

广州X波段双偏振相控阵天气雷达观测试验进展

张羽¹ 田聪聪¹ 傅佩玲¹ 黄辉²

(1 广东省广州市气象台, 广州 511430; 2 广东省珠海纳睿达科技有限公司, 珠海 519000)

摘要: 为了弥补现有业务雷达的探测盲区, 增强小尺度强对流天气监测能力, 广州市气象部门自2017年开始组织开展X波段相控阵雷达(XPAR)布网观测试验, 截至到2020年1月, 已经建成5部具备双偏振功能的X波段相控阵雷达。X波段相控阵雷达通过一体化和模块化设计, 体积小、运行稳定, 可实现无人值守, 但是对数据的传输和存储提出了更高的要求; 相控阵雷达探测数据可靠, 能够清晰地识别出融化层特征。快速扫描体制有利于天气系统的精细观测, 利用其双偏振功能可以进一步观测到降水的相态演变过程。

关键词: 相控阵雷达, 双偏振雷达, 雷达组网, 精细观测

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2020.06.014

Progress of Observation Experiment for X-band Dual Polarization Phased Array Radars in Guangzhou

Zhang Yu¹, Tian Congcong¹, Fu Peiling¹, Huang Hui²

(1 Guangzhou Meteorological Observatory, Guangzhou 511430 2 Naruida Technology Co. Ltd. in Zhuhai, Zhuhai 519000)

Abstract: To cover the detection blind area of existing operational radar and enhance the monitoring capability of meso-micro scale severe convective weather, Guangzhou Meteorological Bureau carry out an observation experiment since 2017. Five X-band dual polarization phased array radars (XPAR-D) have been built by January 2020. Based on integrated and modularization design, X-band Dual Polarization Phased Array Radars can use smaller antennas for a desired half-power beam width (which aids deployment and transportability and reduces costs) and realize unattended with stable operation, while higher requirements are put forward for data transmission and storage. The rapid scanning system of phased array radar is conducive to the fine observation of weather system, and the evolution process of precipitation can be further observed by using its dual polarization function.

Keywords: phased array radar, dual polarization radar, radar networking, fine observation

0 引言

2001年广州建成了广东省第一部新一代多普勒天气(CINRAD/SA)雷达, 并于2016年完成双偏振改造。新一代多普勒天气雷达探测范围广, 投入运行以来, 在台风、暴雨、强对流等灾害性天气监测预警中发挥了重要作用。但由于其天线采用机械扫描方法, 业务运行采用VCP21模式, 最快只能在6 min内完成9个仰角的扫描。这种模式扫描周期过长, 垂直方向分辨率较差, 不能满足龙卷、微下击暴流、冰雹等小尺度天气系统的监测。由于这些小尺度天气系统突发性强, 生消发展迅速, 是目前气象监测预警领域的难点, 而且其一旦发生, 就会产生较大的气象灾害^[1-3]。

为了实现对重点区域强对流天气系统的精细观测, 2003年美国开始了CASA(Collaborative Adaptive Sensing of the Atmosphere)计划, 利用多部X波段天气雷达组成网络化雷达系统, 实现对关注重点区域的协同自适应观测, 在此种模式下, 多部雷达相互协作, 多个雷达波束覆盖相互之间的盲区并且实现对同一地区的同步观测, 获取远高于单部雷达的时空覆盖和分辨率^[4-5]。2013年中国科学院大气物理研究所与南京恩瑞特公司合作, 中国气象局大气探测中心和中国气象科学研究院参与, 在南京建设了国内第一个X波段网络化雷达试验平台。试验网络化雷达平台由4部X波段天气雷达组成。4部雷达以菱形分布, 雷达间距约为40km。利用该试验平台, 建立单雷达自适应和多雷达协同的试验观测模式, 并应用该模式对一个个例进行观测, 验证观测模式的合理性^[6]。国内外的研究都表明X波段雷达的协同组网观测可以提高中小尺度强对流天气系统监测的准确性, 提高预报预警时间。但是由于它们采用的都是机械扫描体制的X波段

收稿日期: 2020年8月3日; 修回日期: 2020年10月11日
第一作者: 张羽(1986—), Email: 312404880@qq.com
资助信息: 广东省重点领域研发计划(2020B1111200001);
国家重点研发计划(2017YFC1501701); 国家自然科学基金项目(41705020); 广东省气象局科研项目(GRMC2018Z01)

雷达,受天线扫描速度制约,几部雷达完成协同探测区需要1~2 min,对快速变化的小尺度天气系统,造成强度数据和速度数据合成失效^[7]。

相控阵天气雷达通过相位控制扫描,其波束的转换更为灵活迅速,能够在1 min之内完成一个体扫。世界主要发达国家较早开展了相控阵天气雷达的观测与应用研究,并取得了一些重要的成果。2002年美国国家雷达技术委员会推荐相控阵技术为美国下一代雷达发展的方向,并于2003年组织了美国强风暴实验室、雷达运行中心和俄克拉何马大学等9家单位对退役的宙斯盾(SPY-1)二维相控阵雷达进行气象探测改造,建立了相控阵天气雷达试验平台。2006年开始着手建立了一维相扫体制的X波段相控阵天气雷达(MWR-05XP),垂直电扫与水平机械扫描相结合,2007—2008年进行了外场试验,观测龙卷、超级对流单体、飚线等天气过程,结果表明,其观测资料质量与多普勒天气雷达相当,但扫描速度远高于WSR-88D雷达^[8-9]。在我国,早期相控阵雷达技术主要用于军事和航天等领域,近年来也开展了相控阵天气雷达技术的相关研发工作。2007年,中国气象科学研究院与中国电子科技集团公司第十四研究所等单位合作,研制出了一部S波段相控阵天气雷达,实现了军用相控阵雷达向天气雷达的转化,观测试验验证了相控阵天气雷达技术的可行性^[10-11]。2009年,中国气象科学研究院与安徽四创电子股份有限公司合作研制车载X波段相控阵天气雷达,2013年的外场观测试验表明相控阵雷达能够精细观测到强对流单体触发、发展和演变过程^[12]。

在相控阵的基础上实现双偏振功能,将进一步增强相控阵雷达的探测能力。双偏振相控阵天气雷达既具有相控阵雷达快速扫描的特点,又拥有双偏振雷达获取天气系统丰富探测信息的优势,从而使其具备了快速获取中小尺度、快变天气系统详细信息的能力,在探测天气系统内部完整、精细的结构上具有极大的优势,同时还可对降水粒子的形状、相态、滴谱分布等微物理结构进行分析。2017年开始,依托中国气象局超大城市综合气象观测试验,广州市气象局与珠海纳睿达科技有限公司合作,开展了X波段相控阵雷达的观测试验,该雷达还同时具备双偏振探测能力^[13]。截至到2020年1月,广州已经建成5部X波段相控阵雷达并开展观测试验。本文主要介绍广州X波段相控阵雷达的建设及初步观测情况。

1 广州地区相控阵雷达的建设情况

广州现有的CINRAD/SA雷达位于广州市番禺区,距离中心城区较近,随着城市的发展,高层建筑越来越多,新一代天气雷达扫描的低层仰角存在越

来越大的遮挡,加上雷达扫描固有的静锥区,限制了雷达的探测能力,导致存在较大的探测盲区。为了实现CINRAD/SA雷达盲区的有效覆盖,需要在CINRAD/SA周边部署多部X波段相控阵天气雷达。雷达站点的选址主要参考了中国气象局颁布的《新一代天气雷达选址规定》,综合考虑地理环境,净空环境、电磁环境、电力通信等条件,选址过程中优先考虑了气象部门现有的地面观测场地,以减少基础建设的成本和难度。广州5部相控阵雷达的建设地点分别位于番禺、花都、帽峰山、南沙和佛山南海(图1)。雷达间距在30~40 km,其中有两部雷达以上共同覆盖的区域基本覆盖了荔湾、越秀、天河、海珠等中心城区。通过多部相控阵雷达联合组网观测,不但可以扩大覆盖区域,相互弥补静锥区,还可以避免单部X波段雷达易受强降水衰减的影响。

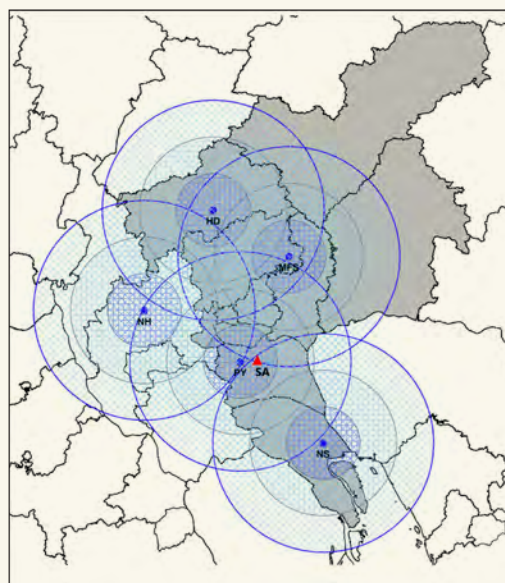


图1 广州X波段相控阵天气雷达分布图

(蓝色实心圆点表示花都(HD)、帽峰山(MFS)、南海(NH)、番禺(PY)、南沙(NS)5部相控阵雷达位置;雷达为圆心的三个蓝色圆分别为10、20和30 km的探测范围;红色三角形表示广州S波段业务雷达位置(SA))

Fig. 1 X-band phased array weather radar Network of Guangzhou

(The blue solid dots represent the positions of five phased array radars: Huadu (HD), Maofengshan (MFS), Nanhai (NH), Panyu (PY) and Nansha (NS); the three blue circles stand for range 10 km, 20 km and 30 km away from the radar; the red triangle represents the S-band radar position (SA))

2 X波段相控阵雷达性能介绍

从外观上看,X波段相控阵雷达主要由天线阵面、GPS授时系统、信号处理机柜、空调制冷系统、雷达底座和转台六部分组成(图2)。从功能上,分

为双线偏振相控阵列天线、伺服系统、收发单元、标定单元、波束控制与合成单元、信号处理单元、监控与显示单元和附属设备等。雷达的主要性能指标如表1所示。天线系统采用全固态收发 TR 组件的设计,通过在空间进行多路能量合成而得到所需的发射功率以及在接收通道进行多路信号同相合成。一共使用了64个全固态相参收发 T/R 组件,在收发TR组件的损

坏率不超过10%情况下,雷达还可以正常工作,进一步提高了雷达长期运行的可靠性与稳定性。雷达还采用了固态发射机,结合非线性调频脉冲压缩技术,由100:1的压缩比例将20 μs的宽脉冲压缩为0.2 μs。由于宽脉冲造成了约3 km的探测盲区,雷达采用长短脉冲相结合的方式来进行补盲,兼顾最近和最远距离的探测。

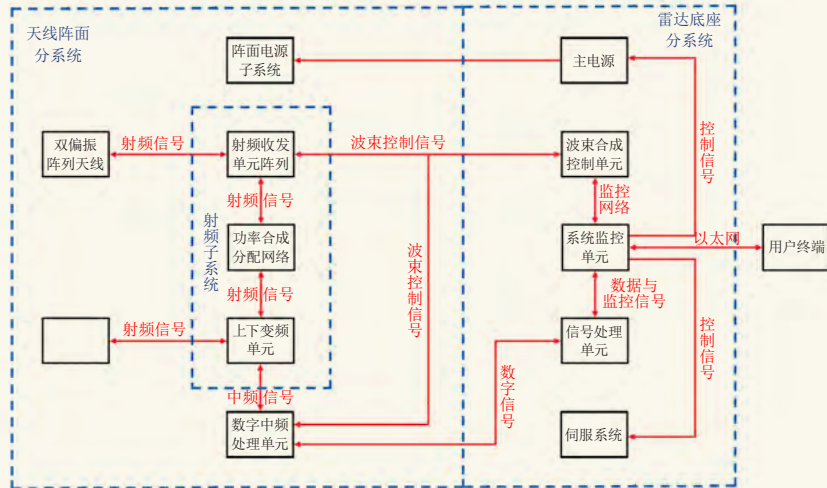


图2 X波段双偏振相控阵雷达外观与系统框图

Fig. 2 System frame diagram of XPAR (X-band phased-array radar)

表1 X波段相控阵雷达主要性能参数

Table1 The parameters of XPAR (X-band phased-array radar)

项目	参数指标
天线形式	一维电子扫描相控阵体制
扫描策略	水平机械扫描, 垂直相控阵扫描
天线尺寸	长1.3 m, 宽0.7 m
工作频率	9.3~9.5 GHz
天线增益	≥36 dB
波束宽度	水平3.6°, 垂直1.8°
极化方式	水平垂直双极化
极化隔离度	≥30 dB
脉冲宽度	20 μs (未压缩), 0.2 μs (压缩)
峰值功率	256 W
探测距离	≥42 km
距离分辨率	30 m
脉冲重复频率	≤4 kHz

3 广州地区相控阵雷达运行情况

3.1 运行维护

传统机械雷达需要建造独立的雷达机房, 专人值守, 相控阵天气雷达采用一体化和模块化设计, 将射频前端、数据处理、机械控制等集成一体, 具有体积小、重量轻、易操作等特点, 无需专门的雷达室。雷达系统运行控制界面设置在远端的中央监控室, 通过局域网和控制软件实现雷达远程操作监控和升

级, 实现无人值守, 降低人力成本。相控阵天气雷达可24 h不间断地连续工作, 其系统的平均无故障工作时间 (MTBF) 不低于30000 h, 平均故障修复时间 (MTTR) 应不大于0.5 h。

3.2 相控阵雷达扫描策略

相控阵雷达的扫描方式与目前业务布网的天气雷达不同 (图3), 业务雷达天线扫描时水平和垂直方向都采用机械驱动, 扫描时按照PPI模式进行 (如在VCP21模式下6 min内完成9个仰角的扫描), 在水平方向扫描完毕一个PPI仰角层后, 抬升电机俯仰切换下一个仰角扫描, 直到扫描最高仰角后, 再经过一个复位时间回到最低仰角, 如此循环往复。广州部署的X波段相控阵雷达属一维相扫体制雷达, 其在水平方向采用机械驱动, 垂直方向采用相控阵扫描。扫描时首先在方位上进行相控阵RHI扫描, 然后切换到另一个方位角, 再继续完成多层仰角扫描, 完成垂直方向连续无间隔多层仰角扫描只需约0.25 s。与业务雷达的扫描模式相比, 相控阵雷达更有利于对降水系统垂直结构进行观测。

相控阵雷达可以设置多种扫描模式, 以适应天气观测的需要。平面模式下雷达以一个固定的仰角进行发射, 方位电机做匀速旋转电子扫描, 波束的垂直

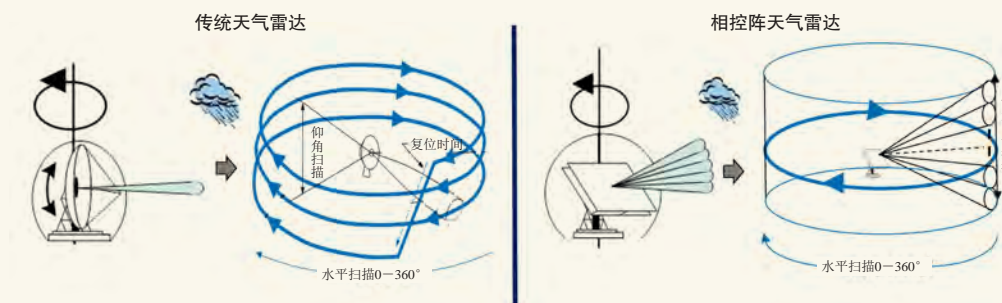


图3 传统天气雷达与相控阵雷达扫描方式对比

Fig. 3 Comparison of scanning modes between traditional weather radar and phased array radar

指向角度可以在 $-5^{\circ}\sim 60^{\circ}$ 设置；垂直高度扫描模式下雷达方位角转到一个指定的方位角固定，然后波束的俯仰角随着电扫描的控制而改变，进行垂直扫描；扇形扫描模式下天线阵面在两个指定的方位角之间来回旋转，在俯仰方向进行电子扫描，该模式一般可用于对某个感兴趣的区域进行快速扫描；体扫模式下天线阵面在方位角上进行匀速旋转运动，天线在垂直方向进行电子扫描，可以看做是平面扫描模式的扩展，这也是相控阵雷达的默认工作模式。目前广州主要采用90 s完成一次体扫模式，扫描仰角从 $0.9^{\circ}\sim 20.7^{\circ}$ 仰角，共12层。

3.3 数据的传输和存储

由于相控阵天气雷达超高的时空分辨率，从而与传统天气雷达相比，拥有更大的数据吞吐量。例如，按照目前单台相控阵雷达单个体扫 360° ，扫描12层仰角计算，每台雷达至少需要20M bit/s的光纤传输能力。由前端网络传输而来的雷达基数据首先要在数据中心完成本地在线存储，五台雷达每天将产生约1T的数据量，一年将产生360 TB；存储基数据时，对基数据进行编码压缩处理，可将原有数据量降为原先的约1/6，则五台雷达每年所需数据量约为60 TB/a。若考虑双备份，则至少需要存储空间120 TB/a。对数据传输能力以及数据处理能力和数据存储空间都提出了极大的要求。因此，需要建立专门的相控阵雷达数据服务中心，包括高速数据传输线路、高性能海量数据处理计算机集群以及相关配套大空间存储器阵列等。

4 观测个例

4.1 层状云降水观测

2020年4月5日，布设在广州市气象局观测场的X波段相控阵雷达观测到了一次层状云降水过程。位于附近的SA雷达也观测到此次过程，两者相距约3.5 km，天线海拔差约120 m，可以近似认为两部雷达共点。通过两部雷达的对比观测，可以检验相控阵雷达观测数据的准确性。

图4为2020年4月5日17:48番禺相控阵雷达观测到的 8.1° 仰角的反射率、径向速度、差分反射率和相关系数产品，图5为广州S波段雷达观测的 6.0° 仰角的反射率、径向速度、差分反射率和相关系数产品。图像的显示距离均为42 km。从反射率看，两部雷达观测的回波分布、回波强度基本相当，主要介于 $5\sim 30$ dBZ，降水强度不大，与地面自动站录得的降水情况符合；区别主要表现在相控阵雷达空间分辨率高，观测的回波结构更加细腻，S波段雷达发射功率大，灵敏度高，观测的回波面积更大，能观测到更多的弱回波。从速度图看，两部雷达观测的径向速度值和零速度线基本一致，低层为东北风，中层为东南风，高层为西风。从偏振产品 Z_{DR} （差分反射率）和CC（相关系数）看，出现了清晰的环状回波，环状回波内的 Z_{DR} 值为2.5 dB左右，明显高于周围地区。环状回波内的CC值大多在0.92以下，明显低于周围地区。从附近的清远探空资料看，环状回波所在的高度与当天的 0° 层接近（都在3.8 km左右）。在零度层亮带内，存在大量的冰水转换过程，因此表现出较大的 Z_{DR} 和较小的CC。在零度层以下，基本由小雨滴构成，因此观测到的 Z_{DR} 接近于0，相关系数接近1。这些都说明相控阵雷达数据质量较好，能够反映出层状云降水的偏振特性。

4.2 强对流过程观测

X波段相控阵雷达相对传统雷达扫描速度更快，空间分辨率更高，因此更适用于快速变化的小尺度强对流天气系统的观测。2020年3月27日傍晚，位于南海的X波段相控阵雷达观测到一次强对流风暴快速合并增强，并出现局地小冰雹的天气过程。在这次过程中，相控阵雷达采用体扫模式，90 s完成12层的PPI扫描（ $0.9^{\circ}\sim 20.7^{\circ}$ ），方位和仰角的分辨率分别是 0.9° 和 1.8° 。图6给出了17:20—17:29时 4.5° 仰角的强度和径向速度的PPI产品图。从强度图看，17:20开始，多个分散的对流单体向靠近雷达站一侧移动，移动过程中发生了多个单体的合并，合并后回波强度明显增强，回波组织结构更严密，最终形成一条长15 km、宽5 km的线状对流。另外，在强回波的后侧，出现了明显的“V”型缺口，主要是由于强回波

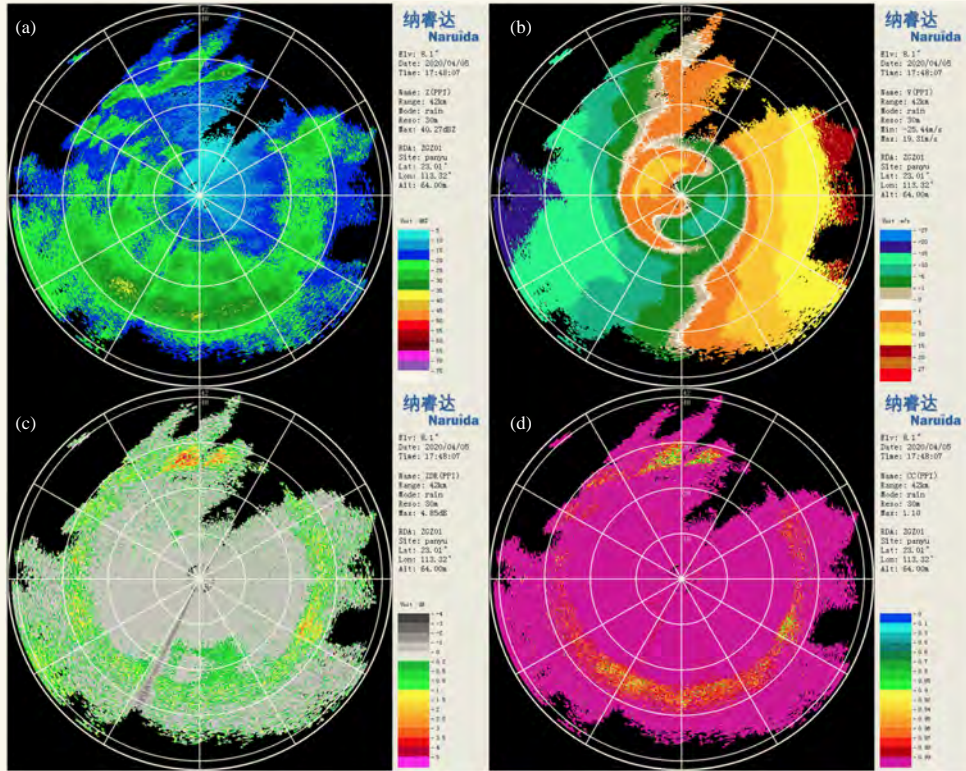


图4 番禺相控阵雷达观测的8.1°仰角的反射率 (a)、径向速度 (b)、差分反射率 (c) 和相关系数 (d)
 Fig. 4 Reflectivity (a), radial velocity (b), differential reflectivity (c) and correlation coefficient (d) of 8.1° elevation observed by Panyu phased array radar

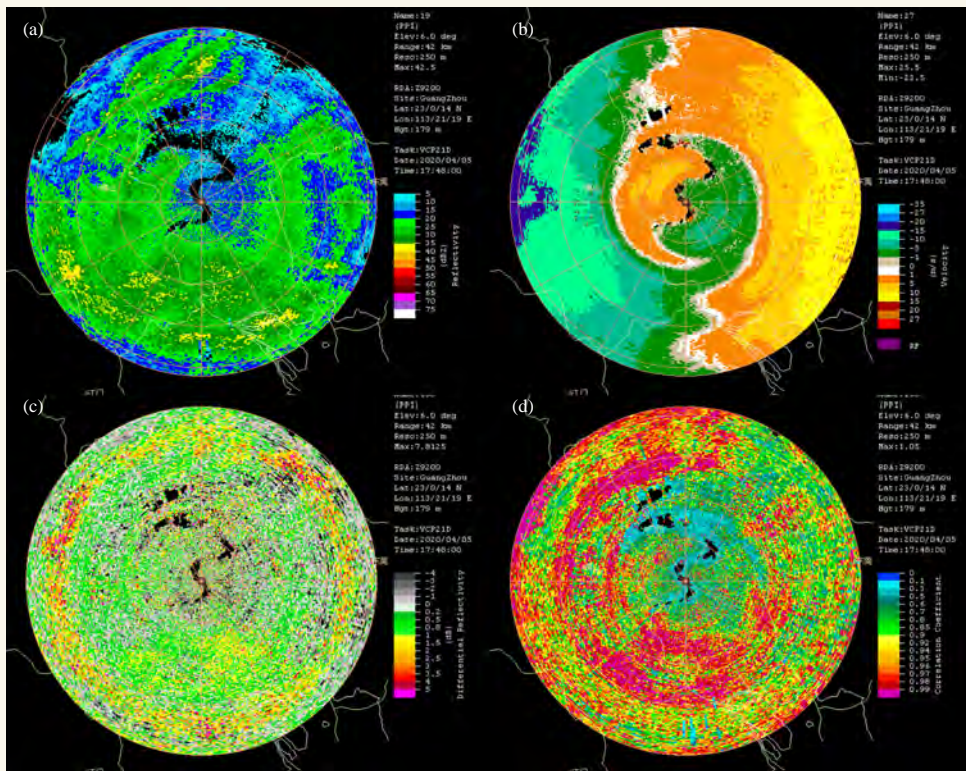


图5 广州S波段雷达6.0°仰角反射率 (a)、径向速度 (b)、差分反射率 (c) 和相关系数 (d) 产品
 Fig. 5 The reflectivity (a), radial velocity (b), differential reflectivity (c) and correlation coefficient (d) by Guangzhou S-band radar at 6.0°elevation

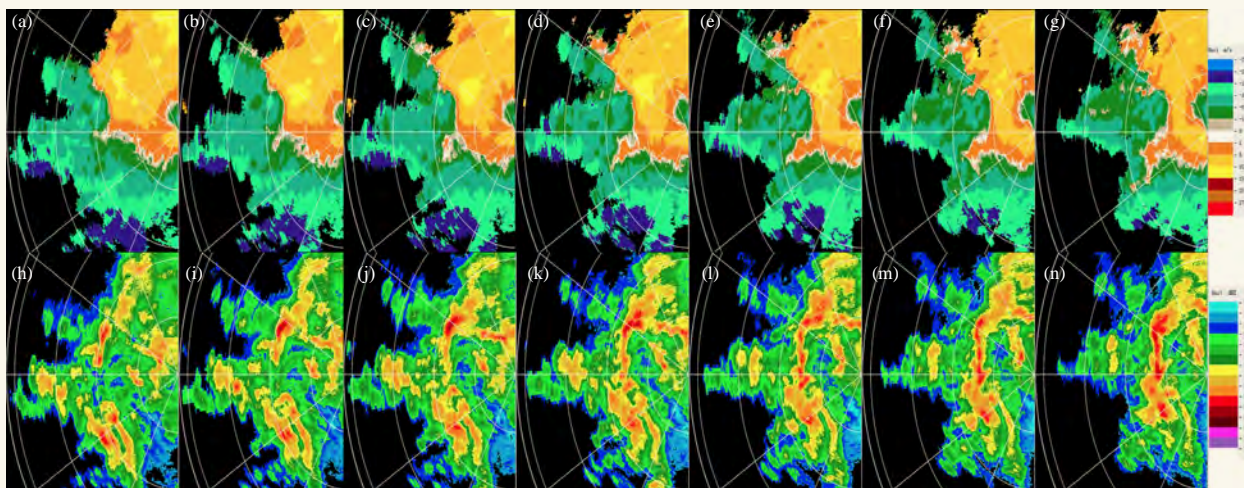


图6 2020年3月27日17:20—17:29南海相控阵雷达4.5° 仰角反射率 (a, b, c, d, e, f, g) 和径向速度 (h, i, j, k, l, m, n) 演变
Fig. 6 Fig. 6 The reflectivity (a, b, c, d, e, f, g) and radial velocity (h, i, j, k, l, m, n) observed by Nanhai phased array radar at 4.5° elevation at 17:20–17:29 BT 27 March 2020

对雷达的显著衰减造成。从径向速度图上看，对流单体合并加强的过程中，风场上出现了明显的辐合，对流单体沿着辐合线发展、合并增强。整个合并演变过程仅十分钟，相控阵雷达精细的监测到了对流单体详细的演变过程，这对未来研究小尺度对流系统的发展演变提供非常大的帮助。

5 结论

相控阵天气雷达是技术更先进的大气探测设备，也是下一代天气雷达发展的重要方向。结合最新阵列技术和双偏振技术，能够高效准确监测中小尺度强对流天气，增强气象防灾减灾的手段和能力，有效降低气象灾害造成的人员伤亡和经济损失。本文介绍了广州双偏振相控阵雷达建设及初步应用情况，得到以下初步结论。

1) X波段相控阵雷达具有更高时空分辨率优势，扫描方式灵活，可以作为业务雷达补充，减少探测盲区，但是由于其探测距离短，受衰减影响大，需要多雷达组网建设。

2) 相控阵雷达扫描速度快，数据量更大，对数据传输能力、数据处理能力和数据存储空间都提出了更高的要求。

3) 相控阵雷达采用一体化设计，集成度高，运维简便，可实现无人值守运行。

4) 相控阵雷达观测数据可靠，能够清晰识别出融化层特征，能够精细监测强对流单体快速演变的过程，这对未来研究小尺度强对流系统的发展演变提供非常大的帮助。

本文是对广州相控阵雷达的观测试验情况的初步介绍，为了更好地发挥相控阵雷达在灾害性天气监测

预警中的应用潜力，未来还有很多的研究需要开展，如X相控阵雷达衰减订正问题、扫描策略问题、多部雷达的协同控制问题、多波束扫描问题等。另外，目前除广州外，佛山、珠海、江门、深圳等地都相继开展了X波段相控阵雷达的建设，根据《粤港澳大湾区气象发展规划（2020—2035）》，粤港澳大湾区将建设由40部相控阵雷达和其他天气雷达组成的高密度雷达试验网。

参考文献

- [1] 胡胜, 罗聪, 张羽, 等. 广东大冰雹风暴单体的多普勒天气雷达特征. 应用气象学报, 2015, 26(1): 57-65.
- [2] 傅佩玲, 胡东明, 张羽, 等. 2017年5月7日广州特大暴雨微物理特征及其触发维持机制分析. 气象, 44(4): 500-510.
- [3] 李彩玲, 黄先香, 蔡康龙, 等. 2019年中国龙卷等对流大风过程及灾情特征. 气象科技进展, 2020, 10(1): 7-14.
- [4] David J, McLaughlin D. Distributed Collaborative Adaptive Sensing (DCAS) for improved detection, understanding, and prediction of atmospheric hazards. IOAS-AOLS San Diego, CA, AMS, 2005.
- [5] Junyent F, Chandrasekar V, McLaughlin D, et al. The CASA integrated project 1 networked radar system. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 2010, 27(1): 61-78.
- [6] 李思腾, 陈洪滨, 马舒庆, 等. 网络化天气雷达协同自适应观测技术的实现. 气象科技, 2016, 44(4): 517-527.
- [7] 马舒庆, 陈洪滨, 王国荣, 等. 阵列天气雷达设计与初步实现. 应用气象学报, 2019, 30(1): 1-12.
- [8] Weber M E, Cho J Y N, Herd J S, et al. The next-generation multimission U.S. surveillance radar network. Bulletin of the American Meteorological Society, 2007, 88: 1739-1752.
- [9] Bluestein H B, French M M, Popstefanija I, et al. A mobile, phased-array doppler radar for the study of severe convective storms. Bulletin of the American Meteorological Society, 2010, 91: 579-600.
- [10] 刘黎平, 胡志群, 吴翀, 等. 双线偏振雷达和相控阵天气雷达技术的发展和运用. 气象科技进展, 2016, 6(3): 28-33.
- [11] 吴翀, 刘黎平, 张志强. S波段相控阵天气雷达与新一代多普勒天气雷达定量对比方法及其初步应用. 气象学报, 2014, 72(2): 390-401.
- [12] 刘黎平, 吴林林, 吴翀, 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. 大气科学, 2014, 38(6): 1079-1094.
- [13] 程文慧, 傅佩玲, 胡东明, 等. 广州相控阵天气雷达组网方案设计及其观测试验. 气象, 2020, 46(6): 823-836.