

江苏北部龙卷雷达组网探测策略

刘俊^{1,2} 周红根^{3*} 刘新安⁴ 史朝⁵ 费启臻³

(1 江苏省泰州市气象局, 泰州 225300; 2 中国气象局交通气象重点开放实验室, 南京 210008;

3 江苏省气象探测中心, 南京 210008; 4 南京恩瑞特实业有限公司, 南京 211106;

5 成都信息工程大学, 成都 610225)

摘要 为了探测、分析和研究尺度小、生命史短、致灾重的龙卷等强对流天气三维精细化垂直结构及演变规律, 江苏正在龙卷易发区苏北平原建设高时空分辨率的双偏振雷达网。本文为支撑苏北龙卷雷达网建设, 从龙卷雷达组网的必要性出发, 重点分析苏北龙卷雷达组网策略。研究表明: ①苏北龙卷雷达网拟采用大天线、全固态、高性能技术指标的 X 波段双偏振雷达组网, 采用不同的观测模式, 可获得空间一致性好、时空分辨率高且丰富的探测数据, 满足龙卷等强对流天气的快速、精细化探测要求。此外, 采用较高的脉冲重复频率等扩展测速范围, 解决 X 波段雷达速度模糊问题。②经理论计算与比较, 苏北龙卷雷达网可采用正三角形组网拓扑结构, 取累计空间密度值 90%, 雷达间距为 60 km 时, 波束直径 b_0 特征值为 282.0 m, 最低波束高度 b_h 特征值为 52.6 m, 探测灵敏度 Z_{\min} 特征值为 2.7 dB; X 波段雷达组网与 S 波段业务雷达相比, 在 60 km 探测距离处, 其波束直径减小了约 2 倍, 0° 仰角盲区高度降低了约 1.5 倍, 探测灵敏度降低了 2.4 dB。即在方位分辨率、探测盲区、弱回波探测能力、数据空间一致性等方面均得到提升, 可提供更多低于 1 km、甚至百米的高时空分辨率的雷达资料, 便于捕捉龙卷等强对流天气。③苏北龙卷雷达网在盐都、阜宁、大丰、宝应、兴化(龙卷易发区), 各布设一部固定式 X 波段全固态双偏振多普勒天气雷达。综合考虑在苏北平原雷达选址的各种因素, 最终雷达网基本单元拟采用近似正三角形 ($N=3, L=45\sim 65$ km) 的拓扑结构。5 部高时空分辨率的龙卷探测雷达组成 3 个近似正三角形的单元, 镶嵌在 S 波段雷达业务网内(盐城、淮安、泰州雷达中间)。后续可进一步增加雷达数量及拓宽观测区域, 例如在高邮等龙卷易发地区, 可增补 X 波段天气雷达或 C 波段相控阵天气雷达。

关键词 龙卷; 雷达组网; 组网策略; X 波段双偏振雷达

中图分类号: P412.25 **DOI:** 10.19517/j.1671-6345.20200137 **文献标识码:** A

引言

江苏北部是中国龙卷的高发区^[1], 东邻黄海, 处长江以北, 淮河中下游, 境内江河湖泊水网密布, 纵横交错, 地域辽阔且地势低洼平坦, 具有季风气候特征^[2]。2016 年 6 月 23 日盐城阜宁发生历史罕见的龙卷事件, 龙卷级别高达 EF4 级, 并伴有短时强降水、雷暴、冰雹、强风等强对流天气发生, 造成当地 99 人死亡, 800 多人受伤, 直接经济损失 49 亿元^[3-6]。

气象雷达作为主动遥感设备是探测、预警和评估龙卷最有效的工具, 除了测量气象目标物的强度信息外, 还可以获取雷达径向速度信息, 在算法的支持下可识别出中小尺度的涡旋、辐合和辐散特征^[7-11]。Donaldson(1970 年)^[12]首次利用多普勒天气雷达探测到超级单体中的“龙卷气旋”, 也就是 1963 年由 Fujita^[13]提出, 现在广泛使用的中气旋(Mesocyclone)。Brown 等^[14](1978 年)利用位于美国 Oklahoma 州 Norman 城的国家强风暴实验室的多普勒天气雷达资料, 发现了一个可能伴随龙卷过

<http://www.qxkj.net.cn> 气象科技

国家重点研发计划(2018YFC1506100、2018YFC1506102)、江苏省气象局科研基金项目(KZ201905、KQ201914)和泰州市社会发展项目(TS201814)共同资助

作者简介: 刘俊, 男, 1988 年生, 硕士, 工程师, 主要从事大气遥感与雷达等技术保障工作, Email: liujun198802@126.com

收稿日期: 2020 年 4 月 17 日; 定稿日期: 2020 年 9 月 8 日

* 通信作者, Email: dpilyg@sina.com

程的比中气旋尺度更小的多普勒雷达径向速度场涡旋特征,它们被称为龙卷式涡旋特征(Tornadic Vortex Signature, TVS)。2009—2010年,在美国开展的第2次龙卷旋转起源试验^[15](Verification of the Origins of Rotation in Tornadoes Experiment, VORTEX)中,快速扫描车载多普勒雷达(Rapid-Scan Doppler on Wheels, RSDOW)观测揭示了龙卷内部三维精细结构,并指出龙卷中心存在弱回波洞(Weak Echo Hole, WEH)以及有些龙卷母体及勾状回波形态竟与热带气旋形态相似^[16](包含雨带和外螺旋雨带)。我国自1999年以来,新一代天气雷达(China Next Generation Radar, CINRDA)网的建设与业务运行行为龙卷强天气的监测和预警提供了有利支撑^[17-23]。俞小鼎^[24]、郑媛媛^[25]、吴芳芳^[26]、周后福^[27]等对发生在西风带系统下的龙卷进行个例分析,认为龙卷往往发生在中到强对流有效位能、抬升凝结高度较低和强垂直风切变环境中,雷达回波图上可探测到中气旋和龙卷涡旋特征TVS,中气旋的底高、风暴质心高度、最大反射率因子强度都低于强冰雹超级单体。郑媛媛^[28]等对台风前部龙卷(简称“台前龙卷”)展开系统的分析和研究,认为台前龙卷母体风暴为微超级单体,往往发生在对流有效位能较低、强低空(0~1 km)切变环境中,其CAPE强度低于西风带龙卷,但母体风暴特征与西风带龙卷对流风暴相似,雷达图上依然存在中气旋、TVS特征。刁秀广^[29]、徐学义^[30]等研究非超级单体龙卷风暴,发现雷达回波图上可探测到TVS,风暴单体的迅猛发展,特别是风暴顶的迅速增高,可对龙卷预警有一定指示作用。周海光^[6]利用双多普勒雷达反演技术对江苏阜宁一次强龙卷事件进行中尺度研究,证实了勾状回波区存在气旋-气旋对组成的涡度偶(Vertical Vorticity Couplet),也称涡旋偶(Vortex Couplet),并指出涡旋偶对龙卷形成、发展、触地具有重要作用。

遗憾的是,国内关于龙卷的观测、预报预警和研究都基于时空分辨率较低的业务雷达网,无法捕捉其精细的三维结构。而早在2006年,美国为弥补NEXRDA(Next Generation Weather Radar)低空探测不足和对大气运动信息探测的不完整,建立了CASA(Collaborative Adaptive Sensing of Atmosphere)系统^[31],利用多部X波段天气雷达组网进行协同自适应观测。国内,2013年国内首个由4部X

波段雷达构成网络化雷达^[32-34]和2018年阵列式天气雷达(X波段,3个子阵列)^[35]开展了组网技术与观测技术方面的科学探索。但依然尚缺一张高时空分辨率的且专为龙卷等小尺度强天气观测、预报预警和研究而设计的业务雷达网。2018年起,江苏省气象局按照中国气象局统一部署,结合《江苏省气象事业发展“十三五”规划》要求,在苏北平原地区建设江苏省国家级龙卷试验基地雷达网,旨在捕捉龙卷等小尺度天气系统精细化三维结构,服务苏北区域强天气预报预警业务与科学研究。本文从龙卷雷达组网的必要性出发,重点介绍苏北龙卷雷达组网策略,旨在支撑苏北龙卷雷达网建设工作。

1 龙卷雷达组网的必要性

雷达组网类似电信发射塔一样,用许多低功率发射塔替代大面积覆盖的高功率发射塔(创建多个基本单元,每个基本单元为覆盖服务区的一部分)增加用户容量。因此,选用探测距离近、发射功率低的小雷达(如X波段)组成密集且重叠区较小的雷达网来弥补远距离探测的高功率雷达系统(S波段)的探测盲区及不足。多部小雷达形成的密集雷达网布设在业务雷达网内,可通过自适应协同观测来优化气象目标物的探测和多部雷达同时测量,获取更高时空分辨率且空间一致性较好的数据产品。

与国外网络化雷达、美国多普勒天气雷达网不同,我国业务天气雷达网每部雷达固定模式扫描。远距离探测时,业务雷达(如S波段)由于笔形波束特性和地球曲率影响,随着探测距离增加,出现远距离方位分辨率、低空探测盲区增大,从而导致探测数据空间的不一致性(如波束直径(Beam Size, b_s)、最低波束高度(Minimum Beam Height, b_h)、探测灵敏度(Detection Sensitivity, Z_{min})。很多天气现象往往发生在近地层,尤其龙卷往往是伴随着超级单体风暴低层出现中气旋(1 km以下)才产生的^[25],因此业务雷达(如S波段)在远距离探测存在一定的局限性,亟需一张更密的龙卷雷达网提供更多低于1 km的快速、精细化资料,支撑龙卷等强对流天气监测、预报预警业务。

2 苏北龙卷雷达组网策略

2.1 苏北龙卷组网雷达性能指标

由图1可知,龙卷等强对流系统属于小尺度系

统,介于热对流和雷暴对流单体之间,空间尺度一般为 20 m~2 km(含热对流),生命史为 5 min~1 h。其母体风暴为 β 尺度对流系统、 γ 尺度雷暴对流单体,空间尺度为 2~200 km,生命史为 30 min 至 1 d。单部 S 波段业务雷达(如 CINRDA/SA),体扫时间约 6 min,空间分辨率为 1 km,在时间和空间上可满足龙卷母体风暴的探测。欲实现龙卷等小尺度天气系统内部结构快速化、精细化探测,低成本、窄波束、高时空分辨率、灵活快扫的 X 波段天气雷达组网探测可为一种很好的选择。

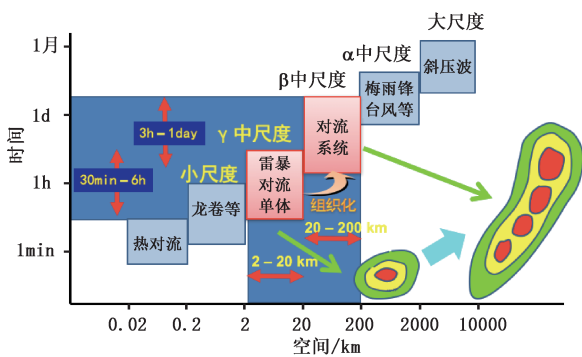


图 1 不同尺度天气的时空分辨率

表 1 为苏北龙卷组网 X 波段雷达和 S 波段业务雷达主要探测性能指标对比表。可知,X 波段雷达由于其体积小、技术较易实现以及采用大天线($D=4.5\text{ m}$)、全固态、脉冲压缩和双偏振技术,可实现

扫描方式灵活多变、窄脉冲宽度、高增益、窄波束、高时空分辨率、探测产品丰富(偏振参量)、稳定可靠等性能指标,均优于 S 波段;而探测范围成为其“不足”,与 S 波段业务雷达相比,约 2.5 倍差距。波束直径、最低波束高度、探测灵敏度三者是表征雷达数据产品空间一致性的重要指标,其值随探测距离增加而增大。对于远距离探测的 S 波段业务雷达而言,其数据产品的空间一致性也随着探测距离增加而变差,远距离探测优势却变成了劣势,而 X 波段雷达在该方面的“不足”变成了优势。因此苏北龙卷雷达网采用大天线、全固态、高性能指标的 X 波段双偏振雷达组网,既可实现远距离探测,又可获得空间一致性较好、时空分辨率高且丰富的数据产品,较大程度上满足龙卷(空间尺度(含热对流):20 m~2 km,时间尺度:5 min~1 h)等中小尺度系统的快速、精细探测需求。此外,X 波段雷达波长较短,测速范围相对 C 波段雷达和 S 波段雷达较窄。考虑到雷达实际测量是径向风速,同时为解决 X 波段雷达测速范围窄的问题,在雷达设计时,需兼顾探测距离不小于 50 km,可采用较高的脉冲重复频率,如采用 3000 Hz,5/4 双重复频率(PRF)进行测速范围的扩展,测速范围可达到 $\pm 96\text{ m/s}$,可满足龙卷测速范围的要求(根据增强藤田龙卷风分级,龙卷探测的最大风速需求为 90 m/s)。

表 1 苏北龙卷组网雷达(X 波段)与业务雷达(S 波段)主要性能指标对比表

	X 波段雷达(全固态、双偏振)性能指标	S 波段业务雷达性能指标
发射功率	$\geq 400\text{ W}$ (平均)	$\geq 650\text{ kW}$ (峰值)
天线增益/dB	≥ 49 (天线直径 4.5 m)	≥ 44 (天线直径 8.4 m)
波束宽度	$\leq 0.55^\circ$	$\leq 1.0^\circ$
脉冲宽度/ μs	0.5/1.0(窄),20/40/80(宽)	1.57(窄),4.7(宽)
最大探测距离/km	≤ 90	230
最大速度不模糊/ $(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	± 96 ($\leq 50\text{ km}$)	± 48
距离库长度/m	30,60	1000
探测时间	$\leq 60\text{ s}$ (16 层 60° 扇扫)、 $\leq 120\text{ s}$ (16 层体扫)	约 6 min(VCP21)
探测参量	Z、V、W、 Z_{DR} 、 Φ_{DP} 、 K_{DP} 、 ρ_{HV}	Z、V、W
扫描方式	VPPI、PPI、RHI、扇形、定点	VCP21(业务要求)
最小可测功率 P_{\min}/dBm	-111.5(水平)、-111.3(垂直)	-111.89

注:Z 为反射率因子、V 为径向速度、W 为谱宽、 Z_{DR} 为差分反射率、 Φ_{DP} 为差分相位、 K_{DP} 为差分相位率、 ρ_{HV} 为共偏(互)相关系数。

2.2 苏北龙卷雷达组网拓扑结构与性能

雷达网由一个个相同或近似相同的基本单元构成,其拓扑结构本质上由雷达网内基本单元决定。图 2 给出雷达网基本单元的几何模型,包含同型号雷达的数量 $N(N=3,4,6$ 时,雷达网基本单元则为等边三角形、正四边形、正六边形)、网距 L (两部雷达之间距离)、单部雷达最大探测距离 R_{\max} 、重叠率 M 、夹角 θ_s 等基本参数以及重叠率 M 的数学计算公式。由图 2 可知,雷达数量 N 表示构成 N 条边的规则多边形(雷达位于顶点),其决定了组网基本单元的几何形状,为基本单元的形状因子;十字交叉点 o 处,为 3 种几何模型外接圆的圆心点,该点到每部雷达的距离(R_{\max}/M)相等。中心点 o 到每部雷达的距离 R_{\max}/M 可称为组网基本单元的空间范围,重叠率 M 则是单部雷达最大探测范围和组网基本单元空间范围的比值。当重叠率 $M=1$ 时,表示组网基本单元空间范围等于组网雷达探测范围(单部雷达探测范围都能延伸到基本单元中心点 o);重叠率 $M<1$ 时,表示组网基本单元空间范围大于组网雷达探测范围,存在探测间隙;重叠率 $M>1$ 时,表示组网基本单元空间范围小于组网雷达探测范围(单部雷达探测范围超过基本单元中心点 o);当 M 取 ∞ 时,各部雷达都集中在基本单元中心点,出现过覆盖。依据重叠率 M 计算公式可知,重叠率 M 可由单部雷达最大探测距离 R_{\max} 和网距 L 计算求得,即组网基本单元空间覆盖情况,由单部雷达最大探测距离 R_{\max} 和组网网距 L 共同决定。在确定用于组网的雷达型号后,单部雷达最大探测距离 R_{\max} 为定值,则组网网距 L 决定着重叠率 M 的值,从而决定组网基本单元的空间覆盖情况,可称其为雷达网基本单元的覆盖率因子。因此雷达网基本单元形状因子雷达数量 N 和覆盖率因子组网网距 L 共同表征着雷达网的拓扑结构特性。

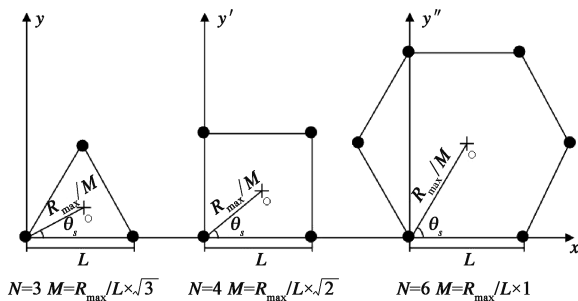


图 2 雷达网基本单元的几何模型

波束直径 b_s (方位分辨率)、最低波束高度 b_h (探测盲区)和探测灵敏度 Z_{\min} 三者均是探测距离的函数,是单部雷达远距离探测时重要性能指标,且三者只涉及雷达硬件性能,并不关心可调整的信号处理方面(如采样数、驻留时间等)。多部雷达构成的雷达网亦可延用波束直径 b_s 、最低波束高度 b_h 和探测灵敏度 Z_{\min} 作为其性能指标比较工具,用于组网的单部雷达性能以及多部雷达构成的雷达网的性能(含组网拓扑结构)比较。

依据 Papoulis(1991)^[36],给定特征量 μ 的空间域 (μ_0, μ_{\max}) ,可计算其累计密度函数:

$$F(\mu) = \int_{\mu_0}^{\mu} f_u(\mu) d\mu \quad \mu_0 \leq \mu \leq \mu_{\max} \quad (1)$$

式中, $f_u(\mu)$ 为特征量 μ 的空间密度函数,其值在 $(0, 1)$ 之间。

假定 $\mu = \delta (\delta \leq \mu_{\max})$,可求出从 μ_0 至 δ 的累计空间密度函数值,其值为小于等于 100% 的百分数(当特征量 μ 取最大值 μ_{\max} 时, $F(\mu_{\max}) = 100\%$)。逆向思维,已知特征量 μ 值的范围,可求得某特定累计空间密度函数值对应的 δ 值,称为特征量 μ 的特征值。参考国外文献,令 $F(\mu) = 90\%$,可由式(1)求得 $\mu = \partial (\partial < \mu_{\max})$ 。其物理意义为:在 μ 的空间域内,小于等于 ∂ 占比(或权重)较大,也就是说,绝大多数 μ 值集中在小于等于 ∂ 的范围内,大于 ∂ 且小于等于 μ_{\max} 在 μ 的空间域内占比(或权重)较小,只占 10%。因此,特征值 ∂ 能表征特征量 μ 全空间域 (μ_0, μ_{\max}) 的分布特性,可作同种特征量不同空间域对比分析。不同组网拓扑结构的雷达网其性能指标(如: b_s 、 b_h 、 Z_{\min})空间域不同,将该方法延用至雷达组网性能评估中,令 3 个雷达性能指标(b_s 、 b_h 、 Z_{\min})分别作为特征量,在求得其空间域的基础上,利用式(1)求得累计空间密度函数值=90%下的波束直径 b_s 特征值、最低波束高度 b_h 特征值和探测灵敏度 Z_{\min} 特征值,分别从 b_s 、 b_h 、 Z_{\min} 3 个雷达性能指标方面进行特征值差异比较,判别不同组网拓扑结构的雷达网空间探测能力和探测数据的一致性程度,从而评估其组网性能。

实际应用中,式(1)等式左边为 90%,等式右边雷达性能指标(b_s 、 b_h 、 Z_{\min})的空间密度函数及其空间域可由 Francesc Junyent(2009)^[37]等给出的公式进行表示,从而计算出性能指标(b_s 、 b_h 、 Z_{\min})对应的特征值,公式如下:

$$f_{b_s}^N(b_s) = \begin{cases} \frac{M^2 \theta_s}{\sin \theta_s \cos \theta_s} \frac{2b_s}{b_{smax}^2} & 0 \leq b_s \leq b_{smax} \frac{\cos \theta_s}{M} \\ M^2 \left[\theta_s - \arccos \left(\frac{b_{smax} \cos \theta_s}{b_s M} \right) \right] \frac{2b_s}{\sin \theta_s \cos \theta_s} \frac{1}{b_{smax}^2} & b_{smax} \frac{\cos \theta_s}{M} \leq b_s \leq b_{smax} \frac{1}{M} \end{cases} \quad (2)$$

$$f_{b_h}^N(b_h) = \begin{cases} \frac{M^2 \theta_s}{\sin \theta_s \cos \theta_s} \frac{1}{b_{hmax}} & 0 \leq b_h \leq b_{hmax} \frac{\cos^2 \theta_s}{M^2} \\ M^2 \left[\theta_s - \arccos \sqrt{\frac{b_{hmax} \cos^2 \theta_s}{b_h M^2}} \right] \frac{1}{\sin \theta_s \cos \theta_s} \frac{1}{b_{hmax}} & b_{hmax} \frac{\cos^2 \theta_s}{M^2} \leq b_h \leq b_{hmax} \frac{1}{M^2} \end{cases} \quad (3)$$

$$f_{Z_{min}}^N(Z_{min}) = \begin{cases} \frac{M^2 \theta_s}{\sin \theta_s \cos \theta_s} \frac{1}{Z_{max}} & 0 \leq Z_{min} \leq Z_{max} \frac{\cos^2 \theta_s}{M^2} \\ M^2 \left[\theta_s - \arccos \sqrt{\frac{Z_{max} \cos^2 \theta_s}{Z_{min} M^2}} \right] \frac{1}{\sin \theta_s \cos \theta_s} \frac{1}{Z_{max}} & Z_{max} \frac{\cos^2 \theta_s}{M^2} \leq Z_{min} \leq Z_{max} \frac{1}{M^2} \end{cases} \quad (4)$$

式(2~4)为雷达网雷达性能指标(b_s 、 b_h 、 Z_{min})概率密度函数表达式及其对应的空间域,包含重叠率 M 、夹角 θ_s 等参量(图 2)。

基于苏北龙卷雷达组网的单部雷达性能指标(表 1),给出累计空间密度值为 90% 时,组网基本单元网距 L 分别为 90 km、60 km、30 km(其中, $R_{max} = 90$ km),几何模型分别为正三角形($N=3$)、正四边形($N=4$)、正六形($N=6$)的拓扑结构下,依据公式(1)、(2)、(3)、(4)求得雷达网波束直径 b_s (方位分辨率)特征值、最低波束高度 b_h (探测盲区)特征值和探测灵敏度 Z_{min} 特征值(表 2)。由表 2 可知,当组网网距 L 相同时,性能指标(b_s 、 b_h 、 Z_{min})特征值均随着形状因子雷达数量 N 的增大而增大。当 $N=3$ (正三角)时,雷达网性能指标特征值最小;组网网距 $L=90$ km 时,波束直径 b_s 特征值为 425.5 m,最低波束高度 b_h 特征值为 118.4 m,探测灵敏度 Z_{min} 特征值为 6.1 dB;组网网距 $L=60$ km 时,波束直径 b_s 特征值为 282.0 m,最低波束高度 b_h 特征值为 52.6 m,探测灵敏度 Z_{min} 特征值为 2.7 dB;组网网距 $L=30$ km 时,波束直径 b_s 特征值为 138.6 m,最低波束高度 b_h 特征值为 13.15 m,探测灵敏度 Z_{min} 特征值为 0.68 dB。当雷达数量 N 相同时,性能指标(b_s 、 b_h 、 Z_{min})特征值均随着覆盖率因子组网网距 L 的增大而增大。组网网距 $L=30$ km 时,雷达网性能指标特征值最小。然而并非组网网距 L 越小越好。由重叠率 M 的计算公式可知,重叠率 M 与组网网距

L 成反比,过小的组网网距 L (即过大的重叠率 M)使雷达网基本单元内雷达探测重叠过度,造成雷达资源的浪费,极大地限制组网效益的发挥。因此,苏北龙卷雷达组网采用正三角形($N=3$, $L=60$ km)的拓扑结构比较合适,在累计空间密度值为 90% 时,其波束直径 b_s 特征值为 282.0 m,最低波束高度 b_h 特征值为 52.6 m,探测灵敏度 Z_{min} 特征值为 2.7 dB。

表 2 不同组网拓扑结构下雷达网性能指标对比
(累计空间密度函数值为 90%)

网距	N	M	特征值		
			b_s/m	b_h/m	Z_{min}/dB
$L = R_{max} = 90$ km	3	$\sqrt{3}$	425.5	118.4	6.1
	4	$\sqrt{2}$	473.9	151.5	7.95
	6	1	626.5	264.2	14.05
$L = \frac{2}{3}R_{max} = 60$ km	3	$\sqrt{3} \times 1.5$	282.0	52.6	2.7
	4	$\sqrt{2} \times 1.5$	313.1	69.0	3.46
	6	1.5	415.2	122.4	6.02
$L = \frac{1}{3}R_{max} = 30$ km	3	$\sqrt{3} \times 3$	138.6	13.15	0.68
	4	$\sqrt{2} \times 3$	152.5	17.1	0.87
	6	3	204.0	40.1	1.54

苏北龙卷雷达网组网采用 X 波段全固态双偏振多普勒天气雷达,与 S 波段雷达相比,60 km(网距 $L=60$ km)处,波束直径 b_s 分别为 575.96 m 和 1047.20 m,减小了约 2 倍; 0° 仰角盲区高度($b_h + b_s/2$)分别为 499.91 m 和 735.53 m,降低了约 1.5 倍;探测灵敏度

Z_{\min} 分别为 -4.65 dB ($80 \mu\text{s}$ 脉压模式) 和 -7.06 dB, 降低了 2.4 dB。雷达波束直径对应方位分辨率, 最低波束高度和波束直径的一半对应探测盲区, 探测灵敏度对应弱回波探测能力, 3 个性能指标都与龙卷分辨有关。从空间尺度而言, 60 km 处 575.96 m 的波束直径特征值相较 S 波段雷达在方位分辨能力上得到一定改善, 较大程度上满足 20 m~ 20 km 的龙卷空间尺度; 499.91 m 的 0° 仰角盲区高度相较 S 波段雷达在探测盲区上得到一定改善, 能提供更多离地低于 1 km、甚至 100 m 的雷达数据, 便于连续监测中气旋、龙卷涡旋特征 TVS 向下触地延展。从弱回波探测能力而言, -4.65 dB 探测灵敏度相较 S 波段雷达在探测弱回波能力方面存在较小的差距。由探测灵敏度公式可知, 在保证接收机的最小可测功率差异较小时, 在某特定距离处, 不同波段雷达探测灵敏差异由雷达常数决定。一般而言 S 波段雷达雷达常数均小于 X 波段雷达, 约 70 dB 左右 (本文采用泰州雷达, 雷达常数为 69.268 dB), 苏北龙卷 X 波段组网雷达采用脉压技术, $80 \mu\text{s}$ 脉压模式下雷达常数可减小至 71.29 dB (非脉冲压缩模式 ($0.2 \mu\text{s}$) 雷达常数为 96.99 dB; 美国 IP1 雷达 (X 波段) 常数为 85.6 dB, IP3 雷达 (X 波段) 常数为 99.2 dB), 缩小了与 S 波段业务雷达差距, 一定程度上提高了其自身弱回波探测能力。此外, 由散射原理可知, X 波段相较 S 波段雷达, 小粒子分辨与探测能力更强, 更有利于龙卷的探测, 尤其勾状回波中弱回波区的精细化探测。值得注意的是, 60 km 处 X 波段雷达探测指标优于或接近于 S 波段雷达, 外加其组网协同观测, 便于获得空间一致性更高的探测数据, 更有利于龙卷过程的分析与判识。因此, 苏北龙卷雷达采用 X 波段雷达组网可提供更多离地低于 1 km、甚至百米的高空间分辨率 (径向和方位)、较好的弱回波探测能力、高空间一致性的雷达资料, 便于龙卷等强对流天气的监测、预报预警。

2.3 苏北龙卷雷达网布局

表 3 给出 1970—2006 年苏北平原主要地区龙卷风的发生情况, 每个统计台站都有超过 10 次龙卷发生的记录。可知, 盐城和阜宁发生的次数最多, 分别高达 34 次、26 次, 兴化、大丰次之, 分别为 17 次、16 次, 宝应和高邮为 12 次、10 次, 其中 2016 年阜宁出现的罕见龙卷事件, 龙卷级别高达 EF4 级。因此盐城、阜宁、大丰、宝应、高邮、兴化都为苏北龙卷易

发区。

表 3 苏北主要地区龙卷风统计情况 (1970—2006 年)

	盐城	阜宁	大丰	宝应	高邮	兴化
发生次数	34	26	16	12	10	17

龙卷主要发生在西风带系统和台风系统天气背景下, 分别称为西风带龙卷和台前龙卷。江苏苏北地区介于亚热带和暖温带的气候过渡地带, 春夏季受西风带、副热带天气系统以及热带低压的共同影响, 5—9 月为龙卷的高发期^[38], 常常出现典型的西风带龙卷和台风前部龙卷, 并伴有短时强降水、冰雹、雷雨大风等天气过程。西风带系统背景下, 强天气过程路径影响大致可分为 2 种: 天气系统沿江自西向东移动并略有北抬、沿淮自西向东移动并略有南压, 前者高邮处于上游, 后者宝应、阜宁处于上游; 台风系统背景下, 强天气的过程路径大致有两种: 副高脊线偏北, 台风系统近海 (如上海—南通交界) 登陆后自南向北移动, 如 1810 号台风“安比”, 大丰、兴化处于上游; 副高脊线正常或略偏南, 台风系统省外 (如福建) 登陆后向内陆西进再转向 (此时有的减弱为热带残留低压), 沿东北方向移动至盐城和连云港之间入海, 苏北地区位于热带残留低压 (台风倒槽) 和槽后冷空气结合处, 如 1513 号台风“苏迪罗”、1614 号台风“莫兰蒂”, 高邮处于上游。由上可知, 阜宁、大丰、宝应、高邮、兴化地区都处于苏北平原地区系统上游。

图 3 为苏北龙卷雷达网布局图, 可知, 苏北龙卷雷达网采用“守株待兔”方式, 在盐都、阜宁、大丰 (盐城, 龙卷易发区) 和宝应、兴化 (苏北平原天气系统上游兼龙卷易发区) 各布设一部固定式 X 波段全固态双偏振多普勒天气雷达。综合在苏北平原雷达选址的各种因素, 最终组网基本单元采用近似正三角形 ($N=3, L=45\sim 65$ km) 的拓扑结构。高时空分辨率的龙卷探测雷达网由 3 个组网基本单元构成, 近似梯形结构, 镶嵌在 S 波段雷达业务网内 (盐城、淮安、泰州雷达)。其中, 阜宁站和宝应站之间网距 $L=46$ km, 阜宁站和盐都站之间网距 $L=50$ km, 宝应站和盐都站之间网距 $L=50$ km, 宝应站和兴化站之间网距 $L=61$ km, 盐都站和兴化站之间网距 $L=64$ km, 盐都站和大丰站之间网距 $L=55$ km, 兴化站和大丰站之间网距 $L=63$ km。5 部 X 波段全固态双偏振多普勒天气雷达构成的雷达网位于盐

城、淮安、泰州 3 部 S 波段业务雷达网中,处于其低空探测不足区域(750 m 探测高度上(图略),苏北平原地区存在较大的覆盖盲区,主要是宝应—建湖一带、阜宁以西—以北一带、大丰东南方向),与 S 波段雷达业务网协同观测,实现苏北平原区域地面(0 km)至 2 km 高度的有效探测。然而高邮位于苏北地区强天气系统的上游,且龙卷发生次数较多、强度较大、致灾严重,如 2013 年 7 月 7 日高邮出现的龙卷^[39]。可在江苏省国家级龙卷观测预警试验基地雷达网二期工程中进一步增加 X 波段雷达数量及拓宽观测范围,或增设一部受雨衰影响较小、探测距离较大、具有快速扫描能力的天气雷达布设在高邮地区,“肩负”龙卷雷达网内强天气的监视、预警的任务,如 C 波段相控阵天气雷达。



图 3 苏北龙卷雷达网布局

3 结论

本文为支撑苏北龙卷雷达网建设工作,从龙卷雷达组网的必要性出发,重点介绍苏北龙卷雷达组网策略,初步得出以下结论:

(1)苏北龙卷雷达网拟采用大天线、全固态、高性能技术指标的 X 波段双偏振雷达组网,采用不同的观测模式,可获得空间一致性好、时空分辨率高且丰富的探测数据,满足龙卷等小尺度强对流天气的快速、精细化探测要求。此外,采用较高的脉冲重复频率(如脉冲重复频率 3000 Hz,5/4 PRF)等进行测速范围的扩展,最大测速范围可达±96 m/s,解决 X 波段雷达速度模糊问题,满足探测龙卷风的要求。

(2)雷达组网拓扑结构由雷达数量 N (形状因子)和组网网距 L (覆盖率因子)决定。比较不同组

网拓扑结构下雷达网特性时,可延用单部雷达波束直径 b_s 、最低波束高度 b_h 和探测灵敏度 Z_{\min} 技术指标进行比较。一般而言,当雷达数量 N 和组网网距 L 较小时,雷达网性能指标(b_s 、 b_h 、 Z_{\min})较优。然而,尤其是形状因子,并非越小越好,过小会造成雷达资源的浪费,影响组网效益的发挥。

(3)经理论计算与比较,苏北龙卷雷达网可采用正三角形组网拓扑结构,取累计空间密度值 90%,雷达间距为 60 km 时,波束直径 b_s 特征值为 282.0 m,最低波束高度 b_h 特征值为 52.6 m,探测灵敏度 Z_{\min} 特征值为 2.7 dB;X 波段雷达网与 S 波段业务雷达相比,在 60 km 探测距离处,其波束直径减小了约 2 倍,0°仰角盲区高度降低了约 1.5 倍,探测灵敏度降低了 2.4 dB。因此,在方位分辨率、探测盲区、弱回波探测能力、数据空间一致性等方面均得到提升,可提供更多低于 1 km、甚至 100 m 的高时空分辨率的雷达资料,便于捕捉龙卷等强对流天气。

(4)苏北龙卷雷达网在盐都、阜宁、大丰、宝应、兴化(龙卷易发区),各布设一部固定式 X 波段全固态双偏振多普勒天气雷达。综合考虑在苏北平原雷达选址的各种因素,最终雷达网基本单元拟采用近似正三角形($N=3$, $L=45\sim 65$ km)的拓扑结构。5 部高时空分辨率的龙卷探测雷达组成 3 个近似正三角形的单元,镶嵌在 S 波段雷达业务网内(盐城、淮安、泰州雷达中间)。后续可进一步增加雷达数量及拓宽观测区域,例如在高邮等龙卷易发地区,可增补 X 波段天气雷达或 C 波段相控阵天气雷达。

参考文献

- [1] 魏文秀,赵亚民. 中国龙卷风的若干特征[J]. 气象,1995,21(5):37-40.
- [2] 吴芳芳,俞小鼎,张志刚,等. 苏北地区超级单体风暴环境条件与雷达回波特征[J]. 气象学报,2013,71(2):209-227.
- [3] 郑永光,朱文剑,姚鹏,等. 风速等级标准与 2016 年 6 月 23 日阜宁龙卷强度估计[J]. 气象,2016,42(11):1289-1303.
- [4] 张小玲,杨波,朱文剑,等. 2016 年 6 月 23 日江苏阜宁 EF4 级龙卷天气分析[J]. 气象,2016,42(11):1304-1314.
- [5] 顾瑜,孙即霖,楚合涛. 2016 年 6 月江苏阜宁一次超强龙卷的特征分析[J]. 中国海洋大学学报(自然科学版),2018,48(2):11-21.
- [6] 周海光.“6.23”江苏阜宁 EF4 级超级龙卷超级单体风暴中尺度结构研究[J]. 地球物理学报,2018,61(9):3617-3639.
- [7] 李柏,俞小鼎. 天气雷达及其应用[M]. 北京:气象出版社,

- 2011, 229-234.
- [8] 张培昌, 杜秉玉, 戴铁丕. 雷达气象学[M]. 北京: 气象出版社, 2010, 386-392.
- [9] 张培昌, 魏鸣, 黄兴友, 等. 双线偏振多普勒天气雷达探测原理与应用[M]. 北京: 气象出版社, 2018, 181-185.
- [10] 刘俊, 黄兴友, 何雨琴, 等. X波段相控阵气象雷达回波数据对比分析[J]. 高原气象, 2015, 34(4): 1167-1176.
- [11] 何建新, 曾强宇, 王皓, 等. 龙卷的雷达探测研究进展[J]. 成都信息工程大学学报, 2018, 33(5): 477-489.
- [12] Donaldson R J. Vortex signature recognition by a Doppler radar [J]. J Appl Meteor, 1970, 9: 661-670.
- [13] Fujita T T. Analytical meso-meteorology: A review severe local storms [J]. Meteor Monogr, 1963, 27: 77-125.
- [14] Brown R A, Lemon L R, Burgess D W, et al. Tornado detection by pulsed Doppler Radar [J]. Mon Wea Rev., 1978, 106: 29-38.
- [15] Atkins N T, Butler K M, Flynn K R, et al. An integrated damage, visual, and radar analysis of the 2013 Moore, Oklahoma, EF5 tornado [J]. Bulletin of the America Meteorological Society, 2012, 95 (10): 1549-1561.
- [16] Bluestein H B, Pazmany A L. Observations of tornadoes and other convective phenomena with a mobile, 3-mm wavelength, Doppler radar: The spring 1999 field experiment [J]. Bulletin of the America Meteorological Society, 2000, 81 (12): 2939-2952.
- [17] 俞小鼎, 郑媛媛, 廖玉芳, 等. 一次伴随强烈龙卷的强降水超级单体风暴研究[J]. 大气科学, 2008, 32(3): 508-522.
- [18] 汪章维, 陈昊, 袁圣, 等. 新一代双偏振天气雷达(CINRDA/SAD)精细化探测技术[J]. 气象科技, 2020, 48(3): 331-336.
- [19] 陈婉婷, 何建新, 史朝, 等. 基于数字高程的波束遮挡订正及在雷达定量估测降水中应用[J]. 气象科技, 2020, 48(1): 9-14.
- [20] 邵楠, 潘新民, 陈玉宝, 等. 利用太阳法提高新一代天气雷达探测精度[J]. 气象科技, 2018, 46(6): 1065-1072.
- [21] 叶飞, 梁海河, 文浩, 等. 新一代天气雷达均一性评估[J]. 气象科技, 2020, 48(3): 322-330.
- [22] 管理, 戴建华, 吴昊. Geodesics 算法在雷达投影转换中的应用检验[J]. 气象科技, 2020, 48(1): 1-8.
- [23] 常亚楠, 戴建华, 黄兴友, 等. 单多普勒雷达反演涡旋风场方法分析[J]. 气象科技, 2019, 47(5): 719-730.
- [24] 俞小鼎, 郑媛媛, 张爱民, 等. 安徽一次强烈龙卷过程的多普勒天气雷达研究[J]. 高原气象, 2006, 25(5): 914-921.
- [25] 郑媛媛, 朱红芳, 方翔, 等. 强龙卷超级单体风暴特征分析与预警研究[J]. 高原气象, 2009, 28(3): 617-625.
- [26] 吴芳芳, 俞小鼎, 张志刚, 等. 对流风暴内中气旋特征与强烈天气[J]. 气象, 2012, 38(11): 1330-1338.
- [27] 周后福, 刁广秀, 夏文梅, 等. 江淮地区龙卷超级单体风暴及环境参数分析[J]. 气象学报, 2014, 72(2): 306-317.
- [28] 郑媛媛, 张备, 王啸华, 等. 台风龙卷的环境背景和雷达回波结构分析[J]. 气象, 2015, 41(8): 942-952.
- [29] 刁广秀, 万明波, 高留喜, 等. 非超级单体龙卷风暴多普勒天气雷达产品特征及预警[J]. 气象, 2014, 40(6): 668-677.
- [30] 徐学义, 赵振东, 梁红新. 三次非超级单体龙卷风暴多普勒雷达特征对比分析[J]. 高原气象, 2014, 33(4): 1164-1172.
- [31] 陈洪滨, 李兆明, 段树, 等. 天气雷达网络的进展[J]. 遥感科学与应用, 2012, 27(4): 487-495.
- [32] 许旭, 李忱. 分布式网络天气雷达设计[J]. 微波学报, 2014(6): 8-11.
- [33] 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[J]. 气象科技, 2016, 44(4): 517-527.
- [34] 李兆明. 网络雷达协同自适应观测方案及衰减订正研究[D]. 北京: 中国科学院大气物理研究所, 2014.
- [35] 马舒庆, 陈洪滨, 王国荣, 等. 阵列式天气雷达设计与初步实现[J]. 应用气象学报, 2019, 30 (1): 1-12.
- [36] Papoulis A. Probability, Random Variables, and Stochastic Processes [J]. McGraw-Hill, 1991.
- [37] Junyent F, Chandrasekar V. Theory and Characterization of Weather Radar Networks [J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 2009, 26: 474-491.
- [38] 姚叶青, 郝莹, 张义军, 等. 安徽龙卷发生的环境条件和临近预警[J]. 高原气象, 2012, 31(6): 1721-1730.
- [39] 曾明剑, 吴海英, 王晓峰, 等. 梅雨期龙卷环境条件与典型龙卷对流风暴结构特征分析[J]. 气象, 2016, 42(3): 280-293.

Observation Strategy of Tornado Radar Network in Northern Jiangsu

LIU Jun^{1,2} ZHOU Honggen³ LIU Xinan⁴ SHI Zhao⁵ FEI Qili³

(1 Taizhou Meteorological Service, Jiangsu, Taizhou 225300; 2 Key Laboratory of Transportation of Meteorology, CMA, Nanjing 210008; 3 Jiangsu Meteorological and Technical Equipment Centre, Nanjing 210008; 4 Nanjing NRIET Industrial Company, Nanjing 211106; 5 Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610225)

Abstract: In order to detect and analyze the three-dimensional fine structure and evolution law of severe convective weather such as tornado with a small scale, short life cycle and heavy disaster, Jiangsu is building a high-resolution dual polarization weather radar network in the North Jiangsu Plain, where tornadoes occur frequently. This paper focuses on the networking strategy of the tornado radar network in the northern Jiangsu to support the construction of the tornado radar network. The study shows: (1) The tornado radar network in the northern Jiangsu adopts the X-band weather radar (dual polarization) network with large antenna, all solid state and high performance, and high performance indexes, which can not only realize long-distance detection, but also obtain data products with a great deal of high spatial consistency and high spatial-temporal resolution data, to a large extent meeting the requirements of fast and fine detection for tornadoes and other severe convection weather. In addition, in order to overcome the problem of velocity ambiguity for X-band weather radar, a higher pulse repetition frequency can be used to expand the speed measurement range. (2) In the North Jiangsu tornado radar network, a triangle ($N = 3$, $L = 60$ km) network topology is used for theoretical calculation. When the cumulative spatial density value is 90%, the performance indicators are: beam size b_s is 282.0 m, the minimum beam height b_h is 52.6 m, and the detection sensitivity Z_{\min} is 2.7 dB. Compared with the single S-band operational radar, the beam size of X-band network radar in the northern Jiangsu has reduced by about 2 times, the minimum beam height by about 1.5 times, and the detection sensitivity by about 2.4 dB. That is to say, the azimuth resolution, detection blind area, weak echo detection ability, and data spatial consistency have been greatly improved, which can provide more radar data with a high spatial resolution, less than 1 km or even 100 m, high weak echo detection capability, and high spatial consistency. All that is convenient for monitoring, forecasting, and early warning of severe convective weather such as tornadoes. (3) Five X-band all-solid-state dual polarization Doppler weather radar sets are respectively equipped in Yandu, Funing, Dafeng, Baoying, and Xinghua (tornado-prone areas), which forms the tornado radar network in the northern Jiangsu. Considering the various factors of radar location selection in the North Jiangsu Plain, the basic unit of the final network adopts the topology structure of approximate triangle ($N = 3$, $L = 45 - 65$ km). The high spatial-temporal resolution tornado detection radar network is composed of three basic networking units, which is similar to a trapezoid structure, embedded in the S-band radar service network (equipped in Yancheng, Huai'an, Taizhou, respectively). In the future, the number of radar sets can further increase and the observation area can be widened. X-band weather radar or C-band phased array weather radar can be added in the tornado prone areas such as Gaoyou.

Keywords: tornado; radar networking; networking strategy; X-band dual polarization weather radar