

张晶,姚文,孙召平,等,2024.双偏振天气雷达新体扫模式试验评估分析[J].气象,50(10):1201-1215. Zhang J, Yao W, Sun Z P, et al, 2024. Evaluation and analysis of experimental testing of dual-polarization weather radar's new volume coverage pattern [J]. Meteor Mon, 50(10):1201-1215 (in Chinese).

双偏振天气雷达新体扫模式试验评估分析*

张晶^{1,2,3} 姚文^{1,2,3} 孙召平⁴ 崔福涛^{1,2} 原久淞^{1,2}

吴杨^{2,3} 孙永联² 李洋⁵ 杨红强⁶

1 中国气象局沈阳大气环境研究所,沈阳 110166

2 辽宁省营口市气象局,营口 115001

3 盘锦国家气候观象台,辽宁盘锦 124200

4 华云敏视达雷达(北京)有限公司,北京 100089

5 辽宁省人工影响天气办公室,沈阳 110166

6 中国人民解放军 94619 部队气象台,安徽六安 237010

提 要: 针对体扫模式 VCP21D 在 5°仰角以下垂直方向上采样较少及附近有探测空隙的问题,借鉴 WSR-88D 的体扫模式,建立 VCP12D、VCP212D、VCP215D、VCP35D 4 种新体扫模式,并利用营口双偏振天气雷达进行业务试验,结果表明:4 种新体扫模式灵敏度和数据质量与现在业务模式 VCP21D 基本一致,地物抑制能力相当,满足业务运行指标,可以在业务中应用。强对流探测模式 VCP12D 和 VCP212D 较 VCP11D 增加了低层的垂直分辨率,可以获得距离雷达 100 km 之外更为详细的探测数据,同时扫描时间从 5 min 缩短到 4 min,对于发展较快的强对流风暴探测效果更好。非强对流降水模式 VCP215D 较 VCP21D 增加 6 层探测仰角,可以获得更为连续的垂直探测产品,可以更为完整和精细地表现回波结构特征和风暴顶高度,探测时间与 VCP21D 相当,优越性明显。晴空模式 VCP35D 较 VCP31D 探测到的数据范围略小,但时空分辨率更高,探测优越性明显。新体扫模式提升了最大不模糊速度,VCP12D、VCP212D、VCP215D 高层(10°以上)提升到 $33.36 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,VCP212D、VCP215D 低层(0.5°~1.3°)提升到 $28.47 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,VCP35D 整层提升到 $26.38 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

关键词: 双偏振,体扫模式(VCP),灵敏度,垂直探测

中图分类号: P412

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2024.080101

Evaluation and Analysis of Experimental Testing of Dual-Polarization Weather Radar's New Volume Coverage Pattern

ZHANG Jing^{1,2,3} YAO Wen^{1,2,3} SUN Zhaoping⁴ CUI Futao^{1,2} YUAN Jiusong^{1,2}

WU Yang^{2,3} SUN Yonglian² LI Yang⁵ YANG Hongqiang⁶

1 Shenyang Institute of Atmospheric Environment, CMA, Shenyang 110166

2 Yingkou Meteorological Office of Liaoning Province, Yingkou 115001

3 Panjin National Climate Observatory, Liaoning Panjin 124200

4 Huayun METSTAR Radar (Beijing) Co. Ltd., Beijing 100089

5 Weather Modification Office of Liaoning Province, Shenyang 110166

6 Meteorological Observatory, Unit 94619 of CPLA, Anhui Lu'an 237010

* 中国气象局沈阳大气环境研究所和东北冷涡重点开放实验室联合开放基金项目(2023SYIAEKFMS08)、辽宁省自然科学基金项目(2021-YKLH-17)、中国气象局创新发展专项(CXFZ2022J003)、中国气象科学研究院基本科研业务费重点项目(2023Z019)、辽宁省气象局人才计划项目(RC202405)和营口市气象局科研课题(202302)共同资助

2023 年 11 月 4 日收稿; 2024 年 7 月 17 日收修定稿

第一作者:张晶,主要从事灾害性天气预报预警技术研究. E-mail: zjing119@126.com

通讯作者:姚文,主要从事天气雷达技术及信息化应用研究. E-mail: 34779904@qq.com

Abstract: In order to address the issue of insufficient vertical sampling below 5° elevation angle and the presence of detection gaps in the volume coverage pattern 21D (VCP21D), four new scanning patterns, namely, VCP12D, VCP212D, VCP215D, and VCP35D, were developed based on WSR-88D. These new scanning patterns were tested using the Yingkou Dual-Polarization Weather Radar, and the results are as follow. The sensitivity and data quality of the four new scanning patterns are comparable to the current VCP21D. The capability to suppress ground clutter is also similar, meeting the operational performance requirements. Therefore, these new scanning patterns can be applied in operational settings. The severe convective detection patterns, VCP12D and VCP212D, provide increased vertical resolution in the lower levels compared to VCP11D. They can obtain more detailed detection data beyond 100 km from the radar. Additionally, their scanning time is reduced from 5 min to 4 min, resulting in improved detection performance for the rapidly developing severe convective storms. The non-severe precipitation mode, VCP215D, has 6 more elevation angles added compared to VCP21D. This allows for more continuous vertical detection products and enables a more complete and detailed representation of echo structure characteristics and storm top heights. The detection time of VCP215D is comparable to that of the VCP21D, demonstrating its superiority. The clear sky pattern, VCP35D, has a slightly smaller data coverage range compared to VCP31D, but it offers higher spatio-temporal resolution and exhibits superior detection capabilities. The new scanning modes have increased the maximum non-blur speed. The high-altitude (above 10°) speeds for VCP12D, VCP212D, and VCP215D have been raised to $33.36 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, the low-altitude ($0.5^\circ - 1.3^\circ$) speeds for VCP212D and VCP215D have been raised to $28.47 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, while the entire layer speed for VCP35D has been increased to $26.38 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.

Key words: dual-polarization, volume coverage pattern (VCP), sensitivity, vertical detection

引 言

天气雷达的探测效果与多种因素有关, Maddox et al(1999)指出天气雷达不同体扫模式的扫描仰角、雷达波束宽度、回波范围均不相同,体扫模式决定了其可以获得的探测精度。Witt(1997)采用两部 WSR-88D 雷达分别使用 VCP11 和 VCP21 跟踪同一风暴进行观测,雷达产品有明显不同,他认为产生这种不同的因素是 2 种体扫模式在垂直方向上采样数差异导致分辨率不同。

美国 WSR-88D 雷达自 1990 年投入使用以来,其扫描策略表经历了多个版本的更新和改进,以适应不断发展的气象监测需求。最初的 WSR-88D 体扫策略定义了 4 个体扫模式(Crum et al,1993),包括 2 个晴空模式和 2 个降水模式。其中晴空模式 VCP32 和 VCP31 具有相同的扫描角度,但使用不同的脉冲长度。降水模式 VCP21 和 VCP11 都用于探测、跟踪及分析降水和恶劣天气特征,主要差异是扫描速率和 4.5° 以上仰角个数的不同,VCP11 主要用于强对流探测。

1998 年美国国家气象局对 WSR-88D 雷达的扫

描策略表进行了重大更新,1998 年版本引入了多个新的扫描模式和参数设置,包括超分辨率体扫和风暴相态识别等,以提高雷达数据的质量和分辨率(Crum et al,1998)。

针对下击暴流、龙卷等快速演变发展的强对流风暴,WSR-88D 雷达操作中心(ROC)和美国国家强风暴实验室(NSSL)设计和测试了几种实验性扫描策略(Brown et al,2005),其中 VCP12 是 VCP11 的更快版本,在低层仰角有更密集的垂直采样;而 VCP121 保留了与 VCP21 相同的仰角,但在最低的 5 个仰角上使用不同的脉冲重复频率来获取更多的多普勒速度数据以减少距离折叠,并提供更准确的径向速度,VCP121 模式主要应用于观测飓风、热带风暴和大范围降水(Zittel and Wiegman,2005)。VCP12 和 VCP121 于 2004 年被正式引入 WSR-88D 的扫描策略中。

在 WSR-88D 的第 9 版和第 10 版扫描策略中(表 1),共包含了 2 个晴空模式(VCP32 和 VCP31)和 7 个降水模式(其中 VCP21/121/221 拥有相同的 9 个扫描仰角;VCP11/211 拥有相同的 14 个扫描仰角,使高空采样更加精细;VCP12/212 拥有相同的 14 个扫描仰角,用于恶劣天气期间更密集的低空大

表 1 WSR-88D 构建并实现的 VCP 编号

Table 1 VCP numbers implemented in WSR-88D

版本号	9.0	10.0	18.0	19.0
	11	11	12**	12
	12	12	31**	31
	21	21	32**	32
	31	31	35	35
体扫模式	32	32	121**	112**
	121	121*	212**	212
	211	211	215	215
	212	212	—	—
	221	221	—	—

注:上角“*”表示此版本中构建的体扫模式较之前版本中的该模式有所更改,“**”引入了单独的监测和多普勒 PRF 表,“—”表示无数据,下同。

气采样)(Cho et al, 2022)。VCP121 在第 10 版扫描策略中有所更改,在第 19 版扫描策略(2020 年)中被 VCP112 取代(Zittel, 2019)。VCP112 通过在底层增加不同的脉冲重复频率,可以更好地去除距离折叠的影响,保证径向速度数据的连续性。

在恶劣天气情况下,选择最合适的体扫模式对准确预报和预警至关重要,而过多的 7 种降水模式给探测选择造成了一定困难(ROC, 2015; Kingfield and French, 2022)。在 WSR-88D 的第 18 版扫描策略中 VCP11、VCP21、VCP211、VCP221 被一种新的体扫模式 VCP215 所取代,VCP215 在 10° 以下与 VCP12/212 的扫描仰角相同,在 10° 以上则与 VCP11/211 的垂直覆盖范围相同,密集的高程采样保留了上述四者最佳的探测属性;其持续时间约为 6 min,满足 VCP 更新间隔要求;且数据质量保持与 VCP21/221 一致。在 WSR-88D 的第 18 版扫描策略中,还增加了 1 种新的晴空模式 VCP35,VCP35 更新时间为 7 min,主要用于晴空或者冬季降雪天气观测中。

2012 年,动态扫描方式开始在业务中应用。动态扫描是根据当前的天气情况来定制数据采集方案,在不牺牲密集的垂直采样和基础数据质量的情况下,提供快速的底层更新,进而获得整个体扫的产品,动态扫描进一步扩大了 WSR-88D 的观测灵活性。其中自动体扫评估和终止(AVSET)是通过观察体扫过程中各仰角反射率的强度和覆盖范围,当扫描仰角回波反射率没有达到预定标准时,动态地终止该体扫(Chrisman, 2013)。这种自适用扫描方式可以缩短体扫时间,减少产品更新间隔。AVSET 自 2012 年以来默认启用,它可以根据需要手动关闭(Cho et al, 2022)。2014—2015 年和 2018—2019 年分别提供了补充自适应体积内低水平扫描(SAILS; Chrisman, 2014)和低海拔高度的中体积重新扫描

(MRLE; Chrisman, 2016) 2 种升级版动态扫描方式,预报员根据探测需要可以做出具体的选择。

我国天气雷达自布网以来,体扫模式主要使用 VCP21 降水模式(俞小鼎等, 2006; 2020)。单一的雷达体扫模式在对不同天气系统探测时存在一定的不足,为此我国气象工作者在改善雷达体扫模式、提升雷达探测质量方面做了定向的分析或试验研究工作。刘应军等(2006)通过对我国新一代天气雷达体扫模式进行比较分析,给出了 VCP11 和 VCP21 在一些天气形势中探测的异同点,及 2 种模式适用的天气类型,同时指出在距雷达较近距离出现强对流天气时,VCP11 和 VCP21 的产品有较大差别,使用 VCP11 探测效果更好;张深寿等(2006)针对我国高山雷达站因海拔较高造成的识别中远距离风暴结构、探测台风能力差的实际情况,提出了适合高山雷达站运行的新一代天气雷达的体扫模式改进思路和方法,并从探测能力、电磁辐射、产品生成、硬件设备等各方面讨论了体扫模式改进的可行性。张沛源等(2008)根据新一代天气雷达在临近天气预报和灾害性天气警报中的重要作用提出需要增加的观测模式,包括增加 PPI/RHI 等观测模式,以提升雷达的探测性能。陈大任等(2010)开展了基于体扫模式的组合 RHI 自动实现算法研究,增强新一代天气雷达业务扫描方式的业务产品功能。杨金红等(2010; 2013)通过增加低仰角或负仰角得到新的观测模式 VCP12,能够提高高山雷达站底层探测能力;汪章维等(2020)着重从新一代天气雷达的时空分辨率、体扫方式等方面,通过对天气雷达脉冲重复频率、信号处理方法及扫描方式等进行改进,提高新一代双偏振天气雷达对中小尺度气旋和龙卷风等灾害性天气的探测能力,以获取快速变化的天气过程精细化特征,获得更新更快、分辨率更高的观测资料。2020 年 8 月,在南京召开的国家重点研发计划“重大自然

灾害监测预警与防范”会议中,南京大学雷达团队在 VCP21 的基础上进行研究,在强对流天气中 4 min 内雷达完成探测 9 个仰角扫描,采用的是高层没有回波时自动体扫终止技术,提升了雷达探测的时间分辨率。

营口市气象局借鉴 WSR-88D 的体扫模式,根据国内雷达天线方位的性能指标修改天线转速,通过对脉冲重复频率和采样参数设定的方式,建立 4 种新体扫模式(VCP12D、VCP212D、VCP215D、VCP35D,D 表示双偏振),并在营口天气雷达站进行扫描试验,以期扩大双偏振天气雷达有效探测覆盖面,尤其提升距离雷达 100 km 以外区域的探测效果。在前期的扫描试验中,主要采用手动连续切换体扫模式及不同模式交替观测的方式,重点对比新体扫模式与业务模式 VCP21D 的差异,并将 VCP21D 穿插在各模式之间,使用强对流体扫模式时,可以尽量减少时空差异,后续将进一步开展扫描模式自动切换策略研究和智能扫描模式试用。

1 天气雷达体扫模式的基本原理

1.1 2 种取样模态和 3 种扫描方式

雷达可以探测到目标物的最大不模糊速度和最大不模糊距离都与雷达的脉冲重复频率(PRF)有关,不存在单一的脉冲重复频率能够同时获得较大的最大不模糊速度和最大不模糊距离,这种现象被称为“多普勒两难”。为解决这一问题,在实际探测中,多普勒天气雷达会使用较低的 PRF 探测反射率因子,使用较高的 PRF 探测径向速度。

多普勒天气雷达有 2 种取样模态,一种是连续监测模态 CS(contiguous surveillance),使用较低的 PRF 来获取较准确的目标位置和强度;另一种是连续多普勒模态 CD(contiguous Doppler),使用较高的 PRF 来获取较准确的径向速度和谱宽数据。在雷达探测过程中,针对不同扫描仰角高度采用 CS 和 CD 2 种取样模态的不同组合方式,一般在低仰角($0.5^{\circ}\sim 2^{\circ}$)使用的是 CS/CD 分离扫描方式,在中仰角($2^{\circ}\sim 7^{\circ}$)使用的是 B(batch)交替扫描方式,在高仰角(大于 7°)使用的是 CDX 不考虑距离折叠的连续多普勒方式。

1.2 现有体扫模式

目前,CINRAD-SA 雷达定义的体扫模式有

3 种,分别是降水模式 VCP11 和 VCP21、晴空模式 VCP31。VCP21 为一般降水模式,6 min 完成 9 个仰角、11 圈的扫描任务,业务上主要使用该模式;VCP11 为强对流模式,5 min 完成 14 个仰角、16 圈的扫描任务。VCP11 和 VCP21 2 种探测模式的中低层扫描仰角均为 0.5° 、 1.5° 、 2.4° 、 3.3° 、 4.3° ,VCP11 的中高层仰角有 9 个,VCP21 的中高层仰角有 4 个。对于发展较旺盛的风暴,在近雷达处,多个探测仰角均可穿过风暴,VCP11 探测仰角更多,具有更高的垂直分辨率,可以探测到更为准确的风暴结构,VCP21 在高层存在探测间隙。在距离雷达较远的地方,仅有低层探测仰角可以穿过风暴(例如, 4.3° 仰角在距离雷达 100 km 处的探测高度已接近 9 km,在距离雷达 150 km 处的探测高度已接近 13 km,超过了大多数风暴顶的高度, 4.3° 以上的仰角在距离雷达 150 km 以外基本没有发挥作用),VCP11 和 VCP21 低层仰角相同且数量较少,距离雷达越远各层仰角波束探测间隙越大,对风暴的探测能力越差。

2 4 种新体扫模式

2.1 VCP12D 和 VCP212D

VCP12D 和 VCP212D 为强对流模式,是在 VCP11D 的基础上进行升级的(模式参数详见表 2、表 3)。与 VCP11D 相比,VCP12D 和 VCP212D 扫描仰角数仍然是 14 个,但减少了 2 个高层仰角、增加 2 个低层仰角。适当增加低层探测仰角的密度,可以有效改善远雷达处的探测效果,得到距离雷达 100 km 之外更为详细的探测数据。同时在雷达最大不模糊速度上有所提升,VCP12D 和 VCP212D 高层仰角(12.5° 、 15.6° 、 19.5°)提升到 $33.36\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,VCP212D 低层仰角(0.5° 、 0.9° 、 1.3°)提升到 $28.47\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ (VCP11D 和 VCP12D 低层仰角为 $26.38\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$)。

在最低层 3 个仰角(0.5° 、 0.9° 、 1.3°),VCP12D 使用的分离取样方式为 CS/CD,VCP212D 使用的分离取样方式为 CS/SZCD[该方式可有效减小径向速度图上距离折叠(即紫色)区域的面积]。在 1.8° 仰角上基本不受地物杂波的影响,均使用 B 交替扫描方式(下同)。VCP12D 和 VCP212D 均是 4 min 左右完成 14 个仰角共 17 圈的扫描,区别是二者的速度脉冲数不同,在最低层 3 个仰角,VCP12D 速度

表 2 VCP12D 参数表
Table 2 Parameter table of VCP12D

仰角/(°)	波形	天线转速/ (°·s ⁻¹)	(强度脉冲数/个)/ (强度脉冲重复频率/s ⁻¹)	(速度脉冲数/个)/ (速度脉冲重复频率/s ⁻¹)	脉冲宽度/ μs	最大不模糊 速度/(m·s ⁻¹)
0.5	CS	21.2	15/322	—	1.57	—
0.5	CD	25.0	—	40/1014	1.57	26.38
0.9	CS	21.2	15/322	—	1.57	—
0.9	CD	25.0	—	40/1014	1.57	26.38
1.3	CS	21.2	15/446	—	1.57	—
1.3	CD	25.0	—	40/1014	1.57	26.38
1.8	B	24.6	3/644	29/1014	1.57	26.38
2.4	B	26.4	3/857	30/1014	1.57	26.38
3.1	B	26.4	3/926	30/1014	1.57	26.38
4.0	B	26.4	3/1014	30/1014	1.57	26.38
5.1	B	28.0	3/1014	30/1014	1.57	26.38
6.4	B	28.0	3/1014	30/1014	1.57	26.38
8.0	CDX	28.4	—	38/1094	1.57	28.47
10.0	CDX	28.9	—	40/1181	1.57	30.74
12.5	CDX	28.7	—	44/1282	1.57	33.36
15.6	CDX	28.7	—	44/1282	1.57	33.36
19.5	CDX	28.7	—	44/1282	1.57	33.36

注:CS 和 CD 分别表示连续监测和连续多普勒模式,B 表示交替扫描方式,CDX 表示不考虑距离折叠的连续多普勒方式,下同。

表 3 VCP212D 参数表
Table 3 Parameter table of VCP212D

仰角/(°)	波形	天线转速/ (°·s ⁻¹)	(强度脉冲数/个)/ (强度脉冲重复频率/s ⁻¹)	(速度脉冲数/个)/ (速度脉冲重复频率/s ⁻¹)	脉冲宽度/ μs	最大不模糊 速度/(m·s ⁻¹)
0.5	CS	21.2	15/322	—	1.57	—
0.5	SZCD	25.0	—	64/1094	1.57	28.47
0.9	CS	21.2	15/322	—	1.57	—
0.9	SZCD	25.0	—	64/1094	1.57	28.47
1.3	CS	21.2	15/446	—	1.57	—
1.3	SZCD	25.0	—	64/1094	1.57	28.47
1.8	B	24.6	3/644	28/1014	1.57	26.38
2.4	B	26.4	3/857	28/1014	1.57	26.38
3.1	B	26.4	3/926	28/1014	1.57	26.38
4.0	B	26.4	3/1014	30/1014	1.57	26.38
5.1	B	28.0	3/1014	31/1014	1.57	26.38
6.4	B	28.0	3/1014	31/1014	1.57	26.38
8.0	CDX	28.4	—	38/1094	1.57	28.47
10.0	CDX	28.9	—	41/1181	1.57	30.74
12.5	CDX	28.7	—	44/1282	1.57	33.36
15.6	CDX	28.7	—	44/1282	1.57	33.36
19.5	CDX	28.7	—	44/1282	1.57	33.36

注:SZCD 中的“SZ”表示 SZ 相位编码方法,用于退距离折叠。

采样为 40 个,VCP212D 采样数为 64 个,取样数量越多,雷达探测质量越好。

2.2 VCP215D

VCP215D 为一般降水模式,在 VCP21D 的基础上进行升级(模式参数详见表 4),增加了 2 个低层仰角、2 个中层仰角和 2 个高层仰角,在最低层 3 个仰角使用的是分离取样方式 CS/SZCD,367 s 完成

15 个仰角共 18 圈的扫描。VCP215D 相较 VCP21D 扫描仰角增加了 6 个,垂直探测精密程度明显提高。与 VCP21D 相比,VCP215D 高层仰角(10.0°、12.0°、14.0°、16.7°、19.5°)最大不模糊速度提升到 33.36 m·s⁻¹(VCP21D 在 9.9° 以上为 30.73 m·s⁻¹),低层仰角(0.5°、0.9°、1.3°)提升到 28.47 m·s⁻¹(VCP21D 低层仰角为 26.38 m·s⁻¹)。

表 4 VCP215D 参数表
Table 4 Parameter table of VCP215D

仰角/(°)	波形	天线转速/ (°·s ⁻¹)	(强度脉冲数/个)/ (强度脉冲重复频率/s ⁻¹)	(速度脉冲数/个)/ (速度脉冲重复频率/s ⁻¹)	脉冲宽度/ μs	最大不模糊 速度/(m·s ⁻¹)
0.5	CS	11.46	28/322	—	1.57	—
0.5	SZCD	16.897	—	64/1094	1.57	28.47
0.9	CS	13.375	24/322	—	1.57	—
0.9	SZCD	16.897	—	64/1094	1.57	28.47
1.3	CS	15.921	22/322	—	1.57	—
1.3	SZCD	16.897	—	64/1094	1.57	28.47
1.8	B	15.921	3/644	50/1014	1.57	26.38
2.4	B	16.897	3/857	40/1014	1.57	26.38
3.1	B	14.767	3/926	40/1014	1.57	26.38
4.0	B	16.771	3/1014	40/1014	1.57	26.38
5.1	B	17.538	3/1014	40/1014	1.57	26.38
6.4	B	19.5575	3/1014	40/1014	1.57	26.38
8.0	CDX	19.5575	—	44/1094	1.57	28.47
10.0	CDX	19.5575	—	50/1282	1.57	33.36
12.0	CDX	24.864	—	50/1282	1.57	33.36
14.0	CDX	25.640	—	50/1282	1.57	33.36
16.7	CDX	25.640	—	50/1282	1.57	33.36
19.5	CDX	25.640	—	50/1282	1.57	33.36

2.3 VCP35D

VCP35D 是晴空模式,在 VCP31D 的基础上进行升级(模式参数详见表 5),增加 2 个低层仰角和 2 个中层仰角,在最低层 3 个仰角使用分离取样方式 CS/SZCD,410 s 完成 9 个仰角共 12 圈的扫描。

与 VCP31D 相比,VCP35D 一方面缩短了扫描时间,提高探测时效性;另一方面通过对扫描仰角的调整,对雷达各层结构特征更加精细。同时,相较于 VCP31D,最大不模糊速度从 11.6 m·s⁻¹ 提升到 26.38 m·s⁻¹。

表 5 VCP35D 参数表
Table 5 Parameter table of VCP35D

仰角/(°)	波形	天线转速/ (°·s ⁻¹)	(强度脉冲数/个)/ (强度脉冲重复频率/s ⁻¹)	(速度脉冲数/个)/ (速度脉冲重复频率/s ⁻¹)	脉冲宽度/ μs	最大不模糊 速度/(m·s ⁻¹)
0.5	CS	4.966	64/322	—	1.57	—
0.5	SZCD	15.612	—	64/1014	1.57	26.38
0.9	CS	4.966	64/322	—	1.57	—
0.9	SZCD	15.612	—	64/1014	1.57	26.38
1.3	CS	5.473	64/446	—	1.57	—
1.3	SZCD	15.612	—	64/1014	1.57	26.38
1.8	B	15.134	3/644	55/1014	1.57	26.38
2.4	B	15.863	3/857	48/1014	1.57	26.38
3.1	B	16.391	5/926	48/1014	1.57	26.38
4.0	B	17.542	5/1014	46/1014	1.57	26.38
5.1	B	17.542	5/1014	46/1014	1.57	26.38
6.4	B	17.542	5/1014	46/1014	1.57	26.38

3 不同模式的探测性能差异

3.1 基数据灵敏度差异

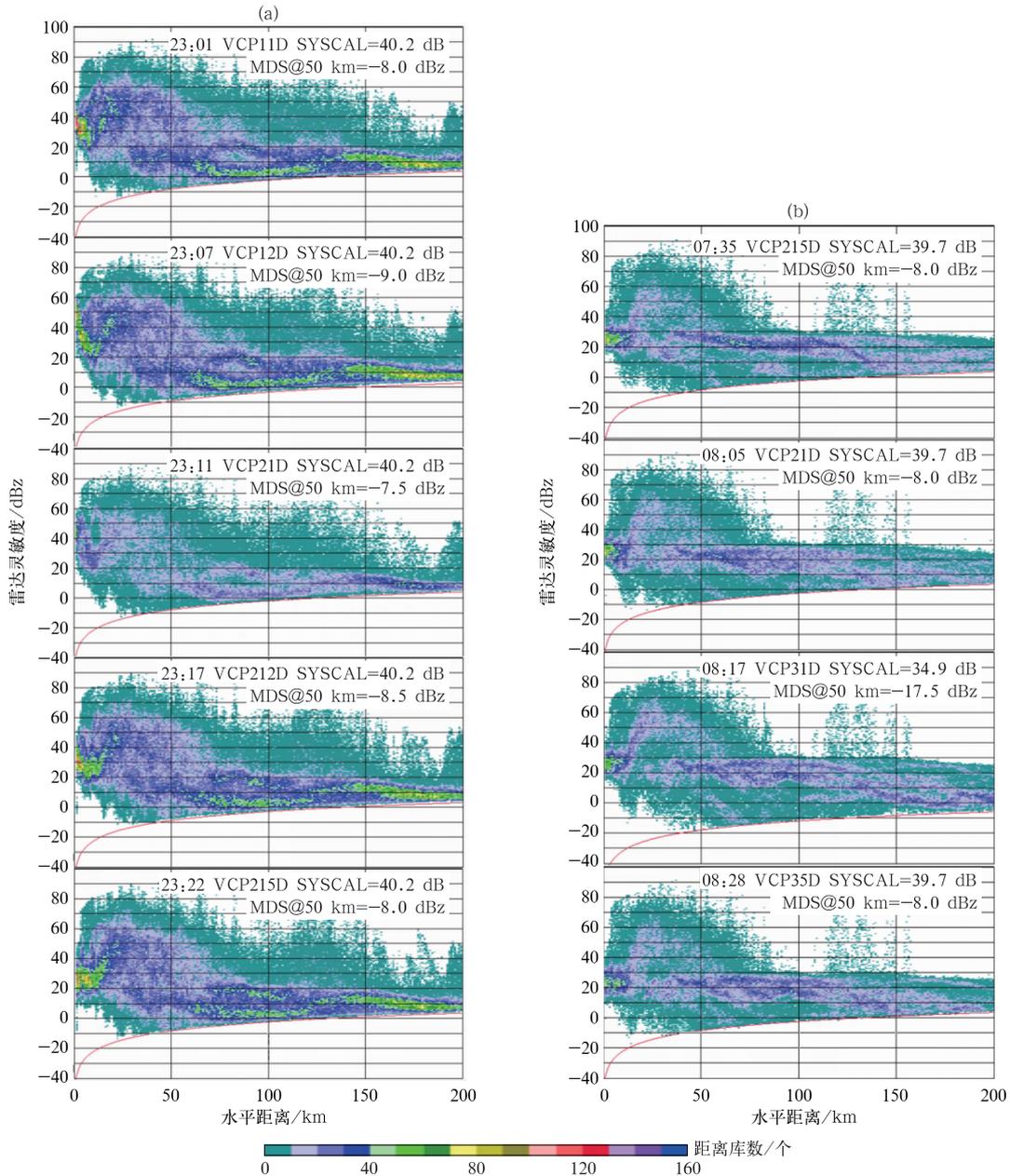
雷达灵敏度是指雷达在探测不同距离时可探测

到的最小信号。基数据雷达灵敏度分析是研究和分析雷达系统或模型的输出变化对系统参数或环境条件变化的敏感程度的方法,可以帮助评估雷达系统的性能、稳定性和可靠性,优化雷达系统的设计和参数选择。基数据雷达灵敏度数值越低,代表探测弱回波的能力越强,在业务上通常统计距离雷达 50 km

处的最小灵敏度数值。SYSCAL 是雷达线性通道增益标定目标常数,可以综合反映雷达对反射率因子测量的静态和动态测量偏置(秦建峰等,2017)。下文对 2021 年 9 月 10—11 日冷涡强对流和 2021 年 11 月 7—9 日暴雪 2 次性质不同的天气过程的探测试验资料进行灵敏度分析。

对 2021 年 9 月 10—11 日过程基数据雷达灵敏度进行分析,选取 9 月 10 日 23:01—23:22(北京

时,下同)基数据进行灵敏度计算,该时段依次使用 VCP11D、VCP12D、VCP21D、VCP212D、VCP215D 5 种体扫模式进行探测试验(图 1a)。5 种体扫模式在距离雷达 50 km 处的最小灵敏度数值分别为 -8.0、-9.0、-7.5、-8.5 和 -8.0 dBz,数值相差不大,VCP12D 灵敏度最高,其次是 VCP212D,再次是 VCP11D 和 VCP215D,VCP21D 灵敏度最低。该探测时段 SYSCAL 均为 40.2 dB,5 种探测模式



注:SYSCAL 为雷达常数,MDS@50 km 表示距离雷达 50 km 处的最小灵敏度。

图 1 2021 年(a)9 月 10 日和(b)11 月 8 日过程基数据雷达灵敏度分布

Fig. 1 Radar sensitivity distribution of the base data on (a) 10 September, and (b) 8 November 2021

在切换过程中对反射率的探测非常稳定。

对 2021 年 11 月 7—9 日过程基数据雷达灵敏度进行分析,选取 11 月 8 日 07:35—08:28 基数据进行灵敏度计算,该时段使用了 VCP215D、VCP21D、VCP31D、VCP35D 4 种体扫模式进行探测试验(图 1b)。4 种体扫模式在距离雷达 50 km 处的最小灵敏度数值分别为 -8.0 、 -8.0 、 -17.5 和 -8.0 dBz, VCP215D、VCP21D、VCP35D 灵敏度一致,而 VCP31D 灵敏度最高。VCP215D、VCP21D、VCP35D 的 SYSCAL 均为 39.7 dB,而 VCP31D 为 34.9 dB。该探测时段 VCP215D、VCP21D、VCP35D 探测模式在切换过程中对反射率的探测非常稳定,而 VCP31D 灵敏度和 SYSCAL 与其他模式存在差别的原因在于 VCP31D 使用的是长脉冲(脉冲宽度为 $4.5 \mu\text{s}$),其他模式使用的是短脉冲(脉冲宽度为 $1.57 \mu\text{s}$)。

图 1 中色块的不同表征了探测数据数量的差异。对比两次过程中的 VCP215D 和 VCP21D, VCP215D 探测仰角较多,使其探测到的数量明显多于 VCP21D,更多的数据可以更准确地反映出回波的形态和精细结构特征。

3.2 探测垂直结构差异

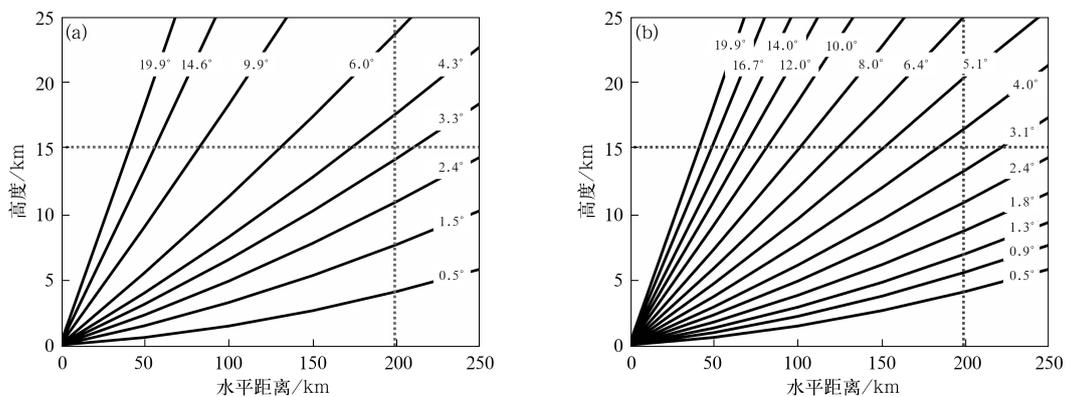
不同体扫模式雷达产品的差异主要表现在探测仰角疏密导致的垂直探测精度上的差别,同时还与采样数目、脉冲重复频率 PRF 有关。

雷达对风暴的探测效果与风暴相对雷达的位置直接相关(龚佃利等,2024;姚文等,2022)。以营口天气雷达为例,在近雷达处,雷达静锥区影响明显,

在距离雷达 25 km 处,垂直方向上最大可以获得 9 km 高度的数据(即 19.5° 仰角探测高度,下同),对于发展旺盛的强对流风暴,雷达仅能探测到其中低层结构特征。在距离雷达 50 km 处垂直方向上可以探测到 18 km 高度的数据,在该距离上雷达大部分扫描仰角都可以穿过对流风暴,可以较完整地反映出对流风暴的结构特征,高仰角可探测到风暴顶端,中、低仰角可以较好地反映出雷暴中低部的状态, VCP21D 在高层有探测间隙,但新模式 VCP12D、VCP212D、VCP215D 较多的探测仰角可以精确地展现风暴的结构特征,在径向速度产品上利于探测到中气旋或切变、辐合、辐散等信息。随着与雷达距离的增加,有效的探测仰角逐渐减少,在距离雷达 200 km 处,中、高仰角距地面高度远高于雷暴垂直伸展的高度,一般在该距离上仅有 4° 以下仰角具有有效探测(200 km 处 4.3° 仰角距地面约 17.7 km),新模式 VCP12D、VCP212D、VCP215D 低层仰角增多则展现出其探测优势,传统的 VCP11D、VCP21D、VCP31D 在该距离上仅有 2~3 个有效探测仰角(发展极为旺盛的对流单体可有 4~5 个有效探测仰角), VCP12D、VCP212D、VCP215D 在该距离上可有 4~6 个有效探测仰角(发展极为旺盛的对流单体可有 6~8 个有效探测仰角)。图 2 为 VCP21D 和 VCP215D 示意图,可以看到在垂直探测上近雷达处和远雷达处 VCP215D 的垂直探测效果均优于 VCP21D。

3.3 地物抑制能力差异

地物杂波分为由山脉、高塔等地物在雷达波束



注:虚线为距离雷达 200 km 处和距离地面 15 km 高度。

图 2 (a)VCP21D 和(b)VCP215D 示意图

Fig. 2 Schematic diagram of (a) VCP21D and (b) VCP215D

正常传播情况下造成的普通地物杂波和由特殊气象条件下雷达波束的超折射造成的异常地物杂波。营口天气雷达使用的滤波方法为二维多普勒点杂波过滤,即对多普勒数据使用的二维(3×3 方位和距离)点杂波过滤。

雷达基数据反射率产品包括滤波前反射率(数据类型为 dBT)和滤波后反射率(数据类型为 dBz)。可以用该模式 dBT 和 dBz 产品的差异做比较,即使用 0.5°仰角上 dBT 产品各反射率量级所占面积与 dBz 产品各反射率量级所占面积的差值代表滤波的效果,进而分析不同体扫模式的地物抑制能力差异。

地物杂波在不同季节、不同气象条件下均存在差异。图 3 为 2021 年 9 月 10 日、2023 年 6 月 10 日和 2021 年 11 月 8 日 3 次天气过程中各体扫模式的滤波效果(滤波前反射率与滤波后反射率面积的差值)对比情况。同一体扫模式在 3 个天气过程中滤波结果差异明显,而在同一过程中,不同体扫模式的滤波差异不大,变化趋势基本一致,不同体扫模式的地物抑制能力差异不大。

4 典型个例分析

VCP11D、VCP12D、VCP212D 为强对流模式, VCP21D、VCP215D 为一般降水模式, VCP31D、VCP35D 为晴空模式。下文结合典型个例,分析不同体扫模式产品差异,及产生差异的原因,分析新体扫模式的优越性。

4.1 2021 年 9 月 10 日强对流个例

2021 年 9 月 10—11 日,受东北冷涡影响,辽宁中东部地区出现强对流天气,最大降水量达 194.5 mm,

最大小时降水量为 79.1 mm,本溪、丹东、营口、辽阳地区局部出现 8~10 级瞬时大风,鞍山、丹东、营口、辽阳地区局部出现直径 3~5 cm 的大冰雹。

10 日 20:00 开始,对流回波在营口北部沿海生成并迅速加强成多单体风暴,部分多单体风暴向东北方向移动并加强为超级单体风暴,其先后影响营口、鞍山、辽阳地区,造成三地强风雹天气。23:01—23:22 连续使用 VCP11D、VCP12D、VCP21D、VCP212D、VCP215D 5 种体扫模式进行探测试验,选取上述超级单体风暴进行体扫模式探测产品适用性分析,图 4 为该单体 5 个体扫的雷达产品探测情况,其中第 1 行是单体在 0.5°仰角上的分布变化情况,第 2~5 行是沿 0.5°平面图上黄实线所示位置的剖面结构。

23:01 使用 VCP11D 体扫模式,回波主体距离雷达 35~55 km,模式 14 个探测仰角均探测到雷暴回波,其中 30 dBz 垂直伸展高度为 11 km(14.0°探测仰角),最高 2 个仰角(16.7°和 19.5°)均为弱回波,回波强度-5~5 dBz,是由旁瓣回波引起的“假尖顶”特征。

23:07 使用 VCP12D 体扫模式,回波主体距离雷达 35~55 km,模式 14 个探测仰角均探测到雷暴回波,其中 30 dBz 垂直伸展高度为 11 km(14.0°探测仰角),最高 2 个仰角(15.6°和 19.5°)回波强度-5~10 dBz。

23:11 使用 VCP21D 体扫模式,回波距离雷达 35~65 km,模式 9 个探测仰角均探测到雷暴回波,其中 30 dBz 垂直伸展高度为 11 km(9.9°探测仰角),最高 2 个仰角(14.6°和 19.5°)仅有少量弱回波,回波强度-5~5 dBz。在垂直剖面图上可以看到在远离雷达一侧有明显的回波缺口,是由雷达高

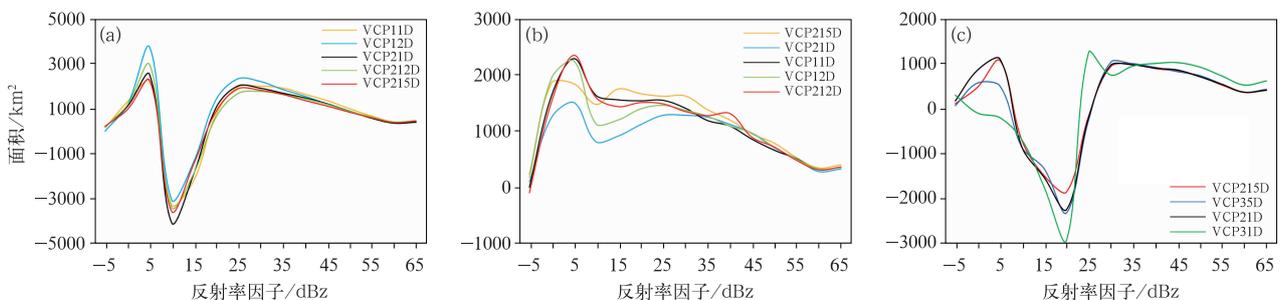
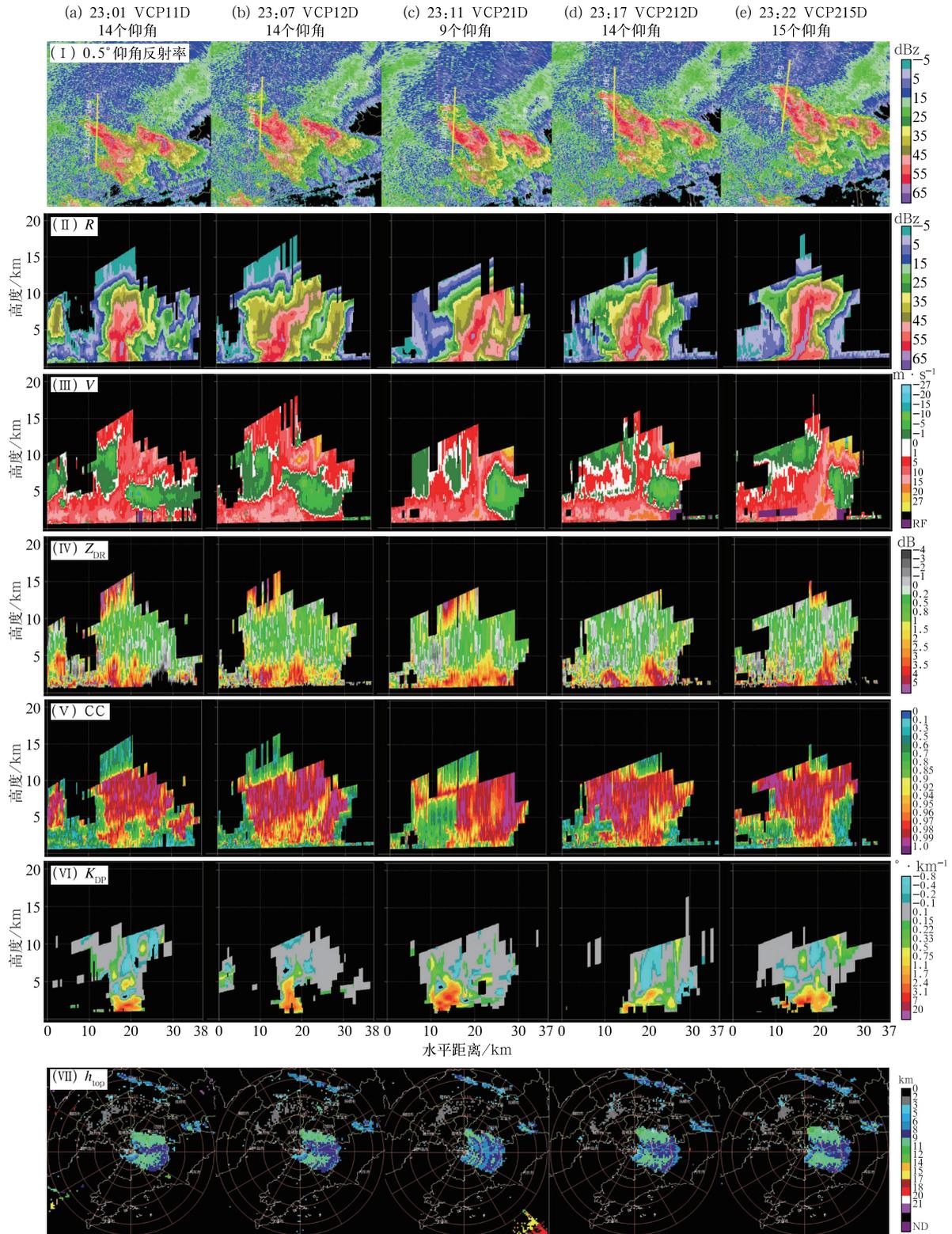


图 3 (a)2021 年 9 月 10 日,(b)2023 年 6 月 10 日,(c)2021 年 11 月 8 日 3 次天气过程各体扫模式的滤波情况

Fig. 3 Filtering results of different VCPs for three events on (a) 10 September 2021, (b) 10 June 2023, and (c) 8 November 2021



注:图 I 为 0.5°仰角产品,图 II ~ VI 为沿图 I 中黄色实线位置所作剖面,图 VII 为平面产品。

图 4 2021 年 9 月 10 日 23:01—23:22 连续 5 个不同体扫模式雷达产品

Fig. 4 Continuous radar products from five different volume coverage patterns between 23:01 BT and 23:22 BT 10 September 2021

层仰角波束间存在探测间隙而无法进行插值造成的,回波的垂直结构无法完全表现出来。同时由于该体扫模式仰角较少,在做垂直剖面插值时在 5~10 km 处出现了类似于“穹窿”的结构特征,与前后 4 个体扫模式比较判断可知该结构特征存在偏差。

23:17 使用 VCP212D 体扫模式,回波距离雷达 40~75 km,模式 14 个探测仰角均探测到雷暴回波,其中 30 dBz 垂直伸展高度为 12 km(10.0°探测仰角),最高 3 个仰角(12.5°、15.6°和 19.5°)回波强度-5~20 dBz。本时次 VCP212D 与上一时次 VCP21D 相比,虽然单体距离雷达更远,但因为探测仰角增加了 12.5°这一层,垂直探测的连续性更好,因此探测到的风暴垂直结构更加完整。

23:22 使用 VCP215D 体扫模式,回波距离雷达 45~77 km,模式 15 个探测仰角中除最顶层(19.5°)外均探测到雷暴回波,其中 30 dBz 垂直伸展高度为 12 km(10.0°探测仰角),次高 2 个仰角(14.0°和 16.7°)回波强度-5~5 dBz。该时次雷达探测到的风暴垂直结构依然比较完整。

对比 5 个体扫模式的反射率因子 R 平均径向速度 V 、差分反射率因子 Z_{DR} 、相关系数 CC 、差分传播相移率 K_{DP} 产品的垂直剖面,同样是扫描仰角多的体扫模式,产品连续性更好,尤其 VCP212D、VCP12D、VCP215D 在低层仰角更多,所展现的回波低层结构更加精细。

同样,较多的扫描仰角可以更好地反映出风暴顶高度,风暴顶高度是雷暴单体发展强度的特征指标之一。回波顶高 h_{top} 是反射率因子大于等于 18 dBz 所在的最高仰角的高度,由图 4 中 5 个时次的 h_{top} 可以看出,VCP21D 由于扫描仰角较少,呈现明显的“阶梯式”回波形态,探测到的 h_{top} 明显不连续且低于其他 4 种扫描模式,VCP215D 探测效果最佳。

4.2 2020 年 5 月 18 日江淮气旋大范围风雨个例

2020 年 5 月 17—18 日,受东北冷涡和江淮气旋共同影响,辽宁出现强风雨天气,东南部地区降大雨到暴雨,局地降大暴雨,并伴有强对流天气。最大降水量达 167.5 mm,最大小时降水量为 43.4 mm,最大瞬时风力 13 级。在本次过程中使用 VCP215D 进行体扫试验,其中 18 日 13:47 使用 VCP21D,14:00 使用 VCP215D,图 5 所示为 2 个体扫模式的组合反射率 CR (半径 230 km)和 0.5°仰角平均径向

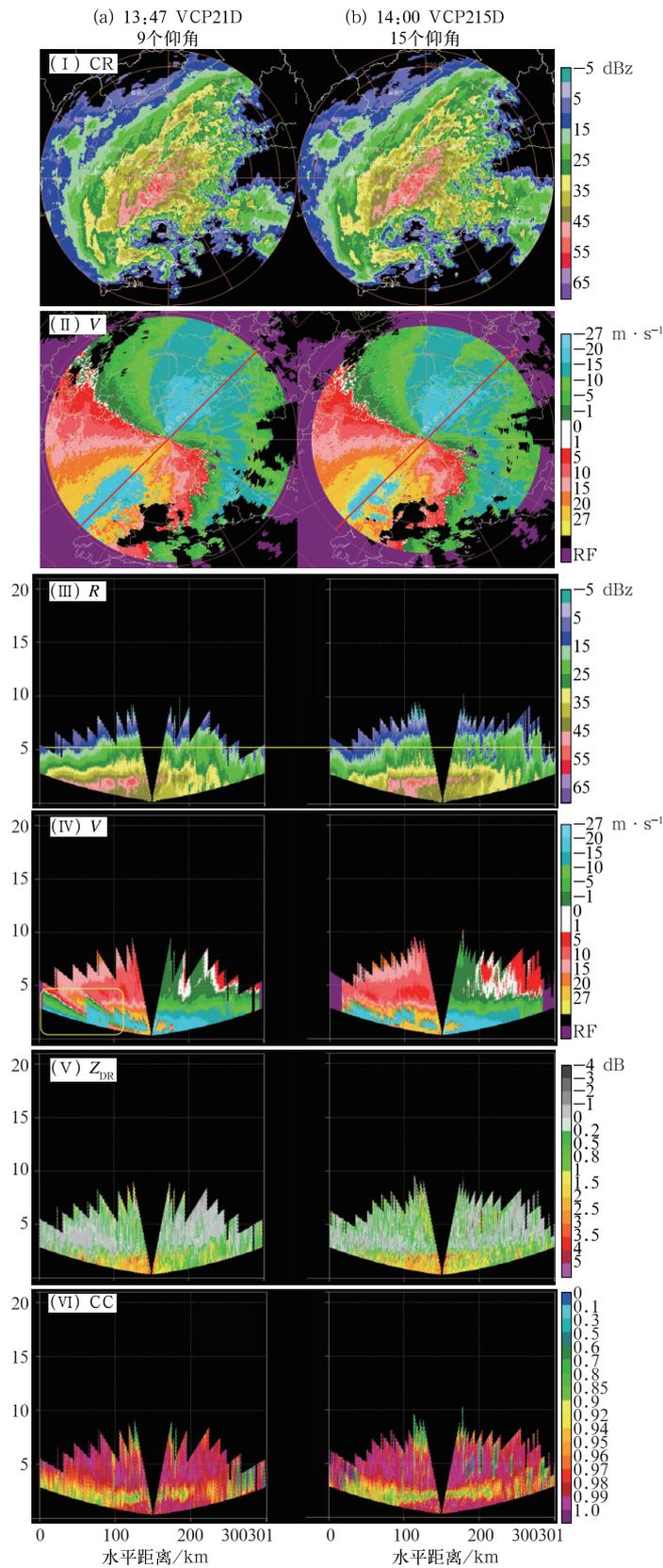
速度(半径 150 km),以及沿 0.5°仰角平均径向速度上红线所示位置所做的 R 、 V 、 Z_{DR} 、 CC 的剖面图,该时段以稳定性降水为主,2 个时次回波形态相差不大。以下对 13:47 VCP21D 模式产品和 14:00 VCP215D 模式产品进行对比分析。

组合反射率产品反映了整个体扫的所有仰角中的最大反射率因子值。在 VCP21D 的组合反射率产品上,围绕雷达原点可以明显看到由 0°C 层亮带所产生的圆环,圆环上数值明显高于周边,而 VCP215D 的组合反射率产品上圆环情况有所改善,回波色斑更为均匀,原因在于 VCP215D 探测仰角多(15 个),对 0°C 层亮带的探测更为准确。在反射率的剖面图上同样可以看出,VCP215D 探测到的回波垂直梯度变化沿半径上分布较均匀,而 VCP21D 存在锯齿结构(图中黄实线所示为同一高度),即因仰角较少(9 个)造成的插值误差。

VCP21D 在 0.5°仰角上使用的速度脉冲重复频率 PRF 为 1014 s^{-1} ,可以探测到的最大不模糊速度为 $26.38 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$;VCP215D 在 0.5°仰角上使用的 PRF 为 1094 s^{-1} ,可以探测到的最大不模糊速度为 $28.47 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ (二者可以在色斑上看到差别,VCP215D 使用了最两端的色标)。在 2 个时次 0.5°仰角的平均径向速度图上可以看到在雷达的西南象限上均存在大风速核(垂直高度上大于 $20 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的速度区位于 3 km 以下),并出现明显的速度模糊,在对应的平均径向速度的垂直剖面图上雷达对速度模糊区域的边缘都进行了错误的插值(即在正负速度之间赋值了零速度的过渡带),但 VCP215D 因为低层仰角较多(0.5°、0.9°、1.3°、1.8°),整体形态较均匀,插值错误区域不明显,整体上能够较好地反映出径向速度的垂直分布状态;而 VCP21D 在低层仰角较少(0.5°、1.5°),速度插值出现明显的错误,且在距离雷达 50~150 km 处(如图中黄框所示)出现锯齿状,表现失真。在差分反射率因子和相关系数的剖面图上也存在因探测仰角少导致的插值失真情况。

4.3 2021 年 11 月 8 日暴雪个例

2021 年 11 月 7—9 日,受东北冷涡及地面气旋强烈发展影响,辽宁省出现历史罕见的特大暴雪、雨雪冰冻、寒潮、大风天气。全省 62 个国家气象观测站平均降水量 41.1 mm,有 39 个气象站出现特大暴雪,雨雪过程伴有 11 级瞬时大风、16°C 以上的强降温、冰冻和弱雷电。本次过程中使用了 VCP215D、



注：图 I 为平面产品，图 II 为 0.5° 仰角产品，图 III~VI 为沿图 II 中红色实线位置所作剖面；黄线和黄框为钜齿状结构。

图 5 2020 年 5 月 18 日 (a)13:47, (b)14:00 使用 2 个不同体扫模式雷达产品

Fig. 5 Radar products from two different VCPs at (a) 13:47 BT and (b) 14:00 BT 18 May 2020

VCP21D、VCP31D、VCP35D 4 种体扫模式进行探测试验,下文对 8 日 07:35 VCP215D、07:50 VCP35D、08:05 VCP21D、08:17 VCP31D 雷达产品进行分析。

该时段系统发展比较稳定,回波形态变化不大,可比性比较强。4 种体扫模式中,VCP215D、VCP21D、VCP35D 使用的是短脉冲,VCP31D 使用的是长脉冲,图 6 是 4 种体扫模式 0.5°仰角各等级反射率因子面积对比。统计强度大于-5 dBz 的探测数据,从图中可以看出,VCP215D、VCP21D、

VCP35D 数据分布趋势基本一致,VCP31D 在弱回波区域(-5~5 dBz)探测到的数据量明显偏多,原因在于 VCP31D 脉冲波束驻留时间长,采样数据多。同时 VCP31D 探测到的强回波(35~65 dBz)数据量也高于其他模式,地物杂波在 VCP31D 产品上更明显。

对比 0.5°仰角反射率(图 7),同样可以看出 VCP31D 回波面积明显大于其他模式,可以更好地描绘出云系的轮廓。在反射率的垂直剖面上(图 7),

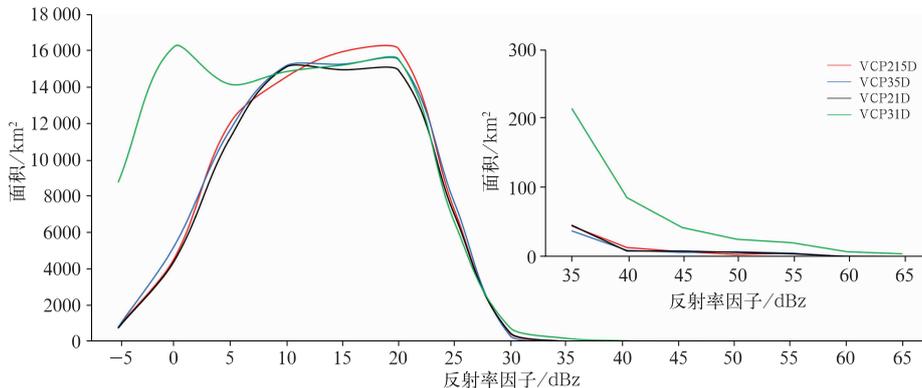
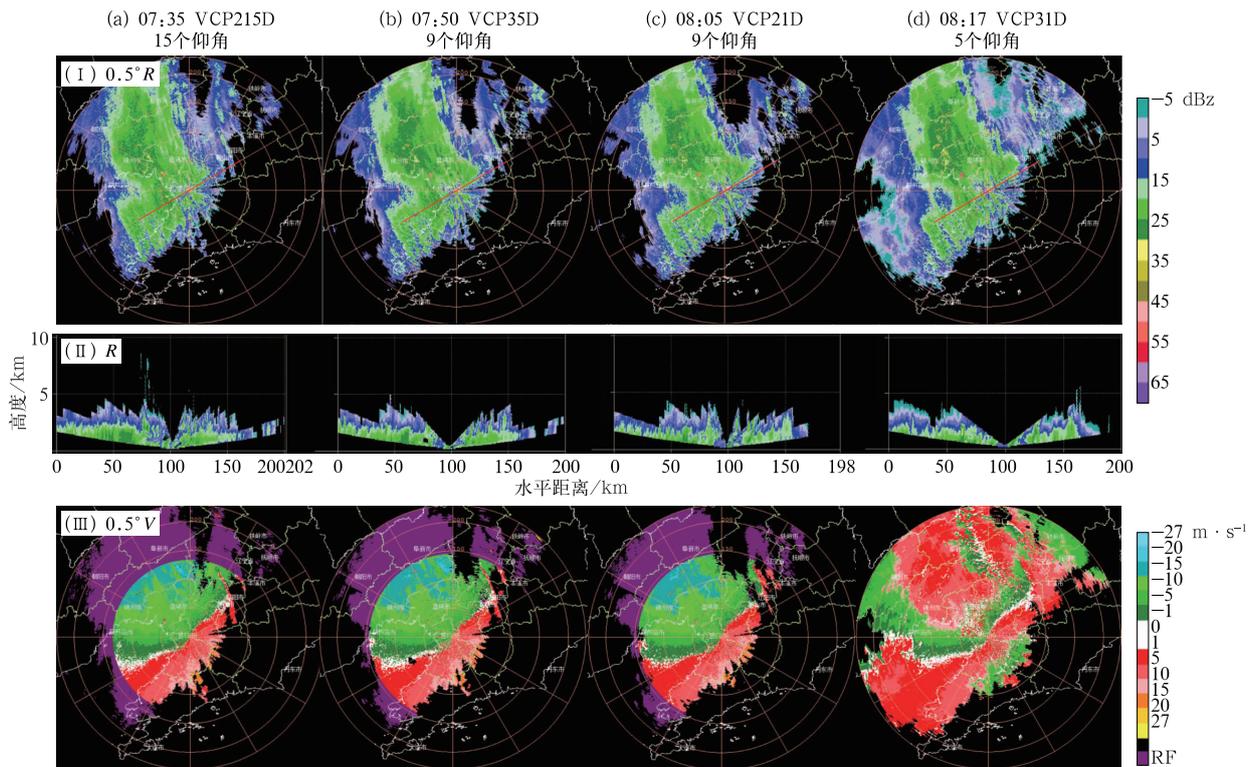


图 6 2021 年 11 月 8 日 07:35—08:17 使用 4 个不同体扫模式 0.5°仰角各等级反射率因子面积对比
Fig. 6 Area comparison of reflectivity factors at 0.5° elevation for four different VCPs between 07:35 BT and 08:17 BT 8 November 2021



注:图 I,图 III 为 0.5°仰角产品;图 II 为沿图 I 中红色实线位置所作剖面。

图 7 2021 年 11 月 8 日 07:35—08:17 使用 4 个不同体扫模式雷达产品
Fig. 7 Radar products from four different VCPs between 07:35 BT and 08:17 BT 8 November 2021

VCP31D 模式最高仰角为 4.5° , 其回波静锥区范围最大; 其次是 VCP35D 模式, 其最高仰角为 6.4° ; VCP215D 和 VCP21D 模式最高仰角均为 19.5° , 静锥区范围最小。从回波连续上看, VCP215D 模式效果最好。

在平均径向速度图上, 各模式在不同仰角上使用的脉冲重复频率不同, 其最大不模糊速度也不相同。以 0.5° 仰角为例, VCP21D 和 VCP35D 的最大不模糊速度为 $26.38 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 有效探测距离为 148 km ; VCP215D 的最大不模糊速度为 $28.47 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 有效探测距离为 137 km ; VCP31D 使用的速度脉冲重复频率 PRF 为 446 s^{-1} , 可以探测到得最大不模糊速度仅为 $11.6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 有效探测距离为 333 km 。从 0.5° 仰角径向速度图(图 7 III) 可以看到, VCP31D 平均径向速度范围明显较其他模式大很多, 但也出现了明显得速度模糊, 甚至出现二次模糊。

VCP35D 是在 VCP31D 的基础上进行升级, 对二者进行比较, VCP35D 探测到的数据范围略小, 弱回波探测能力略差, 但扫描时间短(较 VCP31D 缩短 3 min), 扫描仰角多, 最大不模糊速度大, 在晴空回波中使用优势明显。

5 结 论

针对体扫模式 VCP21D 在 5° 仰角以下垂直方向上采样较少及附近有探测空隙的问题, 营口市气象局借鉴 WSR-88D 的体扫模式, 建立了 VCP12D、VCP212D、VCP215D、VCP35D 4 种区别于现在业务模式的新体扫模式, 并利用营口双偏振天气雷达进行业务试验, 对试验产品进行对比分析, 得到如下结论:

(1) 4 种新体扫模式在 50 km 处最小灵敏度和数据质量与 VCP21D 基本一致, 地物抑制能力相当, 满足业务运行指标, 可以在业务种应用。

(2) VCP12D 和 VCP212D 较 VCP11D 增加了低层的垂直分辨率, 可以获得距离雷达 100 km 之外更为详细的探测数据, 同时扫描时间从 5 min 缩短到 4 min , 对于发展较强的强对流风暴探测效果更好。VCP12D 和 VCP212D 探测周期短、仰角多, 可以应用在强对流天气过程中。

(3) VCP215D 较 VCP21D 增加 6 层探测仰角, 可以获得更为连续的垂直探测产品, 在剖面图上可

以展示更为完整和精细的回波结构特征, 可以更精确地计算风暴顶高度, 同时探测时间与 VCP21D 相当, 优越性明显。VCP215D 可以代替 VCP21D 应用在强对流天气及大范围雨雪天气过程中。

(4) VCP35D 较 VCP31D 探测到的数据范围略小, 但扫描时间短、扫描仰角多, 产品的时空分辨率更高, 探测优越性明显。

(5) VCP12D、VCP212D、VCP215D、VCP35D 较原有模式相比, 最大不模糊速度均有所提升, 其中 VCP12D、VCP212D、VCP215D 高层(10° 以上) 最大可以达到 $33.36 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, VCP212D、VCP215D 低层($0.5^\circ \sim 1.3^\circ$) 提升到 $28.47 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, VCP35D 整层提升到 $26.38 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

需要指出的是, 为保证正常业务探测质量, 同时强化不同产品的对比性, 新体扫模式运行试验采用连续切换新旧体扫模式的方式, 即在同一天气过程中选取某一时段进行体扫模式连续切换探测, 获取比较连续的对比资料。对新体扫模式做更全面的评估, 还应使用同一体扫模式对某一天气过程进行连续完整的探测, 同时对新体扫模式与现有雷达算法的匹配上也应进一步开展研究。

参考文献

- 陈大任, 陈刚, 吴峥嵘, 2010. 基于体扫模式的组合 RHI 自动实现算法[J]. 气象, 36(2): 109-112. Chen D R, Chen G, Wu Z R, 2010. Composite RHI auto-implementation algorithm based on volume scan mode[J]. Meteor Mon, 36(2): 109-112(in Chinese).
- 龚佃利, 朱君登, 林曲凤, 等, 2024. 一次超级单体引发的秋季特大冰雹和龙卷雷达探测分析[J]. 气象, 50(5): 561-576. Gong D L, Zhu J J, Lin Q F, et al, 2024. Radar observation analysis of severe hailstorm and tornado caused by a supercell in autumn[J]. Meteor Mon, 50(5): 561-576(in Chinese).
- 刘应军, 顾松山, 周雨华, 等, 2006. 新一代天气雷达体扫模式的比较分析[J]. 气象, 32(1): 44-50. Liu Y J, Gu S S, Zhou Y H, et al, 2006. Comparison of CINRAD/SA volume coverage patterns on algorithms output[J]. Meteor Mon, 32(1): 44-50(in Chinese).
- 秦建峰, 谢晓宇, 涂明, 等, 2017. 基于 SYSCAL 方法的天气雷达反射率因子在线标定技术[J]. 气象科技, 45(6): 962-967. Qin J F, Xie X Y, Tu M, et al, 2017. SYSCAL-based on-line calibration technique of weather radar reflectivity factor[J]. Meteor Sci Technol, 45(6): 962-967(in Chinese).
- 汪章维, 陈昊, 袁圣, 等, 2020. 新一代双偏振天气雷达(CINRAD/SAD)精细化探测技术[J]. 气象科技, 48(3): 331-336. Wang Z W, Chen H, Yuan S, et al, 2020. Fine detection technology of new generation dual polarization weather radar(CINRAD/SAD)[J]. Meteor Sci Technol, 48(3): 331-336(in Chinese).
- 杨金红, 陈大任, 王曙东, 2013. 改进新一代天气雷达低层探测能力研

- 究[J]. 气象, 39(4):494-499. Yang J H, Chen D R, Wang S D, 2013. Research on improving CINRAD detection ability in lower layers[J]. Meteor Mon, 39(4):494-499(in Chinese).
- 杨金红, 高玉春, 柴秀梅, 等, 2010. 新一代天气雷达体扫模式研究[C]//第 27 届中国气象学会年会雷达技术开发与应用分会场论文集. 北京: 中国气象学会. Yang J H, Gao Y C, Chai X M, et al, 2010. Research on the volume coverage pattern of new generation weather radar[C]//Proceedings of the 27th Annual Conference of the Chinese Meteorological Society on Radar Technology Development and Application. Beijing: Chinese Meteorological Society(in Chinese).
- 姚文, 张晶, 余清波, 等, 2022. 辽河三角洲湿地鸟类活动的双偏振天气雷达回波特征[J]. 气象, 48(9):1162-1170. Yao W, Zhang J, Yu Q B, et al, 2022. Dual-polarization weather radar echo characteristics of avian activities in the Liaohe River Delta Wetland [J]. Meteor Mon, 48(9):1162-1170(in Chinese).
- 俞小鼎, 王秀明, 李万莉, 等, 2020. 雷暴与强对流临近预报[M]. 北京: 气象出版社: 415. Yu X D, Wang X M, Li W L, et al, 2020. Nowcasting of Thunderstorm and Strong Convection[M]. Beijing: China Meteorological Press: 415(in Chinese).
- 俞小鼎, 姚秀萍, 熊廷南, 等, 2006. 多普勒天气雷达原理与业务应用[M]. 北京: 气象出版社: 314. Yu X D, Yao X P, Xiong T N, et al, 2006. Doppler Weather Radar Principle and Business Application[M]. Beijing: China Meteorological Press: 314(in Chinese).
- 张沛源, 杨洪平, 胡绍萍, 2008. 新一代天气雷达在临近预报和灾害性天气警报中的应用[J]. 气象, 34(1):3-11. Zhang P Y, Yang H P, Hu S P, et al, 2008. Applications of new generation weather radar to nowcasting and warning of severe weather[J]. Meteor Mon, 34(1):3-11(in Chinese).
- 张深寿, 童以长, 邓志, 2006. 高山 CINRAD/SA 降水体扫模式改进研究[C]//中国气象学会雷达气象学与气象雷达委员会第二届学术年会文集. 合肥: 中国气象学会雷达气象学与气象雷达委员会. Zhang S S, Tong Y C, Deng Z, 2006. Improvement of precipitation volume coverage pattern in alpine CINRAD/SA [C] // Proceedings of the Second Annual Conference of Radar Meteorology and Meteorological Radar Committee of the Chinese Meteorological Society. Hefei: Radar Meteorology and Meteorological Radar Committee of the Chinese Meteorological Society(in Chinese).
- Brown R A, Wood V T, Steadham R M, et al, 2005. New WSR-88D volume coverage pattern 12: results of field tests[J]. Wea Forecasting, 20(3):385.
- Cho J Y N, Kurdzo J M, Bennett B J, et al, 2022. Impact of WSR-88D intra-volume low-level scans on severe weather warning performance[J]. Wea Forecasting, 37(7):1169-1189.
- Chrisman J N, 2013. Dynamic scanning[EB/OL]. <https://www.roc.noaa.gov/WSR88D/PublicDocs/NNOW/NNow22c.pdf>.
- Chrisman J N, 2014. The continuing evolution of dynamic scanning[EB/OL]. <http://www.roc.noaa.gov/WSR88D/PublicDocs/NNOW/NNow23a.pdf>.
- Chrisman J N, 2016. Mid-volume Rescan of Low-level Elevations (MRLE): a new approach to enhance sampling of Quasi-Linear Convective Systems (QLCSs)[EB/OL]. https://www.roc.noaa.gov/WSR88D/PublicDocs/NewTechnology/DQ_QLCS_MRLE_June_2016.pdf.
- Crum T D, Alberty R L, Burgess D W, 1993. Recording, archiving, and using WSR-88D data[J]. Bull Amer Meteor Soc, 74(4):645-653.
- Crum T D, Saffell R E, Wilson J W, 1998. An update on the NEXRAD program and future WSR-88D support to operations[J]. Wea Forecasting, 13(2):253-262.
- Kingfield D M, French M M, 2022. The influence of WSR-88D intra-volume scanning strategies on thunderstorm observations and warnings in the dual-polarization radar era: 2011-20 [J]. Wea Forecasting, 37(2):283-301.
- Maddox R A, Zaras D S, MacKeen P L, et al, 1999. Echo height measurements with the WSR-88D: use of data from one versus two radars[J]. Wea Forecasting, 14(3):455-460.
- ROC, 2015. WSR-88D Volume Coverage Pattern (VCP) improvement initiatives [EB/OL]. https://www.roc.noaa.gov/WSR88D/PublicDocs/NewTechnology/New_VCP_Paradigm_Public_Oct_2015.pdf.
- Witt A, 1997. Variations in algorithm output for the same storm viewed by different WSR-88Ds[C] // Proceedings of the 28th Conference on Radar Meteorology. Boston: American Meteorological Society:497-498.
- Zittel W D, 2019. Theory and concept of operations for multi-PRF dealiasing algorithm's VCP 112[EB/OL]. https://www.roc.noaa.gov/WSR88D/PublicDocs/NewTechnology/Theory_ConOps_VCP112.pdf.
- Zittel W D, Wiegman T, 2005. VCP 121 and the multi-PRF dealiasing algorithm[EB/OL]. <https://www.roc.noaa.gov/wsr88d/PublicDocs/NNOW/NNwinter05d.pdf>.

(本文责编:俞卫平)