

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[J]. 气象,46(6):823-836. Cheng Y H, Fu P L, Hu D M, et al, 2020. The Guangzhou phased-array radar networking scheme set-up and observation test[J]. Meteor Mon, 46(6):823-836(in Chinese).

广州相控阵天气雷达组网方案设计及其观测试验^{*}

程元慧¹ 傅佩玲² 胡东明² 包晓军³ 张 羽² 李浩文² 黄 辉³

1 广东省气象局, 广州 510060

2 广州市气象台, 广州 511430

3 广东省珠海纳睿达科技有限公司, 珠海 519000

提 要: 通过统计近 3 年广州强对流的回波结构特征, 设计了由 4 部具有双线偏振功能的 X 波段相控阵天气雷达组网, 覆盖广州中心城区。以期获得本地小尺度对流单体生消完整过程的精细探测资料, 为对流单体生消机理分析提供数据基础, 同时为分析城市冠层影响飑线等线状对流系统强度变化提供观测依据。观测试验表明: 相控阵雷达网获取的高分辨率探测数据, 监测本地生消的小尺度对流单体、线状对流系统的强度变化有明显优势, 对预警信号发布等业务有很大帮助。不足之处是该相控阵雷达采取单波束扫描模式, 加快扫描速度受到一定程度限制。

关键词: 双线偏振, 相控阵雷达, 本地中小尺度对流单体, 线状对流系统, 监测, 预警

中图分类号: P411

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2020.06.009

The Guangzhou Phased-Array Radar Networking Scheme Set-up and Observation Test

CHENG Yuanhui¹ FU Peiling² HU Dongming² BAO Xiaojun³

ZHANG Yu² LI Haowen² HUANG Hui³

1 Guangdong Meteorological Service, Guangzhou 510060

2 Guangzhou Meteorological Observatory, Guangzhou 511430

3 Naruida Technology Co. Ltd. in Zhuhai of Guangdong, Zhuhai 519000

Abstract: Based on the statistical analysis of echo structure of severe convective storms in Guangzhou during 2015–2017, a network of phased-array polarimetric Doppler radar has been set up, which can entirely cover the central district of Guangzhou. The main purpose is to obtain high-resolution radar datasets of severe meso- and micro-scale convections, which would be helpful for further analyzing structure and the formation, dispersal mechanism of these storms. Meanwhile, it could contribute to understanding the effects of urban canopy on the local meteorological field and the linear convection systems such as squall lines. The results of field experiment show that the high-resolution radar datasets from phased-array radar have great advantages in monitoring development of local meso- and micro-scale convections, and the evolution of local intensity of linear convection systems. It would greatly help to increase the accuracy and timeliness of early warning and other operations. The poor side is that the phased-array radar scans with a

^{*} 国家自然科学基金项目(41875182)、国家重点研发计划(2017YFC1501701)、广东省科技计划项目(2017ZC0402)、广东省自然科学基金项目(2020A1515010602)和广东省气象局重点项目(GRMC2018Z01)共同资助

2019 年 1 月 14 日收稿; 2019 年 12 月 9 日收修定稿

第一作者, 程元慧, 主要从事天气雷达规划、应用及业务管理. Email: 756853701@qq.com

通讯作者, 胡东明, 主要从事大气探测技术及应用开发. Email: dongminghu1976@163.com

single beam, which makes it difficult to further accelerate the scanning speed.

Key words: dual-polarization, phased-array radar, local meso- and micro-scale convection cell, linear convection system, monitoring, early warning

引 言

华南地形和气候条件复杂,龙卷、冰雹、短时强降雨、下击暴流等中小尺度强对流天气频发。中小尺度天气系统具有局地性强、生消变化快、致灾重的特点。如 2015 年 10 月 4 日,台风彩虹登陆湛江后诱发的 EF3 级龙卷,造成佛山、广州多人伤亡和巨大财产损失(朱文剑等,2016);2016 年 4 月 13 日,珠江三角洲飕线过程带来雷雨大风,造成东莞麻涌龙门架倒塌致 18 人死、多人伤(植江玲等,2017);2017 年 5 月 7 日,由局地对流单体快速发展演变成历史罕见的广州市特大暴雨,无论从微观分析其触发机制(傅佩玲等,2018),还是从宏观分析其维持机制(田付友等,2018),数值模式的准确预报和提前量都很困难(伍志方等,2018)。目前国内外常规天气雷达设备受制于时空分辨率以及观测盲区,导致对中小尺度天气系统的探测难度大,机理研究少,预报预警能力不足,成为气象防灾减灾工作中亟待解决的难点问题。因此,提高中小尺度对流系统的监测能力,认识强对流天气演变发展的机理,建立强对流天气的自动监测和快速预警意义重大。

相控阵天气雷达以其高时空分辨率的优势,主要发达国家早已开展相控阵天气雷达的观测与应用研究。美国于 2000 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)(Bluestein et al, 2010),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、飕线等天气过程;试验表明,其扫描速度远高于 WSR-88D 雷达,且数据质量与多普勒天气雷达相当。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(Weber et al, 2007),并于 2006 年组织了强风暴实验室、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,用于对冰雹、龙卷等强天气的观测(Weadon et al, 2009);试验表明,采用相控阵技术,可以有效改善天气雷达的探测功能,尤其是提高对中小尺度强对流天气的

探测能力。2003 年,美国国家科学基金会设立了马萨诸塞大学牵头的工程研究中心(ERC;也被称作大气协同自适应探测中心,CASA),针对 WSR-88D 雷达存在的问题,采用分布式协同自适应观测(DCAS)的网络化“相控阵小雷达”,来弥补其不足,以提高观测的时空分辨率及实现低空域的有效探测覆盖(Chandrasekar et al, 2010),计划在 2025 年完成对目前机械扫描多普勒天气雷达的替换。日本国家信息通信研究所(NICT)、大阪大学及东芝(TOSHIBA)公司,于 2012 年联合研制出首部单偏振 X 波段一维相控阵天气雷达(PAWR),并于 2016 年开展四台组网观测试验(Mizutani et al, 2011)。日本东芝公司计划 2018 年完成首套双偏振 X 波段一维相扫相控阵天气雷达的研制,希望 2020 年投入业务,为日本东京奥运会提供的精细化天气预报保障服务(Wada et al, 2016)。欧洲各国对于新一代天气雷达的研发进展较缓慢,目前主要致力于欧洲各国现有雷达的网络化数据共享工程(OPERA),包括数据融合、信息共享以及软件一体化等(Holleman et al, 2008)。

在我国,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电子科技集团公司第十四研究所合作,改造军用相控阵雷达,研制了一部 S 波段相控阵天气雷达,观测试验证明相控阵天气雷达观测技术的可行性(张志强和刘黎平,2011),由于种种原因,未能实际用于强对流天气过程的精细观测。2009 年,中国气象科学研究院与四创电子股份有限公司合作,研制了车载 X 波段相控阵天气雷达,为进一步改进雷达观测模式提供了依据(吴翀等,2014),但由于成本太高等因素限制了其应用推广。中国气象局气象探测中心联合湖南宜通华盛科技有限公司,用 3 个 X 波段相控阵收发子阵,组成网络化天气雷达(马舒庆等,2019),2017 年在长沙机场开展观测试验。2015 年珠海纳睿达公司研制了双偏振 X 波段相控阵天气雷达(简称 APAR 雷达)。

本文根据华南中小尺度天气系统气候统计结果,设计 APAR 雷达技术参数和观测模式,开展组网观测试验,以补充广州 CINRAD/SA 雷达(2016

年升级为双偏振)在低空域的覆盖,加之其高时空分辨率(尤其是垂直剖面)探测资料,精细解剖对流单体生消过程,进一步探究其机理,以期提高超大城市下垫面强对流天气的监测预警能力。

1 APAR 雷达探测能力分析

1.1 X 波段相控阵天气雷达对 CINRAD 雷达具有补充作用

目前业务上 CINRAD/SA 雷达,其所在波段以及工作模式决定了对大尺度以及部分中尺度天气系统的观测具有优势,能够有效地观测到飑线、冰雹等强对流的发生演变过程(范皓等, 2019; 公衍铎等, 2019; 侯淑梅等, 2018)。其雷达设计主要针对远距离探测,且在长期业务中已经收到了非常好的效果(徐鸣一等, 2017; 郭英莲和孙继松, 2019; 李柏等, 2013)。APAR 雷达作为现有 CINRAD/SA 雷达网的补充,可利用其低海拔空域覆盖、高时空分辨率探测、实时 RHI 扫描功能,获取小尺度以及部分中尺度天气系统的精细结构及其生消演变过程,可以更精确地描述对流系统的短时演变(于明慧等, 2019)。从而提高对中小尺度强对流天气系统的监测预警能力,加深对其特征机理的认识。

1.1.1 扫描覆盖低海拔空域

CINRAD/SA 雷达在设计上考虑大范围监测,在远距离探测中对大尺度天气系统的预警具有优势,但随着距离增加,波束中心高度和波束宽度也随之增加,使得雷达在较远距离处的探测能力下降,加上地球曲率的影响,导致在低空区域特别是 1 000 m 以下的空域监测存在很大的盲区(朱丹等, 2018)。另外,为了减少地物遮挡,满足净空条件,CINRAD/SA 雷达通常建设在一定海拔高度上,在近距离也形成不小的探测盲区。而中小尺度强对流天气系统,中低层是触发初生的关键区域。APAR 雷达可以弥补 CINRAD/SA 雷达在低空领域的局限性。

1.1.2 实时解剖垂直结构

按照目前 APAR 雷达实现标准体扫时间(水平 360° 为 0.9° 步进;垂直 30° 17 层 1.8° 角分辨率),APAR 雷达垂直为电子扫描,每 1° RHI(距离高度显示)扫描时间只需 0.25 s。这样,雷达的水平旋转速度不需要太快,既避免了机械雷达切换仰角时所

带来的不同仰角数据污染,又可以获得实时准确的 RHI 扫描。

1.1.3 高时间分辨率观测

APAR 雷达利用相控阵技术,不仅减少了天线快速转动时带来的波束形状发生变化以及指向不准确,而且提升了时间分辨率(常规可达 108 s 一个体扫)。相控阵体制中的数字波束形成技术,可控制波束进行任意角度精确指向,完成对特定方位天气系统的集中重点扫描。相控阵天气雷达还可实现多波束同时扫描,缩短了扫描时间,提升了雷达系统的稳定性和波束指向的可靠精确性。

1.2 雨衰对 X 波段雷达的影响分析

为实现中小尺度天气系统精细化探测的目的,选择雷达波段的基本原则:(1)波段能够有效地穿透各种中小尺度天气系统,即较小的衰减;(2)高时空分辨率,以便能够更快更精确地获取此类天气系统的结构特征。

无线电标准委员会(ITU)的试验数据表明,S 波段雷达在降雨中衰减几乎可以忽略(表 1),因此最适用于观测大尺度天气系统,如飑线、台风等。C 波段雷达在雨强达到 50 dBz 后,其衰减也变得很大。虽然 X 波段雷达在雨中的衰减最大,但其在空中的分子相态分辨能力,比 C 波段的雷达更强。

表 1 雨强对不同波段雷达的衰减

Table 1 Attenuation under various rainfall intensities

强度/dBz	X/(dB · km ⁻¹)	C(dB · km ⁻¹)	S/(dB · km ⁻¹)
40	0.19	0.056	0.019
45	0.45	0.12	0.028
50	1.1	0.28	0.047
55	2.6	0.7	0.09
60	6.5	2.5	0.185
65	16	4.3	0.4

由厂家提供的技术手册获知,APAR 雷达接收机最小可探测信号为 10 dBm,距离雷达 10 km 处,最小可测回波强度是 10 dBz。按照该条件任何返回到接收机端的可测信号低于该数值,雷达将无法探测到有用信号。据此条件分析 X 波段与 C 波段雷达(表 2),单台 X 波段相控阵雷达以及相应条件下的 C 波段相控阵雷达,在不同降雨强度下,仿真分析雷达探测深度。由仿真计算得出:不论 X 波段还是 C 波段相控阵天气雷达,在反射率因子超过 55 dBz 后,衰减都会导致有效探测距离急剧下降。X 波段相控阵天气雷达所受到的影响比较严重一

些。但相同性能的 C 波段相控阵天气雷达的体积和重量远大于 X 波段相控阵天气雷达,因此 C 波段相控阵雷达站点选址和安装要求以及基建费用都会远高于 X 波段相控阵天气雷达。

表 2 不同波段雷达穿透不同雨强的探测距离
Table 2 Detection range of X and C band radars
under various rainfall intensities

强度/dBz	X 波段/(°·km ⁻¹)	C 波段/(°·km ⁻¹)
20~30	~0.1	~0.04
30~35	~0.25	~0.09
35~40	~0.8	~0.25
40~50	~10	~4
50~60	~16	~6

考虑工程建设难度大,不容易在小范围建设 C 波段雷达组网,开展业务化观测。国内外用于探测小尺度天气系统,也少见 C 波段雷达作为大雷达网的补充。为此,我们初步选择 X 波段。

1.3 X 波段雷达偏振性能相对最敏感

若天气雷达在强降雨时有剧烈衰减,则必须要进行衰减校正。国内外普遍认为差分相移率(K_{DP})是进行衰减订正最直接有效的方法,主要在于 K_{DP} 具有多方面的优势,诸如:不受雷达系统标定误差影响,只对水相粒子敏感不对冰相粒子敏感,不受波束充塞程度的影响等。C 波段相控阵天气雷达在强降雨时的衰减同样比较严重(表 2),而其 K_{DP} 却不如 X 波段雷达那样对降水敏感(表 3)。在接收弱信噪比信号的状况下, K_{DP} 数值准确性和可靠性大大降低,从而导致其数据质量不可靠而不能用来进行衰减订正,所以常常辅助引入反射率因子(Z)、差分反射率(Z_{DR})等数据进行联合订正。X 波段的 K_{DP} 敏感性约为 C 波段的 3 倍,其 K_{DP} 放入衰减订正适用范围明显大于 C 波段,从而可在更广的回波强度范围内利用 K_{DP} 进行衰减订正。此外,C 波段相比 X 波段而言,其在强降雨时的共振效应比 X 波段更严重,若无法有效剔除共振效应产生的异常值区域,将导致对 K_{DP} 的错误反演,最终造成该区域衰减订正错误。由于 C 波段相比 X 波段上述的复杂的问题,使得其利用 K_{DP} 进行衰减订正相比 X 波段要复杂和困难得多,进而使得反射率数据的质量控制变得相当困难。这也是本项目选择 X 波段的主要因素之一。

作为双线偏振量之一的 K_{DP} 数据,同时也是其他雷达数据质量控制和资料应用行之有效的办法,例如,地物杂波抑制、粒子相态识别,等等。

表 3 不同波段雷达穿透不同雨强的探测距离
Table 3 Detection range of X and C band radars
under various rainfall intensities

强度/dBz	X 波段/km	C 波段/km
50	16.2	39.6
55	8.6	23
60	4.36	12.5
65	2.13	6

2 雷达关键指标参数设计

APAR 雷达采取的是方位机械扫描,俯仰电子扫描的设计方案(主要性能指标设计见表 4)。天线波束宽度分别为 1.8°和 3.6°,同时具有双线偏振功能。体扫模式仰角 0~30°(17 层逐 1.8°)等间隔电子扫描,体扫完成时间为 108 s。整体设计高度采用集成芯片,耗电小,适合露天自动化观测,确保无故障连续运行时间超过 30 000 h。

表 4 主要性能指标设计

Table 4 Main performance specifications

工作体制	一维电子相控扫描
最大探测距离	60 km(@30 dBz)
测速范围(单 PRF)	±64 m·s ⁻¹ (@35 km)
体扫模式	水平:0~360°;垂直:0~30°(17 层等间隔)
极化方式	水平、垂直双极化
波束宽度 H/V	3.6°/1.8°
发射机峰值功率	256 W
脉冲宽度	20 μs
脉冲重复频率	400~4 000 Hz
灵敏度	110 dBm(@1 MHz)
噪声系数	≤3.3 dB
动态范围	≥85 dB

3 广州强对流天气系统的气候统计

由于珠江三角洲地区飑线天气系统频发,破坏力极大,因此本案相控阵天气雷达除了主要关注目标为本地生消的小尺度对流单体外,同时兼顾线状对流系统的探测。统计 2015—2017 年发生在广州的强对流天气,主要分析其回波结构的长度、宽度、强度和移动方向。由表 5 可以看出,广州线状对流宽度最宽通常为 35 km 左右,长度经常超过 300 km;回波强度最强为 60~65 dBz,但通常多是 50 dBz 左右。由于影响珠三角地区的主要天气系统,一是西北—东南向的锋面系统,二是海上来的热带系统,所以回波移动方向,绝大多数是由西北移向东南,或者由西往东。

表 5 2015—2017 年广州强对流回波结构特征

Table 5 Echo structure characteristics of severe convective storms in Guangzhou during 2015—2017

起始时间/年月日时(UTC)	结束时间/年月日时(UTC)	影响区域	移向	强度/dBz	长度/km	宽度/km
20150515 17:00	20150515 23:30	广州市	西北→东南	60~65	220	30
20150523 04:00	20150523 11:30	广州市	西北→东南	60~65	150	30
20150531 08:00	20150531 10:30	广州市	西→东	60~65	170	30
20150611 08:00	20150611 11:30	广州市	西→东	60	230	25
20160105 03:30	20160105 05:00	南沙区	西南→东略偏北	60~65	55	15
20160320 10:30	20160320 13:00	从化区	西北→东南	60~65	138	16
20160404 07:54	20160404 08:42	番禺、南沙	西北→东南	65~70	130	25
20160409 20:54	20160410 00:24	中北部	西北→东南	55~65	412	30
20160412 05:54	20160412 07:18	番禺、南沙	西北→东南	60~65	80	12
20160412 20:30	20160412 22:30	广州市	西北→东南	60~65	440	35
20160417 13:00	20160417 18:00	广州市	西→东	60~65	500	37
20160506 08:30	20160506 12:30	广州市	西→东	60~65	400	40
20160515 10:00	20160515 12:30	广州市	西北→东南	60~65	380	35
20160615 07:00	20160615 10:30	北部地区	西→东	60~65	160	12
20160615 19:30	20160616 00:30	广州市	西→东	60~65	330	40
20160704 04:00	20160704 09:30	广州市	西→东	60~65	300	33
20160826 06:30	20160826 12:00	广州市	西→南	60~65	320	50
20170503 20:30	20170504 04:30	广州市	西北→东南	60~65	530	35
20170508 09:00	20170508 14:30	广州市	西北→东南	60~65	500	35
20170511 20:00	20170512 00:30	北部地区	西北→东南	60~65	350	30

4 相控阵天气雷达组网设计

APAR 雷达具有高时空分辨率的特点,且通过组网以期获得更大的探测范围。基于以下几点考虑:(1)广州 CINRAD/SA 雷达距离市中心不到 30 km,雷达静锥区限制了其观测产品发挥作用,亟需补充对人口密集主城区上空及周边垂直空间的探测。为此,相控阵雷达组网设计将广州主城区置于雷达观测网中心,从而实现对该上空区域的有效覆盖观测。(2)广州地处低纬度的华南沿海,加之珠江三角洲平原及珠江水系,本地经常生成和发展局地对流单体。中小尺度对流系统具有生消变化迅速、致灾性严重的特点,该类天气系统需要更高的时间和空间分辨率来进行观测,以期获得对流单体生消完整过程的精细探测资料。解剖其结构,分析其机理,以提高对小尺度对流单体的监测预警能力,为此要求相控阵雷达体扫观测时间分辨率不高于 90 s。由于探测距离与体扫时间分辨率呈反比,按照相控阵天气雷达指标计算,若完成 0~360°,垂直 0~20°的扫描,并且不高于 90 s 的体扫时间分辨率,那么单雷达探测距离大约为 45 km。(3)单台 X 波段相

控阵天气雷达遇强降雨时,雨衰限制了其“单兵”探测能力。如何能够有效避免雨衰影响,提高雷达观测的覆盖范围,通过表 5 对 2015—2017 年广州大暴雨飑线过程的统计分析可知,线状对流强度多数为 50 dBz、宽度约为 35 km,因此雷达网被设计成菱形,可以保证对飑线的穿透,兼顾对飑线的监测预警。(4)中小尺度对流系统的风场是非常重要的因素,直接决定着天气系统的生消演变趋势和移动路径。如何有效获取更加准确且可靠的三维风场,是组网设计的另一关注点。通过多部相控阵天气雷达组网既可以获得更大的风场覆盖交叠面积,又可以利用观测的高时空分辨率提高风场反演精度,获取更准确的三维风场信息。两台雷达进行三维风场反演会存在反演大误差不可信区域,为了有效避免该大误差不可信范围的影响,需要不同雷达从不同角度照射以便消除反演不可信区域的影响,同时两两雷达间距离不宜过大,美国 NSSL 在多年探测的基础上,总结出两部雷达间距选择 40 km 左右时,对风场的反演效果最佳。

兼顾工程建设的可行性,经过选址和环境评估,最后四部相控阵雷达组网布局如图 1 所示,分别位于广州花都(HD,花都区气象观测站)、白云(MFS,

帽峰山山顶)、番禺(PY,广州市气象局观测场)和佛山南海(NH,广东省农业气象试验站),其中番禺相控阵雷达位于原来的广州新一代多普勒天气雷达(CINRAD/SA)的西侧 4 km。组网的四部 X 波段相控阵天气雷达,它们的共同覆盖区域正好是广州中心城区。统计广州强对流天气的发生发

展特点发现,线状对流系统在移动过程中经过建筑物为下垫面的城区时,强度经常发生变化。通过对这种天气系统的资料分析,进一步研究城市冠层对中小尺度对流系统强度变化的影响。

5 双偏振相控阵天气雷达的质量控制

雷达资料应用前,需要进行杂波抑制、消除噪声等数据质量控制。同时强降水对 X 波段雷达探测造成明显衰减,亟需有效且合理的强度衰减订正。双偏振雷达产品对雷达系统的稳定性和定标的可靠性提出了更高的要求,下面简单介绍广州 APAR 雷达采用的数据质量控制策略。

5.1 地物杂波抑制

椭圆滤波器(IIR)为时域滤波器,优点是容易实现,处理计算量较小。缺点是会将多普勒运动速度较慢的气象信号当成地物杂波一并滤除,反映在气象产品上为径向速度产品零速度带不清晰。APAR 雷达采用自适应高斯频域滤波器(GMAP),将信号变换到频域后进行杂波处理,同时引入高斯模型来对零频信号进行恢复,能够恢复和保留处于零速度带气象数据。

图 2 为使用 GMAP 杂波滤波技术晴空条件下的杂波抑制能力,图 3 为对比广州 CINRAD/SA 雷达使用时域滤波器,APAR 雷达使用 GMAP 后对零速度带信号的重建恢复能力。

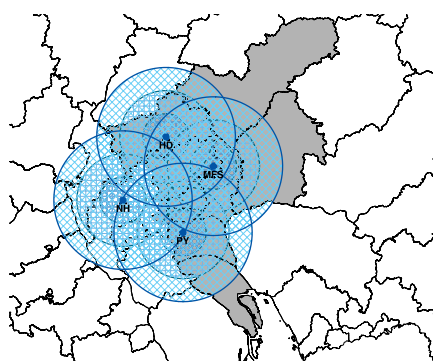


图 1 广州相控阵雷达网分布示意图
(蓝色实心圆点分别代表四部相控阵雷达,自北向南分别为:花都(HD)、帽峰山(MFS)、南海(NH)和番禺(PY)雷达,以雷达为圆心的三个蓝色圆分别为 10、20 和 30 km 的范围)

Fig. 1 Distribution of phased-array radars in Guangzhou

(Blue solid dots represent the four phased-array radars, from north to south: Huadu (HD), Maofeng Mountain (MFS), Nanhai (NH) and Panyu (PY) Radars, and the three blue circles stand for range of 10 km, 20 km and 30 km away from the radar, respectively)

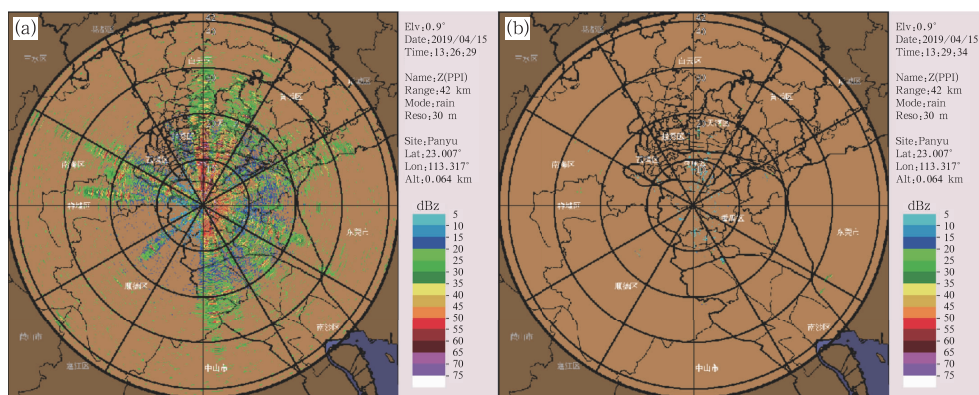


图 2 广州 APAR 雷达晴空地物处理前(a),后(b)回波对比

Fig. 2 Comparison of echoes before (a) and after (b) ground clutter suppression under sunny sky conditions

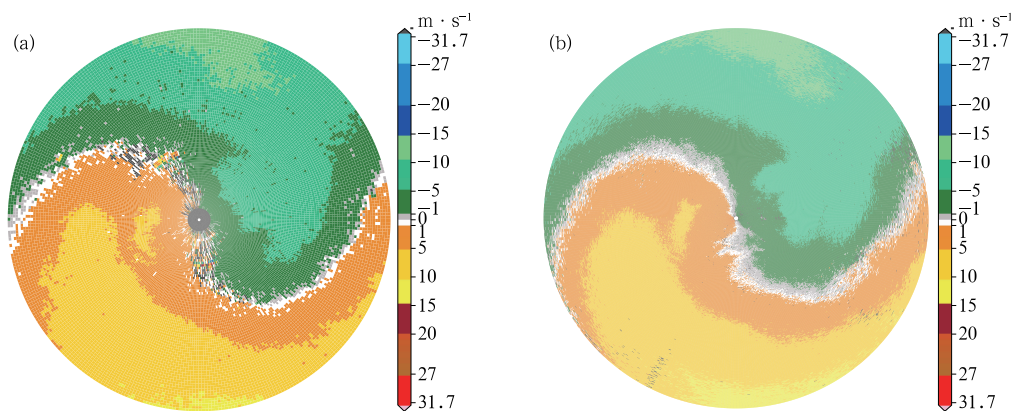


图3 地物杂波零速度带效果对比

(a)APAR 雷达径向速度,(b)CINRAD/SA 雷达径向速度

Fig. 3 Comparison of zero velocity contour of APAR radar and CINRAD/SA radar after ground clutter suppression

(a) radial velocity of APAR radar, (b) radial velocity of CINRAD/SA radar

5.2 衰减订正

衰减可利用差分相移率(K_{DP})来进行订正。通常, K_{DP} 与反射率因子(Z)存在一一对应的订正关系,通过对差分相移进行算法拟合获得的 K_{DP} 产品,可以实现对反射率因子的有效订正,其订正关系式为:

$$A_H = aK_{DP}^b \quad (1)$$

式中: A_H 为单程衰减率; a, b 为订正系数。

APAR 雷达采用的衰减订正算法是自适应约束订正方法,其克服了降雨廓线法将系数 a 设定为经验固定值的不足,通过自适应拟合所获取的 a 值,能够更加准确地进行衰减订正;对每一个 a 值,通过式(2)计算出 A_H ,再根据差分相位移 $[\Phi_{DP}^{cal}(r, \alpha)]$ 约束条件重构出式(3),将式(3)与实际测量的差分相位移 $[\Phi_{DP}^{err}(\alpha)]$ 进行比较[式(4)],以获得的差分相位移差值最小来获得最佳的 a 值,最终得到每个距离门上的最优 A_H 值。

$$A_H(r) = \frac{[Z'_h(r)]^b \times [10^{0.1 \times b \times a \times \Delta \Phi_{DP}^{-1}}]}{I(r_0, r_1) + [10^{0.1 \times b \times a \times \Delta \Phi_{DP}^{-1}}] \times I(r, r_1)} \quad (2)$$

$$\Phi_{DP}^{cal}(r, \alpha) = 2 \int_{r_0}^r \frac{A_H(s, \alpha)}{\alpha} ds \quad (3)$$

$$\Phi_{DP}^{err}(\alpha) = \sum_{i=1}^N |\Phi_{DP}^{cal}(r_i, \alpha) - \Phi_{DP}(r_i)| \quad (4)$$

$$10 \lg[Z_h(r)] = 10 \lg[Z'_h(r)] + 2 \int_0^r A_H(s) ds \quad (5)$$

结果通过式(5),实现对 Z 产品的衰减订正。

雨衰实际影响了 APAR 雷达的观测能力,广州通过部署四部雷达组成四边形,实现从四个不同方向对该飑线系统进行观测,一定程度上解决了强降雨所带来的雨衰问题。图4为2019年4月30日的一次飑线过程,通过引入偏振量 K_{DP} 衰减订正以及多雷达协同观测,基本实现了协同观测范围内的该大尺度天气系统的有效观测,避免雨衰带来的观测障碍。

5.3 相控阵天气雷达双偏振量产品

相控阵天气雷达的双偏振量产品主要包括差分反射率因子、差分传播相移及其导出产品差分传播相移率、相关系数,各双偏振产品定标误差精度符合理论预期。

5.3.1 差分反射率因子(Z_{DR})

通过微雨滴法分析数据,广州 APAR 雷达 Z_{DR} 误差统计接近正态分布,其统计中值约为0.156 dB(图5),满足 Z_{DR} 精度误差(<0.2 dB)的理论要求。

5.3.2 差分相位移(Φ_{DP})

初始相位是影响差分相位移数据质量的关键因素,广州 APAR 雷达引入了初始相位调校技术,使初始相位尽可能从周期最低值开始,最大限度地提高相位的延展范围,降低相位折叠现象的出现。

图6为2018年9月16日10—13时广州 XMTR 雷达连续3 h的 Φ_{DP} 初始相位变化曲线,可以看出 Φ_{DP} 初始相位在 $8.5^\circ \sim 10.5^\circ$ 变化,变化幅度在 2° 范围内,初始相位具有较好的稳定性。

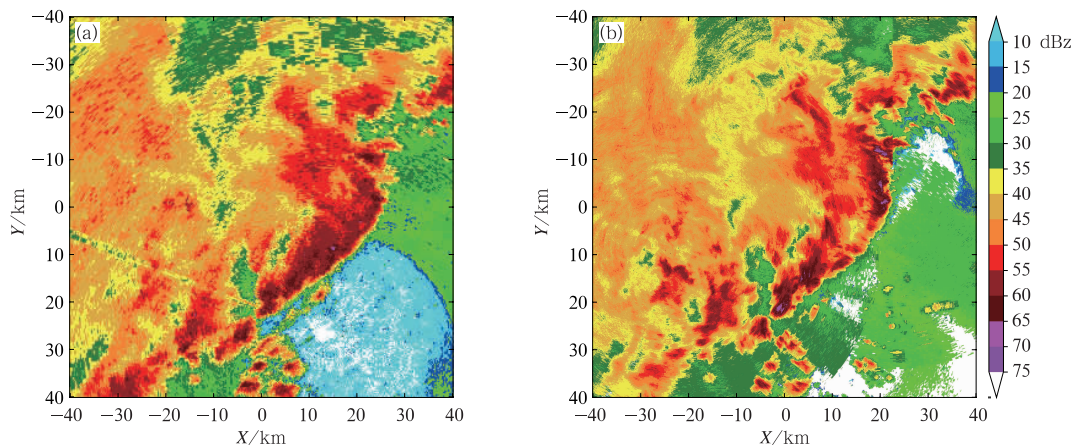


图 4 2019 年 4 月 30 日广州 CINRAD/SA 雷达(a)和广州四台雷达组网(b)对飑线的探测效果

Fig. 4 Detection effect of the squall line of CINRAD/SA radar (a) and Phased-Array Radar Network (b) in Guangzhou on 30 April 2019

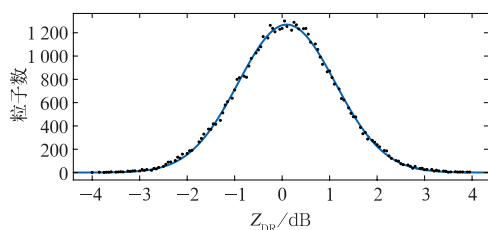


图 5 广州 APAR 雷达 Z_{DR} 误差分布

Fig. 5 Z_{DR} error distribution of APAR radar in Guangzhou

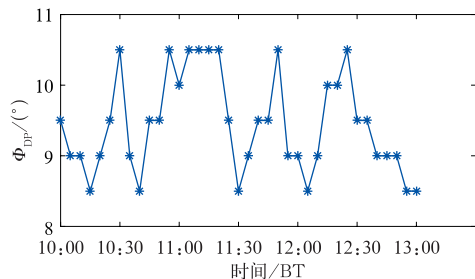


图 6 2018 年 9 月 16 日 10—13 时广州 XMTR 雷达 Φ_{DP} 初始相位随时间的变化曲线

Fig. 6 Temporal variation of Φ_{DP} initial phase of XMTR radar in Guangzhou from 10:00 BT to 13:00 BT 16 September 2018

5.3.3 相关系数(CC)

通常情形下, CC 对噪声较敏感, APAR 雷达在信号处理过程中针对低信噪比的情形采用了高阶算法计算 CC, 图 7 为 2018 年 9 月 16 日弱信噪比高阶算法处理前后的 CC 的概率密度分布曲线, 在新的信号处理算法下, 低信噪比下的 CC 指示性得到明

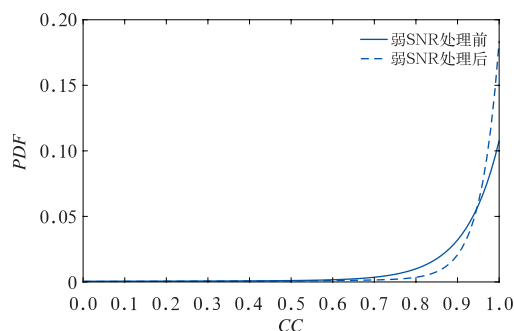


图 7 2018 年 9 月 16 日弱 SNR 处理前后广州 APAR 雷达的 CC 的概率密度分布曲线

Fig. 7 Comparison of CC for probability density distribution before and after weak SNR processing of APAR radar on 16 September 2018

显改善, 在指示降水以及粒子分类时将更有效。

6 个例分析及效果检验

相控阵天气雷达网观测试验以来, 作为 CINRAD/SA 雷达的补充, 对于局地性强、快速生消变化的强对流天气过程, 相控阵天气雷达的高时空分辨率具有明显的优势。其实时垂直剖面产品能够更好地刻画雨带中小尺度对流系统的三维结构; 而快速更新的数据样本能够最多地反映对流系统的演变过程, 给预报员更多时间判断回波的生消发展, 从而更好地把握预警信号的发布时机。在实际业务应用中发挥了积极的作用, 此处给出两次应用个例。

6.1 2018 年 5 月 3 日广州局地暴雨过程

2018 年 5 月 3 日夜间的 18:55—21:45, 广州番禺附近地区约 $30\text{ km} \times 50\text{ km}$ 的小范围区域出现了暴雨到大暴雨降雨过程, 过程持续近 3 h, 总雨量为 165.9 mm, 小时雨量为 94 mm。18:55 左右, 对流单体在本地被触发后逐渐形成线状, 19:42 后迅速发展加强。CINRAD/SA 雷达两个体扫资料(体扫

周期为 6 min, 大约耗时 15 min 左右)显示回波稍有北移的迹象, 之后一直在当地维持不动, 持续时间约 1 h, 期间降水范围不断扩大, 强度维持较强水平, 20:52 回波才开始缓慢南移。由于回波长时间的维持, 容易忽略其向南发展的趋势变化。

此前, 预报员通常要多观察两体扫, 导致贻误战机, 错过发布预警信号的最佳时机, 甚至漏发预警。而 APAR 雷达资料 90s 的更新频率, 帮助预报员做

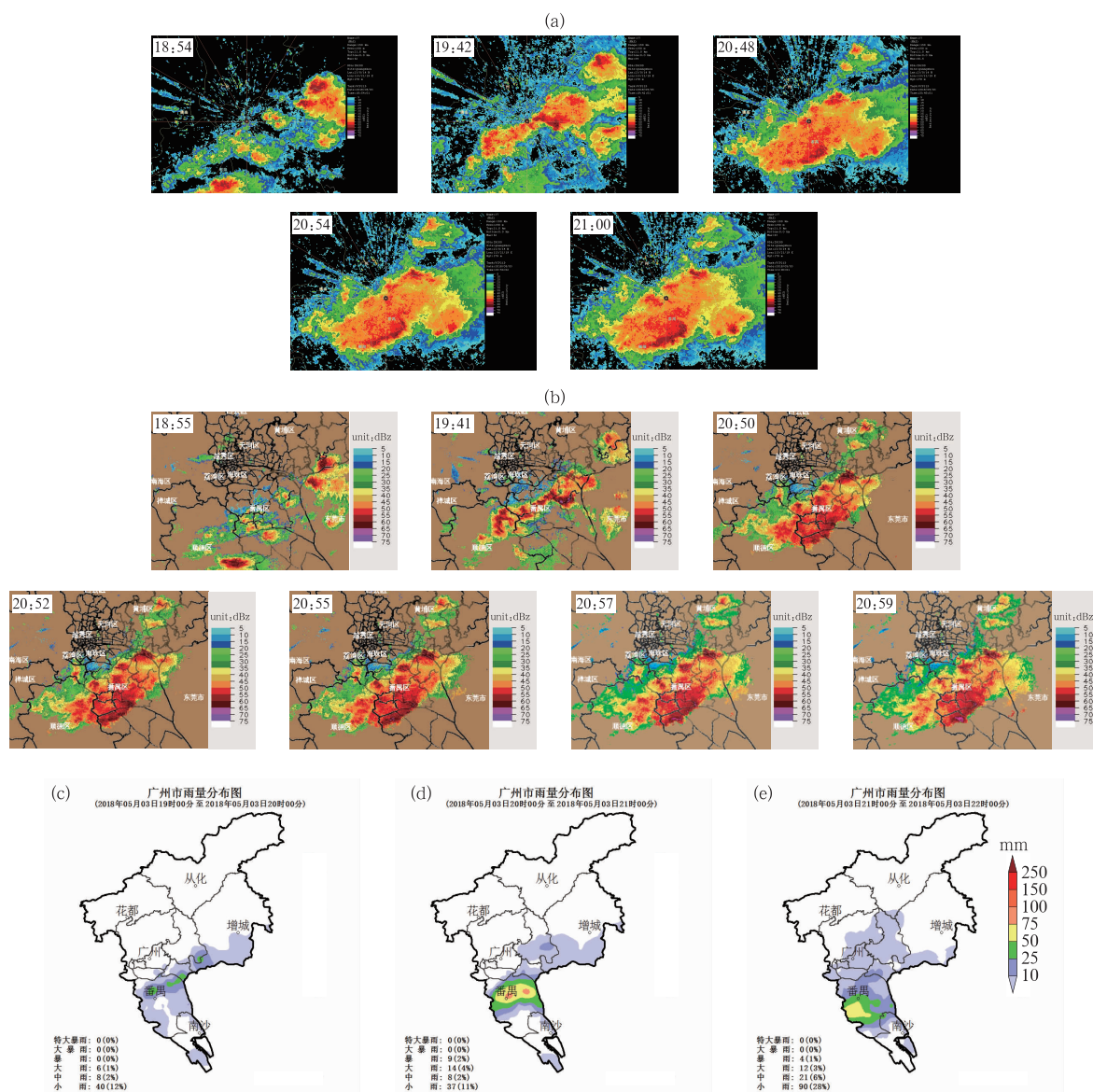


图 8 2018 年 5 月 3 日 18:54—21:00 的 APAR 雷达(a)与 CINRAD/SA 雷达(b)

观测的组合反射率以及 19—22 时每隔 1 h 累计降雨(c,d,e)

Fig. 8 Composite reflectivity of APAR radar (a) and CINRAD/SA radar (b) from 18:54 BT to 21:00 BT, and hourly precipitation from 19:00 BT to 22:00 BT (c, d, e) 3 May 2018

出决定,迅速发布暴雨预警信号。CINRAD/SA 雷达也难于发现回波移动过程中强度加强的细微变化,APAR 雷达可以发现回波在南移过程中快速加强,预报员快速判断出南沙也即将出现强降水,当机立断发布和升级预警信号。此时,自动站监测到强降雨才压至南沙区边界。在预警发布节奏的把握上,APAR 雷达给预报员提供了更有力的支撑。

6.2 5月30日广州局地大风冰雹过程

2018年5月30日傍晚,广州市区突发局地强对流系统,地面自动站录得超过9级大风,并伴随小冰雹和短时强降水。由于对流系统发展时间短、尺度小,因此需要更高时间精度的观测信息。

从图9的回波强度演变可以看到,强风暴的发

展过程非常迅速,自18时左右在广州市区被触发后(图9a),短短20 min以内,最强反射率就超过了65 dBz,而在触发后半小时内,获得冰雹目击报告,此时风暴的尺度仅为 $10\text{ km}\times 10\text{ km}$,尺度非常小,地面观测18:40也录得了最大为 $21.8\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ (9级)的大风。

在其后的半小时,风暴的强度逐渐向东北移动并减弱消散,强风暴从触发发展到最强约半小时,生命史约一个半小时,这对短时临近监测的时空分辨率提出了更高的要求。

回波发展最迅速的阶段也即冰雹接地过程是监测中最为重要的阶段,图10展示了广州CINRAD/SA雷达和APAR雷达对5月30日18:27—18:39相同时段的观测,广州CINRAD/SA雷达可观测到

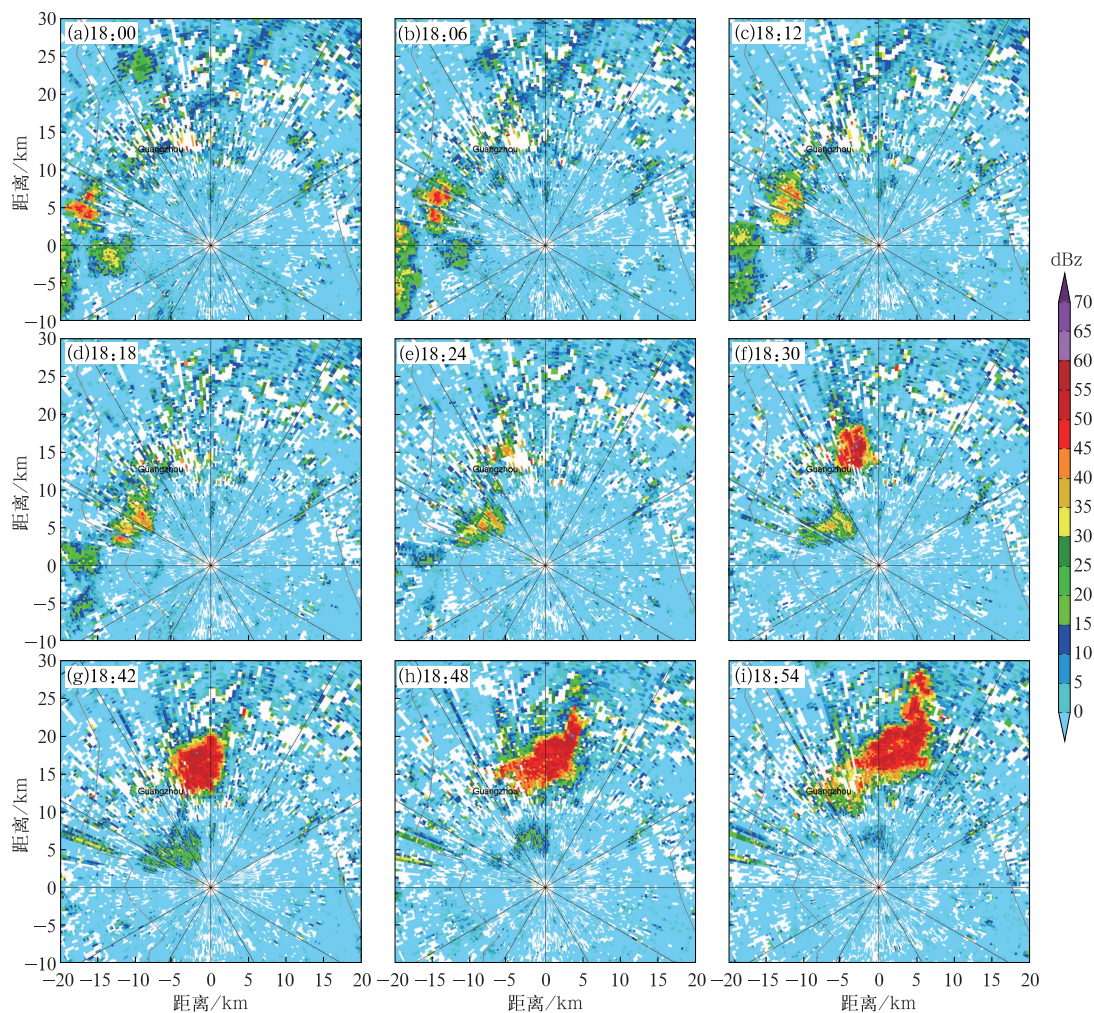


图9 2018年5月30日18:00—18:54 CINRAD/SA雷达观测的 0.5° 仰角反射率

Fig. 9 Reflectivity of CINRAD/SA radar at 0.5° elevation from 18:00 BT to 18:54 BT 30 May 2018

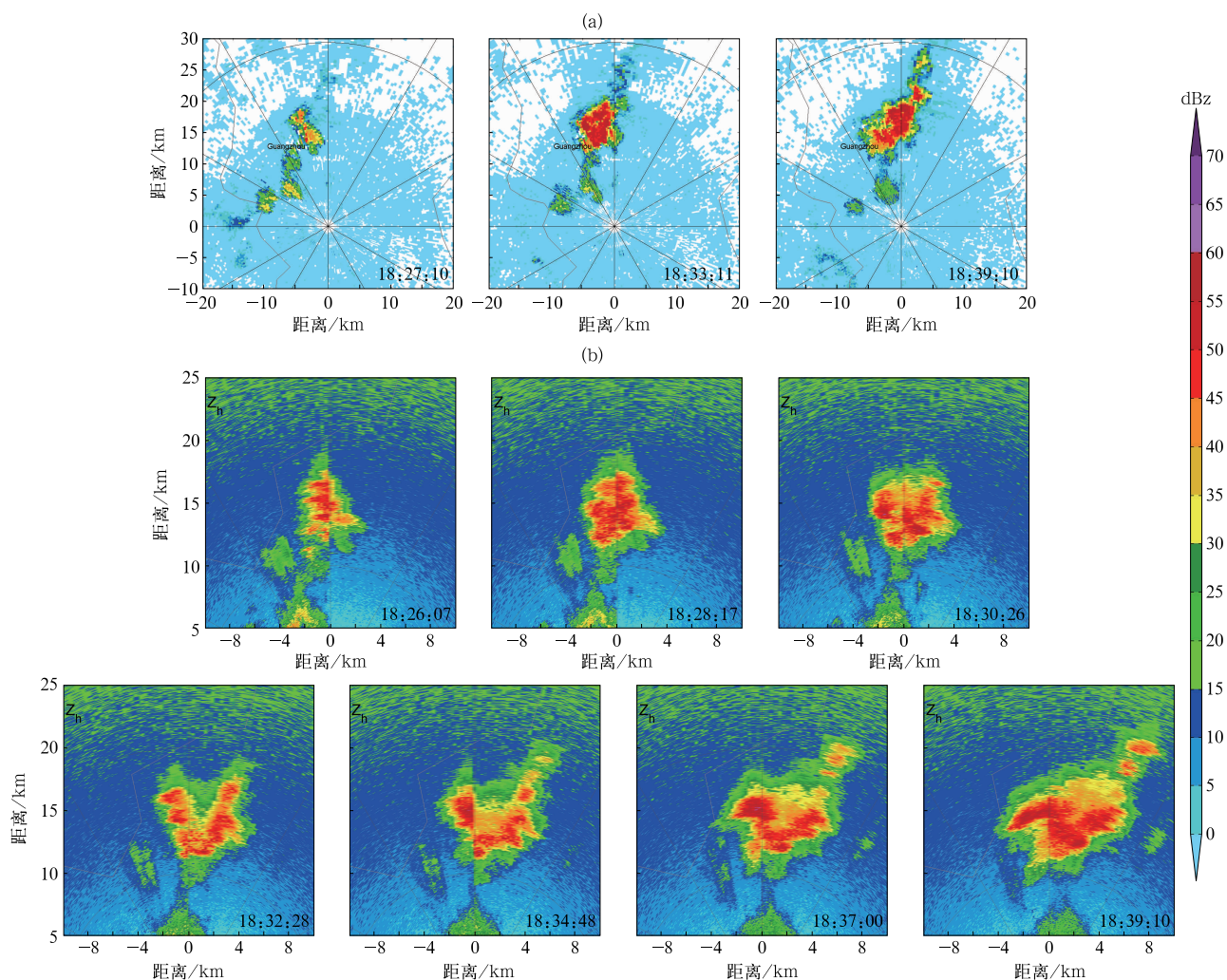


图 10 2018 年 5 月 30 日 18:27—18:39 广州 CINRAD/SA(a, 4.5°)

和番禺 APAR 雷达(b, 4.3°)反射率

Fig. 10 Reflectivity of CINRAD/SA (a, 4.5°) and APAR radar (b, 4.3°)

from 18:27 BT to 18:39 BT 30 May 2018

连续三个时次的回波加强,强风暴的范围随之扩展,而 APAR 雷达则观测到回波在 18:26—18:30 是连续加强的过程,且强风暴主体范围在扩展,18:30—18:34 回波表现为“叉型”,但 CINRAD/SA 雷达回波整体结构依旧完整,这很可能是由于冰雹导致强风暴主体在远离雷达的一侧明显衰减,从而导致“V”型缺口的出现,而在 18:37 以后回波的缺口不再明显,因此雷达冰雹特征的出现时间与实际出现冰雹的时间是比较一致的。

从图 11 APAR 雷达的连续 RHI 垂直观测可以看到,这是一次脉冲风暴引发的强对流天气,初始回波高度在 6~9 km 被触发,水平风速不大,随着回

波的发展增强,对流系统的垂直伸展高度随之增加,底层开始出现大风,18:23 最强回波超过 60 dBZ,18:26 在约 4 km 高度处出现超过 65 dBZ 的回波,18:30 左右可以较为清晰地追踪到强回波的下沉,这与冰雹触地的时间基本一致。

进一步对比 18:30 双偏振量观测(图 12),可以看到 V 型缺口对应靠近雷达一侧存在强回波,且对应差分相移率为超过 3 的大值,说明前侧有大粒子,缺口区仍有比差分相位的大值,说明缺口区内仍有高浓度雨滴存在,不过因为衰减而无法在反射率中表现,结合相关系数的局部低值,说明存在霰或者小冰雹等混合粒子。

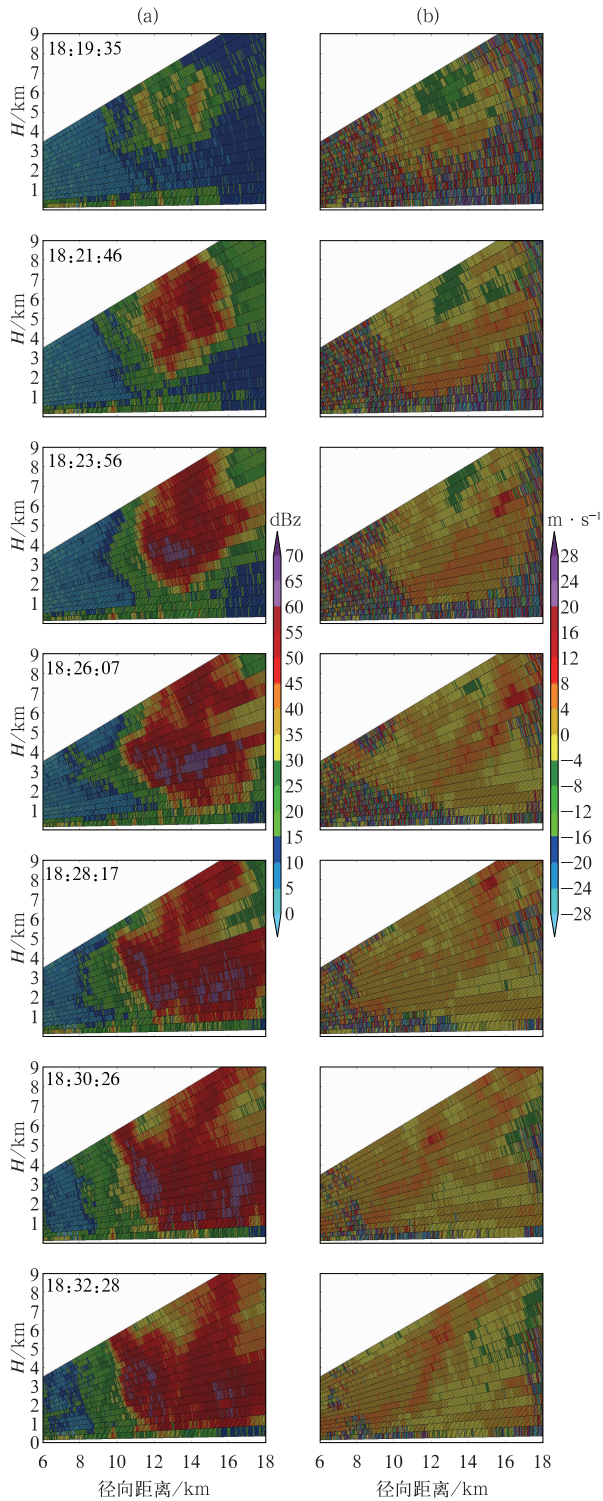


图 11 2018 年 5 月 30 日 18:19—18:32
番禺 APAR 雷达正北向反射率(a)和
径向速度(b)RHI 扫描

Fig. 11 Reflectivity (a) and radial velocity (b)
RHI scanning of APAR radar in the
north direction from 18:19 BT to
18:32 BT 30 May 2018

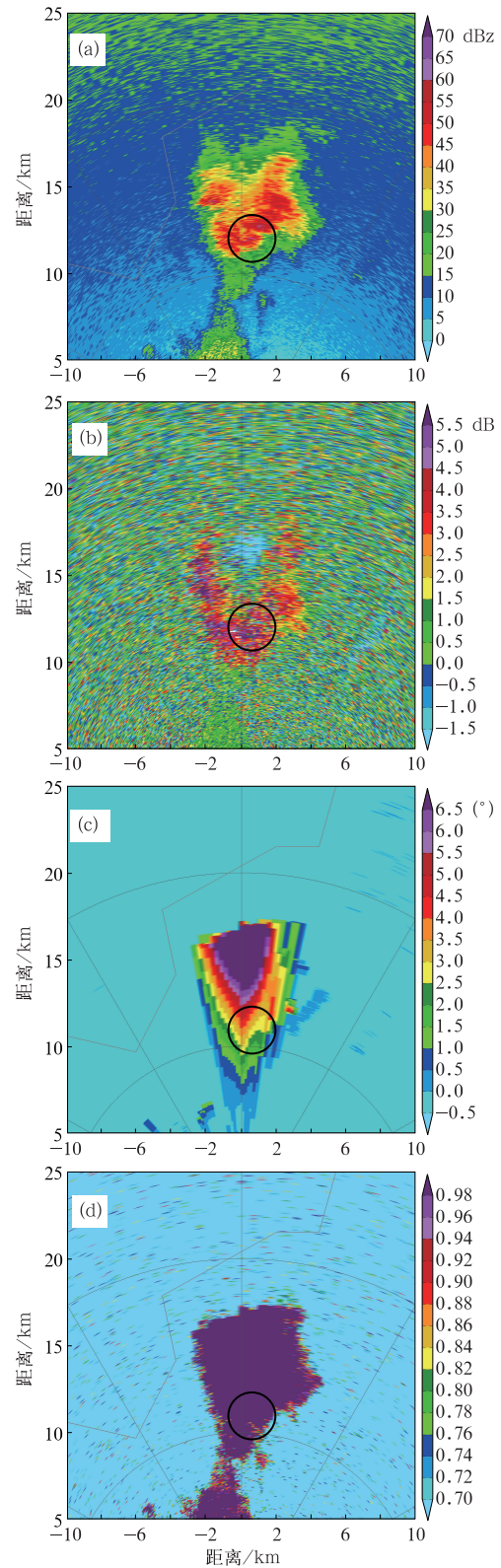


图 12 2018 年 5 月 30 日 18:30 APAR 雷达 6.3°双偏振量观测
(a)水平反射率,(b)差分反射率,(c)比差分相位移,(d)相关系数
Fig. 12 Dual-polarization detection results of APAR
radar at 6.3° elevation at 18:30 BT 30 May 2018
(a) horizontal polarization reflectivity, (b) differential
reflectivity, (c) specific differential propagation
phase shift, (d) correlation coefficient

7 结 论

本文根据珠江三角洲城市群综合观测试验的子项目“雷、雨、大风”综合观测试验,回顾了其中的相控阵天气雷达组网方案设计及其观测试验,得出以下结论:

(1)小波长雷达具有覆盖低空域、精细解剖垂直结构、高时间分辨率探测等优势,可以补充现有S波段业务雷达网。参考国际上通用做法,根据广州强对流天气系统的特点,利用X波段雷达敏感的双线偏振性能,选择具有双线偏振功能的X波段相控阵天气雷达进行组网观测。观测试验表明:高时空分辨率雷达资料对小尺度天气系统的确有明显优势;经数据质量初步评估,偏振量数据符合理论预期。

(2)统计近几年广州强对流天气的回波结构特征表明:影响广州的线状对流宽度最宽通常为35 km左右;回波强度最强为60~65 dBz,多数为50 dBz左右。四部相控阵天气雷达以35 km为边长的近似菱形布局,交叉区域覆盖广州中心城区,可以兼顾探测线状对流系统的强度变化,为城市冠层影响对流系统强度变化提供观测数据。经过近2年的观测试验,广州X波段双偏振相控阵雷达网,既能基本满足城市强对流天气的监测预警业务,又能为研究城市冠层对线状对流系统的强度变化提供数据基础。

(3)观测试验边工程建设边投入业务试运行,2年来的几次重大天气过程服务,相控阵天气雷达以其高分辨率探测,在监测本地生消的小尺度对流单体、线状对流系统的强度变化有明显优势,为预警信号发布等业务有很大帮助。另外,高时空分辨率观测资料,在城市重大活动气象保障服务中,也发挥了重要作用。

(4)本项目设计方案也存一些不足,有待逐步改进优化。APAR雷达采用的是单波束扫描模式,而非相控阵天气雷达普遍采取的多波束扫描模式。一是基于节省成本考虑,二是为了容易实现双偏振功能。但单波束扫描速度也必然低于多波束,从而导致其扫描速度受到一定限制。另外,珠三角地区是受台风影响严重的地区,台风降水对X波段雷达衰减严重,加之APAR雷达采用固态发射机,发射功

率和探测灵敏度较低,进一步限制了大片降水情况下雷达的探测能力。珠江三角洲发生的龙卷大多数出现在台风外围雨带上,由于严重衰减,使得X波段相控阵天气雷达探测台风龙卷的能力受到极大限制。所以APAR雷达难于在业务上“单兵作战”,除了组网观测,亟需加强与CINRAD/SA雷达资料开展融合应用。再者,APAR雷达高时空分辨率采集的海量观测资料,有待进一步研发灾害性天气智能识别预警产品,方便预报员日常业务应用。

参考文献

- 范皓,杨永胜,段英,等,2019.太行山东麓一次强对流冰雹云结构的观测分析[J].气象学报,77(5):823-834. Fan H, Yang Y S, Duan Y, et al, 2019. An observational analysis of the cloud structure of a severe convective hailstorm over the eastern foothill of Taihang Mountain[J]. Acta Meteor Sin, 77(5): 823-834 (in Chinese).
- 傅佩玲,胡东明,张羽,等,2018. 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[J].气象,44(4):500-510. Fu P L, Hu D M, Zhang Y, et al, 2018. Microphysical characteristics, initiation and maintenance of record heavy rainfall over Guangzhou Region on 7 May 2017[J]. Meteor Mon, 44(4): 500-510 (in Chinese).
- 公衍铎,郑永光,罗琪,2019. 冷涡底部一次弓状强飑线的演变和机理[J].气象,45(4):483-495. Gong Y D, Zheng Y G, Luo Q, 2019. Evolution and development mechanisms of an arc-shaped strong squall line occurring along the south side of a cold vortex[J]. Meteor Mon, 45(4): 483-495 (in Chinese).
- 郭英莲,孙继松,2019. 湖北三类组织形态强对流系统造成的地面强对流大风特征[J].大气科学,43(3):483-497. Guo Y L, Sun J S, 2019. Characteristics of strong convective wind events caused by three types of convective systems in Hubei Province[J]. Chin J Atmos Sci, 43(3): 483-497 (in Chinese).
- 侯淑梅,王秀明,尉英华,等,2018. 山东省初秋一次大范围强对流过程落区和抬升触发机制分析[J].气象,44(1):80-92. Hou S M, Wang X M, Wei Y H, et al, 2018. Analysis of an extensive severe convection falling area and lifting trigger mechanism in early autumn at Shandong Province[J]. Meteor Mon, 44(1): 80-92 (in Chinese).
- 李柏,古庆同,李瑞义,等,2013. 新一代天气雷达灾害性天气监测能力分析及未来发展[J].气象,39(3):265-280. Li B, Gu Q T, Li R Y, et al, 2013. Analyses on disastrous weather monitoring capability of CINRAD and future development[J]. Meteor Mon, 39(3): 265-280 (in Chinese).
- 马舒庆,陈洪滨,王国荣,等,2019. 阵列天气雷达设计与初步实现[J].应用气象学报,30(1):1-12. Ma S Q, Chen H B, Wang G R, et al, 2019. Design and initial implementation of array weather

- radar[J]. J Appl Meteor Sci, 30(1):1-12(in Chinese).
- 田付友, 郑永光, 张小玲, 等, 2018. 2017年5月7日广州极端强降水对流系统结构、触发和维持机制[J]. 气象, 44(4):469-484. Tian F Y, Zheng Y G, Zhang X L, et al, 2018. Structure, triggering and maintenance mechanism of convective systems during the Guangzhou extreme rainfall on 7 May 2017[J]. Meteor Mon, 44(4):469-484(in Chinese).
- 吴翀, 刘黎平, 汪旭东, 等, 2014. 相控阵雷达扫描方式对回波强度测量的影响[J]. 应用气象学报, 25(4):406-414. Wu C, Liu L P, Wang X D, et al, 2014. The measurement influence of reflectivity factor caused by scanning mode from phased array radar[J]. J Appl Meteor Sci, 25(4):406-414(in Chinese).
- 伍志方, 蔡景就, 林良勋, 等, 2018. 2017年广州“5·7”暖区特大暴雨的中尺度系统和可预报性[J]. 气象, 44(4):485-499. Wu Z F, Cai J J, Lin L X, et al, 2018. Analysis of mesoscale systems and predictability of the torrential rain process in Guangzhou on 7 May 2017[J]. Meteor Mon, 44(4):485-499(in Chinese).
- 徐鸣一, 李峰, 夏元彩, 等, 2017. 新一代天气雷达2009—2014年运行状态分析[J]. 气象, 43(3):365-372. Xu M Y, Li F, Xia Y C, et al, 2017. Analysis of CINRAD radar operation status during 2009-2014[J]. Meteor Mon, 43(3):365-372(in Chinese).
- 于明慧, 刘黎平, 吴翀, 等, 2019. 利用相控阵及双偏振雷达对2016年6月3日华南一次强对流过程的分析[J]. 气象, 45(3):330-344. Yu M H, Liu L P, Wu C, et al, 2019. Analysis of severe convective process in South China on 3 June 2016 using phased-array and dual-polarization radar[J]. Meteor Mon, 45(3):330-344(in Chinese).
- 张志强, 刘黎平, 2011. S波段相控阵天气雷达与新一代天气雷达探测云回波强度及结构误差的模拟分析[J]. 气象学报, 69(4):729-735. Zhang Z Q, Liu L P, 2011. A simulation and analysis of the observation errors of cloud intensity and structure with the S-band phased array radar and the CINRAD/SA[J]. Acta Meteor Sin, 69(4):729-735(in Chinese).
- 植江玲, 麦雪湖, 黄先香, 2017. 广东一次飑线大风的成因和预警分析[J]. 广东气象, 39(3):11-16. Zhi J L, Mai X H, Huang X X, 2017. Analysis of the causation and pre-warning of a squall in Guangdong[J]. Guangdong Meteor, 39(3):11-16(in Chinese).
- 朱丹, 谷军霞, 师春香, 等, 2018. 新一代天气雷达布网设计的有效覆盖和地形遮挡分析[J]. 气象, 44(11):1434-1444. Zhu D, Gu J X, Shi C X, et al, 2018. Analysis of effective coverage and terrain blockage for next generation radar network design[J]. Meteor Mon, 44(11):1434-1444(in Chinese).
- 朱文剑, 盛杰, 郑永光, 等, 2016. 1522号“彩虹”台风龙卷现场调查与中尺度特征分析[J]. 暴雨灾害, 35(5):403-414. Zhu W J, Sheng J, Zheng Y G, et al, 2016. Damage survey and mesoscale features analysis on tornado in outer rain-band of Typhoon “Mujigae” on 4 October 2015[J]. Torr Rain Dis, 35(5):403-414(in Chinese).
- Bluestein H B, French M M, Popstefanija I, et al, 2010. A mobile, phased-array Doppler radar for the study of severe convective storms[J]. Bull Amer Meteor Soc, 91(5):579-600.
- Chandrasekar V, McLaughlin D, Zink M, et al, 2010. The CASA IP1 test-bed after 5 years operation: accomplishments, breakthroughs, challenges and lessons learned[C] // Proceedings of the 6th European Conference on Radar in Meteorology and Hydrology: Adv. in Radar Technology. Sibiu: ERAD.
- Holleman I, Delobbe L, Zgonc A, 2008. Update on the European weather radar network[C] // Proceedings of the 5th European Conference on Radar in Meteorology and Hydrology. Helsinki, Finland.
- Mizutani F, Wada M, Ushio T, et al, 2011. Development of active phased array weather radar[C] // Proceedings of the 35th Conference on Radar Meteorology. Urban Room.
- Wada M, Yonekubo H, Ushio T, et al, 2016. Development of phased-array weather radar; field trial, dual-pol, and how it reduces disaster[C] // CIMO-TECO 2016.
- Weadon M, Heinselman P, Forsyth D, et al, 2009. Multifunction phased array radar[J]. Bull Amer Meteor Soc, 90(3):385-389.
- Weber M E, Cho J Y N, Herd J S, et al, 2007. The next-generation multimission U. S. surveillance radar network[J]. Bull Amer Meteor Soc, 88(11):1739-1752.