

NEXRAD: 走进“新一代” ——天气雷达探测技术的起步与发展

■ 许小峰

在气象探测科技与业务发展中，天气雷达无疑占有举足轻重的地位，特别是在强对流灾害性天气的监测预警业务中发挥着无可替代的作用。以NEXRAD的发展脉络为主线，对天气雷达技术发展和业务布局进程进行了梳理，也大致介绍了中国天气雷达近期发展情况。

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2020.06.001

1 走进NEXRAD

天气雷达技术是在第二次世界大战中伴随军事雷达技术发展起来的。1940年，英国人通过雷达监视飞机时发现信号会被天气回波干扰，引发了对云雨信号影响的研究。在“二战”中这一成果开始得到应用，对监测飞机航线上发生的雷暴等危险天气发挥了作用。1944年4月，世界上首个“天气雷达网”诞生，美国在巴拿马面向大西洋的两个港口安装了天气监测雷达。二战后，天气雷达技术伴随实际气象服务需求而得到快速发展，最初发展的天气雷达大多是通过军用雷达改造而成的。1946年，美国气象局（Weather Bureau）从海军获得了25部AN/AP2F型S波段军用雷达，并将这些雷达改装用于气象监测，包括有WSR-1s、-1As、-3s和-4s等型号，是后期发展的WSR系列天气雷达的前身。随后又发展了WSR-57、WSR-74C、WSR-74S等，还有其他一些不同功能和型号的雷达，如AN/APQ-13、AN/CPS-9、AN/FPS-103等，一直发展到目前在业务上使用的WSR-88D雷达。

对强天气系统的监测预警是促进天气雷达技术进步和业务发展的重要因素。20世纪50年代，美国航空业进入到快速发展阶段，大型枢纽机场和喷气机开始运营和投入使用。但由天气原因引发的空难事故也随之增多，引起了各方关注。如1959年，马里兰州上空一架子爵号客机的油箱被闪电击中，伴随爆炸和火灾导致了致命的坠机，31人在事故中丧生。接连发生的这类与恶劣天气相关的灾难性事件引起气象和相关部门的关注，于1961年启动了国家强风暴计划（NSSP），开始了有针对性的研究，总部设在密苏里

州堪萨斯城，并于1962年在俄克拉何马州的诺曼建立了一个野外观测站，也称为天气雷达实验室，安装了一台用于研究的天气监测雷达（WSR-57）。WSR-57是当时USWB业务上用的常规雷达，于1957年完成设计，1958年在业务中开始应用，当时布设了31部，很长时间内一直是气象局业务中当家的旗舰雷达，直到20世纪90年代NEXRAD部署后，最后一部WSR-57才于1996年12月在南卡罗来纳州退役。

1963年，整个NSSP转移到了诺曼，在那里重组后组建为国家强风暴实验室（NSSL）。时任USWB局长罗伯特·怀特提出要在NSSL开发更先进的雷达处理和显示系统，以满足强天气监测预警的业务需求，提出的主要目标是发展可以测风的多普勒天气雷达

另一个与天气雷达发展密切相关的事件是对龙卷的探测。1958年6月，美国气象局的技术人员在堪萨斯州的埃尔多拉多市通过雷达发射的连续波探测到了龙卷风，当时使用的是从美国海军获得3 cm波长的多普勒雷达，在康奈尔航空实验室进行了改造（图1），这一成功探测显然激发了人们对多普勒天气雷达技术的强烈兴趣，为连续监测强天气系统的风场变化找到了途径，促进了后来的多普勒天气雷达发展。

NSSL成立后，便致力于多普勒天气雷达的研发工作，到1964年，通过改造海军的雷达，制造了第一台3 cm脉冲多普勒雷达，被用于降水物理学、风暴内流场和晴空回波变化等相关问题的研究，直到1970年退役。

NSSL的专家在使用3 cm多普勒雷达进行研究时，已发现了其固有弱点，如波长很难穿透强风暴、单部多普勒雷达难以获取风暴中完整风场。但由

资助信息：国家自然科学基金重点项目（91637211）

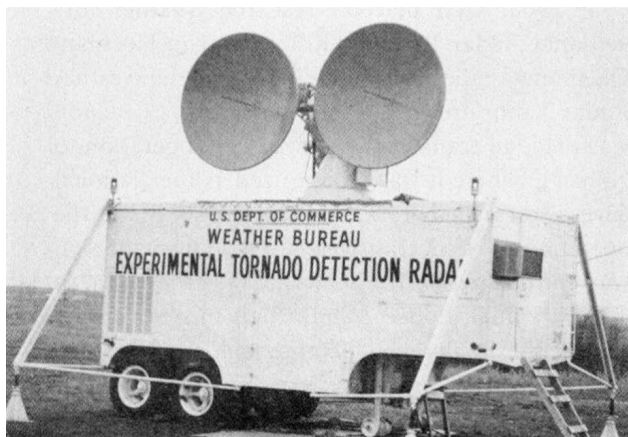


图1 20世纪50年代末USWB使用的连续波3 cm多普勒雷达，设计了并排的发射和接收天线

于当时美国气象局很难给与足够的经费支持，改进设想难以实现，如安装三部雷达从不同角度观测天气系统的方案就一直被搁置。直到20世纪60年代后期，才与康奈尔大学合作首次开展了双多普勒雷达探测实验。同时，为了降低信号衰减，提升多普勒雷达电磁波穿透强风暴的能力，发展10 cm雷达的计划在经历了一些曲折后终于在1967年得以实施。与引入3 cm雷达的方式类似，在多方协调下，从美国空军远程预警雷达网项目中获得了一部10 cm雷达（FPS-18）。1969年初，俄克拉何马大学的校园内，耸立起了10 cm多普勒雷达，后期由NSSL的专家负责改造升级（图2）。



图2 1969年NSSL的10 cm脉冲多普勒天气雷达天线和开放式塔架，发射机位于旁边的机房（右），左边为WSR-57天气雷达

1971年春季，改造后的雷达开始正式投入探测使用，成为当时世界上少有的几部10 cm波长的多普勒雷达，在随后的几年中，多次捕捉到了强风暴和龙卷风天气系统的发生发展。如1973年5月24日发生在俄克拉何马州的联合城的一次龙卷风，追风小组实地跟踪拍摄了龙卷风形成后的照片（图3），与多普勒雷达连续探测到的信息进行了对比检验，给出了龙卷风

发生过程中的时空特征和螺旋结构演变的完整过程。涡旋在高空形成25 min后开始下降，龙卷云接地后风速达到最强，然后逐渐减弱消失。由于多普勒雷达在对识别强天气中的涡旋结构特别有效，使得龙卷风在母体云系中形成后较容易被捕捉到，从而显著提高了预警时效。



图3 1974年5月24日龙卷风穿过俄克拉何马联合城

实践结果完全打消了人们对投入这一先进设备所能获取回报的所有疑虑，为天气雷达的进一步发展扫除了障碍。1974年，NSSL又获得了第二部10 cm多普勒天气雷达，同样是由FPS-18型雷达改造而成，开始了双多普勒雷达运行，共同探测追踪强天气系统。

为了进一步掌握准确信息及获得更广泛支持，在全国大范围布局建设10 cm多普勒雷达，全面提升对强天气的监测预警能力，美国国家天气局（NWS，原USWB）、美国空军天气服务局（AWS）和联邦航空局（FAA）决定共同实施一个联合多普勒业务试验计划（JDOP），并于1977—1978年春季的龙卷风多发期在俄克拉何马的诺曼运行，使用的是NSSL的10 cm多普勒雷达。结果表明，对于发布的强风暴和龙卷风警报，准确率明显提高，且误报减少，警报的提前量从2 min提高到21 min。

基于JDOP的成功，多普勒天气雷达发展项目获得商务部、国防部、交通部的一致认可，NWS、AWS和FAA在华盛顿建立了联合系统项目办公室，负责监管如何采购新一代雷达（NEXRAD），计划在全国范围建设多普勒天气雷达网（图4）。

新雷达系统的一个重要的特点是实现了完全自动化运行，不再需要人为操作硬件，雷达自动产生连续的三维探测数据，交由处理软件生成各类应用产品，业务人员只需要在主用户处理器（PUP）的计算机显示终端上就可以操作显示各类数据产品，发现潜在的影响天气系统。显然，这一包括多种复杂算法的软件处理系统充分体现了新一代雷达优势，也成为



图4 坐落在诺曼的WSR-88D新一代雷达

NEXRAD最终能在业务中成功应用的关键。PUP的另一个特点是可以脱离雷达硬件单独运行，即一部雷达可以配备多个PUP终端，从而满足在一个区域多个用户共享雷达产品的需求。美国布设了161部WSR-88D雷达，但配备的PUP终端超过了400个。

1990年，安装在诺曼的第一部WSR-88D新一代10 cm多普勒天气雷达开始运行，1996年完成了全部160余部的全国布网，成为当时全球最大的现代天气雷达网，也被认为是美国20世纪90年代气象业务建设效益最好的项目。

在美国发展NEXRAD网建设进程中，中国也于1994年制订了新一代天气雷达发展规划，借鉴美国发展经验，提出在全国布设126部新一代雷达的方案。在实际操作上，确定引进美国最新的WSR-88D技术，在中国合资生产新一代天气雷达，并鼓励国内厂商参与合作和按同样规格自主生产，设定了不同型号，统称为CINRAD。当时尽管有了规划，也解决了技术引进和转化问题，并开始组织生产，但整体进展并不顺利，由于缺乏资金而使建设停滞不前。到1997年，仅有一部从美国原装进口的WSR-88D型雷达坐落于上海浦东，成为国内第一部业务运行的新一代雷达。1998年发生在长江和松花江、嫩江流域的特大洪水，改变了雷达布网建设的命运，面对现实发生的应对重大气象灾害的迫切需求，雷达建设资金被纳入国债项目，消除了建设新一代天气雷达网的最后屏障。1999年9月，在我国生产的第一部CINRAD-SA型新一代天气雷达在安徽省合肥市落成，象征着我国新一代天气雷达网建设全面启动（图5）。

中国的新一代天气雷达建设持续至今，布网雷达已达210多部，远超过了最初的规划，与美国共同构成了全球最大的两个新一代天气雷达网。



图5 被称为“庐阳银珠”的合肥新一代多普勒天气雷达

2 升级NEXRAD

美国NEXRAD业务化布网后，已运行了20多年，对雷达的改造和升级一直没有停止。从探测能力上看，现在的雷达与20年前相比，已有了很大变化，有些可以说是质的飞跃。

2.1 双极化改造

常规天气雷达可以测量大气中云雨粒子的距离和强度，多普勒天气雷达增加了对粒子径向速度和谱宽的测量，具备了对天气系统动力场结构的识别能力，而要获取粒子特性或降水类型的信息，则需要对雷达进一步升级改造，增加双极化功能。

双极化技术通过天气雷达同时发射水平和垂直极化的电磁波，通过接收极化回波，测量雷达的反射率因子、差分反射率、差分相位、共偏相关系数和退极化比，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。对在天气雷达上使用双极化技术的关注始于20世纪60年代，70年代做了较广泛的研究，进入到研究实验阶段。80年代，一些技术开始在实际探测中取得效果，如美国大气研究中心（NCAR）1983年在CP-2雷达上应用了双极化技术，成功地通过差分反射率探测到了冰雹的结构特征，研究结果发表在知名杂志《科学》上。同一时期，NSSL也在开始了双极化技术研究。进入到90年代，双极化技术逐步进入到科研和业务应用阶段。

科学研究与实验的成功促进了对实际业务运行中的雷达进行技术改造，由于在NEXRAD发展过程中，双极化技术的研究和实验一直在同时跟进，当161部WSR-88D布设刚完成后不久，NWS、DOD和FAA就已确定要对全网雷达进行双极化改造。首部双极化多普勒天气雷达的原型机于1997年在NSSL的研究雷达

上实现, NSSL的技术人员按业务要求进行了开发和实验, 提出了技术标准, 交由企业进行改造设计。

2005年, 美国国家海洋和大气管理局(NOAA)的雷达运行中心(ROC)将雷达数据采集系统(RDA)升级为开放系统(ORDA), 由于此项改造影响到了基础数据, 包括反射率、速度、谱宽等, 会进一步会影响到数据产品, 成为关键环节。为此成立了专门评估小组, 要确保任何因信号改变生成的基础数据不会影响到雷达产品生成(RPG)环节的质量。ROC从各单位调集人员, 工作进行得非常艰苦, 小组成员由最初的十几个人, 发展到80多人, 每周都要开会, 对各类数据进行分析, 持续了近5年时间。数据质量问题仅是雷达升级改造中的一个重要环节, 还有许多其他难点需要克服, 也经历了艰辛的过程。

2011年9月, 全网雷达双极化改造正式启动, 2013年完成, 实现了NEXRAD网建成后一次技术最为复杂、规模也最大的技术升级改造。

2.2 分辨率提升

NEXRAD网建成后, 基数据中反射率为 $1\text{ km}\times 1^\circ$ 极向网格分辨率, 径向速度和谱宽的分辨率为 $250\text{ m}\times 1^\circ$ 。对一般天气系统而言, 这样的分辨率可以捕捉到, 但对于尺度在几十千米以下的强天气系统, 就显得不够了。如对于强烈发展的中尺度气旋或龙卷的探测, 若能将分辨率提升到 $250\text{ m}\times 0.5^\circ$, 可以对其结构有较为清晰的识别, 通过模拟信息与WSR-88D的常规资料对比可以印证这一改进的效果。为了满足提高分辨率的需求, 几乎在进行双极化试验的同时, NWS又安排NSSL对预期的分辨率改进提高进行量化评估, 并提出方案。

提升雷达的探测分辨率, 需要通过改变雷达发射方式, 在更精细的网格上获取频谱信息, 这样做会牺牲一些雷达的探测距离, 在实际业务化设计时要进行平衡取舍。沿径向方向, 通过调整发射器脉冲宽度, 发射短脉冲($1.57\text{ }\mu\text{s}$), 并结合接收器滤波器响应的调整可达到将分辨率从 1 km 提高到 250 m 的效果。同时, 在方位角方向的分辨率高低则取决于本征天线波束分布, 需要通过压缩有效天线波束宽度来提高雷达分辨率, 这对数据处理提出了更高的要求。经过改进, 可以将雷达数据的方位分辨率从 1° 提高到 0.5° 。通过在硬件和软件技术对径向到方位两个方向上的改进, 达到了将分辨率提升到 $250\text{ m}\times 0.5^\circ$ 的目标。分辨率的提高会涉及到数据处理和产品生成等进一步的问题, 每一步都要细致分析, 相互协调, 并经过严格检验和评估, 最终达到提供业务使用的要求。

经过技术实现和业务检验后, NWS从2006年开始对NEXRAD网进行了高分辨率升级, 2008年全部完成, 虽然从工作量和复杂程度上不及双极化技术改造, 但从对强天气系统的识别角度确实取得了很好的提升效果, 是一次成功的改进。

2.3 扫描模式改进

WSR-88D有多种体扫模式(VCP), 每一种模式对应着不同的扫描方式, 包括一次体扫时间、扫描角度和次数, 如较常用的降雨模式VCP-21, 规定在 6 min 内完成一次对应9个仰角的体扫。在实际应用中发现, 在捕捉一些快速变化的强天气系统时, 如快速多变的结构风场, 当一个体扫完成后, 已发生很大改变, 不利于保持信息的连续性。

2012年, NWS针对强天气体扫模式VCP-12和VCP-212的扫描方式进行了改进试验, 增加了体扫间低仰角补充扫描方案, 即当出现剧烈变化的强天气时, 新的体扫模式会自动在最低仰角(0.5°)增加扫描次数, 从而获取更多在这一层天气变化的连续信息。2016年春季, 该模式得以在业务上得到应用, 提高了对强天气(如龙卷)变化过程信息的捕捉。

根据雷达技术的不断变化和美国对NEXRAD网的改造提升, 中国也在持续跟进。到目前为止, 已有50余部多普勒天气雷达进行了双极化升级, 起步较早的广东省从2016年开始进行区域性改造, 全省12部多普勒雷达先后都已增加了双极化功能, 可以更清晰地获取降水系统内部的精细化分类信息。高分辨率模式改进虽然起步时间不长, 但取得了显著进展。从杭州天气雷达的改进试验结果看, 仅从分辨率提高的角度, 已超越了美国当前的模式, 径向分辨率的提升可以实现 250 、 125 和 62.5 m 三个档次, 还发展了回波识别智能探测模式, 自动根据天气系统变化进行判识, 调整探测模式, 达到平衡兼顾的目的, 体扫的时间也可由 6 min 提高到 4 min 左右, 这一结果对中小尺度强天气的监测显然将发挥重要作用。从图6的对比可以看出分辨率提高后, 精细化观测效果显著提升。

3 后NEXRAD时代

3.1 分布式协同自适应探测(DCAS)网络雷达系统

已运行了20多年的NEXRAD网, 一些固有的弱点仍难以克服。如WSR-88D雷达扫描半径可以达到 230 km 以上, 但由于受地球曲率影响, 在这样的距离上的探测信息基本覆盖不到 1 km 以下的空间, 且由于波束宽度的扩展, 探测分辨率也会降低, 这会影响到对中小尺度强对流天气的探测质量。探测远距离天气系统时, 还难免会受到地形等障碍物的遮挡, 也

会妨碍探测效果。作为多普勒雷达网，如何获取到大气完整风场信息，而不仅限于径向速度，也是需要考虑解决的重要问题。2003年，在美国国家科学基金会（NSF）组织下，成立了大气协同自适应遥感（CASA）工程研究中心（ERC），四所大学（科罗拉多州立大学、马萨诸

塞大学、俄克拉何马大学和波多黎各大学马亚古兹分校）和工业界及政府实验室组成的这个联合体，提出了小雷达组网探测技术，与NEXRAD网互补，可以弥补远距离探测覆盖不足问题。首期试验项目于2006年1月开始，在俄克拉何马州东南部布设了4个低功耗、3 cm多普勒双极化雷达（图7），可以提供时间分辨率为60 s和空间分辨率为100 m的高分辨率数据。从实际试验结果看，确实达到了低空加密探测、提高分辨率、时效增强、获取部分三维风场等功能。基于此，有人提出在全美布设数千个小雷达，与NEXRAD网形成互补的方案。

类似的工作在中国也有开展，如2013年，中国科学院大气物理研究所与相关单位合作在南京及周边地区筹建了网络化雷达。也由四部X波段雷达组成，有效探测距离为60 km，布设在南京及其周边地区，也取得了很好的效果，可以成为CINRAD网的有益补充。

从实际进展看，网络雷达经过了15年以上的试验和改进，取得了不少科研和应用成果，但并没有在业务上全面展开。这或许与其自身存在某些弱项有关，

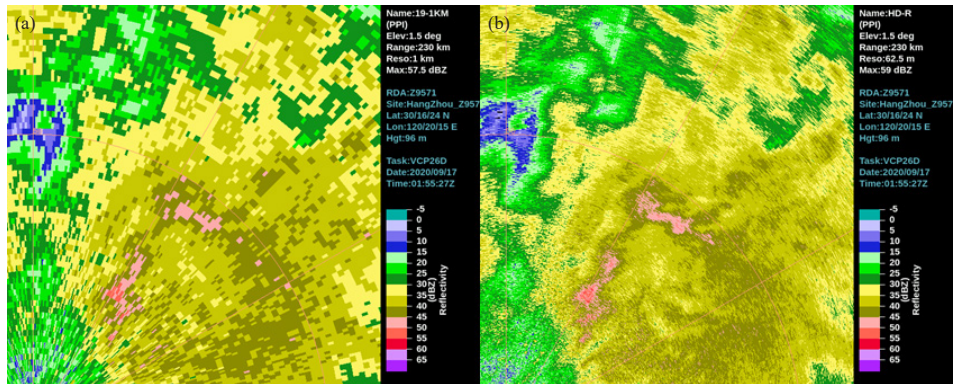


图6 2020年9月17日杭州雷达探测到的天气系统1 km (a) 和62.5 m (b) 分辨率对比

如在三维风场的获取方面，还只能在一些关键区发挥作用，这与传统雷达扫描方式有关，较难获取完整、准确的三维协同风场信息。另一方面，随着相控阵技术的逐步开始应用，使天气雷达的探测扫描方式出现了新的变化，由于可以在一个方位角上快速获取多个仰角方向的信息，显著提升了探测时效，各类相应的探索与试验相继展开，给未来的选择增添了变数。

3.2 相控阵天气雷达

相控阵雷达的研发在美国起步较早，包括未来有可能替代NEXRAD的S波段相控阵雷达，及可以替代网络雷达X波段相控阵雷达。NSSL和俄克拉何马大学高性能雷达研究中心（OU-ARRC）目前已研发了一部多功能柱形极化相控阵天气雷达（CPPAR），于2018年7月安装在距诺曼KOUN雷达不远处，在不断进行测试和改进，试验的目标定位在检验相控阵雷达对于强天气监测的实际效果；对相控阵雷达增加双极化功能后信号检验评估；相控阵雷达是否可以作为未来WSR-88D雷达的替代方案选择。

目前，美国、日本等国在X波段相控阵雷达技术发展上给予了更多关注，如2015年开始，日本在大阪建立了相控阵雷达示范网络，首次采用两部相控阵天气雷达（PAWR）组网实时运行，雷达分别安装在日大阪大学和日本神户的国家信息与通信技术研究所。PAWR体扫周期小于30 s，探测范围为约60 km，天线沿方位角机械旋转，垂直方向采用0~90°全仰角高密度电子扫描。

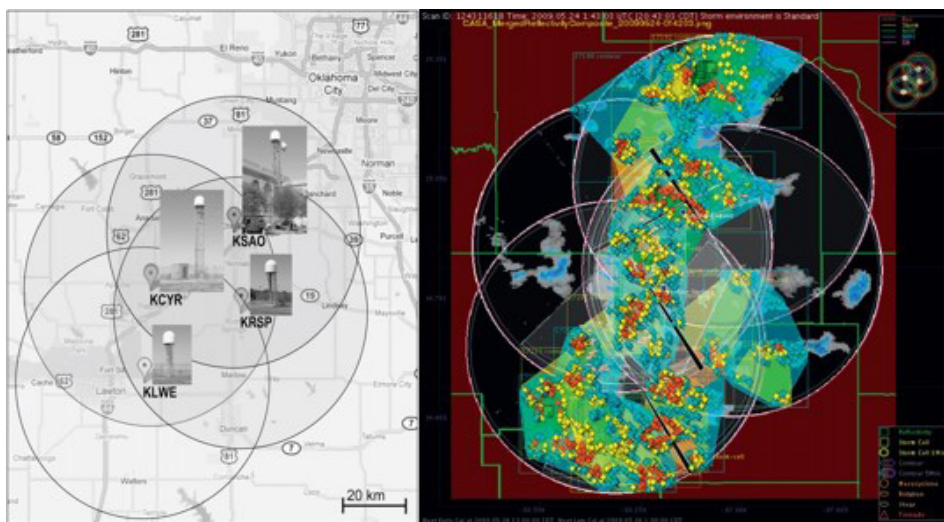


图7 俄克拉何马州东南部布设的四部组网小雷达

从相控阵天气雷达的研发与试验的进展看,中国目前的进度与国际先进水平已较接近,提出了一些先进的设计理念,有了可供科研和业务试验的不同种类产品,中科院大气所、中国气象科学研究院、中国气象局大气探测中心、成都信息工程大学等单位和相关企业都先后开展了产品研发与试验,区域性的业务化布局也在展开。发展比较快的是广东和长江流域一些

省份,如广东大湾区已经建起了一个由10余部X波段双极化相控阵雷达组成的探测网络,通过高时空分辨率探测、实时RHI扫描等特性获取小尺度以及部分中尺度天气系统的精细结构及生消演变过程,从而精确地描述对流系统的短时演变,提高对中小尺度强对流天气系统的监测预警能力。从区域组网对中小尺度精细化监测能力看,已走在了国际前列(图8)。

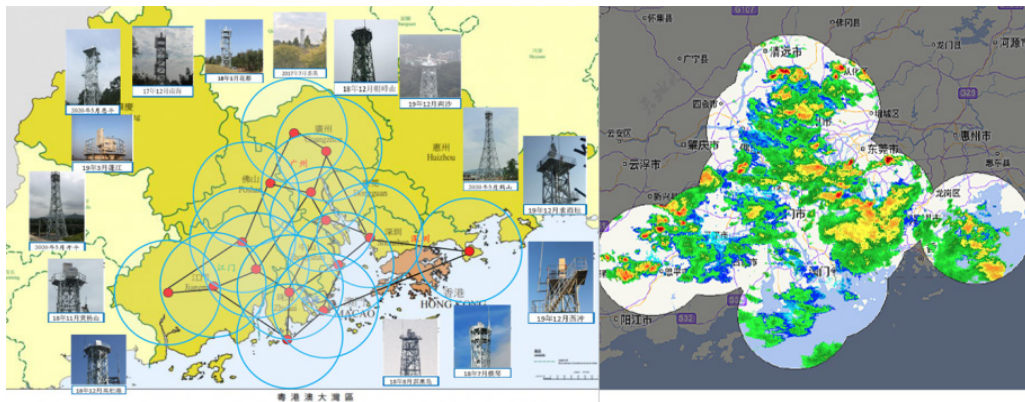


图8 广东大湾区X波段双极化相控阵雷达精细化探测网

广东佛山也建设了由7部X波段相控阵雷达组成的阵列网络精细化监测系统,采用相控阵多波束扫描技术,通过4个发射波束和64个接收波束覆盖 $0\sim 90^\circ$ 仰角,方位角通过机械扫描覆盖 360° ,一个体扫时间约为12 s,其对风场的精准快速同步定位对于捕捉中小尺度强对流天气中的风场结构具有独特优势。湖南、上海、河北等地也引入了这一技术开展了组网试验,取得了很好的效果。

4 结语

1) 天气雷达是强天气监测预警的重要手段,在未来的气象监测业务中发展中仍将处于难以取代的地位,需要在发展布局中优先考虑。

2) 在发展过程中要注意数据应用、技术改进和

提升工作,在充分发挥雷达建设直接效益的同时,要针对雷达探测的特点和弱点,通过不断投入改进,保持其生命力和先进性。

3) 要注意业务升级前的准备工作,包括对升级效益、数据质量、系统协调、应用培训、性价比等的综合考虑。

4) 相控阵多普勒双极化天气雷达或许是未来的发展方向,要予以关注,特别是对于已经开始试验和业务布局的单位,要注意总结经验,发现问题,为后人的跟进创造条件。

5) 大小雷达网的结合互补已经历了10多年的探索,如何使这种互补效益达到最大化是最终能否推动业务实现的根本,需要在一些关键环节上着力,如三维风场获取问题。

深入阅读

- Bringi V N, Seliga T A, Aydin K. 1984. Hail detection with a differential reflectivity radar. *Science*, 225(4667): 1145-1147.
- Brown R A, Lewis J M. 2005. Path to NEXRAD: Doppler radar development at the National Severe Storms Laboratory. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 86(10): 1459-1470.
- Brown R A, Wood V T, Sirmans D. 2002. Improved tornado detection using simulated and actual WSR-88D data with enhanced resolution. *J Atmos Oceanic Technol*, 19: 1759-1771.
- Hiroshi K, Tomoo U, Fumihiko M, et al. 2018. Improving the accuracy of rain rate estimates using X-band phased-array weather radar network. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 56: 6986-6994.
- Sachidananda M, Zrnicek D S. 1985. ZDR measurement considerations for a fast scan capability radar. *Radio Science*, 20(4): 907-922.

- Whiton R C, Smith P L, Bigler S G, et al. 1998. History of operational use of weather radar by U.S. weather services. Part I: The pre-NEXRAD era. *Weather and Forecasting*, 13(2): 219-243.
- Whiton R C, Smith P L, Bigler S G, et al. 1998. History of operational use of weather radar by U.S. weather services. Part ii: Development of operational doppler weather radars. *Weather & Forecasting*, 13(2): 244-252.
- 程元慧, 傅佩玲, 胡东明, 等. 2020. 广州相控阵天气雷达组网方案设计及其观测试验. *气象*, 46(6): 823-836.
- 李思腾, 陈洪滨, 马舒庆, 等. 2016. 网络化天气雷达协同自适应观测技术的实现. *气象科技*, 44(4): 517-527.
- 马舒庆, 陈洪滨, 王国荣, 等. 2019. 阵列天气雷达设计与初步实现. *应用气象学报*, 30(1): 1-12.

(作者单位: 中国气象局)