

DOI:10.16356/j.1005-2615.2018.05.001

毫米波气象雷达发展与应用

葛俊祥^{1,2} 汪洁^{1,2} 王金虎³ 林海^{1,2}

(1. 南京信息工程大学雷达技术研究所, 南京, 210044; 2. 南京信息工程大学电子与信息工程学院, 210044;
3. 南京信息工程大学大气物理学院, 南京, 210044)

摘要:相比于微波,毫米波的频率更高、波长更短、频率范围更宽,对于大气中云粒子等微小粒子的探测具有高时空分辨率等优势。毫米波气象雷达可以实现对大气、云、气溶胶等更精确的观测,可以提高现有气象数值预报的准确性,可以探测和预报极端性气象灾害的发生。鉴于毫米波气象雷达在大气探测领域的诸多独有优势,毫米波气象雷达的发展和应用已经成为中国未来气象探测装备发展的重要方向。本文介绍了毫米波雷达技术的发展、特点及其典型应用,探讨了毫米波气象雷达在大气探测中的应用,并总结了作者在毫米波气象雷达研究方面取得的研究成果。最后展示了毫米波气象雷达发展中存在的主要问题和关键技术。

关键词:毫米波;气象雷达;大气探测

中图分类号:TN958 文献标志码:A 文章编号:1005-2615(2018)05-0577-09

Development and Application of Millimeter Wave Weather Radar

GE Junxiang^{1,2}, WANG Jie^{1,2}, WANG Jinhu³, LIN Hai^{1,2}

(1. Institute of Radar Technology Research, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing, 210044, China; 2. School of Electronic & Information Engineering, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing, 210044, China;
3. School of Atmospheric Physics, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing, 210044, China)

Abstract: Compared with microwave, millimeter wave has higher frequency, shorter wavelength and wider frequency range. And it has advantages of high spatial and temporal resolution for detecting small particles such as cloud particles in the atmosphere. Therefore, millimeter wave weather radar can realize more accurate observation of atmosphere, cloud, aerosol, etc. It can improve the accuracy of existing meteorological numerical forecast, and can detect and forecast the occurrence of extreme weather disasters. In view of the unique advantages of millimeter-wave weather radar in the field of atmospheric detection, the development and application of millimeter-wave weather radar has become an important direction of the future development of meteorological detection equipment in China. This paper introduces the development, characteristics and typical applications of millimeter wave radar technology, discusses the application of millimeter wave meteorological radar in atmospheric detection, and introduces the re-

基金项目:国家自然科学基金(61671249)资助项目;江苏省“双创团队”(2015年)资助项目。

收稿日期:2018-09-10;**修订日期:**2018-10-08

作者简介:葛俊祥,男,博士,教授,博士生导师。主要从事毫米波雷达系统、电磁散射理论与天线技术等方面研究。江苏省高层次创新创业二级人才,江苏省“双创团队”领军人才,江苏省“信息与通信工程优势学科”建设项目学科带头人。主持和参加各类课题 40 余项,发表学术论文 100 余篇,获得国内外各类授权专利 40 项(国外授权发明专利 11 项)。以排名第一获教育部科技进步二等奖以及中国航空工业总公司科技进步三等奖。中国气象学会气象通信与技术委员会副主任,中国电子学会通信学分会委员,江苏省通信学会卫星与导航专委会主任,江苏省电子学会常务理事。

通信作者:葛俊祥, E-mail: jxge@nuist.edu.cn.

引用格式:葛俊祥,汪洁,王金虎,等. 毫米波气象雷达发展与应用[J]. 南京航空航天大学学报, 2018, 50(5): 577-585.
GE Junxiang, WANG Jie, WANG Jinhu, et al. Development and application of millimeter wave weather radar[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2018, 50(5): 577-585.

search results of millimeter wave meteorological radar. Finally, the main problems and key technologies in the development of millimeter wave meteorological radar are presented.

Key words: millimeter wave; meteorological radar; atmospheric detection

毫米波是指频率在 30~300 GHz 范围内的电磁波,其波长范围为 1~10 mm。相对于微波(0.3~30 GHz),毫米波的频率更高、波长更短、频率范围更宽。同时,由于毫米波还定义和涵盖了部分太赫兹波低频波段,因而具备部分太赫兹波(0.1~10 THz)的特点^[1]。

基于毫米波的诸多特点,它首先被应用于军事雷达领域。近 20 年来,随着微电子技术、材料技术以及电路计算机仿真技术的发展,毫米波器件的性能和电路集成度有了大幅度的提高,同时生产成本也有了大幅度的下降,毫米波器件技术发展和器件品种的日趋丰富多样,为军用毫米波技术和包括气象雷达等在内的毫米波民用技术发展提供了可能^[2]。在毫米波波段用于雷达探测和通信的“大气窗口”包括 35,45,94,140 和 220 GHz 频段。

毫米波气象雷达是毫米波技术的重要应用领域。云是调节大气环流、气候变化非常重要的因素之一,它在大气能量分配、辐射传输以及水循环中具有非常重要的作用。因此,在对地球大气系统研究中,云始终是一个重要的研究对象,也是大气探测的重要对象之一。然而,由于云粒子的几何尺寸非常小,通常在数微米到数百微米之间,对于传统的米波或厘米波气象雷达而言,其电磁散射极为弱小,处于瑞利电磁散射的低散射区,采用米波或厘米波气象雷达很难实现对云的有效探测、识别和成像等。毫米波由于具有更接近云粒子尺寸的短波长,其瑞利散射较频率呈四次方增加,因而更适合于云等微小粒子的探测。同时,由于毫米波频率很高,其探测运动下的云多普勒效应更加明显,探测精度更高。对于毫米波雷达系统而言,天线可以在较小孔径尺寸下获得较窄的天线波束和较高的天线增益,因而可获得较高的雷达空间分辨力,易于实现目标云的高精度雷达成像。毫米波气象雷达除了能够连续观测云厚、云高、云底、云量等宏观参数外,还可获得云内的微物理参量,如云粒子大小、浓度、滴谱分布、冰与液态水的含量等^[3-4]。

本文主要介绍毫米波雷达技术在大气探测中的应用和发展。同时,介绍作者在毫米波气象雷达研究方面研究成果,最后提出了未来毫米波气象雷达的发展方向。

1 毫米波雷达技术发展

1.1 毫米波雷达特点及其发展历程

近些年,毫米波雷达技术受到高度重视和深入研究的主要原因是由于毫米波雷达具有以下重要的特性:毫米波具有较宽的工作频带,适用于各种宽带雷达信号的处理;毫米波天线可以在较小孔径下获得较窄的波束和方向性,易于雷达获得较高的空间分辨力和跟踪精度;毫米波雷达具有较宽的多普勒宽带和多普勒分辨力,多普勒效应明显,测速精度高;具有窄波束特性的毫米波雷达,其受地杂波和多径效应的影响较小,雷达低空跟踪性能强;毫米波波段的电磁散射对目标几何形状和构成等细节较为敏感,毫米波雷达可以获得较高的目标识别能力和成像质量;毫米波雷达较宽的工作频段和较窄的天线波束,便于实现良好的电子对抗和低截获率;对于大多数隐身目标而言,由于不具备对毫米波波段的良好隐身,毫米波雷达探测隐身目标的发现概率较高;毫米波与激光和红外相比,具有较强的烟、灰尘和雾的穿透能力,可全天候工作^[5-6]。

自 20 世纪 40 年代开始国外就开展了毫米波雷达技术的研究。50 年代国外开发出用于机场交通管制和船用导航的 Ka 波段(26.5~40 GHz)毫米波雷达。不过,由于技术和成本上的原因,特别是毫米波器件技术和加工工艺等问题,毫米波雷达的发展一度受到限制和停顿。在毫米波雷达关键技术问题中,雷达发射机的发射功率和工作效率,接收机的低噪声放大和低损耗混频,以及高增益高效率天线的设计和制作等,在很大程度上限制了毫米波雷达的作用距离和探测能力,使得毫米波雷达难以满足实际需要。进入 70 年代中期后,随着毫米波理论与技术,特别是新型毫米波器件技术的发展,如:大功率毫米波电真空器件(磁控管、行波管、返波管等)、毫米波固态器件(如雪崩二极管、耿氏二极管、肖特基二极管等),使得毫米波雷达技术得到迅速的发展和應用。典型的毫米波脉冲雷达的固态发射峰值功率可达 5~15 W(95 GHz),电真空发射峰值功率可达 1~6 kW(95 GHz)或 1 kW(140 GHz)。在毫米波雷达接收机低噪声混频器方面,肖特基二极管混频器在毫米波段已可工作到 100 GHz,低噪声混频器噪声温度可低至

500 K(未致冷)或 100 K(致冷)。70 年代后期,毫米波雷达技术逐渐开始应用于军事雷达领域,如毫米波近程高分辨防空雷达系统、毫米波制导雷达系统、毫米波成像雷达系统、毫米波微小目标探测雷达系统等。

进入 21 世纪,随着毫米波单片微波集成电路(Monolithic microwave integrated circuit, MMIC)、现场可编程门阵列(Field-programmable gate array, FPGA)、数字信号处理(Digital signal process, DSP)芯片以及软件仿真技术的高速发展,以低廉的车载毫米波防撞雷达系统为代表的民用毫米波雷达得到飞速的发展,目前车载毫米波防撞雷达已逐渐成为许多汽车的标配。具有小型、低功耗、高精度等特征的毫米波雷达技术已在国防及国民经济许多领域逐步得到应用^[7-8]。

1.2 毫米波雷达的典型应用

毫米波在军事领域的应用是推动毫米波技术,特别是毫米波雷达技术发展的重要动力。基于毫米波雷达的窄波束和高精度特性,毫米波雷达特别适合于火控雷达和制导雷达的应用,如中国的近防火炮用毫米波火控雷达、低空反舰导弹毫米波制导雷达等;基于毫米波雷达的全天候和对烟、雾、尘、雪等较强的穿透特性,以及较强的抗电子干扰能力,毫米波雷达非常适合于机载和舰载使用,如美国安装在武装直升机上的 APG-78“长弓”毫米波机载雷达等。除此之外,基于毫米波雷达的超高频、超宽带和小型化特性,毫米波雷达在战场侦测领域也具有广泛的应用,它具有非常好的反隐身能力,是现代战场侦察的主要装备之一,如英国耐威技术公司的 W500/W350/W200 等系列毫米波战场侦测雷达等^[6,9]。

近年来,以 MMIC 为代表的毫米波集成技术飞速发展,使毫米波雷达逐渐在民用领域得到应用。其中,毫米波安检成像雷达和毫米波车载防撞雷达是两个最典型的代表^[10-11]。(1)传统的机场等安全检查是借助于 X 射线的透视成像检查,这种检查方式虽然简单可靠,但对于被检查人员和检查人员或多或少存在一定的人体损害。毫米波安检成像雷达可以弥补这一缺陷,实现无害安检。目前,毫米波安检成像雷达成像主要分为主动式和被动式两种工作模式:主动式毫米波安检成像雷达通过发射毫米波并接受目标物反射的毫米波信号进行成像;被动式毫米波成像雷达则借助于被检查人体自身的弱毫米波辐射,通过高灵敏接收实现安检

成像。毫米波安检成像雷达已在机场、地铁等重要场所得到广泛应用,它可以清晰地呈现出人体衣物与皮肤之间藏匿的不同材质危险物品,如枪支、刀具、炸药、强腐蚀或易爆液体等违禁物品。(2)随着汽车自动驾驶技术的研发,毫米波车载防撞雷达已成为毫米波雷达在民用领域又一个典型应用,目前国内外不少企业投入重金用于该类毫米波雷达的研制,其中 77 GHz 毫米波防撞雷达产品已较为成熟,且产品价格较低。

2 毫米波气象雷达

2.1 毫米波气象雷达的主要特点及应用

自由空间的毫米波传播特性表明,水分子等对毫米波的传播具有较高的吸收性,不利于毫米波,特别是短毫米波的传播。因此,毫米波气象雷达更多地用于云的探测,包括云厚、云高、云底、云量等宏观参数探测,也包括云粒子大小、浓度、滴谱分布、冰与液态水含量等微观参数探测。气象学研究表明,在利用全球模式预测地表温度的幅值变化对温室气体的影响时,最大的不确定性是云的参数化问题。正是由于云及其辐射场的重要性以及不确定性,许多国家都设立了大型云观测实验计划,中国也在“十三五”期间设立了包括毫米波气象雷达在内的多波段气象雷达综合观测实验项目。

云的观测可通过卫星或地基遥感探测、现场飞机的观测以及模型仿真进行。卫星遥感的优点在于能够提供全球云的覆盖情况,具有更大范围的观测优势,但对于小尺度云微观测以及高时间分辨率而言,地基遥感更能够显示出其特有的优越性。

2.2 国内外毫米波气象雷达的发展

二次世界大战结束后的 20 世纪 40 年代后期,以美国为代表的西方国家,纷纷研究将二战时期的军用警戒雷达改装成用于强对流天气监测的气象雷达,由此诞生了雷达的又一支:气象雷达。如 1953 年美国空军研制出的用于探测机场周围强对流天气的 CPS-9(X 波段)气象雷达,1957 年美国国家天气局研制生产的用于强对流天气探测和大范围降水监测的 WSR-57(S 波段)气象雷达等。这一时期的气象雷达主要采用模拟信号接收和模拟显示。20 世纪 60~70 年代,随着半导体和数字技术以及计算机仿真技术的发展,气象雷达开始走向数字化,如美国 WSR-81S(S 波段)气象雷达等。由于雷达采用了数字化技术,可以形成多种直观的数字图像产品,提高了气象产品的直观性。20 世

纪80年代初美国开始全相干脉冲多普勒气象雷达的研制,称为下一代气象雷达(NEXRAD)。该多普勒气象雷达不仅提高了探测能力,还具备了获取风场信息的功能,并提供了丰富的监测和预警产品。20世纪90年代美国NEXRAD业务布网完成,并在2010年完成了双极化改造。欧洲及日本基本沿用美国气象雷达的工作方式,时间滞后约5~10年。

中国的第一部气象雷达是20世纪60年代末研制生产的X波段测雨雷达,之后在70年代生产的C波段气象雷达正式在全国布网。80年代中国研制出具有数字处理系统的S波段气象雷达,同时开展了对常规气象雷达进行数字化改造。80年代后期在从国外引进多普勒气象雷达的同时,开展了自主研发工作。90年代研制出C波段全相干多普勒气象雷达。1998年中美合作在继承美国原多普勒气象雷达优点的基础上,重新设计出先进的S波段全相干脉冲多普勒气象雷达(CINRAD/SA)。目前CINRAD系列S和C波段多普勒气象雷达已在中国气象部门得到广泛应用^[12]。

近30多年来,美、日、英、德、法等国开展了各类毫米波气象雷达系统的研究,相继研制出Ka波段和W波段地基毫米波气象雷达系统。

美国在军用雷达气象应用的同时开展了毫米波气象雷达的研制工作。1947年,美国空军研制出了工作于Ka频段的毫米波气象雷达(AN/TPQ-6),可用于测量云层的高度等。之后,美国一直对该毫米波气象雷达系统不断完善,到60年代研制出了AN/TPQ-11^[13]型毫米波气象雷达并进行了小批量生产,成为国际上最早投入使用的毫米波气象雷达。然而,受当时元器件和材料等条件限制,此款毫米波气象雷达在之后的很长时间内未得到进一步改进和发展。直至80年代,Hobbs等人^[14]开始对AN/TPQ-11型毫米波气象雷达进行升级改造,分别增加了多普勒探测、双极化(线极化和圆极化)扫描等功能,并开始用于观测风暴云结构等。1987年Lhermitte首次研制出了探测云的94 GHz毫米波气象雷达^[15-16],用于研究层积云的物理结构,首次证明了94 GHz毫米波气象雷达在弱气象目标物探测方面的优势和潜力。90年代美国微波遥感实验室又研制出更加先进的机载94 GHz毫米波多普勒极化云雷达^[17],用于观测云体的各种云物理数据。之后又研究出了35/94 GHz双波段毫米波气象雷达系统^[18],该雷达系统

可以定向或扫描观测云内冰、过冷水和雨滴谱等微观特性。另外,美国于90年代还设立了大气辐射测量计划(Atmospheric radiation measurement program, ARM),在几个气候变化区域部署无人值守的35 GHz毫米波气象雷达,用于观测非降水云和弱降水云^[19]。2000年以后,ARM计划又将毫米波气象雷达的工作频率提高到94 GHz^[20]。美国NASA于2006年还发射了首颗搭载94 GHz毫米波气象雷达的地球科研探测卫星,这是首次发射地基毫米波气象雷达,提高了全球云层的探测能力^[21]。

德国GKSS研究中心于1999年研制出94 GHz毫米波气象雷达,用于观测层状云^[22]等。英国于90年代后期研制出了Copernicus(35 GHz)和Galileo(94 GHz)两部毫米波气象雷达系统,该雷达被安置在Chilbolton观测场,用于云降水物理的研究,目前仍在服役中。此外,英国雷丁大学于2004年研制出了35 GHz地基毫米波气象雷达Rabelais,用于研究层积云底部细雨的微观物理特征等。

日本主要对Ka波段地基毫米波气象雷达以及W波段机载毫米波气象雷达进行研究和开发。2003年,日本京都大学联合三菱公司研制出了Ka波段毫米波多普勒气象雷达,用于雾的观测,该雷达可以观测海雾的三维结构^[23]。日本国家通信研究机构(NICT)也研制出了95 GHz机载毫米波气象雷达SPIDER,其扫描角度为 $-40^{\circ}\sim 95^{\circ}$,峰值功率达1.6 kW,可用于飞机飞行安全预警以及研究云的物理特性等。

法国和意大利于2016年共同提出了一种低造价的95 GHz毫米波多普勒云雷达BASTA^[24]。通过连续地发射较低的能量和特定的信号处理技术,获得了高质量的云雾测量结果。

中国自2006年以来在毫米波气象雷达研究和开发方面也取得一系列重要成果,相继研制出Ka波段和W波段地基毫米波气象雷达以及W波段机载毫米波气象雷达等。2006年安徽四创电子公司和空军第七研究所联合研制出35 GHz毫米波气象雷达,用于云内积冰的观测;2013年,在国家八六三“机载气象雷达云雨探测系统”项目支持下,又研制出94 GHz机载毫米波气象雷达系统,并在国产运七飞机上完成了飞行试验。2007年中国气象科学研究院与中国航天科工23所联合研制出35 GHz地基毫米波气象雷达,用于观测云降水、

台风、降雪等;2013年,又进一步实现了该毫米波气象雷达的全固态化。2008年南京电子技术研究所研制出Ka波段毫米波中频相参气象雷达系统^[25],并在南京、北京和内蒙等地进行了测试。在国家科技部公益性(气象)行业专项“毫米波云雷达关键技术研究”项目支持下,南京信息工程大学雷达技术研究所于2013年研制出94GHz地基毫米波云雷达系统,并进行了地面气象探测。

2.3 毫米波气象雷达技术

2.3.1 典型粒子/群的电磁散射^[26-28]

由于毫米波波长更贴适于云粒子几何尺度,各种大气粒子/群对其的电磁散射将有别于低频段的气象雷达,现有的微波气象雷达反演理论难以直接

有效地应用于毫米波气象雷达。因此,需要从基本的电磁散射理论出发,对毫米波下各类大气粒子/群的电磁散射特性进行研究,建立一套大气参数反演理论。

自2012年起,作者利用等效Lorenz-Mie理论以及离散偶极子近似理论(Discrete dipole approximation, DDA)分析计算了毫米波频率下的卷云随机取向6种典型卷云冰晶粒子(图1)的电磁散射特性。对比结果表明:在毫米波频率下,利用等效体积与投影面积比值Lorenz-Mie理论计算的结果与DDA的结果最接近,并且利用最小二乘法拟合出了误差公式,为等效球理论代替DDA计算复杂的冰晶粒子电磁散射特性提供了重要参考。

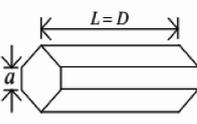
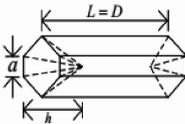
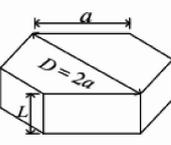
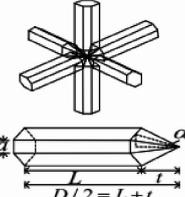
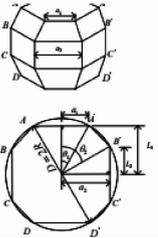
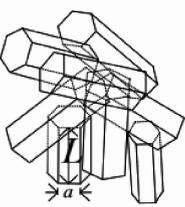
几何形状	轴比关系	几何形状	轴比关系
 <p>Column</p>	$a = 0.35L \quad L < 100 \mu\text{m}$ $a = 3.48L^{0.5} \quad L \geq 100 \mu\text{m}$	 <p>Hollow</p>	$a = 0.35L \quad L < 100 \mu\text{m}$ $a = 3.48L^{0.5} \quad L \geq 100 \mu\text{m}$ $h = 0.25L$
 <p>Plate</p>	$L = 2a \quad a \leq 2 \mu\text{m}$ $L = 2.4883a^{0.474} \quad a \geq 5 \mu\text{m}$ $L = 2 + ((2.4883a^{0.474} - 2)/4) \cdot (a - 1)$ $2 \mu\text{m} < a < 5 \mu\text{m}$	 <p>6-Branch Bullet Rosette</p>	$a = 1.552L^{0.63}$ $t = \frac{\sqrt{3}a}{2\tan\alpha} \quad \alpha = 28^\circ$
 <p>Droxtal</p>	$D = 2R$ $a_1 = R\sin\theta_1 \quad a_2 = R\sin\theta_2$ $L_1 = R\cos\theta_1 \quad L_2 = R\cos\theta_2$ $\theta_1 = 32.35^\circ \quad \theta_2 = 71.81^\circ$	 <p>Aggregate</p>	$a_1 = 0.291L_1 \quad a_2 = 0.323L_2$ $a_3 = 0.359L_3 \quad a_4 = 0.381L_4$ $a_5 = 0.368L_5 \quad a_6 = 0.352L_6$ $a_7 = 0.333L_7 \quad a_8 = 0.312L_8$ $D = 7.297L_{\min}$

图 1 6种典型卷云冰晶粒子

Fig. 1 Six kinds of ice crystal particles of cirrus cloud

2.3.2 毫米波云雷达关键技术

(1)94 GHz 双极化毫米波天线技术研究^[29]

双极化气象雷达是气象雷达的一个重要发展方向,“十三五”期间中国开始对现有气象雷达逐步改造。对于毫米波,特别是短毫米波而言,采用复杂的微波网络实现天线的双极化将产生比较大的损耗和相位误差。为此,作者采用了波导正交摸设计思想,在94GHz短毫米波波段设计出了隔离度大于40dB,直径为50cm的毫米波卡塞克伦天线(图2),天线增益为47.3dB,效率大于87.8%。

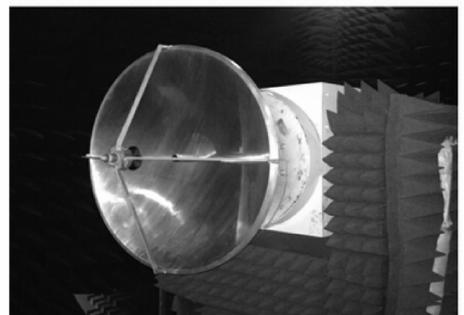


图 2 94 GHz 双极化毫米波天线

Fig. 2 94 GHz dual-polarized MMW antenna

(2) 35 GHz/94 GHz 双波段毫米波天线技术研究^[30]

35 GHz 和 94 GHz 是大气的两个电磁波传播“窗口”,利用不同波段毫米波实现气象雷达的多元粒子探测、数据反演和数据融合是气象探测研究中的一项重要工作。因而,研究和开发 35 GHz/94 GHz 双波段毫米波气象雷达已成为未来毫米波气象雷达的又一重要发展方向,而其中的 35 GHz/94 GHz 双波段毫米波天线是一项关键技术。为此,作者采用波导正交模结合滤波器设计技术研制出直径 80 cm 的 35 GHz/94 GHz 双波段毫米波高隔离度卡塞克伦天线(图 3),天线在 35 GHz/94 GHz 频率的隔离度大于 60 dB,增益为 43.6/51.3 dB。

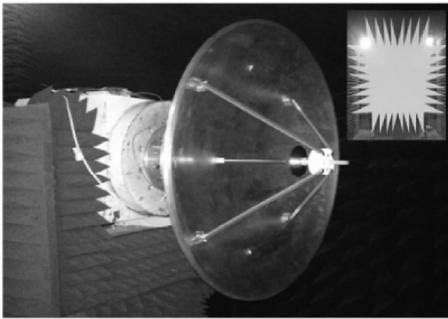


图 3 35 GHz/94 GHz 双波段毫米波天线

Fig. 3 35 GHz/94 GHz dual-band MMW antenna

(3) 94 GHz 毫米波大功率合成技术^[31]

制约毫米波雷达发展的关键问题之一是毫米波雷达发射功率受限问题。目前,国内在毫米波大功率器件研制方面虽有长足发展,但依然是一个需要进一步突破的关键技术问题。采用功率合成技术是解决毫米波雷达大功率发射的首选。为此,作者设计了一种具有自我保护作用的毫米波脉冲大功率合成网络(图 4),在 94 GHz 毫米波波段实现了两个约 100 W 脉冲大功率源的高效合成,得到了脉冲输出功率 194 W 的大功率,合成效率达到 84.6%。

(4) 94 GHz 地基毫米波云雷达系统研制^[32]

自 2012 年起,在国家科技部公益性(气象)行业专项支持下,作者在国内首次开展了 94 GHz 地基毫米波云雷达系统的研制。该 94 GHz 地基毫米波云雷达系统采用了全相参 PD(Pulse Doppler)脉冲压缩和单发双收新型双极化毫米波气象雷达体制。雷达研制中先后解决了双极化共面天线设计、大功率脉冲发射、双通道接收平衡以及双极化

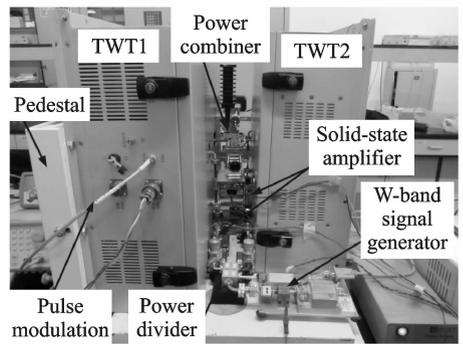


图 4 94 GHz 毫米波脉冲大功率合成系统

Fig. 4 94 GHz pulsed power combining system

云探测算法等一系列关键技术问题。2013 年底,该雷达系统研制获得成功,取名“天剑一号”(图 5)。雷达中心工作频率为 94 GHz、脉冲发射功率 100 W,采用双通道平衡接收系统、雷达目标探测范围为 $-30 \sim 55$ dBz、天线波束宽度 0.5° 、共面同频双极化天线隔离度达 42 dB,雷达有效探测距离 15 km,距离分辨率 35 m。

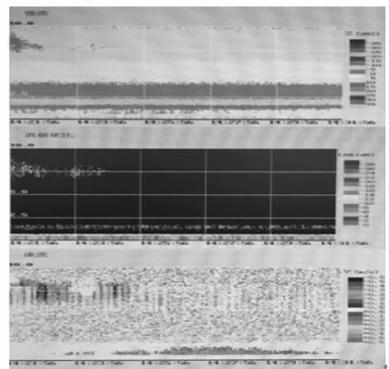


图 5 南京信息工程大学研制的 94 GHz 地基毫米波云雷达系统“天剑一号”及其测试结果

Fig. 5 “Tianjian I” 94 GHz MMW Cloud Radar, designed by NUIST and its test results

3 毫米波气象雷达发展方向

毫米波气象雷达探测对象大多是大气中的云粒子、气溶胶等微小粒子,它们对电磁波的散射能

力非常弱。因此,毫米波气象雷达的大功率发射和高灵敏接收,以及天线设计成为主要问题。而目前国内对毫米波段大功率器件以及低噪声放大器的研究较为欠缺,特别是大功率毫米波固态器件。现有的大功率电真空器件具有使用环境要求高、寿命短、造价高等缺点,不利于毫米波气象长时间工作的情况。研制具有长寿命、低造价的大功率毫米波固态器件成为毫米波雷达的一个重要研究方向。

毫米波气象雷达的参数反演以及定标等都需要相应的理论支持,其中云粒子/群的电磁散射分析与计算是一个主要问题。开展毫米波云等粒子/群电磁散射基础研究,建立更加符合实际大气云粒子特点及分布的模型,发展相应的理论算法是又一个重要研究方向。

然而就毫米波气象雷达技术而言,作者认为目前还存在着3项关键技术有待突破:

(1) 高度集成化、组合化和低成本的毫米波射频前段组合器件^[33]

以金属波导为基础的第一代微波电路至今仍然得到广泛的应用,而金属波导器件存在体积大、加工成本高、不利于集成等问题;以平面结构以及晶体管等固态电子器件为基础的第二代混合平面微波电路实现了小型化和平面结构,但存在传输损耗大、时延严重等问题;随着砷化镓、氮化镓等半导体材料及加工设计技术的发展,迎来了第三代MMIC单片微波集成电路的发展,该项技术不仅进一步缩小了微波毫米波电路的体积,而且大大降低了毫米波雷达射频前段的成本,提高了器件性能。因此,研究和开发毫米波气象雷达用集成化、组合化和低成本的毫米波射频前段组合器件是一项需要突破的关键技术。

(2) 全相控阵及数字波束技术的应用^[34-35]

目前气象雷达主要采用机械扫描的工作方式,其扫描对于发展速度较强的强对流灾害天气,如雷暴、冰雹和龙卷等很难实现有效和及时的发现及监测。而全相控阵及数字波束技术是实现和满足以上气象探测要求的有效方法。全相控阵的另一个优势是便于实现毫米波大功率发射源的空间功率合成,获得毫米波气象雷达所需的大功率发射。

(3) 实时定标技术的突破

毫米波气象雷达器件的微小变化所带来的探测数据的不稳定通常较微波气象雷达更加严重。因此,实现包括天馈系统在内的毫米波气象雷达实时定标是保证探测数据质量的关键。但目前该项

技术尚处于研究阶段,其主要难点一方面是需要云等粒子/群电磁散射理论研究和实验测试方面有所突破,另一方面是需要包括天线、馈电系统、发射和接收系统在内的雷达实时定标方法方面有所突破。

4 结束语

毫米波气象雷达发展和应用已经成为中国未来气象探测装备发展的重要方向。从美国等发达国家气象探测的应用实例来看,毫米波气象雷达可以实现对大气、云、气溶胶等更精确的观测,可以提高现有气象数值预报的准确性,并探测和预报极端性气象灾害的发生。毫米波气象雷达的研究与开发对于开展更为精细、局部的大气理论研究具有重要的辅助作用,同时对于气象军事应用和保障也具有重要意义。

参考文献:

- [1] 洪伟,余超,陈继新,等.毫米波与太赫兹技术[J].中国科学:信息科学,2016,46(8):1086.
HONG Wei, YU Chao, CHEN Jixin, et al. Millimeter wave and terahertz technology[J]. Scientia Sinica Informationis, 2016, 46(8):1086.
- [2] SHEEN D M, MCMAKIN D L, HALL T E. Three-dimensional millimeter-wave imaging for concealed weapon detection[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory Techniques, 2001, 49(9):1581-1592.
- [3] 沈瑾,甘泉,邓小丽,等.天气雷达的现状与发展趋势[J].电子设计工程,2011,19(16):82-85.
SHEN Jin, GAN Quan, DENG Xiaoli, et al. Current situation and development trend of weather radar[J]. Electronic Design Engineering, 2011, 19(16):82-85.
- [4] 张培昌,杜秉玉,戴铁丕.雷达气象学[M].北京:气象出版社,2001.
ZHANG Peichang, DU Bingyu, DAI Tiepei. Radar meteorology [M]. Beijing: China Meteorological Press, 2001.
- [5] 石星.毫米波雷达的应用和发展[J].电讯技术,2006,46(1):1-9.
SHI Xing. Application and development of millimetre-wave radars [J]. Telecommunication Engineering, 2006, 46(1):1-9.
- [6] 王少华,印世平,秦晓磊.毫米波雷达在军事对抗中的应用[J].兵器装备工程学报,2010,31(5):30-32.
WANG Shaohua, YIN Shiping, QIN Xiaolei. Application of millimeter wave radar in military counter-

- measures[J]. *Journal of Ordnance Equipment Engineering*, 2010, 31(5):30-32.
- [7] ALBRECHT J D, CHANG T H, KANE A S, et al. DARPA's nitride electronic next generation technology program[C]//2010 IEEE Compound Semiconductor Integrated Circuit Symposium (CSICS). Monterey, CA, USA: IEEE, 2010:1-4.
- [8] RAPPAPORT T S, MURDOCK J N, GUTIERREZ F. State of the art in 60-GHz integrated circuits and systems for wireless communications[J]. *Proceedings of the IEEE*, 2011, 99(8):1390-1436.
- [9] FANG T X, JIANG Y H, YA-KUN L I, et al. Application research for millimeter-wave technology on guidance shell[J]. *Journal of Projectiles Rockets Missiles & Guidance*, 2007, 27(3):140-142.
- [10] ADELA B B, ZEIJL P T M V, JOHANNSEN U, et al. On-chip antenna integration for millimeter-wave single-chip FMCW radar, providing high efficiency and isolation[J]. *IEEE Transactions on Antennas & Propagation*, 2016, 64(8):3281-3291.
- [11] SHEEN D M, FERNANDES J L, MCMAKIN D L, et al. Wide-bandwidth, wide-beamwidth, high-resolution, millimeter-wave imaging for concealed weapon detection[C]//SPIE Defense, Security, and Sensing. [S. l.]: The International Society for Optical Engineering, 2013:871509.
- [12] 仲凌志, 刘黎平, 葛润生. 毫米波测云雷达的特点及其研究现状与展望[J]. *地球科学进展*, 2009, 24(4):383-391.
- ZHONG Lingzhi, LIU Liping, GE Runsheng. Research status and prospect of millimeter wave cloud radar characteristics[J]. *Advances in Earth Science*, 2009, 24(4):383-391.
- [13] PETROCCHI R J, PAULSEN W H. Meteorological significance of vertical density profiles of clouds and precipitation obtained with the An/TPQ-11 radar [C]//Proc 12th Radar Meteorology Conf. Norman, OK, USA: Meteor Soc, 1996:467-474.
- [14] HOBBS P V, LOCATELLI J D, BISWAS K R, et al. Evaluation of a 35 GHz radar for cloud physics research[J]. *Journal of Atmospheric & Oceanic Technology*, 1985, 2(1):35-48.
- [15] LHERMITTE R. A 94 GHz Doppler radar for cloud observations[J]. *AMS Journal of Atmospheric Oceanic Technology*, 1987, 4(1):36-48.
- [16] LHERMITTE R. Small cumuli observed with a 3 mm wavelength Doppler radar[J]. *Geophys Res Lett*, 1987, 14:707.
- [17] PAZMANY A L, MCINTOSH R E, KELLY R D, et al. An airborne 95 GHz dual-polarized radar for cloud studies[J]. *IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing*, 1994, 32(4):731-739.
- [18] SEKELSKY S M, MCINTOSH R E. Cloud observations with a polarimetric 33 GHz and 95 GHz radar [J]. *Meteorology & Atmospheric Physics*, 1996, 59(1/2):123-140.
- [19] MORAN K P, MARTNER B E, POST M J, et al. An unattended cloud-profiling radar for use in climate research[J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 1998, 79(3):443-455.
- [20] MEAD J B, WIDENER K B. W-band ARM cloud radar[C]//32nd Int Conf on Radar Meteorology. Albuquerque, NM, USA: Meteor Soc, 2005:3.
- [21] STEPHENS G L. The CloudSat mission and the A-train—A new dimension of space-based observations of clouds and precipitation[J]. *Bull Amer Meteor Soc*, 2002, 83(12):1771-1790.
- [22] DANNE O, QUANTE M, MILFERSTÄDT D, et al. Relationships between Doppler spectral moments within large-scale cirro- and altostratus cloud fields observed by a ground-based 95-GHz cloud radar[J]. *Journal of Applied Meteorology*, 1999, 38(2):175-189.
- [23] HAMAZU K, HASHIGUCHI H, WAKAYAMA T, et al. A 35-GHz scanning Doppler radar for fog observations[J]. *Journal of Atmospheric & Oceanic Technology*, 2003, 20(7):972-986.
- [24] DELANOË J, PROTAT A, VINSON J P, et al. BASTA: A 95-GHz FMCW Doppler radar for cloud and fog studies[J]. *Journal of Atmospheric & Oceanic Technology*, 2016, 33(5):160223142820008.
- [25] 王永亮, 陆建兵, 严勇, 等. 8 mm 毫米波测云雷达系统设计[J]. *现代雷达*, 2014, 36(7):14-17.
- WANG Yongliang, LU Jianbing, YAN Yong, et al. System design of 8 mm millimeter-wave length cloud radar[J]. *Modern Radar*, 2014, 36(7):14-17.
- [26] 王金虎, 葛俊祥, 魏鸣, 等. 联合 35 GHz 与 94 GHz 毫米波雷达对云宏微观特性的反演研究[C]//全国微波毫米波会议. 北京:电子工业出版社, 2015.
- [27] 吴举秀, 魏鸣, 王以琳. 利用毫米波测云雷达反演层状云中过冷水[J]. *干旱气象*, 2015, 33(2):227-235.
- WU Juxiu, WEI Ming, WANG Yilin. Retrieval of the supercooled water in stratiform clouds based on millimeter-wave cloud radar[J]. *Journal of Arid Meteorology*, 2015, 33(2):227-235.
- [28] 王金虎, 葛俊祥, 魏鸣, 等. 等效球理论计算冰晶粒子

- 毫米波散射的误差分析[J]. 河南师范大学学报, 2014(5):40-44.
- WANG Jinhu, GE Junxiang, WEI Ming, et al. Error analysis of equivalent sphere theory for calculating the scattering properties of ice crystals at millimeter wavelength[J]. Journal of Henan Normal University, 2014(5):40-44.
- [29] YU Bing, XIA Han, CHEN Xiaoye, et al. A novel W-band dual-polarized cassegrain antenna for cloud radar [J]. Progress in Electromagnetics Research Letters, 2016(61):99-103.
- [30] WANG Jie, GE Junxiang, ZHOU Yong, et al. Design of a high isolation 35/94 GHz dual-frequency orthogonal polarization cassegrain antenna [J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2017 (16):1297-1300.
- [31] GE Junxiang, ZHOU Yong, YU Bing, et al. Pulsed power combining system for w-band traveling wave tube amplifiers with a waveguide combiner[J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 2014, 61(9): 3317-3323.
- [32] 葛俊祥. 94 GHz 毫米波测云雷达系统及关键技术 [C]//2015年全国微波毫米波会议. 合肥: [s. n.], 2015.
- [33] 朱勇. 毫米波组件通用化、系列化、模块化研究[C]//全国微波毫米波会议. 北京:电子工业出版社, 2013.
- [34] 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.
- TANG Shunxian, LV Daren, HE Jianxin, et al. Research of weather radar technology and application on Chinese weather observation [J]. Remote Sensing Technology & Application, 2017, 32(1):1-13.
- [35] 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[J]. 气象, 2013, 39(3): 265-280.
- LI Bai, GU Qingtong, LI Ruiyi, et al. Analyses on disastrous weather monitoring capability of CINRAD and future development[J]. Meteorological Monthly, 2013, 39(3):265-280.

(编辑:张黄群)