中重要的观测设备。云雷达采用Ka波段或W波段工作，有垂直指向与扫描两种观测方式。在测量参数上，目前，云雷达一般采用多普勒参数测量(ZVW)模式，并行收发(STSR)的双偏振参数(Z_{dr} , ρ_{HV} , K_{DP})测量模式，以及单发双收的双偏振参数(ρ_{HV} , LDR)测量模式三种。云雷达也具有HCA、LWC/IWC、融化层识别等功能。双偏振扫描云雷达几乎全部采用“天线一收发一处理”一体化结构，即收发与处理部件全部安装在天线上，实现免旋转关节运行，最大程度地减少系统本身带来的误差。同时，在一定程度上，云可以近似看作大气运动的示踪物，由此可以测量大气垂直气流速度。

由于大气运动对人工影响天气作业(特别是烟炉催化模式)效果具有决定性的影响作用，因此用来测量大气运动的风廓线雷达仍然是人影工作中重要的观测设备。但是，我国目前使用的风廓线雷达，仍然存在一些需要解决的问题，如动态范围不足，根据国外经验需要至少105 dB的动态范围，以克服菲涅尔镜式反射以及降水回波等原因可能导致的接收机饱和问题，这要从硬件设计上考虑解决方法；抑制各种杂波干扰，包括射频干扰、地物污染、昆虫与飞鸟这类间歌杂波等，小波杂波滤波法是优先解决方案^[7]。智能峰值检测算法可在时频域处理以及不同波束回波中找到大气回波^[8-10]，极大地缓解观测的无回波区。这样，数据质量得到良好的控制。配合电声探测系统(RASS)，直接得到的风廓线与虚温廓线。通过信号处理算法，

可分离强降水回波资料，扩展雷达输出产品。

双波长双偏振多普勒雷达(D³R)，可以观测到更多的参数，其双波长比已经用于水凝物的相态识别中^[11]。甚至可以利用不同水汽含量的大气对不同波长的衰减程度差异来观测反演大气湿度^[12]。

篇幅原因，本文不再涉及这些内容。

随着天气雷达研究及应用的深入，近年来，国际上生产天气雷达的公司，如位于美国的EEC公司、Prosensing公司，德国的Gematronik公司等，已将原定几乎全面转向全固态雷达的发展方向，重新设定成固态雷达增强发射功率、磁控管雷达接收相参双偏振配置的格局。还有一些公司，如美国的Baron公司、Ridgeline公司，德国的Gamic公司以及意大利的ELDES公司等，致力于研制、生产磁控管双偏振多普勒天气雷达。由于这种雷达采用天线、收发系统与信号处理器等一体化的结构，避免了由于天线运动而引起的馈线性能变化，实现了低成本的双偏振雷达中，双通道幅相平衡问题，显现出高性价比的优势。

美国、加拿大、德国、意大利、韩国等发达国家，以及巴西、印度这类发展中国家，将X波段长寿磁控管双偏振多普勒天气雷达作为气象业务雷达网的补充(补盲雷达)，或用于气象灾害监测与跟踪、火山灰与沙尘暴等的监测与跟踪、甚至森林火灾的监测与跟踪等工作中^[13-17]。表1给出了当前一些典型天气雷达的特点。

事实上，MaXPol雷达在内陆地区试用，其性能已基本满足要求。但如果在沿海，并遇到像台风这样的强降水天气过程，其发射功率显得有些力不从心，观测距离会降低至30 km左右。这种情况，就需要像德国的Gematronik公司和美国的EEC和Baron公司那样，将发射功率提高到200~300 kW的水平才能表现出较好的性能。

鉴于探测物理量优先和数据质量优先的原则，本文主要讨论在WXR-MD-10多普勒天气雷达^[18]基础上，参考目前全球力推的X波段长寿磁控管双偏振多普勒天气雷达设计理念所研发的MaXPol雷达^[19]的结构、性能与直接观测结果及其价格优势。

1 MaXPol雷达简介

1.1 原理与结构特点

MaXPol雷达在参考国外先进的X波段雷达，如美国Prosensing公司的XPol，Baron公司的Gen3，ARC公司的X波段雷达和Redgline公司的RXM-25(由WMO认可，全球唯一的标准双波长双偏振多普勒天气雷达CHILL的X波段原型的独立脱离设计而成)等雷达，以及德国Gamic公司的GMWR-50DP，Gamatronik公司

表1 天气雷达类别、用途与特征
Table 1 Weather radar classification, application and characteristics list

分类	制式	天线	代表公司/型号	测量参数、主要特征与性能	价格或性价比	应用领域或主要用途
旧式	磁控管发射机非相参	抛物面	LAWR ¹⁾ /缺省	单参数Z。X波段, 发射功率为10~25 kW, 脉宽为0.4 μs。组成网络工作。定量测量距离约为20~30 km, 波束宽度为2.4°~3.6°, 距离分辨率为60 m, 观测灵敏度为25 dBz@20 km	约3万欧元, 性价比高	作为面雨量计(特别山区)使用, 甚至反演微物理量
	磁控管发射机接收相参	抛物面	GMWR-25-SP/Gamic	多普勒参数Z/V _r /W, 输出SQI。X波段, 长寿磁控管发射功率为25 kW, 脉宽为50 ns~0.75 μs。接收机动态范围为94 dB。定量测量距离为50~150 km, 波束宽度为1.3°~2°, 可移动, 观测灵敏度为10 dBz@70 km	价格不详, 性价比高	作为业务雷达网的补盲雷达或单站使用
传统	速调管发射机全相参	抛物面	CINRAD/敏视达	多普勒参数Z/V _r /W, 输出SQI。S波段, 发射功率为大于650 kW, 脉宽为1/1.57 μs或4/4.7 μs。动态范围为-10~70 dB(降水模式), -28~28 dB(晴空模式)。定量测距强度为200 km, 速度为150 km, 波束宽为1°, 观测灵敏度为7 dBz@200 km	价格约1300万元, 性价比适中	我国气象业务布网雷达, 正在逐步升级为双偏振雷达
	固态发射机全相参	平板缝隙阵列	E700XD/EWR	多普勒参数Z/V _r /W。X波段, 发射功率为大于200 W, 脉宽为1/10/40/70 μs(脉压后1 μs)。定量测距强度为150 km, 速度为100 km, 波束宽度为3.6°, 可移动, 观测灵敏度为11.4 dBz@92 km	价格高, 性价比一般	龙卷、水灾等监测、跟踪和预警
			MaXPoL/巨波雷达	双偏振多普勒参数Z/V _r /W/Z _{dr} /ρ _{HV} /φ _{DP} 或K _{DP} , 输出SNR和SQI。X波段, 长寿磁控管发射功率为50 kW, 脉宽为0.56/1.12 μs。接收机动态范围为优于90 dB。定量距离75 km/150 km两档, 波束宽度为1.4°, 观测灵敏度8 dBz@75 km	价格约240万元, 性价比高	气象补盲雷达、气象灾害防御、人工影响天气、民航支线气象服务等
	磁控管发射机接收相参	抛物面	RXM-25/Ridgeline	双偏振多普勒参数Z/V _r /W/Z _{dr} /ρ _{HV} /φ _{DP} 或K _{DP} , 输出NCP。X波段, 长寿磁控管发射功率为25 kW, 脉宽为可设置最大1.6 μs。接收机动态范围为优于90 dB。定量距离50 km, 预警为150 km, 波束宽度为1.4°, 观测灵敏度4.9 dBz@30 km	价格约50万美元, 性价比高	龙卷、山洪与城市内涝等气象灾害的监测、跟踪和预警, 雷达测试台
			DEFENDER-X200/EEC	双偏振多普勒参数Z/V _r /W/Z _{dr} /ρ _{HV} /φ _{DP} 或K _{DP} , 输出NCP。X波段, 长寿磁控管发射功率为200 kW, 脉宽为0.2~2 μs。接收机动态范围优于105 dB、灵敏度为-114 dBm。观测灵敏度为-18 dBz@30 km	价格偏高, 性能高, 性价比高	龙卷、台风、雷暴等气象灾害的监测、跟踪和预警
双偏振			NEXRAD升级/Baron2	双偏振多普勒参数Z/V _r /W/Z _{dr} /ρ _{HV} /φ _{DP} 或K _{DP} , 准确度为1 dB/1 m·s ⁻¹ /0.5 m·s ⁻¹ /0.1 dB/0.006/1°。输出SNR和SQI。S波段, 速调管, 发射功率为750 kW, 脉宽为1.57/4.71 μs。接收机动态范围为优于93 dB。定量距离400 km(强度为)/300 km(速度和偏振), 波束宽度为1°, 观测灵敏度-9.5 dBz@50 km(1.57 μs), -18.5 dBz@50 km(4.71 μs)	价格高, 性能高, 性价比中	美国气象业务布网雷达, 兼有非气象目标监测功能
	速调管发射机全相参	抛物面	CINRAD SA-D/敏视达	双偏振多普勒参数Z/V _r /W/Z _{dr} /ρ _{HV} /φ _{DP} 或K _{DP} , 误差为1 dB/1 m·s ⁻¹ /1 m·s ⁻¹ /0.2 dB/0.01/3°。输出SNR和SQI。S波段, 速调管, 发射功率为650 kW, 脉宽为1.57/4.7 μs。接收机动态范围为优于115 dB。定量距离460 km(强度)/230 km(速度和偏振), 波束宽度为1°, 接收机灵敏度-110 dBm(1.57 μs), -114 dBm(4.7 μs)	价格高, 性能高, 性价比中	我国气象业务布网雷达升级
	固态发射机全相参	抛物面	Ranger-X5/EEC	双偏振多普勒参数Z/V _r /W/Z _{dr} /ρ _{HV} /φ _{DP} 或K _{DP} /L _{dr} 。X波段, 双发射机, 功率为2×500 W, 脉宽为0.4~100 μs。接收机动态范围为优于95 dB、灵敏度为-114 dBm。波束宽度为1.3°, 可移动, 观测灵敏度18 dBz@120 km	价格高, 性能高, 性价比中	龙卷、台风、雷暴等气象灾害的监测、跟踪和预警
			SSWR-C/Toshiba	双偏振多普勒参数Z/V _r /W/Z _{dr} /ρ _{HV} /φ _{DP} 或K _{DP} /L _{dr} 。C波段, 发射功率为2×3.5 kW, 脉宽为1~129 μs。接收机动态范围为110 dB、灵敏度-110 dBm。波束宽度为1.2°。距离分辨率为150 m, 观测距离230 km	价格高, 性能高, 性价比中	日本气象业务布网雷达
	行波管发射机全相参	抛物面	RaXPoL/Prosesing	双偏振多普勒参数Z/V _r /W/Z _{dr} /ρ _{HV} /φ _{DP} 或K _{DP} /L _{dr} 。X波段, 发射功率为20 kW, 脉宽为0.1~40 μs。方位扫描速度180 s ⁻¹ , 接收机动态范围为优于90 dB、噪声系数3 dB。波束宽度为1°, 移动观测	价格高, 性能高, 性价比低	跟踪龙卷、雷暴等, 主要用于气象研究
	行波管发射机无源相控阵	阵列	MWR-05XP/Prosesing	多普勒参数Z/V _r /W。X波段, 发射功率为26 kW, 脉宽为1 μs。俯仰相扫, 方位机扫, 接收机灵敏度-108 dBm。笔形波束, 波束宽度为方位1.8°×俯仰2°, 移动观测, 距离分辨率为150 m, 有效距离1~75 km	价格高, 性能高, 性价比低	跟踪龙卷、雷暴等, 主要用于气象研究
快扫	(固态)有源相控阵多功能双偏振	阵列	MPAR/NSSL3	S波段, 具有飞机监视和天气监视两种模式。金字塔4阵面天线。前者垂直偏振每阵面24波束, 后者双偏振每阵面12波束。每面直径4 m, 收发阵元5000个, 每阵元发射功率为8 W。波束宽度为1.6°, 旁瓣约50 dB, 交叉隔离度发射40 dB, 接收35 dB。天线阵成本5万元/m ² 。	价格高, 性能高, 综合性价比高	现在处于研究试用阶段, 将来用于综合性业务
	(固态)有源相控阵全相参	阵列	PAWR/JRC	多普勒参数Z/V _r /W。X波段, 发射功率为1.6 kW, 距离分辨率为75/100/150 m, 体扫(方位机扫)速度6r.p.m@30 km/2r.p.m@80 km。俯仰电扫360个脉冲。宽为窄收模式工作, 接收波束宽度为方位1°×俯仰1°。	价格相对较低, 性价比高	监测跟踪强降水、龙卷、雷暴等灾害, 正在试用
	(固态)有源相控阵双偏振	阵列	MP PAWR/Toshiba	双偏振多普勒参数Z/V _r /W/Z _{dr} /ρ _{HV} /φ _{DP} 或K _{DP} 。X波段, 俯仰电扫, 方位机扫, 体扫时间30 s, 距离分辨率为150 m。收发分离双天线, 宽窄收模式工作, 接收波束宽度为方位1.2°×俯仰1.2°, 有效测距60 km, 灵敏度12 dBz@30 km	价格相对较低, 性价比高	价格相对较低, 性价比高

注: 1) LAW R指low-cost local area weather radars, 即廉价局地天气雷达, 有船用雷达改造和直接设计两种, 生产公司不详, 德、法、意等欧洲国家在使用。2) NEXRAD生产为Lockheed Martin公司, 双偏振雷达升级由Baron公式完成。3) NSSL领导实施的多功能相控阵改造计划, 最初NWRT MPAR无源相控阵在NEXRAD上改造, 速调管发射机, 功能试验宣告完成。后来采用有源相控阵技术。2018年安装、测试完毕, 进行试验。4) Z或Z_{dr}, 反射率因子; V_r, 多普勒速度; W, 速度谱宽; SQI, 信号质量严重(也称NCP, 归一化相参功率); Z_{dr}, 差分反射率; ρ_{HV}, 相关系数; φ_{DP}或K_{DP}, 差分传播相移或差分传播相移率。5) 所有系统全部使用数字接收机。试用固态发射机(特别是100W量级小功率发射机)的雷达仍然存在由于窄脉冲补盲造成的灵敏度近低远高的跳变问题。6) 双波长雷达并非主要针对测量降水, 且没有业务化使用, 这里不予列出。

的METEOR 60DX, 意大利ELDES公司的WR-25XP等雷达的实用化和基于高数据质量要求的设计理念, 沿用其磁控管雷达收发单元灵巧, 可置于天线俯仰平台上的设计方法, 避免系统因观测需要, 发生方位俯仰转动, 从而引起旋转关节及其他长距离微波传输馈线(波导)系统的参数变化而导致的系统测量误差; 使用接收相参脉冲雷达制式, 通过先进而可靠的数字信号处理技术, 获得良好的相参接收效果; 采用结构简单的同发同收(STSR)水平(H)/垂直(V)双线偏振工作模式, 以获得高质量多普勒参数(Z , V , W)和双偏振参数(Z_{dr} , ρ_{HV} , φ_{DP} 或 K_{DP})的测量结果。

MaXPol为英文Magnetron X Band Dual-Linear Polarization Weather Surveillance Radar的缩写, 意为磁控管X波段双偏振多普勒天气雷达。其原理和结构示意图如图1。该雷达按照功能分成了3大部分: 天线及支撑平台部分是雷达的核心, 雷达控制室部分是必须的辅助部分, 运行(作业指挥)中心是应用场景。雷达控制室的计算机主要用途是检查和监控, 可以省略; 如果空间有限, 或雷达控制室与运行中心相隔很近,

二者是可以合二为一的。

雷达工作流程描述如下。

发射过程: 数字信号处理器产生参差频率的触发脉冲, 并控制磁控管发射机工作于所需脉宽, 形成50 kW大功率微波输出。该输出经过3 dB功率分配后形成两路各25 kW的功率微波信号, 通过定向耦合器和环流器, 由天线发射出去, 实现水平与垂直偏振探测。同时, 两个发射通道通过各种的正反向定向耦合器, 采集发射与接收功率, 数字化后被用来检测发射功率与驻波比, 以评估两个发射通道的各自性能与平衡度, 同时提供发射样本的中频信号。

频率跟踪: 通过对发射中频样本进行瞬时测频, 控制频综(FS)产生一个与磁控管频率(f_0)多出1个中频频率(IF)的稳定本振信号(f_L), 即 $f_L = f_0 + IF$ 。

接收过程: 雷达天线接收到的水平(H)和垂直(V)偏振回波信号, 经各自的环流器和限幅器后进入微波中频模块。在这里, 回波信号首先被两个高增益低噪声放大器放大到合适的电平, 再被两个单边带混频器下变频为H和V偏振中频信号。

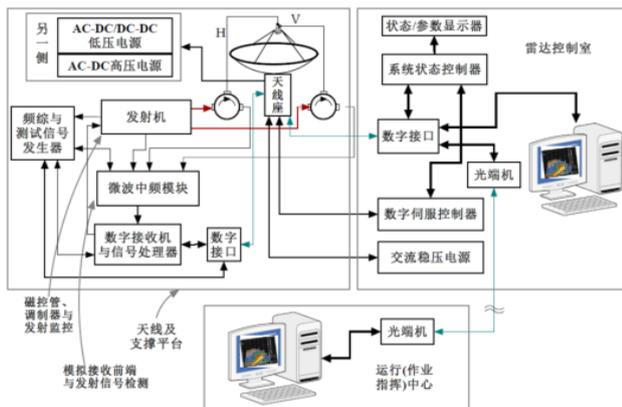
数字下变频: 上述中频信号被数字中频接收机(IFD), 以采样频率 f_s 直接数字化为数字中频信号, 然后被使用频率为 IF 的复本振信号的数字下变频器(DDC), 下变频为复基带信号 I_h/Q_h 和 I_v/Q_v 。发射中频样本也被数字下变频为 I_T/Q_T 。由于是数字信号处理, DDC在信号处理器(DSP)中实现。

数字式接收相参处理: 复基带信号($I_T + jQ_T$)包含了磁控管工作的频率漂移和随机初相; 利用它, 与回波信号($I_h + jQ_h$)和($I_v + jQ_v$)进行一种特殊的特殊处理, 可消除磁控管不稳定造成的影响, 获得全相参系统类似的相参性能, 输出相参复基带信号。

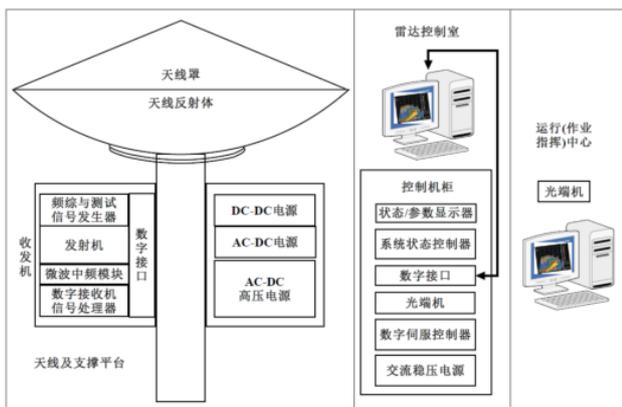
信噪比提高: 使用相参积累技术, 获得处理增益, 提高信噪比。发射脉宽为 τ (其带宽 $BW = \frac{1}{\tau}$), 可获得 $10 \times \log_{10}(\frac{f_s}{BW})$ 的信噪比改善, 既提高了灵敏度, 又扩展了动态范围。

接收性能最优化: 利用瞬时噪声功率检测技术, 来自动选择系统工作在不同时间、方位、仰角以及太空中噪声的状态下的处理阈值, 随时获得最佳信噪比。

地物杂波处理: 可选择使用时域滤波、或频域高斯模型自适应滤波(GMAP, 只考虑幅度信息)、或杂波环境分析自适应滤波处理(CLUtter Environment ANalysis using Adaptive Processing filter, CLEAN-AP算法, 同时考虑幅度与相位), 获得最佳地物、超折射杂波处理效果。



(a) 原理图



(b) 系统功能结构图

图1 MaXPol雷达原理(a)与结构图(b)

Fig. 1 Block scheme and structural scheme for MaXPol

信息提取：采用时域相关矩估计算法和频域谱分析算法，提取多普勒信息 (Z , V , W)；在时域上对双通道复基带信号 (I_H+jQ_H) 和 (I_V+jQ_V) 进行幅度和相位的处理，获得双偏振参数 (Z_{dr} , ρ_{HV} , φ_{DP} 或 K_{DP})。

1.2 性能指标

吸收并本土化国外发达国家先进的雷达标定方法，以硬件参数测量为基础，以小雨法、太阳与地物结合法、标准目标反射法等^[20-21]，来对雷达进行标定，效果完全堪用。

收发机性能可通过仪表进行测量，这也是我国每年CINRAD雷达巡检需要完成的工作。但是，由于条件限制，天线的指标往往只能靠厂家测定。由于天线旁瓣电平、H/V的平衡和隔离度直接决定了双偏振雷达的性能^[22]，使用中检查天线性能是很必要的。地物杂波测量结果比对法是一种简单可行的方案。

2019年3月25日中国气象局观测司发布了《X波段双线偏振多普勒天气雷达系统功能规格需求书（第一版）》，该书虽然没有完全参照WMO的相关指标要求，但是给出了雷达设备应达到的基本条件。

图2给出了在测量量程范围内，MaXPol雷达的设计性能。实际观测中，验证了雷达测量性能的裕量。

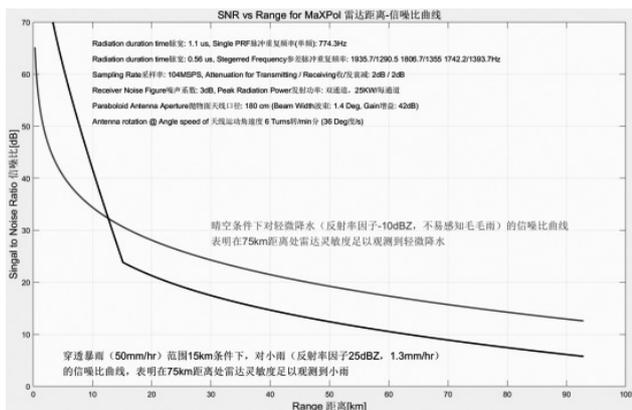


图2 MaXPol雷达测量范围内的性能

Fig. 2 SNR (means Sensitivity) of MaxPol in measurement range

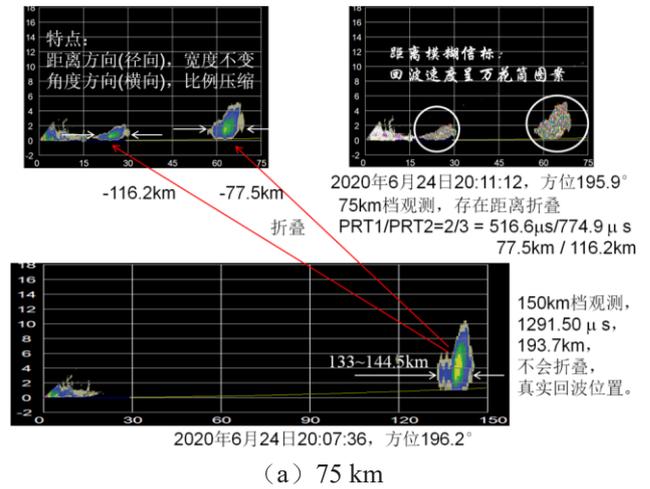
1.3 距离模糊识别能力

MaXPol雷达可选用3：2、4：3和5：4的参差脉冲重复频率，在75 km距离档，不模糊速度达到55.7 m·s⁻¹，在150 km距离档，不模糊速度也能达到约28 m·s⁻¹。因此，在测量距离档位，速度模糊问题基本不会出现。

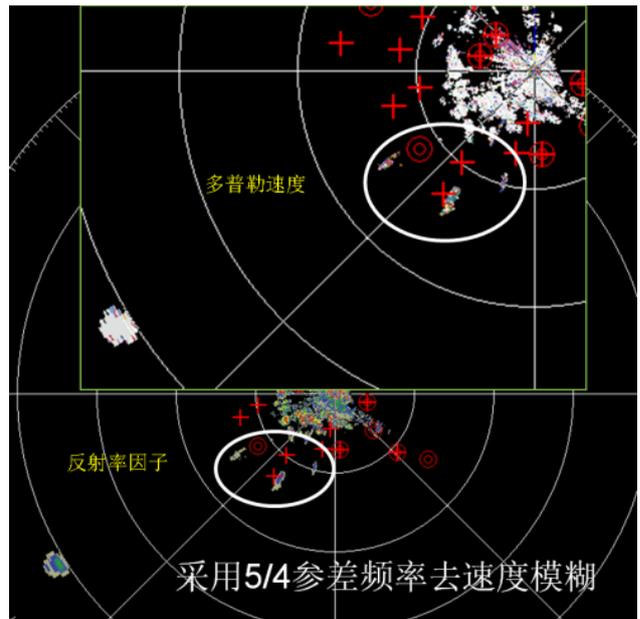
图3a给出了75 km距离档的距离模糊实例。实际目标在150 km距离档清晰可见。在75 km距离档观测时，由于参差重复频率的关系，在两个距离上显示该目标。2：3参差重频的周期分别是516.6 μs和774.9 μs，

其模糊距离分别为77.5 km和116.2 km。133至144.5 km距离的目标，模糊位置是133-77.5=55.5 (km)至144.5-77.5=67 (km)；以及133-116.2=16.8 (km)至144.5-116.2 = 28.3 (km)。

图3b为150 km档的距离模糊实例，由于距离已经超过150 km，不再加以分析。



(a) 75 km



(b) 150 km

图3 MaXPol雷达具有距离模糊识别能力
Fig. 3 The MaXPol radar is with the ability of identifying range folding

1.4 差分相移模糊处理

差分传播相移模糊是因为在径向，电磁波传播过程中，垂直偏振与水平偏振的累计相移差超过了±180°而引起折叠。由于全球业务雷达多属S波段，长的波长不太容易引起差分相移的折叠。因此不太容易见到这方面的描述。

MaXPol是X波段雷达,这种雷达比起S波段来,同样含水量的降水,引起的差分传播相移要大3倍。因此,X波段双偏振雷达是比较容易出现差分传播相移模糊的。图4是MaXPol雷达出现差分传播相移模糊的两个实例。

因为差分传播相移率的估计是以差分传播相移

为基础的,一旦出现模糊,将引起其差分传播相移率的极大误差。根据天气系统存在连续性的本质,采用连续性原理,可以实现差分传播相移模糊的检测与校正。这是以 360° 为周期的解模糊处理,是一种比较简单的判断和运算。

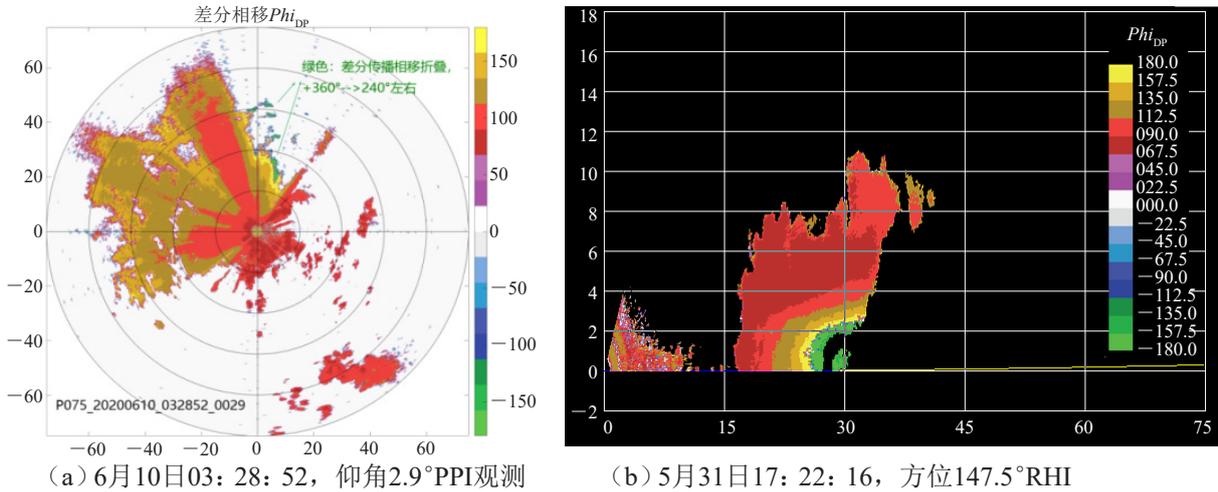


图4 MaXPol雷达在2020年测量中出现的差分相移模糊实例

Fig. 4 Folding examples of differential phase in radar measurements by MaXPol in 2020

2 MaXPol雷达对人影典型作业天气中的观测

2.1 三个偏振参数表达的物理含义

差分反射率 Z_{dr} 表示目标粒子在统计意义上的形状,与降水粒子的尺寸和轴比有关。它是区别冰晶、雪花、霰、雨滴、冰雹、虫/鸟、烟囱以及风电支撑杆等目标的重要参数之一,也是粒子谱和含水量等计算的重要参数之一。

共极化0阶相关系数 ρ_{HV} 是一个被H/V各自幅度归一化后的互功率。归一化的结果就是这个参数在规则目标形状时,取值趋于1。因此,在单一降水目标情况下,该参数接近于1;在混合目标情况下,则明显降低。非球形、变姿态的目标,该参数的测量会变得很低。

这个参数表示目标粒子在两个偏振方向上的统计意义的相关性。它是区别单一类型与混合类型降水的重要标志;也是龙卷、沙尘暴、火场烟柱(舌)等的专门识别标志。在粒子分类中作用重大。

差分传播相移(率)是双偏振雷达定量测量降水考虑的最重要参数。由于在一定信噪比条件下,相位与幅度无关的特性,从理论上考虑,这个参数与降水率成正比,是最合适的含水量测量的依据。由于信噪比降低,会引起这个参数的退化,弱回波的情况将使该参数变得恶化。

差分传播相移的估计稍为复杂,如图5所示,说

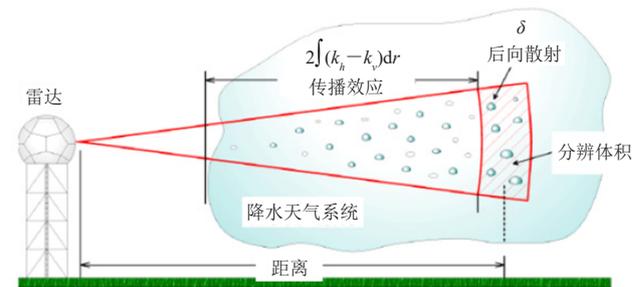


图5 差分传播相移(率)的测量考虑

Fig. 5 The measurement of (specific) differential phase shifts

明了差分传播相移的成因。由于降水系统中所有雨滴的形状在水平垂直两个方向上的差异,其介电常数也有差异,水平垂直偏振电磁波传播速度随着发射变化,引起各自移相 ϕ_h 和 ϕ_v 的差异。

2.2 降雨观测及原始回波分析

首台MaXPol雷达于2019年9月2日完成了威宁县气象局(人工影响天气办公室,海拔高度约2200 m)落户安装。在稍后的2019年9月10日15:32(北京时)的观测中,获得了图6的观测结果。该次观测未使用距离订正,使用3:2脉冲重复频率。从图6a可见,如果考虑距离订正因素,全部降水区域反射率因子应该在40 dBz左右。西方出现空白区域,是因为该方向安装有一台WXR-MD-10多普勒雷达造成遮挡的缘故。从图6b可见,在强信噪比处(反射率因子回波图

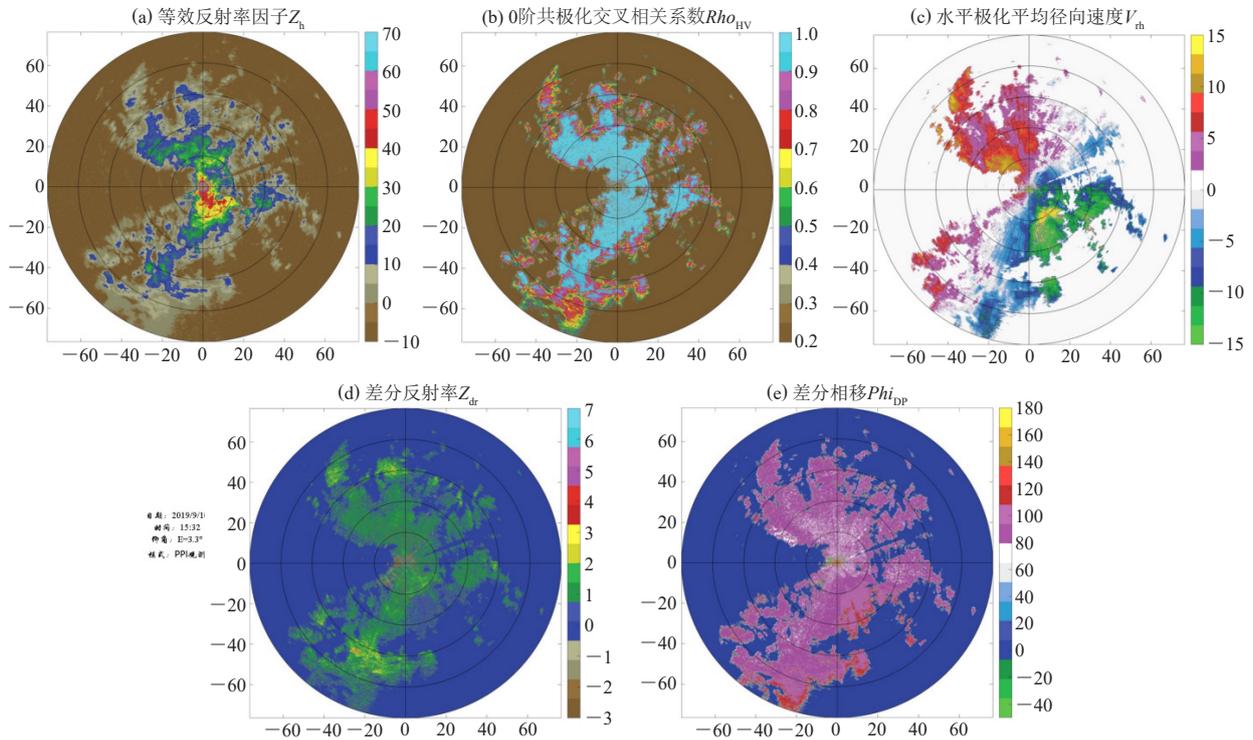


图6 大面积降雨观测结果 (a—e)
Fig. 6 Observations of rainfall in large range (a—e)

可知), 相关系数接近于1, 说明本次降水属于单纯降雨过程。在低信噪比位置, 相关系数被退化到0.7以下^[23]。从图6c可见, 降水过程自东南向西北方移动。其中, 在东南向15 km左右位置, 出现了速度模糊的情况, 其原因是该图的显示是未使用速度退模糊算法, 而仅使用516.6 s的周期估计速度的缘故(模糊速度约 $15.5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$)。从图6d可见, 降水过程雨滴较大, 在西南方约50 km处, 出现大雨滴的情况。从图6e可见, 降水过程中, 含水量比较均匀, 因为差分传播相移的变化率(即 K_{DP})比较均匀。

另一次强降水实例为2020年6月17日的一次降水过程。观测时间21:33, 方位 129.2° , 使用距离订正的RHI。距离约25 km处, 雷达RHI回波在离地面2 km高度回波区域出现55 dBz较强降水回波, 在同样位置上, 相关系数接近于1, 表明该区域为单一降水(雨), 差分反射率 Z_{dr} 数值极大(约4.5 dB), 表明降水粒径很大, 差分传播相移随距离方向变化明显, 表明其含水量较高。这些特征符合强降水标志。35~42 km更远距离处的第2个回波, 由于电磁波受到第1个回波区降水的衰减影响, 其强度已经降低。其差分反射率也同样受到影响。通过差分相移(率)可以补偿这些衰减^[24], 通过编程序来实现。

2.3 降雪观测及原始回波分析

2020年3月10日, MaXPoI在威宁首次观测到降

雪。时间00:06, 仰角 3.7° , PPI观测结果如图7所示。降雪回波不强, 最强约35 dBz, 多数在25 dBz左右; 相关系数 ρ_{HV} 在高信噪比(强回波)区时接近于1, 低信噪比(弱回波位置)被退化降低; 差分反射率和差分传播相移较为均匀。圈起部分出现差分反射率增大和相关系数减少的情况, 说明降雪过程在该处伴随降雨且雨滴较大。

3 结论

通过双偏振多普勒天气雷达的基本物理量及双偏振信息, 如反射率因子 Z_h 、差分反射率 Z_{dr} 、相关系数 ρ_{HV} 、差分传播相移 ϕ_{DP} , 能够得到降水粒子的大小、形状和相态等微物理信息, 能够有效地进行强对流天气的监测及预警, 有助于人工影响作业时间及位置的判断, 提高人工影响天气作业质量。

MaXPoI通过一年多的试运行, 显示出了较好的双偏振观测能力, 其分辨力、灵敏度以及稳定性得到了考验; 雷达观测数据可靠, 但定性分析回波不能满足实时人影作业指挥要求, 基于软件的识别与定量计算是提高效率和实时应用的关键; 转化理论模型为软件实现算法是智能处理的核心工作。

致谢: 本文撰写得到了贵州省威宁县气象局(人影办)、成都巨波雷达科技有限公司提供的观测数据与雷达结构的帮助, 作者在此一并表示感谢。

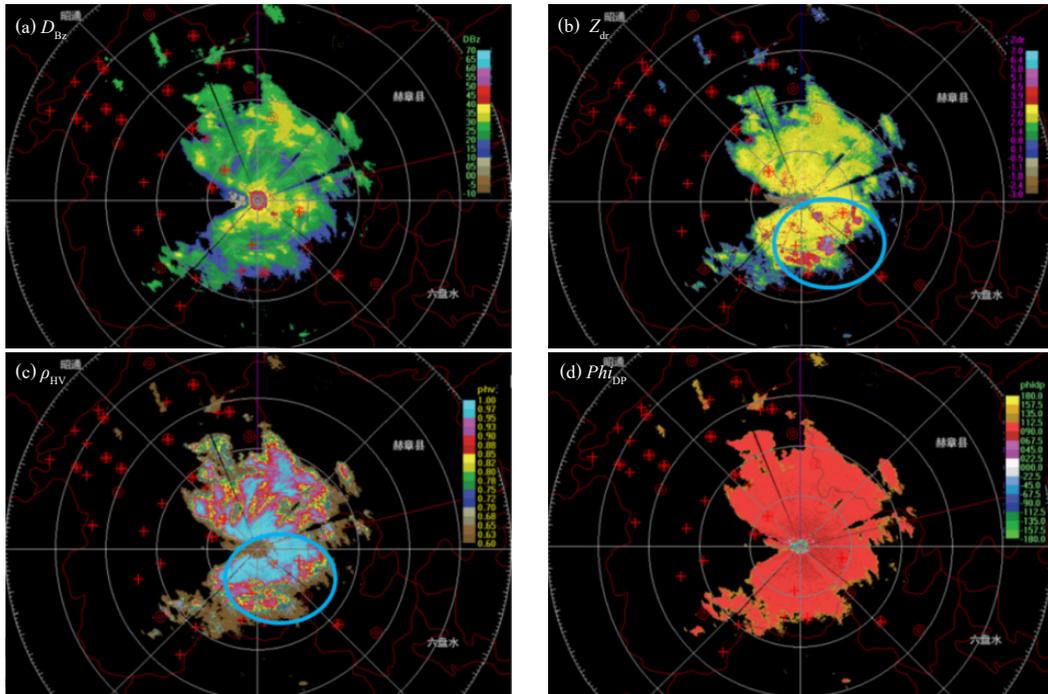


图7 降雪过程的观测结果

Fig. 7 Presentation of dual-polarization variables in snowfall

参考文献

- [1] Bruintjes R. Report from Expert Team on Weather Modification Research for 2012/2013, 6th Joint Science Committee of the World Weather Research Programme, 18-19 July 2013. Geneva: World Meteorological Organization Commission for Atmospheric Sciences, 2013.
- [2] Flossmann A I, Manton M, Abshaev A, et al. WWRP 2018-1, Peer Review Report on Global Precipitation Enhancement Activities. Geneva: World Meteorological Organization, 2018.
- [3] Doviak R, Zrníc D S. Doppler Radar and Weather Observations. Orlando: National Academic Press, 1984.
- [4] Bringi V N, Seliga T A, Aydin K. Hail detection with a differential reflectivity radar. Science, 1984, 225(4667): 1145-1147.
- [5] Bringi V N, Chandrasekar V. Polarimetric Doppler Weather Radar-principles and applications, Cambridge: Cambridge University Press, 2001.
- [6] Ryzhkov A V, Zrníc D S. Radar Polarimetry for Weather Observations. Cham: Springer Nature Switzerland AG, 2019.
- [7] Jordan J R, Lataitis R J, Carter D A. Removing ground and intermittent clutter contamination from wind profiler signals using wavelet transforms. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 1997, 14(6): 1280-1297.
- [8] Wilfong T L, Merritt D A, Lataitis R J, et al. Optimal generation of radar wind profiler spectra. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 1999, 16(6): 723-733.
- [9] Morse C S, Goodrich R K, Cornman L B. The NIMA method for improved moment estimation from Doppler spectra. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 2002, 19(3): 274-295.
- [10] Griesser T, Richner H. Multiple peak processing algorithm for identification of atmospheric signals in Doppler radar wind profiler spectra. Meteorologische Zeitschrift, 1998, 7(6): 292-302.
- [11] Iguchi T, Seto S, Meneghini R, et al. GPM/DPR Level-2 Algorithm Theoretical Basis Document, 2018. https://gpm.nasa.gov/sites/default/files/document_files/ATBD_GPM_DPR_n3_dec15.pdf.
- [12] Ellis S M, Vivekanandan J. Water vapor estimates using simultaneous dual-wavelength radar observations. Radio Science, 2010, 45(5): RS5002.
- [13] Schneebeli M, Sakuragi J, Biscaro T, et al. Polarimetric X-band weather radar measurements in the tropics: radome and rain attenuation correction. Atmospheric Measurement Techniques, 2012, 5(9): 2183-2199.
- [14] Mishra K V, Krajewski W F, Goska R, et al. Deployment and performance analyses of high-resolution Iowa XPOL Radar System during the NASA IFloodS Campaign. Journal of Hydrometeorology, 2015, 17(2): 455-479.
- [15] Bendix J, et al. RadarNet-Sur First Weather Radar Network in Tropical High Mountains. Bulletin of the American Meteorological Society, 2017, 98: 1235-1254.
- [16] Rutledge S A, Chandrasekar V, Fuchs B, et al. SEA-POL Goes to Sea. Bulletin of the American Meteorological Society, 219, 100: 2285-2301.
- [17] Allabakash S, Lim S, Chandrasekar V, et al. X-band dual-polarization radar observations of snow growth processes of a severe winter storm: case of 12 december 2013 in south Korea. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 2019, 36: 1217-1235.
- [18] Yao Z D, She Y, Li J, et al. Developing X-band magnetron Doppler radar for weather modification, 32nd URSI GASS, 19-26 August 2017, Montreal.
- [19] Yao Z, Lou X, Su Y, et al. X-band Magnetron Dual-polarization Weather Radar, 2019 International Conference on Meteorology Observations ICMO, September 28-29, 2019, Chengdu, China.
- [20] Chandrasekar V, Baldini L, Bharadwaj N, et al. Calibration procedures for global precipitation-measurement ground-validation radars. URSI Radio Science Bulletin, 2015, 355: 45-73.
- [21] Melnikov V, Zrníc D, Free A, et al. Calibrating ZDR on nonlinear 88D receivers, TAC meeting, 29 April 2019, Norman, OK, USA.
- [22] Wang Y, Chandrasekar V. Polarization isolation requirements for linear dual-polarization weather radar in simultaneous transmission mode of operation. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2006, 44(8): 2019-2028.
- [23] Melnikov V M, Zrníc D S. Measurements of Polarimetric Parameters at Low Signal-to-Noise Ratios, 32nd Conference on Radar Meteorology, 22 to 29 October 2005, Albuquerque, NM, US.
- [24] Gorgucci E, Chandrasekar V. Evaluation of attenuation correction methodology for dual-polarization radars: Application to X-Band Systems. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 2005, 22(8): 1195-1206.