

相控阵天气雷达技术研究进展

马辉¹, 陈哲², 李岳衡², 魏彬³, 吴礼福³

¹水利部信息中心, 北京

²河海大学信息科学与工程学院, 江苏 南京

³中科星图亿水(四川)科技有限公司, 北京

收稿日期: 2023年12月20日; 录用日期: 2024年1月17日; 发布日期: 2024年1月24日

摘要

天气雷达是一种典型的气象雷达, 也称测雨雷达, 是用于警戒和预报中、小尺度降雨天气系统的主要探测工具。自第一部天气雷达问世以来, 社会经济的持续发展和科学技术的进步, 推动了天气雷达技术不断创新, 经历了常规模拟、数字化、多普勒、多普勒双偏振等发展阶段。天气雷达的核心部件发射机系统也从磁控管、速调管发展到全固态、相控阵技术。本文介绍国内外相控阵天气雷达技术研究进展, 重点综述相控阵天气雷达技术研究进展。内容包括: 介绍气象微波波段与天气雷达种类, 介绍天气雷达体制发展进程, 介绍双线偏振多普勒天气雷达; 综述相控阵天气雷达技术进展, 以及介绍几种新发展的相控阵天气雷达等。最后, 给出总结和展望。

关键词

天气雷达, 双偏振多普勒雷达, 相控阵雷达, 研究进展

Advances in Phased Array Weather Radar Technology Research

Hui Ma¹, Zhe Chen², Yueheng Li², Bin Wei³, Lifu Wu³

¹Information Center of the Ministry of Water Resources, Beijing

²College of Information Science and Engineering, Hohai University, Nanjing Jiangsu

³EWATER (Sichuan) Technology Co., Ltd., Beijing

Received: Dec. 20th, 2023; accepted: Jan. 17th, 2024; published: Jan. 24th, 2024

Abstract

Weather radar is a typical meteorological radar, which is also called rain radar. It, as the detection

文章引用: 马辉, 陈哲, 李岳衡, 魏彬, 吴礼福. 相控阵天气雷达技术研究进展[J]. 气候变化研究快报, 2024, 13(1): 155-170. DOI: 10.12677/ccrl.2024.131017

tool, generally provides service for warning and forecasting on the small and medium scale rainfall weather system. From the first weather radar, it has witnessed the continuous progress of weather radar technology, due to the continuous development of social economy and the progress of science and technology. Historically, the weather radar has developed from common simulation, digitalization, Doppler to Doppler dual polarization. The transmitter system, the core component of weather radar, has developed from magnetron and klystron to all-solid and phased array technology. This paper reviews both domestic and international advances in weather radar technology research. The meteorological microwave band, weather radar type, weather radar system, dual linear polarization Doppler weather radar and phased array weather radar are comprehensively introduced. Finally, a conclusion and outlook are provided.

Keywords

Weather Radar, Dual Polarization Doppler Radar, Phased Array Radar, Research Advances

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

目前气象雷达已广泛应用于天气预报以及农业、水文、林业、交通、海洋、航空航天等领域的专业气象服务。常规的气象雷达主要包括有测雨雷达、测云雷达以及测风(风廓线)雷达等。天气雷达是一种典型的气象雷达,也称测雨雷达,是用于警戒和预报中、小尺度降雨天气系统的主要探测工具。它通过方向性很强的天线向空间发射电磁脉冲波,利用雨滴、云状滴、冰晶、雪花等对电磁波的散射作用来探测大气中的降水或云中水滴的浓度、分布,以及台风、局部地区强风、冰雹、暴雨和强对流云体等,并能监视天气移动和演变,了解天气系统的结构(尤其是灾害性天气)的变化和特征。以水利领域雷达测雨为例,通常以地面以上 2 km 垂直高度大气中的液态水为主要探测目标物,通过以雷达站为中心、半径 ≥ 45 km 水平范围内、地面以上 2 km 垂直高度大气中无缝的连续仰角步进扫描作业,获得降雨云体的三维结构和雷达回波强度,实现近地面层液态水含量的精细化测量,提高面雨量监测精度,进而对未来 1~2 h 可能发生致灾暴雨区域进行自动化预警。

通过大量的文献检索,已有有关天气雷达技术研究的综述。但近年来,新型天气雷达体制——相控阵天气雷达技术迅速发展,在性能上实现了突破,特别是在国内,展现出强劲的发展势头。而反映近年来新发展的相控阵天气雷达技术研究文献综述工作尚未得到系统性关注。本文对该领域既有的技术研究成果进行综述,希望为相关领域的技术研究提供参考和帮助。

2. 气象微波波段与天气雷达种类

2.1. 气象微波波段

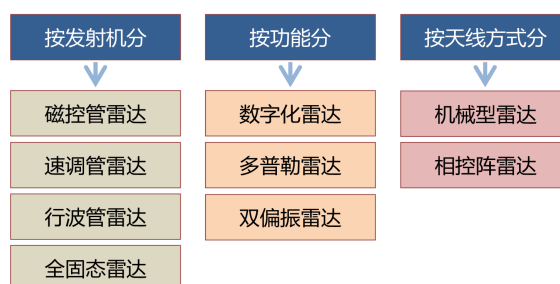
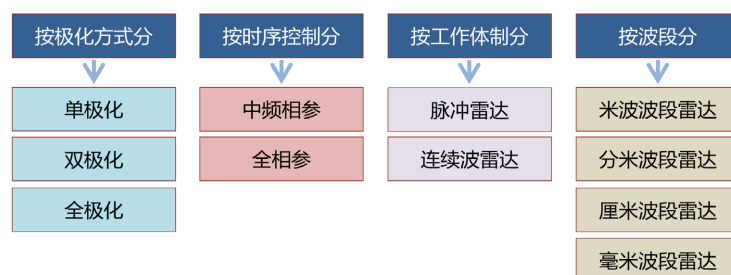
雷达技术和数字信号处理技术进步促进了气象雷达系统的发展。依据测量降水粒子的电磁散射信号(振幅、相位、偏振和频移),可探测大气中降水粒子的大小、形状、成分、运动和热力学相位等。气象雷达波段的大致划分如表 1 所示。

2.2. 天气雷达主要种类

按照天气雷达主要部件发射机、天线以及工作方式等划分,其主要种类划分参见图 1、图 2 所示。

Table 1. The rough division of meteorological microwave bands**表 1.** 气象微波波段的大致划分

波段代号	频率[GHz] /波长范围[cm]	气象探测	波段代号	频率[GHz] /波长范围[cm]	气象探测
L	1~2/30~15	高空气象要素	Ku	12~18/2.5~1.67	少量降水和降水粒子
S	2~4/15~7.5	暴雨和冰雹	K	18~27/1.67~1.11	弱降水粒子
C	4~8/7.5~3.75	降水	Ka	27~40/1.11~0.75	弱降水云/非降水云
X	8~12/3.75~2.4	降水和降水粒子	W	80~100/0.375~0.3	弱降水云/非降水云

**Figure 1.** Classification of weather radar types (A)**图 1.** 天气雷达种类划分(A)**Figure 2.** Classification of weather radar types (B)**图 2.** 天气雷达种类划分(B)

3. 天气雷达体制发展进程

自 20 世纪 40 年代初美国麻省理工学院(MIT)设计专用雷达用于气象目的以来,天气雷达体制经历了从电子管体制,晶体管化,脉间相参多普勒体制,大量使用数字芯片的全相参多普勒体制,单线偏振多普勒体制、交替发射模式(脉间交替发射水平极化波、垂直极化波)双线偏振多普勒体制、双发双收模式的双线偏振多普勒体制到相控阵体制的发展历程。天气雷达的核心部件发射机体制也从磁控管、速调管发展到全固态、相控阵技术[1]-[7]。天气雷达体制发展进程如图 3 示意。雷达探测也从反射率因子单参量的观测发展到双偏振多普勒多参量观测,进一步通过多参量的反演可获取降水粒子的尺寸大小、形状和雨滴谱分布等更为精细的降水信息[8] [9]。

4. 双线偏振多普勒天气雷达

传统多普勒天气雷达或单偏振天气雷达,难以获取到降水粒子的形状和方向等信息,无法区分它们的形状、方向和电性参量的大小对反射率因子的贡献。以观测雨滴、冰雹的散射为例,两个不同形状和

方向的降水粒子具有明显不同的反射率因子,而单偏振(如水平偏振)多普勒天气雷达测量的差分反射率因子(Z_{dr})不能提供足够的信息来区分雨滴、冰雹不同的形状/方向[8] [10]。

双线偏振多普勒天气雷达(Bilinear polarization Doppler weather radar, 简称双偏振雷达或双极化雷达)是在传统多普勒天气雷达基础上发展的。主要是来自气象应用需求的驱动、双线偏振支持技术升级这两方面原因,即,解决传统多普勒雷达存在的降水估测精度不高、粒子相态识别及非气象回波(杂波)辨别困难等问题的需求驱动,以及将偏振功能设置于传统多普勒雷达上,双线偏振技术相对容易实现。双偏振雷达探测信号示意参见图 4, 图中还示意了雪花(Snow)、冰雹(Hail)、雨滴(Rain)等。

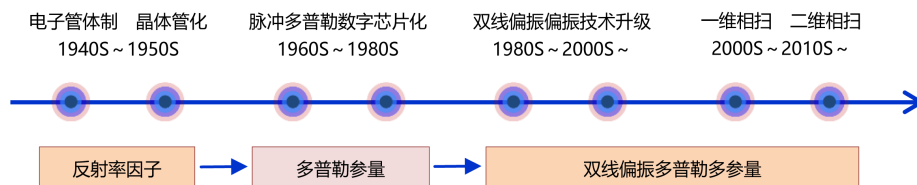


Figure 3. Development process of weather radar system

图 3. 天气雷达体制发展进程

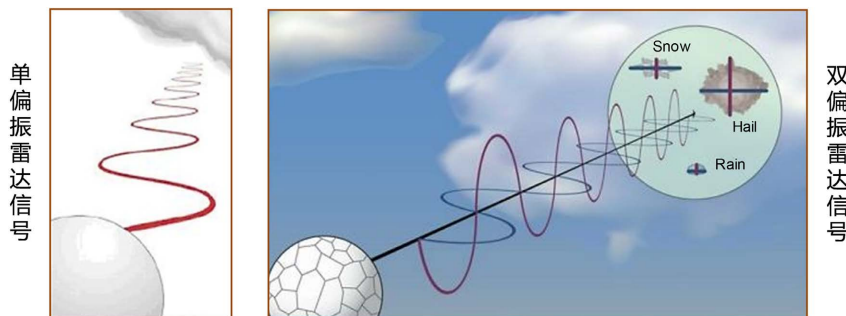


Figure 4. The schematic diagram of single polarization, dual polarization radar detection signal

图 4. 单偏振、双偏振雷达探测信号示意

20 世纪 70 年代末,美国研发了第一部双偏振(双极化)雷达,采用的是在水平(h)极化通道上增加一条垂直(v)极化通道的技术路线[1] [9]。20 世纪 90 年代初,美国国家气象局(NWS)与美国国防部(DOD)和美国联邦航空管理局(FAA)合作,部署了 WSR-88D 雷达(具有多普勒能力的机械扫描常规天气雷达)。到 2000 年已经完成了全美 160 部多普勒雷达的布点建设,构建了美国下一代天气雷达网(NEXRAD),覆盖美国大陆以及部分沿海海域和岛屿。此外,联邦航空管理局还在全美 45 个机场建成了专用于民航的高性能终端多普勒天气雷达。自 2007 年起,在 NWS、DOD 和 FAA 联合部署下,逐步对 20 世纪 90 年代初建设的 WSR-88D 多普勒雷达开展了双线偏振技术升级,包括双极化改造、分辨率提升、体扫模式(VCP)等改进,2013 年升级改造完成[1] [9] [11]。在我国,自 1999 年以来部署了一个全国性的雷达网络,由 200 多部中国新一代多普勒天气雷达(CINRAD 98D)组成。双线偏振技术研究始于 1988 年,是在单偏振的国产 713 型五厘米波段测雨雷达基础上改造而成的双线偏振多普勒天气雷达[12]。经过 30 多年的探索研究,偏振雷达体制、探测技术、数据分析方法等不断完善,取得了长足进步[9] [13] [14] [15]。

我们知道,电磁波的传播是由相互垂直的电场和磁场产生的,具有偏振、强度两方面的特征。电磁波的极化(极化又称偏振)描述了电场向量随时间变化的方式。极化分为线极化、圆极化和椭圆极化三种。雷达极化能力是电磁波的本质属性和重要基本参量,双偏振雷达通过发射水平极化电磁波和垂直极化电磁波(水平和垂直电场分量),能够观测散射电场 2×2 散射分量(水平和垂直两个正交分量)矩阵,考虑散射场的两个正交分量与入射场的两个正交分量的关联,使用差分反射率因子 Z_{dr} 表示水平偏振处的反射率

与垂直偏振处的反射率的差异。差分反射率因子表示为： $Z_{dr} = 10 \log_{10} \left(\frac{|S_{hh}|^2}{|S_{vv}|^2} \right)$ ，其中， h 、 v 分别为水平和垂直极化电磁波(电场矢量)， S_{hh} 、 S_{hv} 、 S_{vh} 和 S_{vv} 为 2×2 散射矩阵元素，将散射电场的 E_h 和 E_v 分量与入射场分量联系起来。降水粒子的偏振散射特性，即 2×2 矩阵元素上发射和接收辐射的偏振态所提供的粒子形状和方向新的信息特性，能够实现降水粒子几何和微物理特性的观测，以及了解云过程和由此产生的降水和雪或水的积累[16] [17] [18]。例如，双偏振雷达(即使在目标尺寸远小于雷达波长的瑞利模式下)，可以区分不同形状、成分和方向的粒子(雨与冰雹或雨与雪或雪聚集与原始晶体雪花等)。表 2 给出了典型的粒子散射偏振特性。表 3 给出了双偏振多普勒观测参量。双偏振雷达可以测量更多的参数，观测参量除了常规的反射率因子、平均径向速度以及速度谱宽外，还包括水平偏振反射率因子、差分反射率因子、线性退极化比、差分传播相移率、共极性互相关系数、零延迟相关系数等[8] [9] [10]。

Table 2. Scattering polarization characteristics of typical precipitation particles

表 2. 典型降水粒子散射偏振特性

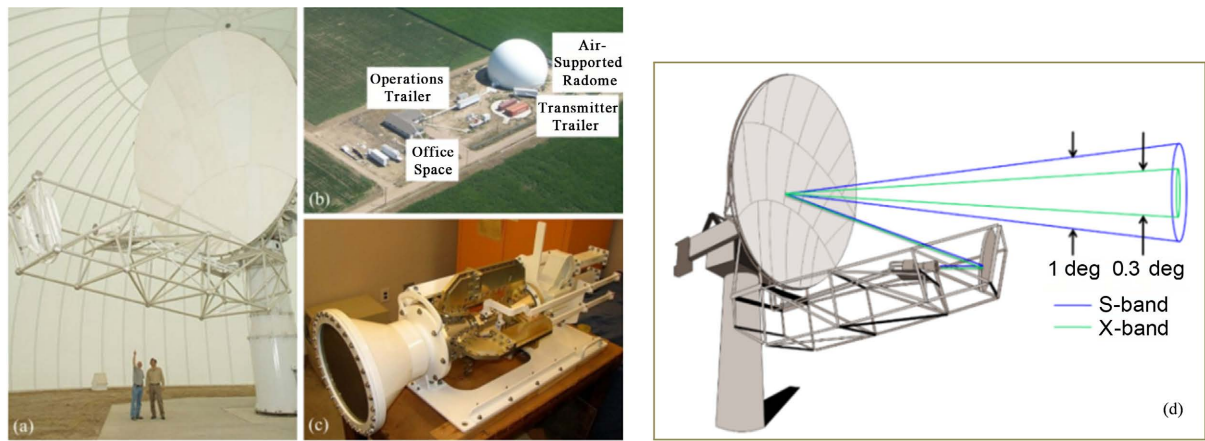
粒子性状	偏振散射特性	粒子性状	偏振散射特性
小雨滴 (接近球形)	弱反射 水平 $h \approx$ 垂直 v	小冰雹	随机变化强反射 水平 $h \approx$ 垂直 v
中等雨滴	中等强度的反射 水平 $h >$ 垂直 v	大冰雹	垂直偏振强反射 垂直 $v >$ 水平 h
大雨滴	水平偏振强反射 水平 $h \gg$ 垂直 v	-	-

Table 3. Dual polarization Doppler observation parameters

表 3. 双偏振多普勒观测参量

观测参量	说明
多普勒速度	接收到的雷达回波信号中，由于降水粒子的运动而产生的频率偏移。通过反映降水粒子运动状态的多普勒速度，可以判断降水粒子的类型，如雨滴、雪花、冰雹等
相位差	雷达发射信号与接收信号之间的相位差异可以反映降水粒子的形态和大小，判断降水粒子的类型和密度等
偏振率	偏振参数的测量有利于气象目标的微物理场的探测。偏振率是指雷达发射信号和接收信号之间的偏振状态，可以反映降水粒子的形态和大小等
水平偏振反射率因子	反射率因子是天气雷达最基本的参数，双偏振雷达中表示接收平行偏振方向的信号强度与发射信号强度之比，反射率因子越大，表示探测回波信号越强，降水量也就越大
径向速度	利用降水回波频率与发射频率间变化的多普勒效应来测定降水粒子的径向(朝向雷达或远离雷达方向)运动速度
速度谱宽	是一个对速度离散程度的度量，反映了气象目标内水汽等散射粒子之间相对运动的剧烈程度。可提供由于风切变、湍流和速度样本质量引起的平均径向速度变化的测量
差分反射率因子	水平反射率因子和垂直反射率因子的比值，其值越大代表雨滴越大且越偏平，反之雨滴越小且越接近球形
差分传播相位	水平偏振波与垂直偏振波通过相同长度降水区后散射回雷达天线的相位差值
差分传播相移率	单位长度上的差分传播相位值，反映液态水含量大小，其值越大代表含水量越高
零延迟相关系数	水平垂直偏振波零延迟相关系数

美国科罗拉多州立大学(Colorado State University, CSU)研发的 CSU-CHILL 雷达是采用双偏振多普勒天气雷达技术的代表之一[4] [19]。CSU-CHILL 是一部用于教学和科研的双发双收模式雷达,自 20 世纪 90 年代起,已经几次技术改造。该雷达使用相同的发射系统发射水平和垂直(h 和 v)极化波,可同时在 S 波段(3 GHz)、X 波段(9 GHz) 2 个频率上工作,天线的主波束宽度: S 波段: 1.0° , X 波段: 0.33° (参见图 5)。中国 CIRAD-98DP 双偏振雷达的技术特性总结如表 4 所示[9]。典型的国内外双偏振雷达及特点列于表 5 [6] [9] [13] [15]。



(a) 双偏置格雷戈里式抛物面天线和定位系统; (b) 充气天线罩、发射机和操作拖车; (c) 安装于抛物面天线上的双极化、双频喇叭天线馈源(照射器); (d) 雷达天线发射示意图(S 波段: 1.0° , X 波段: 0.33°)。

Figure 5. CSU-CHILL dual polarization radar (From [4] [19])

图 5. CSU-CHILL 双偏振雷达(引自文献[4] [19])

Table 4. The technical specifications of China CIRAD-98DP radar

表 4. 中国 CIRAD-98DP 雷达的技术规格

技术参数	范围	技术参数	范围	雷达变量	范围
发射机(速调管)	2.90 GHz	极化、扫描模式	STSR、PPI	σ_v	$1.0 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$
PRF	322~1282 Hz	径向分辨率	250 m	Z_{dr}	0.2 dB
脉宽	$1.57\mu\text{s}$	波束宽度	0.95°	Φ_{dp}	2.0°
峰值功率	700 kw	Z_h	1.0 dB	SNR	-
天线口径、增益	8.5 m、44.7 dB	v_r	$1.0 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$	ρ_{hv}	-

Table 5. Typical dual polarization radar and its characteristics

表 5. 典型的双偏振雷达及特点

双偏振多普勒天气雷达	工作波段频率(MHz)	特点	应用
双偏振全相参天气雷达(华云敏视达雷达(北京)有限公司)	S 2700~3000	采用美国 WSR-88D 双线偏振技术, 双发双收技术体制 采用 WSR-88D 生成算法	雷达系统生成的气象产品可满足短时临近预报、降水估测、强天气识别和分析、风场分析和切变识别等业务需要
单/双偏振全相参天气雷达(华云敏视达雷达(北京)有限公司)	C 5300~3725	技术源于洛克希德·马丁公司生产的 WSR-88D 天气雷达	用于监测/跟踪/预警强雷雨、冰雹、下击暴流、晴空风切变等中小尺度天气系统

续表

全固态双偏振多普勒天气雷达(国睿科技股份有限公司)	X 9300~9700	单发双收、双发双收和极化捷变双极化多普勒技术, 全固态发射、脉冲压缩技术	可对半径 120 公里范围内降水量分布、区域降水量及云中降水粒子相态估测 可对半径 240 公里的台风、暴雨、冰雹、飢线、龙卷风等灾害天气监测和预警
移动式(车载)双偏振天气雷达(南京大学, NJU-CPOL)	C 5625	单发双收、双发双收和全相参双线偏振多普勒技术, 雷达扫描方式: PPI 和 RHI	研究型双偏振雷达, 用于研究云和降水系统微观结构
WSR-88D 天气雷达(美国洛克希德·马丁空间系统公司)	S 2700~3000	由脉冲多普勒升级为双偏振多普勒雷达	美国下一代天气雷达网(NEXRAD)各地部署的 WSR-88D 站点, 2013 年已升级为双偏振雷达, 以便更准确地识别回波信号, 区分雨水、冰雹和雪等
CSU-CHILL 双偏振天气雷达(美国科罗拉多州立大学)	S, 3000 X, 9000	双发双收、双频双偏振	使用相同的发射系统, 可同时在 S 波段、X 波段 2 个频率工作, 天线的主波束宽度: 1.0°/S 和 0.33°/X

5. 相控阵天气雷达

相控阵雷达(Phased array radar, PAR)技术源于军事领域, 后被引入监测快速变化的天气过程, 如龙卷风及强风暴预报和响应、云系统的理解、强降雨水文预报、监测危险羽流的扩散等气象领域。由于其优越的探测能力, 系统提供二维相位控制, 不需要电机或其他机械移动部件。二维高速(无惯性)波束导向结合双极化, 可编程/自适应波形, 以及将多个雷达组合成网络的能力, 现已成为短程天气观测新一代天气雷达体制发展的主流方向[20]-[25]。

相控阵雷达的工作原理可分为两个主要步骤: 波束生成和目标探测。波束生成主要部件包括阵列天线和发射单元。阵列天线与常规雷达的抛物面天线不同, 天线阵面是由数量众多、独立控制的小型天线收发单元排构成, 发射波束并接收回波信号; 每个发射单元(天线)都可以独立地调节发射波振幅、相位, 从而形成一个相对相位差的阵列。当信号发射时, 各个天线发射的信号相互叠加, 通过精确控制每个发射单元的信号特性, 形成一个或多个相位不同的定向波束。另外, 常规雷达扫描方式通常是机械式扫描, 即通过改变雷达天线的方位和仰角实现对天气过程的空域扫描。一维相控阵雷达则是俯仰(垂直方向)电扫、方位(水平方向)机械扫描; 二维相控阵雷达在俯仰和方位上均采用电子扫描。电子扫描是利用电磁波相干原理, 通过控制天线阵面上各个发射单元电流的相位来改变发射波束的方向, 从而实现天线的电子扫描。这种二维相位可控的阵列天线技术可以使雷达探测范围更广, 抗干扰能力更强, 波束指向更加灵活, 能够实现无惯性快速扫描, 其扫描速率对全空域扫描时间控制在 1 min 以内, 探测快速变化天气过程的时间分辨率远低于机械式扫描雷达通常的 4~6 min 分辨率。

目标探测主要部件包括接收单元和信号处理单元。每个接收单元可以独立地调节接收回波的相位和幅度, 接收单元接收到降水粒子散射后的回波信号, 并将其合并为一个整体信号。信号处理单元对接收到的信号进行计算和处理, 利用不同降水粒子的性状、尺寸、入射电场与粒子指向的夹角、介电常数等对回波的影响不同来估算降水粒子的形状、大小、滴谱和指向角的分布情况, 从而对云雨结构、类型和降水过程特征可以有更为完整的认识和识别。

5.1. 国外相控阵天气雷达的发展

美国是最早开始将 PAR 技术应用于气象领域的国家。2002 年, PAR 技术就被美国国家雷达技术委

委员会推荐为未来取代美国 WSR-88D 系统的技术[11] [25] [26]。2002 年, 美国国家海洋和大气管理局(NOAA)所属的国家强风暴实验室(NSSL)、俄克拉荷马州立大学(The University of Oklahoma, OU)等多家单位联合, 将美国海军宙斯盾舰退役的(AN/SPY-1)S 波段相控阵雷达进行了气象化改造。观测试验表明, PAR 相比于双偏振技术升级的美国 NEXRAD WSR-88D 天气雷达在探测精度和快速反应能力方面具有较大优势[21] [22] [24] [25] [26], 对于扩展国家雷达网捕捉小尺度强烈天气, 提高防灾减灾预警能力有重要作用。2006 年, 美国交通部联邦航空局(FAA)、NOAA 和国防部空海军指挥部联合资助, 预研美国 NEXRAD WSR-88D 升级改造的作战 - 气象混合雷达网络新方案, 计划使未来的雷达监测网采用一部多功能多任务的相控阵雷达替代单任务雷达(包括气象雷达、空管雷达和边境防御雷达等), 能够同时执行飞机跟踪、风廓线和天气监视、国土防御等任务, 以有效减少美国本土的雷达总数。将偏振法和 PAR 技术结合到偏振 PAR (PPAR)中, 计划发展具有全极化、多功能的 PAR (Multiple function phased array radar, MPAR), 并拟定了在 2025 年之前完成 PAR 替代现有机扫式雷达的计划[21] [26]。另外, 美国国家气象局(NWS)也提出了利用更快扫描速度的 PAR 作为国家 NEXRAD 网的组网雷达的研究计划[26] [27] [28]。在日本, 2012 年东芝公司和大阪大学在日本国家信息与通信技术研究机构(NICT)的资助下, 开发了用于气象应用的 X 波段相控阵天气雷达(PAWR)系统[5], 以 100 米和 10~30 sec 的分辨率扫描整个体积, 半径可达 80 公里范围, 可以在 1 min 内对积雨云进行三维探测, 通过探测数据, 证明了雷电活动和风暴结构之间的关系。2016 年, 在大阪机场, 该 X 波段 PAWR 与原有的 C 波段多普勒天气雷达进行联合实验, 发现添加了具有快速扫描功能的相控阵雷达的联合探测使得一次下击暴流的精细结构变化可以重现[5] [27]。2017 年, 基于 X 波段 PAWR 的进一步研究, 提出了一种用于夏季对流阵雨快速预测的 3D 卷积神经网络(CNN)模型[5]。日本 PAWR 系统场外试验表明, 采用 PAR 技术的雷达相比偏振多普勒天气雷达 WSR-88D (通常全体积扫描为 4~6 min), 时间分辨率远高于双偏振雷达[5]。表 6 列出了国际上(美国、日本)代表性的相控阵天气雷达技术发展和时间节点[5] [21] [23] [27] [29]。表 7 列出了国外双偏振、相控阵天气雷达主要厂商。

Table 6. Development of phased array weather radars in the United States and Japan
表 6. 美国、日本相控阵天气雷达的发展

时间	研究单位	发展技术	具体情况
2002	美国强风暴实验室(NSSL)、俄克拉荷马州立大学(OU)	相控阵天气雷达	改装美国海军宙斯盾舰退役的(AN/SPY-1) S 波段相控阵雷达, 是第一部相控阵天气雷达
2006	美国交通部联邦航空局(FAA)、NOAA 和国防部空海军指挥部联合资助	全极化、多功能相控阵雷达(MPAR)	能够同时执行飞机跟踪、风廓线和天气监视、国土防御等任务
2012	东芝公司、日本大阪大学、日本国家信息与通信技术研究机构(NICT)	X 波段的相控阵天气雷达(PAWR)外场试验	在 1 min 内对积雨云进行三维探测, 探测数据证明了雷电活动和风暴结构之间的关系
2014	美国国家气象局(NWS)、美国国防部(DoD)和美国联邦航空管理局(FAA)	双极化技术	完成对 160 部高分辨率多普勒天气雷达组成的美国国家 NEXRAD WSR-88D 雷达站网的升级改造
2014	美国国家海洋和大气管理局(NOAA)和美国联邦航空管理局(FAA)	“先进技术演示样机”(ATD)设计与研究	首款全尺寸 S 波段双极化相控阵雷达, 用于评估平面相控阵雷达的极化性能

续表

2017	日本跨部门战略创新促进计划(SIP)成立研究小组	双极化、多参数、相控阵技术	多参数相控阵天气雷达(MP-PAWR)暴雨迹象试验
2018	东芝公司、日本大坂大学、NICT、日本气象厅	双极化相控阵(多普勒)天气雷达(DP-PAWR)	先进的数字波束形成技术,“同时发射,同时接收”模式,获取高空时分分辨率双极化信息
2019	美国国家气象局、美国空军和美国联邦航空局(FAA)	安装新的雷达天线环绕基架,安装更为强大的信息处理计算机	实施美国国家在网天气雷达站升级和整修计划,计划预计 2023 年完成
2021	NOAA 所属的美国强风暴实验室(NSSL)、美国麻省理工学院林肯实验室	数字全极化相控阵雷达(DPPAR)-先进技术演示样机(ATD)	得到持续 10 年的资助,2018 年 ATD 投入试验使用,2021 年实现了初始作战能力
2021	雷神技术公司(Raytheon Technologies)	SKYLER-II 双偏振 X 波段相控阵雷达	单通道发射/接收模块和双极化天线,交替发射交替接收模式(ATAR),软件定义功能
2022	美国俄克拉荷马大学(The University of Oklahoma)先进雷达研究中心(ARRC)	基于车载的 S 波段全数字极化相控阵天气雷达(命名为 HORUS 雷达)	由美国 NOAA 所属的 NSSL 实验室资助,计划作为目前 WSR-88D 雷达的技术升级方案,为未来天气雷达观测业务服务做准备。

Table 7. Major foreign dual polarization, phased array weather radar manufacturers**表 7.** 国外的双偏振、相控阵天气雷达主要厂商

厂商	国别	成立时间	厂商	国别	成立时间
Raytheon Company	雷神公司(美国)	1922	Selex ES GmbH	Selex ES GmbH 公司(德国)	1961
Enterprise Electronics Corporation(EEC)	霍尼韦尔公司(美国)	1950	GAMIC	GAMIC 公司(德国)	1988
EWR Radar Systems Inc.	EEC 公司(美国)	1971	Vaisala	维萨拉公司(芬兰)	1936
Honeywell	EWR 雷达系统公司(美国)	1982	Japan Radio Co.	JRC 雷达公司(日本)	1915
LMT	洛克希德·马丁空间系统公司(美国)	1995	FURUNO	古野电气株式会社(日本)	1951

5.2. 国内相控阵天气雷达的发展

我国 PAR 技术研究和应用相对落后于美国、日本等国。2007 年,在公益性行业科研专项等项目资助下,开展了 PAR 军用技术向气象领域转化的研究,研发了 PAR 天气雷达原理样机。2016 年,中国气象科学研究院采用 X 波段 PAR 天气雷达和两个极化天气雷达开展了联合探测强对流天气,超级单体风暴观测实验进一步验证了 PAR 雷达的观测在短时间尺度上显示了抛物面天线雷达无法观测到的详细变化 [26] [30]。2019 年,中国气象局印发的《气象观测技术发展引领计划(2020~2035 年)》提出了要发展研制

双偏振 PAR 天气雷达[31]。2022 年,中国电子科技集团国睿科技公司研制生产的全国首部 S 波段相控阵双偏振天气雷达启动试验,该雷达站建于福建闽侯县大湖乡雪峰村,探测范围覆盖福建省及台湾海峡和台湾岛西部,既是东移强对流天气系统主要移动路径所经地,也是台风、强对流天气预报预警重点区域[32]。2023 年,国睿科技、四创电子、浙江宜通华盛等多家公司生产的 S、C、X 波段双偏振相控阵天气雷达,亮相 2023 中国气象现代化建设科技博览会(深圳举行)。目前,相控阵雷达的研发和应用已成为我国气象雷达领域的重要发展趋势[26] [33]。表 8 列出了国内双偏振、相控阵天气雷达主要厂商。

Table 8. Major domestic dual polarization, phased array weather radar manufacturers
表 8. 国内的双偏振、相控阵天气雷达主要厂商

厂商	企业类型	成立时间	厂商	企业类型	成立时间
国睿科技股份有限公司	中国电子科技集团公司第 14 所控股	1994	维萨拉(北京)测量技术有限公司	外国法人独资(总部位于芬兰)	2005
华云敏视达雷达(北京)有限公司	中国华云气象科技集团投资组建	1995	航天新气象科技有限公司北京分公司	中国航天科工集团二院第 23 所控股	2014
成都中电锦江信息产业有限公司	原国营第 784 厂投资组建	1998	广东纳睿雷达科技股份有限公司	外资企业	2014
四创电子股份有限公司	中电科集团第 38 所投资组建	2000	浙江宜通华盛科技有限公司	民营企业	2014
南京恩瑞特实业有限公司	国睿集团和中电科第 14 所投资组建	2000	成都远望未来科技有限公司	民营企业	2017

6. 新发展的相控阵天气雷达介绍

6.1. S 波段数字全极化相控阵雷达(先进技术演示样机)

在 NOAA 和空军军方合同经费持续 10 年的资助下,为探讨下一代用于国家雷达网的相控阵雷达技术和业务建立提供支撑,2018 年,美国麻省理工学院林肯实验室(MIT Lincoln Laboratory)研发的 S 波段数字全极化相控阵雷达(DPPAR)——先进技术演示样机(ATD),在国家气象雷达试验平台投入使用。DPPAR-ATD 经过现场校准和系统测试,验证了其采用固态发射、脉冲压缩技术的有效性,能够满足 NOAA 未来天气雷达对快速体积扫描和更高质量气象数据的需求。2021 年, DPAR-ATD 实现了初始作战能力[27]。图 6 是 DPPAR-ATD 外观照片,高约 4 米。雷达孔径由 76 个风冷散热的 8×8 单元极化面板组成,每个面板由射频 RF 孔径和数字背板两块 PCB 板组成,基于中等功率砷化镓高功率放大器和 2:1 重叠子阵列接收架构。

6.2. SKYLER 双极化多功能 X 波段相控阵雷达

雷神技术公司(Raytheon Technologies)开发了一种基于有源电子扫描天线阵列的低成本、双极化(双偏振)多功能、X 波段相控阵雷达,命名为 SKYLER [29]。SKYLER 提供远程无间隙覆盖。具有软件定义能力,能够作为单个雷达或联网一起运行,可以同时提供本地化的高分辨率天气数据和监视空中目标功能。美国纽约州立大学石溪分校(Stony Brook University)与雷神技术公司(Raytheon Technologies)合作,近年来一直在探索和试验使用 SKYLER 双偏振 X 波段 PAR 进行气象数据资料新的采样策略。图 7(a)、图 7(b)分别是 2019 年、2021 年石溪大学将 SKYLER、激光雷达(0~15 km)和 MRR-PRO 微降雨雷达集成的 SBU 天气观测移动平台[29]。雷神技术公司的第二代相控阵雷达 Skyler-II,使用单通道发射/接收模块和双极

化天线，工作在交替发射交替接收模式(ATAR)，软件定义的收发器使用长占空比脉冲和脉冲压缩来提高灵敏度，并可以采用相位编码来抑制多行程回波。气象数据处理器(WDP)利用基于频谱方法进行噪声估计和杂波滤波，并提供以下观测参测：反射率、差分反射率、径向速度、速度谱宽、差分反射率和共极性互相关系数，以及几个质量控制参数。SKYLER-I 和 SKYLER-II 雷达的技术规格列于表 9。

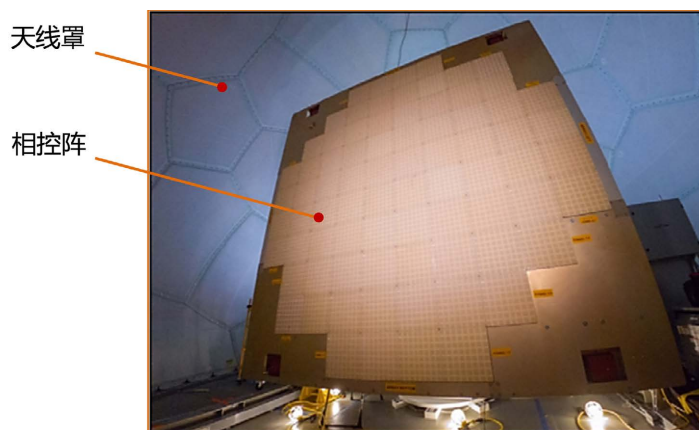


Figure 6. Advanced technology demonstrator (ATD) at the National Weather Radar Test bed in Norman, Oklahoma, USA (From [27])

图 6. 位于美国俄克拉荷马州诺曼市国家气象雷达试验平台的演示样机(ATD) (引自文献[27])

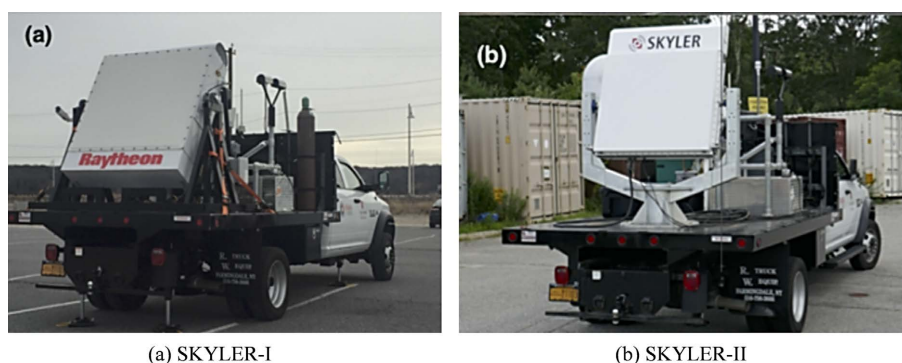


Figure 7. SBU weather observation mobile platform based on SKYLER dual polarization x-band phased array weather radar (From [29])

图 7. 基于 SKYLER 双偏振 X 波段相控阵天气雷达的 SBU 天气观测移动平台(引自文献[29])

Table 9. The technical specifications of SKYLER-I and SKYLER-II radar

表 9. SKYLER-I 和 SKYLER-II 雷达的技术规格

技术参数	范围	技术参数	范围
工作频率	9.0~9.6 GHz	脉宽	可选, 典型: 1~55 μ s
Tx 功率	<250 W	波形脉冲调制	CW, LFM, NLFM
天线尺寸	1 m \times 1 m	Tx/Rx 极化模式	hh, hv, vv, vh
天线波束宽度	2° \times 2°	覆盖角	$\pm 45^\circ$ 方位角 \times $\pm 15^\circ$ 仰角
最大任务周期	25%	仪器测量范围	40 km
脉冲重复频率	可选, 典型: 1.2~4.0 kHz	-	-

6.3. 车载 S 波段全数字极化相控阵天气雷达

在 NOAA 所属的国家强风暴实验室(NSSL)资助下, 2022 年, 俄克拉荷马大学先进雷达研究中心(OU-ARRC), 研发了一种车载 S 波段全数字极化 PAR, 命名为“荷鲁斯”雷达(荷鲁斯(HORUS)古埃及天神, 拥有鹰神之眼) [33]。“荷鲁斯”将利用全数字架构获得的原始双极化数据, 更准确地捕获 4D 微物理过程, 改善降水定量估测以及对微物理过程的理解, 包括理解和预测严重危害(如龙卷风、冰雹、洪水)形成的关键过程。将通过不断测试和改进, 检验 PAR 技术对于强天气监测的实际效果、相控阵增加双极化功能后的信号检验评估, 是否可以作为下一步美国 NEXRAD WSR-88D 雷达相控阵技术升级的可选方案。“荷鲁斯”雷达如图 8 所示。左图示: 刀片板卡(OctoBlade)外形图, 中间的图示: 8×8 “荷鲁斯”双极化天线面板, 右图示: 车载“荷鲁斯”, 天线罩摘下显露出的 25 个 8×8 “荷鲁斯”双极化面板(1600 个发射元件)。FPGA PCB (FPGA 印刷电路板), RF front-end PCB (射频前端印刷电路板), Support frame (支撑框架)和 Liquid-cooling channel (液冷却通道), OctoBlade (刀片板卡), Analog backplane (模拟电路背板), 8×8 Dual-Pol antenna array (双极化天线阵列)。

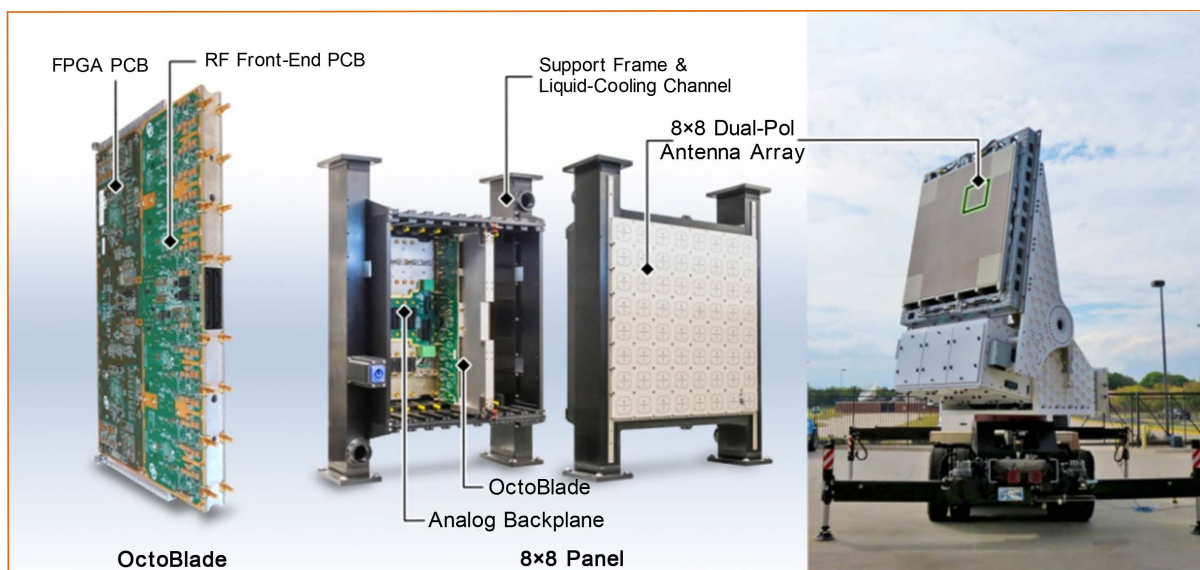


Figure 8. HORUS fully digital polarized phased array weather radar (From [34])

图 8. “荷鲁斯”全数字极化相控阵天气雷达(引自文献[34])

“荷鲁斯”工作原理的形象化示意如图 9 所示。全数字相控阵列的一个重要性能是波束形成的灵活性, 具有自适应波束形成的最大自由度。由于每个单元(和极化)波束的形成权值是通过基于软件的 DSP 实现的, 与常规模拟波束形成系统对硬件的依赖不同, 可以形成多个任意波束。图 9(a)示意了在水平方向(方位角)和垂直方向(俯仰角)发射笔形波束, 极小观测间隙, 可以显著提高时间分辨率和垂直覆盖, 在距离高度显示(RHI)扫描模式下实现基于“成像”的密集垂直采样。另外, 全数字 PAR 使用最小方差无失真响应(MVDR)自适应波束形成技术, 具有自适应波束形成的最大自由度。MVDR 方法对于减缓干扰、地面杂波相比传统的杂波滤波器效果好(参见图 9(b)示意)。“荷鲁斯”雷达的技术规格列于表 10。

6.4. S 波段圆柱形极化相控阵雷达

基于对未来短程探测的相控阵天气雷达应采用何种阵列配置尚未达成共识的考虑, 2021 年, 俄克拉荷马大学 OU-ARRC 首次采用圆柱形阵列天线配置方案, 与上述的平面阵列天线配置不同, 研发了一种

S波段的圆柱形极化相控阵雷达(Cylindrical polarimetric phased array radar, CPPAR)演示样机,并进行了校准和气象探测实验[35]。使用单束机械扫描和换向束电子扫描,可以在各个方向上具有方位角和偏振扫描不变束的特性,从而可以进行高质量的天气监测。图10给出了CPPAR演示样机照片及圆柱形阵列天线原理性概念图示。CPPAR雷达技术规格列于表11。

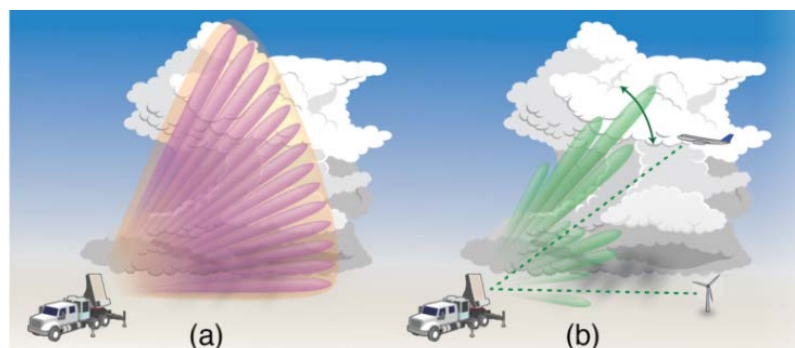


Figure 9. Schematic diagram of the working principle of HORUS fully digital polarized phased array weather radar (From [34])
图 9. “荷鲁斯”全数字极化相控阵天气雷达工作原理示意图(引自文献[34])

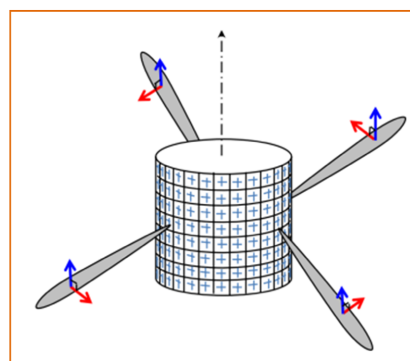
Table 10. The technical specifications of HORUS radar

表 10. “荷鲁斯”雷达技术规格

技术参数	范围	技术参数	范围
工作频率	2.7~3.1 GHz	最大面阵(面板)数	25 (1600 个双极化元件)
天线元件极化	ATSR/STSR/RHCP/LHCP	最大电扫角	$\pm 45^\circ$ 方位, $\pm 45^\circ$ 仰角
Tx 波形	AWG/LFM/NLFM	机械定位器	360° 方位角, $-1\sim 92^\circ$ 仰角
峰值功率(单个元件)	10 W/极化	孔径尺寸	$2.03 \times 2.03 \text{ m}^2$
最大 Tx 脉冲宽度	100 μs @10% 占空比	Tx/Rx 波束宽度	2.58° (无锥度)
最大 Tx 带宽	100 MHz	总信噪比损失 Tx/Rx	6.01/9.81 dB
元件间隔	0.5λ @2.951 GHz	灵敏度(1 个脉冲)	4.3 dBZ @50 km



(a) CPPAR演示样机



(b) CPPAR概念图示

Figure 10. CPPAR technology demonstrator and schematic diagram of the principle concept of cylindrical array antennas (From [35])

图 10. CPPAR 技术演示样机及圆柱形阵列天线原理性概念图示(引自文献[35])

Table 11. The technical specifications of CPPAR radar
表 11. CPPAR 雷达技术规格

技术参数	范围	技术参数	范围
工作频率	2.7~3.0 GHz	极化	双极化(h, v)
波形	LFM/NLFM	峰值功率	180 W/圆柱
脉冲宽度	1~100 μ s	动态范围	74 dB
脉冲重复时间	1~100 ms	噪声系数	2.8 dB
天线单元	贴片	带宽	1~5 MHz
波束宽度	方位角 6.20°, 仰角 5.35°	距离分辨率	30~150 m
旁瓣	≤ -28 dB	-	-

6.5. C 波段相控阵天气雷达(GLC-18C 型)

中国电子科技集团国睿科技公司研发的 GLC-18C 型雷达采用一维有源数字相控阵体制, 主要采用了全数字固态有源相控阵、频 - 相扫数字多波束、超低副瓣相控阵天线、基于先进三代半导体技术的大功率功放设计、数字多波束合成(DBF)、扫描波束修正补偿、大型天线阵面精度控制等技术。能够实时监测 450 km 范围内的强对流危险天气系统, 对 250 km 范围内的中尺度风暴、暴雨、风切变、冰雹、龙卷、大风等灾害性天气能进行有效的监测和预警。GLC-18C 型 PAR 天气雷达技术规格列于表 12 [36]。

Table 12. The technical specifications of GLC-18C radar
表 12. GLC-18C 雷达技术规格

技术参数	范围	技术参数	范围
工作频率	5.3~5.7 GHz	整机功耗	≤ 15 kW
脉冲功率	≥ 23 kW	数据更新时间	≤ 90 s (15 层)
天线口径	8.6 m	强度测量距离	≥ 400 km
天线扫描	方位角机扫	强度、速度测量距离	≥ 200 km
	俯仰角电扫	输出产品	强度、速度、谱宽

7. 总结与展望

天气雷达经历了从电子管、晶体管化、多普勒体制、双偏振多普勒体制到相控阵体制的发展历程。雷达探测从反射率因子单参量的观测发展到多参量观测, 缩短体扫时间以更精细地揭示小尺度天气系统结构, 也从常规雷达俯仰和方位上的机扫发展到相控阵快速电扫。

1) 美国、欧盟等国家在相控阵理论模型、基于机器学习/人工智能(AI)的动态观测数据处理理论方法、半导体材料以及低成本的固态阵列模块、宽带模拟和数字转换处理器等研究方面处于领先地位, 这些新技术的突破对于相控阵天气雷达发展将带来重要影响。

2) 相控阵天气雷达是当前天气雷达装备技术发展的热点, 正在起到重大作用。美国气象部门和研究机构率先开展的相控阵天气雷达作为下一代业务使用的天气雷达研究, 所取得的大量研究成果, 为我国新一代气象雷达网组网, 以及农业、水文、林业、交通等领域的应用提供了很好的借鉴和学习范例。

3) 短程气象探测正在成为相控阵天气雷达发展的重要方向。在小尺度强烈天气, 如冰雹、龙卷、短时强降水探测中, 更高观测精度, 更短体扫时间、更高时空分辨率, 能更精细地捕捉小尺度天气系统信息。

4) 目前正在兴起的 X 波段全固态相控阵气象雷达, 除发挥对天气系统采样的空间分辨率优势和减缓 X 波段降雨衰减的短板外, 还需要在提高固态发射机功率和信噪比等方面进一步研究。

5) 为进一步提升 PAR 在气象领域应用能力, 需要转化为基于机器学习/AI、数据驱动的动态观测框架。例如, 具有来自两个相控阵雷达输入的丰富数据生态系统和非相控阵雷达观测(即 GOES 观测卫星, 地面相机, WSR-88D 天气雷达), 可以通过一个机器学习系统更全面地描述天气系统状态, 建立基于地面传感器的实时跟踪与最佳估计位置制导, 以及加深对基础大气科学的理解。

6) 近年来, 我国相控阵天气雷达装备技术研究发展快速, 领域应用成效逐渐凸显。但应看到国内相控阵天气雷达装备技术还处于“跟跑”, 极少数技术点“并跑”的基本态势。持续提升相控阵天气雷达装备及其应用技术水平仍然是努力不懈的方向。

基金项目

本文得到国家重点研发计划项目(2022YFC3005401)的资助。

参考文献

- [1] Brown, R.A. and Lewis, J.M. (2005) Path to NEXRAD: Doppler Radar Development at the National Severe Storms Laboratory. *Bulletin of the American Meteorological Society*, **86**, 1459-1470. <https://doi.org/10.1175/BAMS-86-10-1459>
- [2] Bringi, V. and Zrníc, D. (2019) Polarization Weather Radar Development from 1970-1995: Personal Reflections. *Atmosphere*, **10**, Article 714. <https://doi.org/10.3390/atmos10110714>
- [3] 杨扬, 张建云, 戚建国, 等. 雷达测雨及其在水文中应用的回顾与展望[J]. 水科学进展, 2020, 11(1): 92-98.
- [4] Notaros, B.M. (2022) Polarimetric Weather Radar: Overview of Principles and Applications. *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, **64**, 43-54. <https://doi.org/10.1109/MAP.2022.3143442>
- [5] Ushio, T., Kim, D.K., Baron, P., et al. (2022) Recent Progress on the Phased Array Weather Radar at X Band. 2022 *IEEE Radar Conference*, New York, 21-25 March 2022, 1-4. <https://doi.org/10.1109/RadarConf2248738.2022.9764164>
- [6] 刘黎平, 胡志群, 吴翀. 双线偏振雷达和相控阵天气雷达技术的发展和应[J]. 气象科技进展, 2016, 6(3): 28-33.
- [7] 徐梦溪, 施建强, 王丹华. 天地网一体的水环境监测数据整合关键技术[J]. 水利信息化, 2021(2): 29-33.
- [8] Ryzhkov, A., Zhang, P.F., Bukovčić, P., Zhang, J. and Cocks, S. (2022) Polarimetric Radar Quantitative Precipitation Estimation. *Remote Sensing*, **14**, Article 1695. <https://doi.org/10.3390/rs14071695>
- [9] Zhao, K., Huang, H., Wang, M.J., et al. (2019) Recent Progress in Dual-Polarization Radar Research and Applications in China. *Advances in Atmospheric Sciences*, **36**, 961-974. <https://doi.org/10.1007/s00376-019-9057-2>
- [10] 谷军霞, 师春香, 潘旸. 天气雷达定量估测降水研究进展[J]. 气象科技进展, 2018, 8(1): 71-78.
- [11] 许小峰. NEXRAD: 走进“新一代”——天气雷达探测技术的起步与发展[J]. 气象科技进展, 2020, 10(6): 2-7.
- [12] 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.
- [13] 唐顺仙, 吕达仁, 何建新, 等. 天气雷达技术研究进展及其在我国天气探测中的应用[J]. 遥感技术与应用, 2017, 32(1): 1-13.
- [14] 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, 895.
- [15] 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.
- [16] Kostinski, A. and Boerner, W. (1986) On Foundations of Radar Polarimetry. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, **34**, 1395-1404. <https://doi.org/10.1109/TAP.1986.1143771>
- [17] 谢晓林, 杨泷, 董元昌, 等. 复杂地形背景下双偏振雷达数据质量评估方法[J]. 气象科技, 2023, 51(3): 346-355.
- [18] Cremonini, R., Voormansik, T., Post, P. and Moisseev, D. (2022) Estimation of Extreme Precipitations in Estonia and

- Italy Using Dual-Pol Weather Radar QPEs. *Atmospheric Measurement Techniques Discussions*, **220**, 1-17. <https://doi.org/10.5194/amt-2022-220>
- [19] Bringi, V.N., Hoferer, R., Brunkow, D.A., *et al.* (2011) Design and Performance Characteristics of the New 8.5-m Dual-Offset Gregorian Antenna for the CSU-CHILL Radar. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, **28**, 907-920. <https://doi.org/10.1175/2011JTECHA1493.1>
- [20] Imai, R. and Takahashi, N. (2022) Analysis of the Three-Dimensional Structure of the Misocyclones Generating Waterspouts Observed by Phased Array Weather Radar: Case Study on 15 May 2017 in Okinawa Prefecture, Japan. *Remote Sensing*, **14**, Article 5293. <https://doi.org/10.3390/rs14215293>
- [21] Ushio, T., Kim, D.K., Baron, P., *et al.* (2022) Recent Progress on the Phased Array Weather Radar at X Band. 2022 *IEEE Radar Conference*, New York, 21-25 March 2022, 1-4. <https://doi.org/10.1109/RadarConf2248738.2022.9764164>
- [22] Adachi, T., Kusunoki, K., Yoshida, S., Arai, K.I. and Ushio, T. (2016) High-Speed Volumetric Observation of a Wet Microburst Using X-Band Phased Array Weather Radar in Japan. *Monthly Weather Review*, **144**, 3749-3765. <https://doi.org/10.1175/MWR-D-16-0125.1>
- [23] Zhao, G., Huang, H., Yu, Y., *et al.* (2023) Study on the Quantitative Precipitation Estimation of X-Band Dual-Polarization Phased Array Radar from Specific Differential Phase. *Remote Sensing*, **15**, Article 359. <https://doi.org/10.3390/rs15020359>
- [24] 胡林宏, 周红根, 沈邦跃, 等. 相控阵天气雷达数据压缩技术[J]. 气象科技, 2023, 51(3): 356-365.
- [25] Heinselman, P.L. and Sebastian, M.T. (2011) High-Temporal-Resolution Capabilities of the National Weather Radar Testbed Phased-Array Radar. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, **50**, 579-593. <https://doi.org/10.1175/2010JAMC2588.1>
- [26] 高玉春, 陈浩君, 步志超, 等. 从第 39 届国际气象雷达会议看相控阵天气雷达发展[J]. 气象科技进展, 2020, 10(6): 14-18.
- [27] Harger, M., Conway, M.D., Thomas, H., *et al.* (2022) An Update on the Fully Digital Phasedarray Development for Next Generation Weather Radar. 2022 *IEEE Radar Conference*, New York, 21-25 March 2022, 1-6. <https://doi.org/10.1109/RadarConf2248738.2022.9764346>
- [28] Pavlos, K., Robert, P., David, B., *et al.* (2022) Science Applications of Phased Array Radars. *Bulletin of the American Meteorological Society*, **10**, 2370-2390.
- [29] Kollias, P., Luke, E.P., Tuftedal, K., Dubois, M. and Knapp, E.J. (2022) Agile Weather Observations Using a Dual-Polarization X-Band Phased Array Radar. 2022 *IEEE Radar Conference*, New York, 21-25 March 2022, 1-6. <https://doi.org/10.1109/RadarConf2248738.2022.9764308>
- [30] 刘黎平, 吴林林, 吴狮, 等. X 波段相控阵天气雷达对流过程观测外场试验及初步结果分析[J]. 大气科学, 2014, 38(6): 1079-1094.
- [31] 气象局. 气象观测技术发展引领计划(2020-2035 年) [EB/OL]. https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2019-11/04/content_5456909.htm, 2023-11-09.
- [32] 中国气象报社. 直击全国首部 S 波段双偏振相控阵天气雷达建设——强对流监测预警添利器[EB/OL]. https://www.cma.gov.cn/2011xwzx/ywfw/202208/t20220801_5010582.html, 2023-11-12.
- [33] 李柏. 中国气象雷达技术发展及面临的挑战[J]. 气象科技进展, 2022, 12(5): 37-46.
- [34] Palmer, R.D., Yeary, M.B., Schwartzman, D., *et al.* (2023) Horus—A Fully Digital Polarimetric Phased Array Radar for Next-Generation Weather Observations. *IEEE Transactions on Radar Systems*, **1**, 96-117. <https://doi.org/10.1109/TRS.2023.3280033>
- [35] Zhang, G.F. (2022) Cylindrical Polarimetric Phased Array Radar for Weather Observations: An Review. 2022 *IEEE Radar Conference*, New York, 21-25 March 2022, 1-5. <https://doi.org/10.1109/RadarConf2248738.2022.9764328>
- [36] 国睿科技. 产品展示[EB/OL]. <http://www.glaruntech.com/product.php?id=94>, 2023-11-12.