

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.

DOI: 10.11898/1001-7313.20190101

## 阵列天气雷达设计与初步实现

马舒庆<sup>1)\*</sup> 陈洪滨<sup>2)</sup> 王国荣<sup>2)</sup> 甄小琼<sup>2)3)4)</sup> 许晓平<sup>5)</sup> 李思腾<sup>6)</sup>

<sup>1)</sup>(中国气象局气象探测中心,北京 100081)

<sup>2)</sup>(中国科学院大气物理研究所,北京 100029)

<sup>3)</sup>(成都信息工程大学电子工程学院,成都 610225)

<sup>4)</sup>(中国科学院大学,北京 100049)

<sup>5)</sup>(湖南宜通华盛科技有限公司,长沙 410000)

<sup>6)</sup>(中国气象局北京城市研究所,北京 100089)

### 摘 要

阵列天气雷达是分布式、高度协同的相控阵天气雷达。阵列天气雷达至少包括 3 个相控阵收发子阵(简称收发子阵),通过增加收发子阵而扩大探测区域。每 3 个相邻的收发子阵一组协同扫描,保证 3 个相邻收发子阵在同一个空间点的数据时差小于 2 s,从而保证径向速度合成正确的流场。采用相控阵多波束扫描技术,4 个发射波束和 64 个接收波束覆盖  $0^{\circ}\sim 90^{\circ}$  仰角,机械扫描覆盖  $360^{\circ}$  方位,整个扫描时间为 12 s,为多普勒天气雷达整个扫描时间的 1/30。阵列天气雷达通过金属球进行了强度、波束宽度、方位、仰角的定标。阵列天气雷达在长沙机场布设试验,成功获取了精细的风场和回波强度数据,可为更精细、更完整揭示小尺度天气系统变化规律提供新工具。

**关键词:** 阵列天气雷达; 相控阵天气雷达; 风场; 网络化天气雷达; 回波强度

### 引 言

美国大气科学和气候专业委员会,美国地球科学、环境和资源委员会,美国国家研究委员会共同编写的《进入 21 世纪的大气科学》<sup>[1]</sup>明确提出了大气科学发展中面临的新挑战、新问题,其中一个问题是全面认识小尺度环流以及与其他尺度环流的相互作用,这种认识对大气科学发展和防御气象灾害能力的提高有极其重要意义。在大气科学发展趋势下,天气雷达也针对探测小尺度天气系统的需求不断发展。近 10 年来,X 波段天气雷达在国际上(以美国为代表)再次形成应用热点的主要形式是短程网络化探测。这里的短程指几十千米,雷达与雷达之间相距几十千米,与早期 X 波段天气雷达应用于 200~300 km 探测大不相同。几十千米正是 X 波段天

气雷达大多数降水天气条件下能够穿透的距离。2003 年美国开始了 CASA(collaborative adaptive sensing of the atmosphere)计划<sup>[2]</sup>,提出了网络化天气雷达概念,利用多部 X 波段小功率短程天气雷达组成网络化雷达系统,通过分布式协同自适应探测(distributed collaborative adaptive sensing,DCAS)模式<sup>[3]</sup>,实现对关注区域进行高时空分辨率的探测,弥补现有长程雷达的探测盲区。位于美国俄克拉荷马州的西南部的网络化雷达,主要研究低空风灾及相关灾害性天气的探测。4 部雷达分布在近似菱形的顶点,雷达间相距约 25 km。2007 年 IP2(Integrative Projects 2)安装在美国德克萨斯州的休斯敦,主要目的是改进城市洪水的监测和预报。2010 年 1 月 IP3(Integrative Projects 3)成功安装在波多黎各,研究复杂地形下的热带降水和由此引发的山洪和山体滑坡。IP4(Integrative Projects 4)主要研究

2018-09-07 收到,2018-12-12 收到再改稿。

资助项目:国家自然科学基金国家重大科研仪器研制(部委推荐)项目(31727901)

\* 邮箱: msqaoc@cma.gov.cn

无降水大气中的风场测量,以改进关于对流发源地和污染物输送的预报。IP5(Integrative Projects 5)是IP1的升级试验平台,综合采用CASA工程中发展的技术。经过不断试验和改进,CASA网络化雷达通过DCAS模式实现了对关注区域进行高时空分辨率的探测<sup>[4]</sup>。

2013年由中国科学院大气物理研究所与南京恩瑞特公司合作、中国气象局气象探测中心与中国气象科学研究院参与筹建了国内第1部网络化雷达。网络化雷达由4部X波段雷达组成,其中两部是具有双线偏振功能的全固态雷达,另外两部为磁控管雷达。4部网络化雷达架设在南京古平岗、句容、禄口和仪征,组成菱形分布,雷达间距离约为40 km。2013年6月架设完成,2013年6—10月、2014年5—10月进行了探测试验<sup>[5]</sup>。

国内外的网络化雷达、美国的多普勒天气雷达网和中国气象局布设的多普勒天气雷达网三者的最大区别在于后者每部雷达独自探测,前者每部雷达协同探测,即网络化雷达系统中的每部雷达是根据网络化雷达系统规划的统一探测目标和探测策略进行扫描探测。网络化雷达系统应用研究表明:网络化雷达可提高中小尺度危险天气预报的准确性,延长预报预警时间<sup>[6-10]</sup>。从技术和经济等方面证明了网络化雷达的可行性,并且为S/C波段雷达网络提供有益补充。但由于上述网络化雷达扫描速度慢,几部雷达完成协同探测区需要1~2 min,协同探测的雷达相同空间的探测数据时间差即1~2 min,对变化速度快的小尺度天气系统来说,无论是强度数据融合和速度数据合成均存在较大误差,甚至使强度数据融合和速度数据合成失效。2002年美国强风暴实验室(NSSL)联合多家单位将宙斯盾战斗系统上的相控阵雷达改装成一个相控阵天气雷达(NWRT),并进行了外场探测试验,这是天气雷达历史上的第1部具有相控阵天线的快速扫描雷达<sup>[11]</sup>,随着NWRT场外试验展现出的精细化探测结果,相控阵技术逐渐走入天气雷达领域。中国气象科学研究院与中国电子科技集团公司第14所、第38所也研制了X波段相控阵天气雷达。由于相控阵天线高昂的价格,科研人员从提高性价比的角度,开始研发X波段、一维相扫(垂直方向为电扫描,水平方向为机械扫描)的相控阵天气雷达。日本大坂

大学联合东芝公司研制了X波段的相控阵天气雷达(PAWR),安装在大阪大学吹田校区,并于2012年7月开始进行场外试验,该雷达可以在1 min内对积雨云进行探测,通过该雷达的探测数据,证明了雷电活动和风暴结构之间的关系<sup>[12]</sup>。为了发挥更大的作用,2016年该X波段PAWR还与安放在大阪机场的C波段多普勒天气雷达进行联合探测,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<sup>[13]</sup>。此外,该雷达与其他传统雷达的联合探测还可以重现气旋增长过程中的内部结构以及水平风切变现象<sup>[14]</sup>。为了研究雷暴起电和风暴动力学之间的关系,2017年日本气象研究所等机构的研究人员综合研究了三维闪电定位网(Broadband Observation Network for Lightning and Thunderstorm, BOLT)数据、两部相距54 km的X波段PAWR数据和一部C波段多普勒天气雷达数据<sup>[15]</sup>。这也是在相控阵天气雷达历史上第1次采用两部短程X波段相控阵雷达联合观测。该联合探测方案中,两部PAWR每隔30 s记录1次三维降水结构,覆盖距离大约60 km。加入PAWR的联合探测方案,克服了传统网络化雷达扫描速度慢、协同探测具有时间差的缺点,解决了机械扫描雷达构成网络化雷达存在的问题。这代表了网络化雷达的新发展,也是天气雷达精细化探测的发展方向。

2015年中国气象局气象探测中心设计了X波段阵列天气雷达,并与有关厂家合作,在2017年研制出了第1套阵列天气雷达。阵列天气雷达是用相控阵收发子阵构成的网络化天气雷达,也可以说是分布式相控阵天气雷达。与日本大坂大学的相控阵构成的网络化天气雷达相同之处是采用了相控阵技术,不同点是阵列天气雷达必需3个相控阵收发子阵为一组完成协同探测。

## 1 阵列天气雷达结构

最初的天气雷达只能探测回波强度。多普勒天气雷达的出现,实现了强度探测为主、辅之不完整的速度信息(径向速度)的探测方式。阵列天气雷达可完整探测降水粒子运动,将速度探测与强度探测结合,从而为更精细、更完整揭示小尺度天气系统变化

规律提供新工具。

阵列天气雷达由控制数据处理中心和 3 个以上相控阵接收发射子阵(简称收发子阵)构成。图 1 为

包括多个收发子阵的阵列天气雷达结构示意图,称其为阵列天气雷达是因为其由多个收发子阵按照设定的规则分布和扫描。

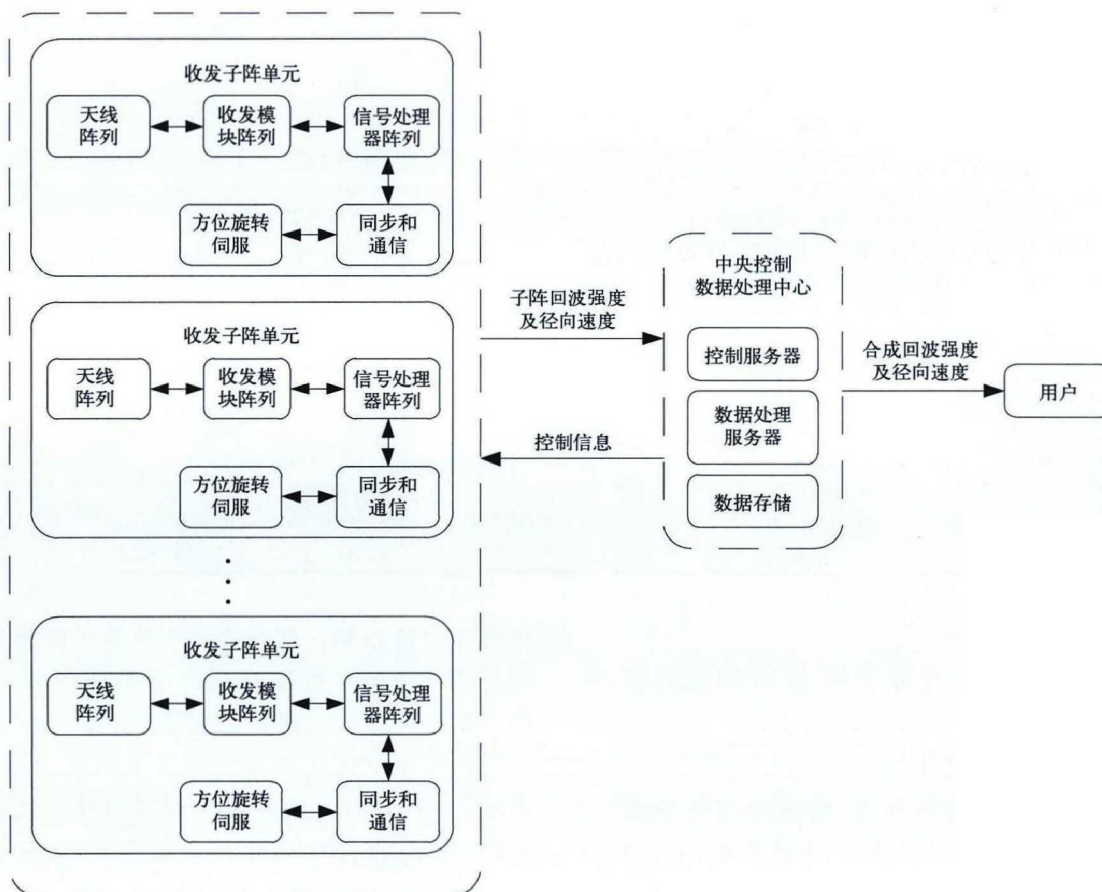


图 1 阵列天气雷达总体结构

Fig. 1 The structure of an array weather radar(AWR)

收发子阵是阵列天气雷达的前端,之所以称之为收发子阵,而不是相控阵雷达,是因为收发子阵没有独自的控制和数据处理部分,不是完整的雷达。收发子阵采用相控阵技术,由天线阵列、收发(TR)模块阵列、信号处理器阵列、方位旋转伺服、同步和通信模块等部分组成。收发子阵通过 64 个发射通道发射电磁波,在空中合成定向波束,64 个接收通道接收云雨粒子散射回来的电磁波信息,并经过放大、下变频、模数转换(ADC)、数字下变频、数字波束形成、脉冲压缩和谱分析得到云雨粒子的回波强度、多普勒径向速度、径向速度谱宽,将这些信息通过通信网络传输到控制与数据处理中心。收发子阵按三角形布局,即相邻 3 个收发子阵构成三角形。

控制与数据处理中心主要由控制服务器、数据

处理服务器和数据存储服务器等部分组成。控制服务器控制收发子阵同步探测,将收发子阵按相邻 3 个一组编组,按顺序进行扫描;控制服务器另一功能是监测收发子阵的运行状态。数据处理服务器将收发子阵传来的径向速度数据合成速度矢量场  $V(x, y, z)$ , 将 3 组强度数据融合为一个回波强度场  $Z(x, y, z)$ , 形成高时空分辨目标物(云、雨体)三维流场和强度格点场。数据存储服务器存储、分发数据。

通信在阵列天气雷达中起着至关重要的作用,它是实现同步探测和数据传输的重要一环。收发子阵与控制与数据处理中心之间数据传输有两种链路:一种是无无线信道,如 4G 信道;另一种是有线信道,如宽带。

阵列天气雷达主要技术指标见表 1。

表 1 阵列天气雷达主要技术指标  
Table 1 Main technical indicators of AWR

名称	主要技术指标
技术体制	全固态、全相参、一维相控阵、多普勒
工作频段	X 波段
收发子阵间距	20~60 km
距离分辨率	50 m
方位分辨率	1.6°
俯仰分辨率	1.6°
强度	15~70 dBZ
速度	-32~32 m·s <sup>-1</sup>
谱宽	0~16 m·s <sup>-1</sup>
天线扫描方式及范围(方位)	0°~360°(机械扫描)
天线扫描方式及范围(俯仰)	0°~90°(电扫描)
强回波模式三维子区探测时间	2 s (方位 60°,俯仰 90°)
普通模式三维子区探测时间	12 s (方位 360°,俯仰 90°)
天线口径	1.2 m×1.2 m
发射峰值功率	不小于 320 W
脉冲宽度	4,20 μs
噪声系数	3 dB
电源	单相,交流电 220 V/50 Hz
连续工作	可 24 h 连续工作
环境要求(温度)	工作: -25~+50℃;贮存: -40~+60℃
质量	300 kg

2 阵列天气雷达的收发子阵布局 and 探测区

阵列天气雷达的基本布局方式为三角形布局，收发子阵设置在三角形的顶点，最典型的是等边三角形布局，阵列天气雷达收发子阵最基本布局为 3

个收发子阵布局。图 2 为 3 个收发子阵布局及探测示意图。由图 2 可以看到，3 个收发子阵构成的中间三角形区域为三维精细探测区(图 2a)，在这个区域里的每个空间点都有 3 组强度数据  $Z_1(x,y,z)$ ,  $Z_2(x,y,z)$ ,  $Z_3(x,y,z)$  和 3 组径向速度数据  $V_1(x,y,z)$ ,  $V_2(x,y,z)$ ,  $V_3(x,y,z)$ 。当 3 个收发子阵进行

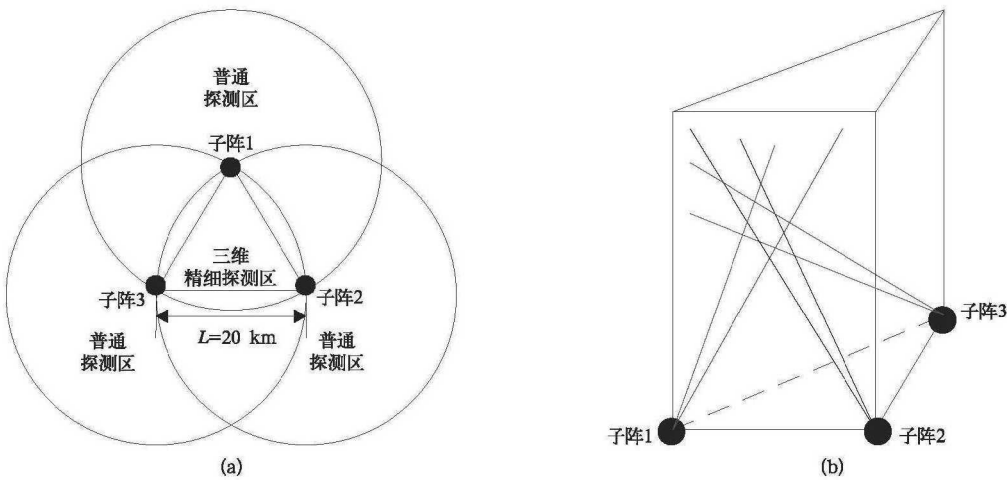


图 2 三收发子阵阵列天气雷达布局及探测示意图  
(a)布局及探测范围,(b)三维精细探测空间

Fig. 2 Deployment diagram and spatial detection schematic diagram of AWR consisting of three transmit-receive subarrays  
(a)deployment and detection range,  
(b)three-dimensional fine spatial detection

360°方位扫描时,三角形外的圆形区域内也有探测数据,这些区域称之为普通探测区。由于每个收发子阵是方位 360°扫描、俯仰 0°~90°扫描,因此,三维探测区和普通探测区均被立体扫描,三维探测区是以 3 个收发子阵构成的三角形为截面的三角形柱体(图 2b)。

3 个收发子阵是阵列天气雷达最基本的构成(图 2a),收发子阵间隔为 20 km,因此,要覆盖更大

的区域,如北京市需要更多的收发子阵按三角形布局。图 3 给出了覆盖北京市的阵列天气雷达收发子阵布设示意图。图 3 中每个三角形的顶点设 1 个收发子阵,总共布设 14 个收发子阵,相邻收发子阵间隔 20 km,三维探测区面积约为 3518.23 km<sup>2</sup>,可以实现对北京市六环内区域的全空域三维精细化探测。

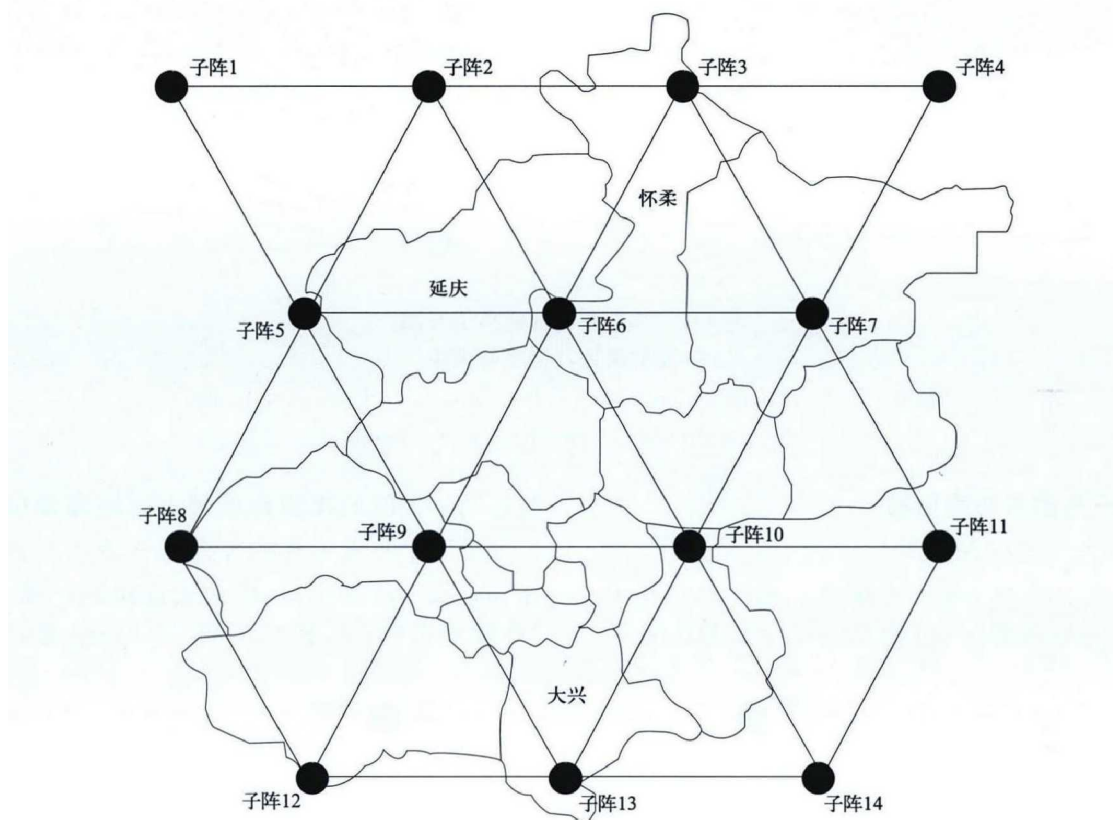


图 3 北京市阵列天气雷达布设示意图

Fig. 3 AWR deployment schematic diagram in Beijing

### 3 阵列天气雷达探测扫描方式

#### 3.1 收发子阵波束形成和扫描方式

阵列天气雷达收发子阵采用一维相控阵扫描技术,即垂直方向采用电扫描,水平方向采用机械扫描。水平方向波束是通过微带天线自身的微带网络而形成。垂直方向波束形成采用数字波束形成技术,相对模拟波束形成技术其优点包括:无一般微波电路的调整要求,特性具有内在重复性;系统测试简便;具有再组合和可编程能力。垂直方向波束通过 64 个发射和 64 个接收通道幅度、相位设置而完成,

改变 64 个发射通道及接收通道的幅度和相位即改变了波束的形状和指向。垂直方向最多可同时形成 16 个波束,即同时探测 16 个方向。

利用数字波束形成技术的再组合和可编程能力,阵列天气雷达的收发子阵扫描工作模式主要有两种:三维探测模式和一般探测模式。三维探测模式垂直方向采用 64 个波束覆盖 0°~90°,分 4 次扫描完成,依次覆盖 0°~22.5°,22.5°~45°,45°~67.5°,67.5°~90°。每次发射一个宽度为 22.5°的波束,接收回波信号后,通过数字波束形成得到 16 个平均波束宽度为 1.6°的波束(图 4)。水平方向采用机械扫描方式,天线旋转速度 30°·s<sup>-1</sup>,完成 60°

方位扫描,需要 2 s,即完成一个三维探测子区只需 2 s。因此,只要控制 3 个子阵同时进入三维精细探测区(三角形),在三维探测区 3 个子阵的探测数据时差小于 2 s,从而保证速度合成的有效性。当然,3 个子阵扫描波束空间不能重合还会带来速度合成误差,但这种误差比数据时差带来的误差小很多。

一般探测模式下,一个波束发射,一个波束接收,波束宽度  $1.6^\circ$ (垂直、水平),垂直方向可设置多仰角(如 14 个)。水平方向采用机械扫描方式,天线旋转速度  $10^\circ \cdot \text{s}^{-1}$ 。该方式类似现有天气雷达扫描方式,探测距离可扩展至 150 km,用于搜索和预警。

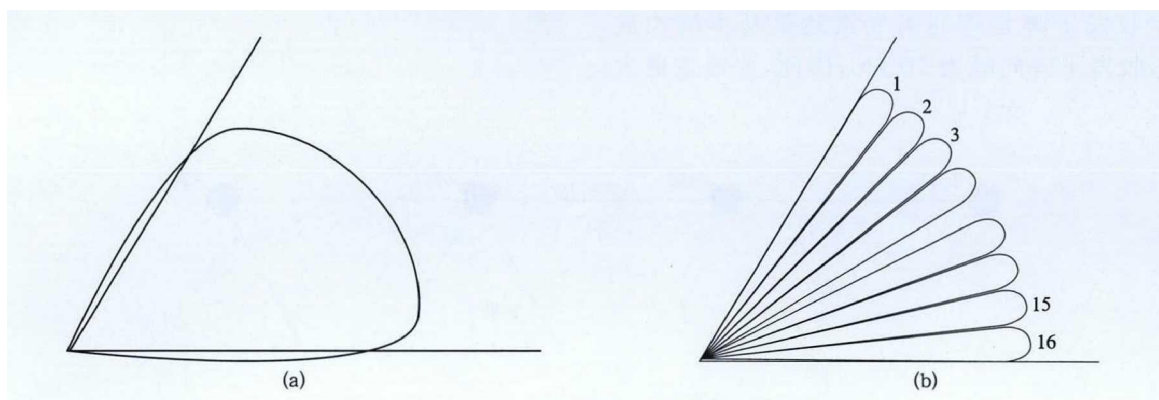


图 4 三维探测模式波束示意图

(a) 发射波束, (b) 接收波束

Fig. 4 Beam schematic diagram of a three-dimensional detection mode

(a) transmitting beam, (b) receiving beam

### 3.2 阵列天气雷达协同扫描

在阵列天气雷达控制与数据处理中心协同下,每 3 个相邻收发子阵为 1 组同步探测。这 3 个收发子阵同时进入三维探测区,也就是说 3 个相邻收发子

阵在同一空间的探测数据最大时间偏差仅 2 s。对于多于 3 个收发子阵的阵列天气雷达来说,每 3 个相邻收发子阵为 1 组,依次完成协同扫描。图 5 是 7 个收发子阵(A, B, C, D, E, F, G)组成 6 个三维探

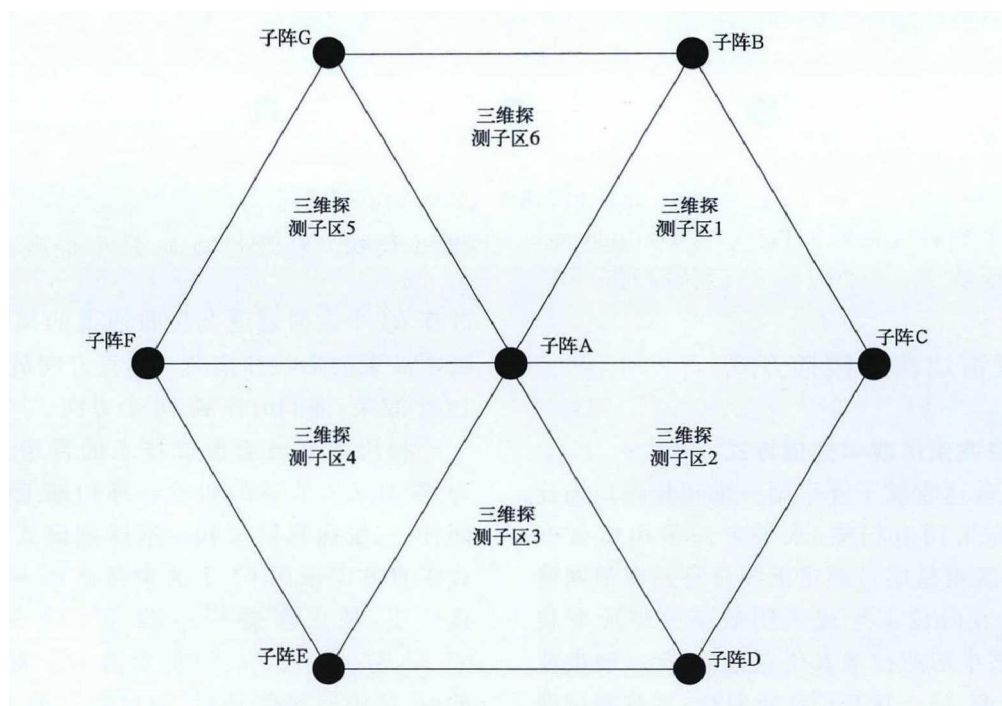


图 5 6 个三维探测子区的扫描顺序示意图

Fig. 5 Scan sequence diagram of six three-dimensional detection subzones



测区的阵列天气雷达扫描顺序示意图,图5中的数字是探测扫描三维探测区的顺序,字母表示收发子阵。首先是A,B,C 3个收发子阵开始同步扫描其构成的三维探测区,每个收发子阵水平扫描 $60^\circ$ 范围,俯仰扫描 $0^\circ\sim 90^\circ$ 范围,A,C,D 3个收发子阵开始同步扫描其构成的三维探测区,经过6次协同扫描,可完成整个六边形区域的三维探测扫描。表2给出了收发子阵分组扫描顺序。

完成一个三维探测区的时间为2 s,12 s可以完

成6个三维探测区域的扫描。一个非常重要的特性是在所有三维探测区中,相邻3个收发子阵在同一空间点的探测数据时差最大仅2 s。是现有3部天气雷达组网进行三维探测的探测数据时差的1/30,从而保证了径向速度合成速度的有效性。

表2给出了6个、10个、14个三维探测区的收发子阵协同扫描的顺序。从表2可以看到,不管多少个三维探测区,整个三维探测区仅需6次协同扫描就能完成,即12 s就能完成整个三维探测区扫描。

表2 分组同步扫描顺序

Table 2 Group synchronous scanning sequence

6个三维探测子区 分组同步扫描收发子阵	10个三维探测子区 分组同步扫描收发子阵	14个三维探测子区 分组同步扫描收发子阵
A,B,C	A,B,C;F,J,G	A,B,C;F,J,G;E,D,K
A,C,D	A,C,D;F,E,II	A,C,D;F,E,II
A,D,E	A,D,E;F,II,I	A,D,E;F,II,I
A,E,F	A,E,F	A,E,F;II,L,M
A,F,G	A,F,G	A,F,G;E,L,II
A,G,B	A,G,B;F,I,J	A,G,B;F,I,J;E,K,L

#### 4 阵列天气雷达收发子阵定标

阵列天气雷达收发子阵有64个天线振子、64个发射通道、64个接收通道,回波强度定标是定量探测的关键所在。收发子阵的波束方向性也由各通道的幅度和相位决定。因此,收发子阵的定标是阵列天气雷达最为重要的环节之一。由传统雷达方程<sup>[16]</sup>引出如式(1)给出的阵列天气雷达方程,

$$Z = \frac{1024 \ln 2 \cdot \lambda^2 R^2 P_r}{\pi^3 P_t h G_t G_r \theta \varphi K^2}, \quad (1)$$

表达雷达性能的参数包括回波强度 $Z$ 、发射波长 $\lambda$ 、雷达到目标物距离 $R$ 、接收功率 $P_r$ 、发射峰值功率 $P_t$ 、天线发射增益 $G_t$ 、天线接收增益 $G_r$ 、水平波束宽度 $\varphi$ 、垂直波束宽度 $\theta$ 、有效照射体深度 $h=0.5 \times c\tau$ ( $c$ 为光速, $\tau$ 为脉冲宽度)及常数 $K$ 。所谓雷达系统定标就是测定或确定这些参数,主要包括3方面工作:通过金属球直接测量 $\varphi$ 和 $\theta$ ,通过金属球回波数据计算定标常数 $C$ ,通过仪表测定 $\lambda$ 和 $h(\tau)$ 。

##### 4.1 金属球回波数据获取

所用的金属球直径为20 cm或40 cm。采用微型旋翼机(需根据金属球离雷达的距离计算旋翼机离金属球的距离)、气球或风筝携带升空。金属球升空到一定高度后,阵列天气雷达收发子阵开始进行 $0^\circ\sim 90^\circ$ 俯仰电扫描和 $0^\circ\sim 360^\circ$ 方位机械扫描,获取

俯仰 $0^\circ\sim 90^\circ$ , $360^\circ$ 方位体扫数据。根据金属球的GPS位置数据,从体扫数据中得到金属球的回波数据集。

##### 4.2 计算定标常数 $C$

对于X波段而言,电磁波处在光学反射区。由传统雷达方程<sup>[16]</sup>引出如金属球的雷达方程,如式(2)所示:

$$P_r = \frac{G_r G_t P_t \lambda^2 \sigma}{R^4 (4\pi)^3}. \quad (2)$$

式(2)中, $G_r$ 为天线接收增益, $G_t$ 为天线发射增益, $P_t$ 为发射峰值功率, $\lambda$ 为发射波长, $P_r$ 为接收功率, $\sigma$ 为金属球雷达散射截面, $R$ 为金属球到雷达的距离。令

$$P_r = PC_1 + C_2, \quad (3)$$

式(2)中, $P_r$ 为收发子阵信号处理器输出的接收功率, $C_1$ 和 $C_2$ 为过渡常数,将式(3)带入式(2),

$$PC_1 + C_2 = \frac{G_r G_t P_t \lambda^2 \sigma}{R^4 (4\pi)^3}, \quad (4)$$

则

$$P + C_2/C_1 = \frac{G_r G_t P_t \lambda^2 \sigma}{R^4 (4\pi)^3 C_1}. \quad (5)$$

由式(5)整理,得

$$\frac{G_r G_t P_t}{C_1} = \frac{R^4 (4\pi)^3 (P + C_2/C_1)}{\lambda^2 \sigma}, \quad (6)$$

由式(4)和探测不同距离的金属球,也可以推导

出

$$C_2/C_1 = \frac{P_1 - P_2 R_2^4/R_1^4}{R_2^4/R_1^4 - 1}. \quad (7)$$

$P_1, P_2$  是金属球分别在  $R_1$  和  $R_2$  收发子阵信号处理器输出的接收信号值,  $R_1, R_2$  是金属球与收发子阵的距离, 令

$$C = \frac{G_r G_t P_t}{C_1} = \frac{R^4 (4\pi)^3 (P + C_2/C_1)}{\lambda^2 \sigma}, \quad (8)$$

$$CC_1 = G_r G_t P_t. \quad (9)$$

将式(3)和式(9)代入式(1), 得

$$Z = \frac{1024 \ln 2 \cdot \lambda^2 R^2 (PC_1 + C_2)}{\pi^3 h \theta \varphi K^2 CC_1}$$

$$= \frac{1024 \ln 2 \cdot \lambda^2 R^4 (P + \frac{C_2}{C_1})}{\pi^3 h \theta \varphi K^2 C}, \quad (10)$$

将通过金属球得到的  $C, C_2/C_1, \lambda, \varphi, \theta, h$  的具体数值代入式(10), 从而完成回波强度定标。

## 5 长沙机场布设的阵列天气雷达探测数据

2018 年 3 月 31 日湖南宜通华盛技术有限公司在长沙机场布设了包括 3 个收发子阵的阵列天气雷达(布局如图 6 所示)。相应收发子阵间距约 20 km, 机场跑道在 3 个子阵的中间。20 km 正是 X 波段天气雷达大多数降水天气条件下能够穿透的距离。图 7 为子阵 1 架设在铁塔上的照片。

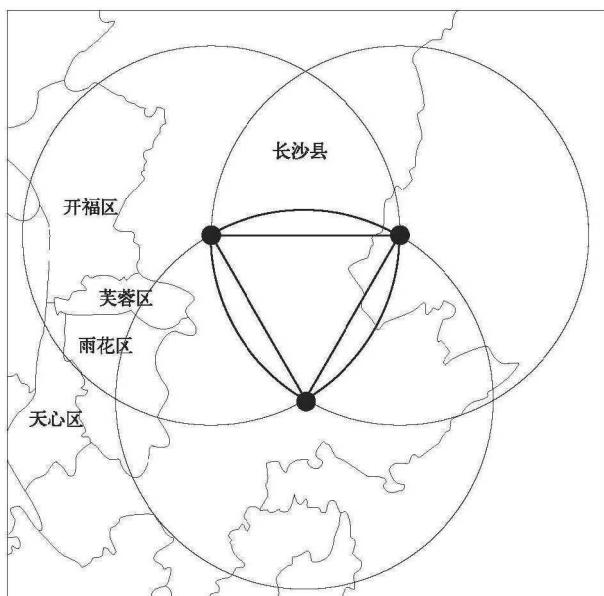


图 6 长沙机场阵列天气雷达布局

Fig. 6 AWR deployment diagram at Changsha Airport



图 7 架设在长沙机场铁塔上的子阵 1

Fig. 7 No. 1 subarray on the top of an iron tower at Changsha Airport

布设完成后, 阵列天气雷达开始协同探测。2018 年 4 月 22 日阵列天气雷达探测到降水过程, 由 3 个子阵的探测的径向速度,  $V_1, V_2, V_3$  合成得到速度  $V$ ,

$$V = V_1 + V_2 + V_3. \quad (11)$$

图 8 是 2018 年 4 月 22 日 15:22(北京时, 下同) 1000 m 至 4000 m 高度风场。由图 8 可以看到, 1000 m 到 2000 m 高度为偏南风, 3000 m 和 4000 m 高度为偏西风。此外, 图 8 还给出了以上 4 个高度的降水回波强度。

图 9 为 2018 年 5 月 20 日 18:20 阵列天气雷达子阵 2 仰角为  $21^\circ$  探测到的降水回波强度。该降水过程与长沙 SA 波段多普勒天气雷达探测的  $1.5^\circ$  仰角降水回波对比后可知, 阵列天气雷子阵 2 与多普勒天气雷达探测的降水回波分布和最大值(图略)基本一致, 但子阵 2 外侧回波强度小于多普勒天气雷达回波强度; 子阵 2 在该探测过程中处于强天气探测模式, 最小回波强度大于多普勒天气雷达最小回波强度。



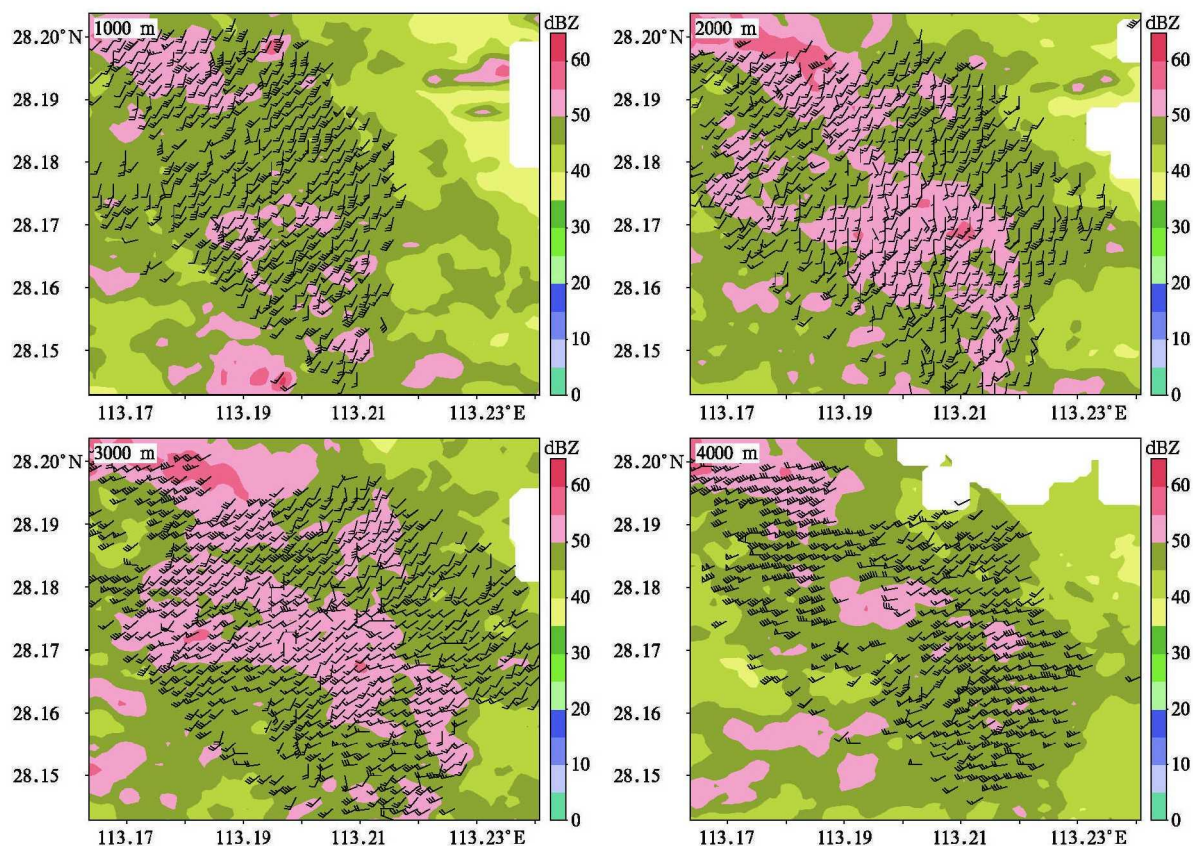


图8 2018年4月22日15:22长沙机场阵列天气雷达探测并计算出不同高度风场(风羽)及降水回波强度(填色)

Fig. 8 Calculated wind field(the barb) and intensity of precipitation echo data(the shaded) acquired by the AWR deployed at Changsha Airport from 1000 m to 4000 m height at 1522 BT 22 Apr 2018

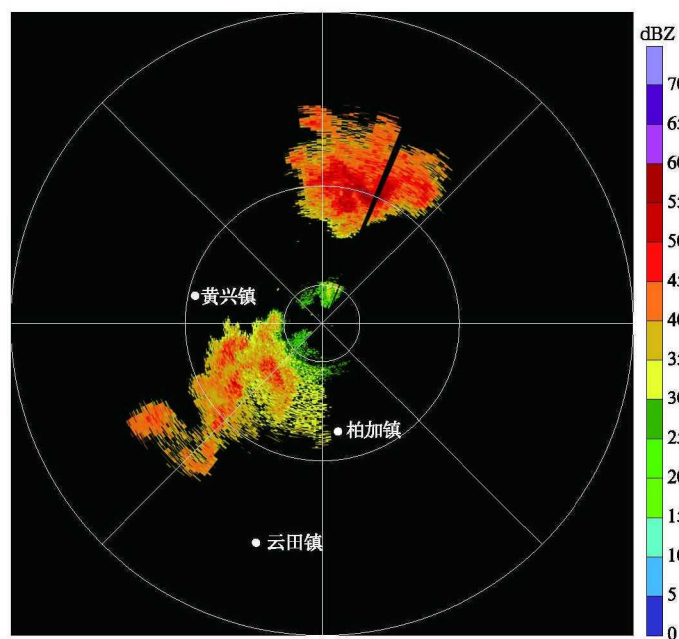


图9 2018年5月20日18:20长沙机场阵列天气雷达子阵2在21°仰角探测的降水回波强度  
(由中心到外层距离圈分别为3 km, 10 km和20.28 km)

Fig. 9 Intensity data acquired by the 2nd subarray of the AWR with 21° elevation deployed at Changsha Airport during a rain process at 1820 BT 20 May 2018  
(distance ranges from the center to outer circles are 3 km, 10 km and 20.28 km, respectively)

## 6 小 结

阵列天气雷达是针对小尺度天气系统精细化探测需求,在国内外网络化和相控阵技术<sup>[17-19]</sup>发展的大技术背景下设计研制的。阵列天气雷达主要解决的是云雨目标三维速度场探测和俯仰角 $0^{\circ}\sim 90^{\circ}$ 全覆盖探测。多普勒天气雷达能够获得云雨目标的径向速度<sup>[20]</sup>,但空间一点的单个径向速度无法完整反映云雨粒子及大气的运动,阵列雷达的出现是天气雷达从获取云雨目标的热力学信息到同时获取动力学信息的迈进。多雷达组网探测能够获得多个径向速度,但多雷达探测同一空间点径向速度的时间差过大,造成对于快速变化的小尺度强对流天气系统<sup>[21-23]</sup>,速度合成误差大或无效<sup>[24]</sup>。正是由于中国气象局布网的多普勒天气雷达以及现在新发展起来的网络化雷达在探测中小尺度强对流天气系统时存在的诸多问题,中国气象局气象探测中心开展了阵列天气雷达的研发工作,得到以下初步成果:

1) 阵列天气雷达采用分布式相控阵技术体制,通过每3个相邻收发子阵一组协同扫描,使每个空间点都有3个径向速度,并且每个空间点3个径向速度值的时差小于2 s,保证径向速度能够正确合成速度。

2) 阵列天气雷达的收发子阵采用先进的数字波束形成技术,可以同时形成16个波束探测16个方向。 $0^{\circ}\sim 90^{\circ}$ 俯仰范围分为4次探测,每次探测16个方向,即完成 $0^{\circ}\sim 90^{\circ}$ 俯仰角范围全覆盖探测的时间约48 ms。完成 $0^{\circ}\sim 90^{\circ}$ 俯仰角, $360^{\circ}$ 方位角范围全覆盖探测的时间仅需12 s。

3) 阵列天气雷达收发子阵有64个发射通道和64个接收通道,已采用金属球对收发子阵进行出厂定标和现场定标,从而保证了回波强度计算的准确性。

具有3个收发子阵的阵列天气雷达已经安装在民航长沙机场,并获取三维速度场和回波强度数据,由这些数据可以得到一些小尺度天气系统的较为精细的信息。但阵列天气雷达技术发展和应用还存在很多需要探索的问题,需要不断努力。

## 参 考 文 献

[1] Rycroft M. The atmospheric sciences entering the twenty-first

- century; National research council. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 2000, 62(2): 152-153.
- [2] Junyent F, Chandrasekar V, McLaughlin D, et al. The CASA integrated project 1 networked radar system. *J Atmos Oceanic Technol*, 2010, 27(1): 61-78.
- [3] McLaughlin D J, Chandrasekar V K, Droegemeier K, et al. Distributed Collaborative Adaptive Sensing (DCAS) for Improved Detection, Understanding, and Prediction of Atmospheric Hazards. Ninth Symposium on Integrated Observing and Assimilation Systems for the Atmosphere, Oceans, and Land Surface. American Meteorological Society, 2005.
- [4] Philips B, Pepyne D, Westbrook D, et al. Integrating end user needs into system design and operation; The center for collaborative adaptive sensing of the atmosphere (CASA). *Chemistry & Biodiversity*, 2007, 1(11): 1829-1841.
- [5] 陈洪滨, 李兆明, 段树, 等. 天气雷达网络的进展. 遥感技术与应用, 2012, 27(4): 4487-495.
- [6] Nitin B, Chandrasekar V, Junyent F. Signal processing system for the CASA integrated project I radars. *J Atmos Oceanic Technol*, 2010, 27(9): 1440-1460.
- [7] Brotzge J A, Zink M, Preston M, et al. CASA's First Test Bed; Integrated Project 1 (IP1). 32nd Conference on Radar Meteorology, American Meteorological Society, 2005.
- [8] Chandrasekar V, McLaughlin D, Brotzge J, et al. Distributed Collaborative Adaptive Radar Network: Preliminary Results from the CASA IP1 Testbed. IEEE Radar Conference, 2008.
- [9] Brotzge J, Droegemeier K, McLaughlin D. Collaborative adaptive sensing of the atmosphere (CASA): A new radar system for improving analysis and forecasting of surface weather conditions. *Transportation Research Record*, 2006, 1948: 145-151.
- [10] 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.
- [11] William E B, Torok G, Weber M, et al. Progress of Multifunction Phased Array Radar (MPAR) Program. 25th Conference on International Interactive Information and Processing Systems (IIPS) for Meteorology, Oceanography, and Hydrology, 2009.
- [12] Wu T, Takayanagi Y, Yoshida S, et al. Spatial relationship between lightning narrow bipolar events and parent thunderstorms as revealed by phased array radar. *Geophys Res Lett*, 2013, 40(3): 618-623.
- [13] Adachi T, Kusunoki K, Yoshida S, et al. High-speed volumetric observation of a wet microburst using X-Band phased array weather radar in Japan. *Mon Wea Rev*, 2016, 144(10): 3749-3765.
- [14] Adachi T, Kusunoki K, Yoshida S, et al. Rapid volumetric growth of mesocyclone and vault-like structure in horizontal shear observed by phased array weather radar. *Sola*, 2016, 12: 314-319.

- [15] Yoshida S, Adachi T, Kusunoki K, et al. Relationship between thunderstorm electrification and storm kinetics revealed by phased array weather radar. *J Geophys Res*, 2017, 122(7): 3821-3836.
- [16] 张培昌, 王振会. 大气微波遥感基础. 北京: 气象出版社, 1995.
- [17] 刘黎平, 吴翀, 汪旭东, 等. X波段一维扫描有源相控阵天气雷达测试定标方法. 应用气象学报, 2015, 26(2): 129-140.
- [18] 吴翀, 刘黎平, 汪旭东, 等. 相控阵雷达扫描方式对回波强度测量的影响. 应用气象学报, 2014, 25(4): 406-414.
- [19] 杨金红, 高玉春, 程明虎, 等. 相控阵天气雷达波束特性. 应用气象学报, 2009, 20(1): 119-123.
- [20] 郑永光, 周康辉, 盛杰, 等. 强对流天气监测预报预警技术进展. 应用气象学报, 2015, 26(6): 641-657.
- [21] 黄先香, 俞小鼎, 炎利军, 等. 广东两次台风龙卷的环境背景和雷达回波对比. 应用气象学报, 2018, 29(1): 70-83.
- [22] 陈元昭, 俞小鼎, 陈训来, 等. 2015年5月华南一次龙卷过程观测分析. 应用气象学报, 2016, 27(3): 334-341.
- [23] 毕宝贵, 代刊, 王毅, 等. 定量降水预报技术进展. 应用气象学报, 2016, 27(5): 534-549.
- [24] 杨洪平, 张沛源, 程明虎, 等. 多普勒天气雷达组网拼图有效数据区域分析. 应用气象学报, 2009, 20(1): 47-55.

## Design and Initial Implementation of Array Weather Radar

Ma Shuqing<sup>1)</sup> Chen Hongbin<sup>2)</sup> Wang Guorong<sup>2)</sup> Zhen Xiaoqiong<sup>2)3)4)</sup>

Xu Xiaoping<sup>5)</sup> Li Siteng<sup>6)</sup>

<sup>1)</sup> (Meteorological Observation Center of CMA, Beijing 100081)

<sup>2)</sup> (Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029)

<sup>3)</sup> (College of Electronic Engineering, Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610225)

<sup>4)</sup> (University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049)

<sup>5)</sup> (Eastone Washon Science and Technology Ltd, Changsha 410000)

<sup>6)</sup> (Institute of Urban Meteorology, CMA, Beijing 100089)

### Abstract

With the development of phased array technology and networked radars, focusing on the requirement of small-scale weather fine detection, the array weather radar (AWR) is developed, which is a distributed and highly collaborative radar. The traditional Doppler weather radar can obtain radial velocity of cloud or precipitation targets. However, single radial velocity of a spatial point cannot reflect the movement information of precipitation and atmosphere. A multi-radar network can obtain a plurality of radial velocity values using a collaborative detection method, but disadvantages are that the time difference of the same single spatial point obtained by multiple radars is high, leading to composition error of the velocity or invalid observation.

The AWR comprises at least three phased array transmit-receive subarrays (subarrays for short), and the detection region of the AWR can be enlarged by increasing the number of subarrays. The AWR employs a multi-beam phase array scanning technology, which has 4 transmission beams and 64 receiving beams covering an elevation angle between  $0^\circ$  and  $90^\circ$ . And meanwhile, a  $360^\circ$  azimuth is covered by mechanical scanning. One volume scanning time of the AWR is 12 s which are several tenths of the traditional Doppler weather radar. Each three adjacent subarrays work as a group, which performs collaborative scanning to ensure data time differences at the same spatial point from three adjacent subarrays are less than 2 s, and then correct flow fields can be synthesized by using radial velocity of the subarrays. This is a big progress in acquiring thermodynamic information and dynamic information of precipitation targets.

One AWR consisting of three subarrays has been deployed at Changsha Airport and has acquired three-dimensional velocity and intensity (reflectivity factor) data, and more fine information of small-scale weather systems may be obtained by using data. There are still a lot of problems to be solved and a lot of works to be done in the field of the AWR technology and application.

**Key words:** array weather radar (AWR); phased array weather radar; wind field; networked weather radar; reflectivity