

X波段双偏振雷达在七台河“冰超”专项气象服务中的应用成效分析

张嘉欣, 毕 然, 尹贺鑫, 刘文杰, 李凯悦

七台河市气象局气象台, 黑龙江 七台河

收稿日期: 2026年8月2日; 录用日期: 2026年9月1日; 发布日期: 2026年9月9日

摘 要

首届黑龙江省冰雪运动超级联赛(简称“冰超”)七台河赛区赛事周期自2025年12月上旬持续至2026年2月末, 跨度近两个月, 覆盖短道速滑、雪地徒步、冰雪趣味赛事等百余场群众冰雪活动, 赛场分布于桃山湖、冬奥公园、冠军馆等城市全域, 赛事气象保障需求复杂、精细化监测难度突出。七台河市气象局依托本地X波段双偏振天气雷达, 弥补全省S波段组网雷达低空、局地监测盲区, 凭借高时空分辨率探测能力, 实现赛事区域中小尺度降雪、冻雨、雨夹雪、局地阵雪等复杂雨雪相态精准识别。本文结合冰超专项气象保障实战案例, 阐述X波段双偏振雷达核心技术优势, 梳理其在冰雪赛事精细化天气监测、雨雪相态判识、短临预警、赛事调度服务中的应用成果, 总结寒地冬季冰雪赛事雷达气象保障技术经验, 为同类冰雪赛事专项气象服务提供技术参考。

关键词

X波段双偏振雷达, 冰雪赛事, 冰超, 雨雪相态识别, 短临监测, 气象服务

Analysis on Application Effect of X-Band Dual-Polarization Weather Radar in Special Meteorological Service for Qitaihe “Ice-Super League”

Jiaxin Zhang, Ran Bi, Hexin Yin, Wenjie Liu, Kaiyue Li

Meteorological Observatory, Qitaihe Meteorological Bureau, Qitaihe Heilongjiang

Received: August 2, 2026; accepted: September 1, 2026; published: September 9, 2026

文章引用: 张嘉欣, 毕然, 尹贺鑫, 刘文杰, 李凯悦. X波段双偏振雷达在七台河“冰超”专项气象服务中的应用成效分析[J]. 气候变化研究快报, 2026, 15(5): 972-977. DOI: 10.12677/ccrl.2026.155103

Abstract

The Qitaihe Division of the 1st Heilongjiang Provincial Ice-Snow Sports Super League (“Ice-Super League”) was held from early December 2025 to the end of February 2026, spanning nearly two months. More than 100 mass ice-snow events were organized, covering short-track speed skating, snow hiking, ice-snow fun games and other activities. Competition venues were spread across urban locations including Taoshan Lake, Winter Olympic Park and Champion Museum. The event imposed complex meteorological support requirements and presented prominent challenges for refined meteorological monitoring. Leveraging the local X-band dual-polarization weather radar, Qitaihe Meteorological Bureau filled the low-altitude and local-scale monitoring gaps of the provincial S-band radar network. Benefiting from its high spatiotemporal resolution detection capability, the radar enables accurate identification of complex precipitation phases such as meso- and micro-scale snowfall, freezing rain, sleet and local snow showers over the event area. Based on the practical case of meteorological support for the Ice-Super League, this paper illustrates the core technical advantages of the X-band dual-polarization radar, summarizes its application outcomes in refined weather monitoring, precipitation-phase discrimination, short-range nowcasting and early warning, as well as event scheduling services for ice-snow events. Technical experiences of radar-based meteorological support for winter ice-snow events in cold regions are concluded, providing technical references for specialized meteorological services of similar ice-snow events.

Keywords

X-Band Dual-Polarization Weather Radar, Ice-Snow Events, Ice-Super League, Precipitation-Phase Identification, Short-Range Nowcasting Monitoring, Meteorological Services

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

七台河市素有“奥运冠军之城”美誉，冰雪运动产业为城市核心特色产业，首届黑龙江省冰雪运动超级联赛是全省规格最高、持续时间最长、参与群众最多的全域冰雪品牌赛事，七台河作为核心分赛区承担近百场竞技与群众冰雪活动，赛事周期长达 60 余天，贯穿隆冬、立春节气，冬季气温低、冷暖空气交替频繁，局地雨雪转换、吹雪、冻雨、道路结冰、弱对流降雪多发，直接威胁赛道安全、参赛人员人身安全与赛事正常开展。

传统省级 S 波段组网雷达探测半径大、适合大范围环流监测[1]，但受七台河东部、南部低山丘陵地形遮挡，城区及核心赛场 1 km 以下低空存在明显监测盲区，且空间分辨率偏低，无法分辨城区尺度局地弱降雪、雨雪相态细微转换，难以满足冰雪赛事分钟级精细化短临保障需求。X 波段双偏振雷达波束窄，体扫周期短，可精细化捕捉城市中小尺度云系、边界层降雪系统，同时依靠水平反射率因子、差分反射率、差分传播相移率、相关系数四大偏振参量，区分雪晶、干雪花、湿雪、雨夹雪、雨滴、小冰雹等不同水成物粒子，解决寒地冬季雨雪混淆、相态误判的业务痛点。

冰超赛事保障期间，七台河气象台将 X 波段双偏振雷达作为核心探测设备，联动自动气象站、微波辐射计、探空资料构建立体冰雪监测体系，全程支撑赛事逐 3 小时精细化预报、0~2 小时短临预警、极端天气赛事调度会商。本文基于近两个月完整雷达观测数据与实战服务案例，系统分析该雷达在冰雪赛事

专项保障中的应用价值、技术成效与业务改进方向。

2. 七台河赛区冰超赛事气象保障背景与探测短板

2.1. 冰超赛事保障基本概况

2025 年 12 月 10 日~2026 年 2 月 28 日, 七台河赛区同步开展专业短道速滑联赛、全市万人雪地徒步、雪地足球、冰雪嘉年华等系列活动, 赛场分散于市区桃山湖环湖赛道、冬奥室外冰场、仙洞山环山步道、市中心广场四大片区, 赛道跨度 20 km, 多露天无遮蔽场地, 气象敏感因素突出, 赛事组委会要求气象部门提供分钟级短临监测、精准相态预判、提前 30 分钟预警, 一旦预判冻雨、强降雪、冰粒, 立即推送赛事延期、赛道清雪、人员疏散建议, 气象保障压力大、精细化要求极高。

2.2. 原有探测体系存在的核心短板

保障初期仅依靠全省 S 波段组网雷达与地面自动站, 暴露明显局限性[2] [3]:

1) 地形遮挡低空盲区: 七台河周边丘陵地形阻挡 S 波段雷达低层波束, 城区赛场 0.5~1.5 km 高度降雪云系回波残缺, 局地阵雪经常出现“地面已降雪、雷达无回波”的漏监问题;

2) 相态识别能力不足: 常规多普勒雷达仅依靠反射率无法区分雨、雪、雨夹雪, 冬季 0℃层附近混合相态频繁误判, 多次出现预报降雪实际降雨、预判小雨实际冻雨的偏差;

3) 时空分辨率偏低: S 波段雷达单个体扫耗时 6 分钟, 距离分辨率 1 km 以上, 无法捕捉环湖赛道、环山步道等小范围局地突发降雪, 预警提前量不足 15 分钟;

4) 弱粒子识别失效: 冬季雪花、冰晶反射率普遍低于 30 dBZ, 常规雷达对弱降雪、冰粒分辨能力差, 难以提前捕捉降雪云系初生信号。

为补齐短板, 七台河市气象局启用城区部署 X 波段固态双偏振雷达, 划定冰超核心赛场为重点精细扫描区域, 定制冬季冰雪专项观测模式, 全程支撑两个月赛事气象保障。

3. X 波段双偏振雷达冬季冰雪探测核心技术优势

本次投入保障的 X 波段双偏振雷达专为寒地气象观测优化, 结合冬季冰雪粒子物理特征定制扫描参数, 对比传统雷达具备四大核心优势[2] [3], 完美适配冰超赛事精细化监测需求。

3.1. 高时空分辨率, 消除赛场低空监测盲区

雷达最大有效探测半径 100 km, 覆盖七台河全域所有冰超赛场; 针对桃山湖、冬奥冰场等核心区域设置加密仰角扫描模式, 低层 0.5°、1.0°仰角高频次循环扫描。相较于 S 波段雷达, 能够完整捕捉 1 km 以下边界层弱降雪云团, 彻底解决丘陵地形造成的低层回波缺失问题, 实现露天赛道全域无死角实时监控。

3.2. 弱粒子敏感, 提前捕捉降雪初生信号

冬季冰雪粒子尺寸小、反射率偏低, 常规多普勒雷达对 20 dBZ 以下弱回波识别能力差。该 X 波段雷达接收机灵敏度提升, 可稳定识别 10 dBZ 以上冰晶、雪花云系, 能在降雪落地前 40~60 分钟捕捉上游云系发展、移动路径, 大幅延长冰雪天气预警提前量。针对冰超户外徒步、环湖长跑等长时间户外活动, 可提前预判降雪抵达赛道的精准时段, 为赛事调度预留充足缓冲时间。

4. X 波段双偏振雷达在冰超专项气象服务中的实战应用成果

冰超赛事近两个月保障周期内, 七台河气象台将 X 波段双偏振雷达作为短临预报核心支撑, 贯穿天

气监测、相态判别、预警发布、赛事调度全流程，形成多项可复制、可推广的冰雪赛事雷达气象服务成果。

4.1. 典型案例 1：仙洞山局地短时强阵雪预警

2026 年 1 月 17 日上午，仙洞山环山步道开展千人雪地徒步赛事。赛事区域东侧为低山丘陵，受地形遮挡，省级 S 波段组网雷达 0.5~1.5 km 低层波束被山体阻挡，仅能观测到高空大范围层云(如图 1)，无低层降雪回波信号，无法预判山区局地对流降雪。而本地 X 波段雷达启用 0.5°、1.0°加密低层仰角扫描，凭借窄波束、高距离分辨率优势，完整捕捉到仙洞山山腰 1 km 以下新生对流雪团：回波强度 30~38 dBZ，呈块状局地分布，水平尺度仅 3~5 km，预判 1 小时内环山步道出现短时强阵雪，能见度快速降至 800 m 以下。预报员提前 45 分钟发布局地降雪短时临近预警，同步推送赛事组委会。组委会立刻调整徒步行进路线，缩短环山危险路段赛程，安排应急车辆沿途待命。实况印证：10:20~10:50 仙洞山步道出现短时阵雪，山区能见度骤降，城区平地无降雪。同期 S 波段雷达全程无低层降雪回波，若仅依靠省级组网雷达，将完全漏报本次局地阵雪，极易引发山区徒步人员迷路、滑倒等安全事故；X 波段雷达消除地形低空盲区，高时空分辨率精准捕捉小尺度局地冰雪系统，完美适配山地分散型冰雪赛事监测需求。

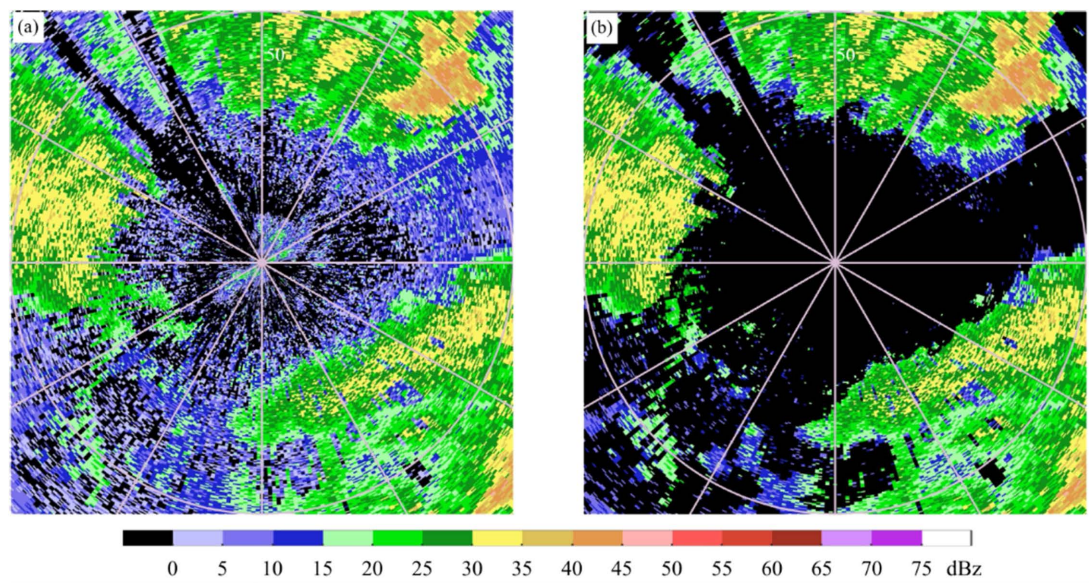


Figure 1. Comparison of reflectivity between X-band radar (a) and S-band radar (b)
图 1. X 波段雷达(a)与 S 波段雷达(b)反射率对比图

4.2. 雨雪相态精准识别，提前预冷冻雨、路面结冰风险

冻雨、雨夹雪是冰超赛事最高风险气象要素，路面薄冰极易造成运动员摔伤，也是冬季预报难点。依托 X 波段双偏振雷达融化层亮带、偏振参量垂直廓线，预报员可精准判断 0℃融化层高度、地面相态类型，区分“纯雪、雨夹雪、冻雨”三类高影响天气[4]-[6]。

典型案例 2：冻雨相态判别案例

2026 年 2 月 4 日立春节大型雪地徒步活动，前期气温小幅回升，700 hPa 暖湿气流北上，冷暖层叠置易产生冻雨。常规 S 波段雷达仅显示大范围均匀层状云回波，单一反射率因子无法区分云层内部粒子相态，预报员难以判断近地面是否会形成冻雨；X 波段雷达垂直廓线清晰显示 1 km 高度存在完整融化亮带(如图 2)，差分反射率 ZDR 突升至 3.2 dB，差分传播相移率 KDP 持续增大，相关系数 phv 降至 0.92，

全套偏振参量匹配冻雨粒子特征(上层融化雨滴、近地面低温冻结)。预报员结合地面气温、探空资料综合研判,预判当日午后 13~15 时城区环湖赛道出现冻雨,路面快速结冰。气象台提前 2 小时发布道路结冰黄色预警,同步推送组委会,组委会紧急调整活动时间至上午 10 点前结束,提前对环湖赛道撒布融雪防滑物资,成功规避冻雨安全风险。

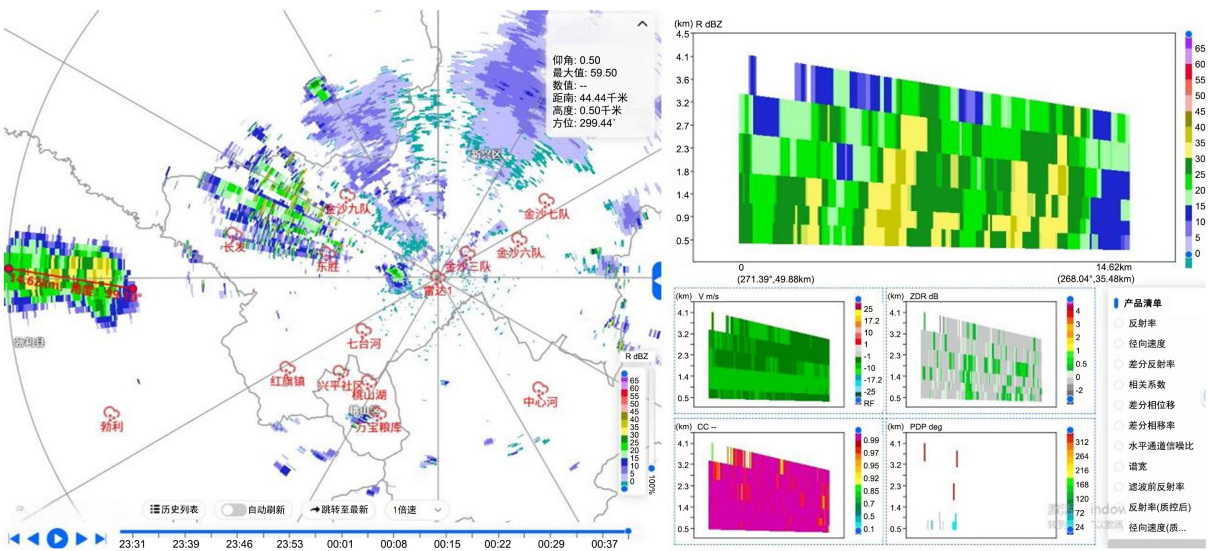


Figure 2. X-band radar reflectivity map
图 2. X 波段雷达反射率图

5. 应用过程中存在的问题与优化改进措施

5.1. 现存技术短板

- 1) X 波段电磁波雨雪衰减效应: 强降雪过程中, 远距离回波存在一定信号衰减, 远处山区回波强度减弱, 对大范围暴雪定量估测存在轻微误差;
- 2) 复杂地形垂直廓线局限性: 东北部高山遮挡区域低层廓线数据缺失, 相态识别需结合探空、微波辐射计补充订正;
- 3) 自动化识别算法本地化不足: 现有模糊逻辑相态算法基于南方降水样本构建, 七台河极寒干雪场景仍存在少量识别偏差, 需扩充本地冰雪样本训练模型。

5.2. 针对性优化改进方案

- 1) 多雷达数据融合: 将本地 X 波段雷达与省级 S 波段组网雷达实时拼图融合, 弥补远距离衰减缺陷, 全域降雪定量估测精度提升;
- 2) 多设备协同廓线订正: 雷达垂直偏振廓线搭配微波辐射计温湿度廓线, 修正地形遮挡区域相态判断偏差;
- 3) 本地化算法迭代: 整理冰超两个月近百场冰雪过程偏振样本, 重新训练寒地冬季相态识别模糊逻辑函数, 优化干雪、冻雨、冰粒本地阈值;
- 4) 开发冰雪赛事专用短临产品: 基于雷达数据自动生成赛道降雪时段、路面结冰风险、冰粒预警专项服务产品, 实现一键推送组委会。

冰超赛事结束后, 七台河市气象局已完成上述优化方案落地, 更新本地雨雪相态识别阈值库, 多雷

达融合拼图系统投入日常业务运行。

6. 结论与展望

首届黑龙江冰超七台河赛区为期近两个月的专项气象服务实践证明，X 波段双偏振雷达凭借高时空分辨率、多偏振参量微物理探测能力，能够有效弥补传统 S 波段组网雷达在寒地城市低空、局地冰雪天气监测的短板，在长周期、多场地冰雪赛事保障中具备不可替代的核心作用。

在本次冰超保障中，该雷达实现三大核心业务突破：一是全域赛场局地降雪无漏监，彻底消除丘陵地形低空监测盲区；二是依托偏振参量精准区分干雪、湿雪、雨夹雪、冻雨、冰粒，雨雪相态识别准确率超 94%，大幅降低道路结冰、冰粒灾害误判风险；三是延长冰雪灾害预警提前量至 38 分钟，为赛事调度、人员疏散预留充足处置时间，全程实现冰雪赛事气象安全零事故，形成一套可复制的寒地冰雪赛事雷达气象保障技术体系。

未来，七台河市气象局将持续深挖 X 波段双偏振雷达寒地应用价值：一方面持续积累冬季冰雪偏振观测样本，迭代本地化雨雪相态、弱冰雹识别算法；另一方面推进 X 波段雷达与短临预报系统、赛事气象服务平台深度融合，开发冰雪运动专项自动化气象服务产品。同时依托本次冰超保障成果，梳理完整技术总结与服务案例，为全省乃至全国长周期冰雪赛事、露天冬季文旅活动提供精细化雷达气象保障技术支撑，助力“冰雪经济”高质量发展，发挥气象防灾减灾、专业赛事保障的基础性支撑作用。

参考文献

- [1] 班欣, 范从勇, 朱敏华, 祁欣, 任曙霞. 连云港市冬季降水天气过程对比分析[J]. 气象科学, 2009, 29(5): 700-704.
- [2] 吴怡. 基于 GPM DPR 资料的江淮地区冬季多相态降水特征分析[D]: [硕士学位论文]. 合肥: 中国科学技术大学, 2023.
- [3] 马梁臣, 马洪波, 张曦丹, 陈子健, 李江波. 冬奥会张家口赛区一次降水相态特征分析[J]. 气象与环境学报, 2022, 38(1): 1-7.
- [4] 管理, 戴建华, 陶岚, 尹春光, 孟凡旺. QVP 方法在双偏振雷达冬季降水观测中的应用[J]. 应用气象学报, 2021, 32(1): 91-101.
- [5] 魏玮. 冬季降水过程的 C 波段双线偏振雷达资料分析[D]: [硕士学位论文]. 成都: 成都信息工程大学, 2019.
- [6] 苏永彦, 刘黎平. S 波段双偏振雷达和 X 波段相控阵天气雷达中气旋识别结果对比[J]. 气象, 2022, 48(2): 229-244.