

张鹏,陈玉宝,商建,等,2025.我国天气雷达网和风云三号降水卫星的发展与数据融合应用初探[J].气象,51(11):1367-1382.  
Zhang P,Chen Y B,Shang J,et al,2025.Preliminary study on the development and data fusion application of China's weather radar network and FY-3G precipitation satellite[J].Meteor Mon,51(11):1367-1382(in Chinese).

# 我国天气雷达网和风云三号降水卫星的发展与数据融合应用初探<sup>\*</sup>

张 鹏<sup>1,2</sup> 陈玉宝<sup>1,2</sup> 商 建<sup>3,4,5</sup> 吴 蕾<sup>1,2</sup> 陈 林<sup>3,4,5</sup>  
步志超<sup>1,2</sup> 李 璐<sup>1,2</sup> 李 俊<sup>3,4,5</sup>

1 临近空间环境特性及效应全国重点实验室,北京 100081

2 中国气象局气象探测中心,北京 100081

3 国家卫星气象中心(国家空间天气监测预警中心),北京 100081

4 许健民气象卫星创新中心,北京 100081

5 中国气象局遥感卫星辐射测量和定标重点开放实验室,北京 100081

**提 要:**我国已经建成了全球规模最大的地基多波段天气雷达网,同时成功发射了国内首颗、全球第三颗主动降水测量卫星,总体技术水平世界先进。天气雷达和降水卫星是天地一体化降水观测网的重要组成部分,是精准捕捉降水动态、全面解析降水特征的关键技术支撑。地基天气雷达具有高时空分辨率,但其覆盖范围受地理位置限制,难以实现全球范围连续观测。星载降水雷达可提供全球中低纬度地区的三维降水结构信息,尤其适用于海洋、高原等地面设备难以覆盖的区域。天地一体化融合应用实现了大范围降水态势的连续预警和局部降水特征的精细化探测的有机结合,为气象预报、灾害预警、水资源管理等领域提供了更为精准、全面的数据支持与决策依据。文章详细介绍了我国地基多波段天气雷达网和风云三号降水卫星的技术特点、运行质量和数据产品,并从星地降水雷达交叉检验、数据融合、基于静止卫星的地基雷达信号模拟、主被动微波与高频次红外遥感资料融合等方面,提出了我国天地降水雷达协同观测和雷达反射率因子等基础数据融合应用的初步思考和展望。

**关键词:**多波段天气雷达,星载降水测量雷达,天地一体化,交叉检验,数据融合应用

**中图分类号:** P412,P414

**文献标志码:** A

**DOI:** 10.7519/j.issn.1000-0526.2025.081001

## Preliminary Study on the Development and Data Fusion Application of China's Weather Radar Network and FY-3G Precipitation Satellite

ZHANG Peng<sup>1,2</sup> CHEN Yubao<sup>1,2</sup> SHANG Jian<sup>3,4,5</sup> WU Lei<sup>1,2</sup>  
CHEN Lin<sup>3,4,5</sup> BU Zhichao<sup>1,2</sup> LI Lu<sup>1,2</sup> LI Jun<sup>3,4,5</sup>

1 State Key Laboratory of Environment Characteristics and Effects for Near-Space, Beijing 100081

2 CMA Meteorological Observation Centre, Beijing 100081

3 National Satellite Meteorological Centre/National Centre for Space Weather, Beijing 100081

4 Innovation Center for FengYun Meteorological Satellite, Beijing 100081

5 Key Laboratory of Radiometric Calibration and Validation for Environmental Satellites, CMA, Beijing 100081

**Abstract:** China has established the world's largest ground-based multi-band weather radar network and successfully launched its first active radar precipitation measurement satellite, the third of its kind globally,

<sup>\*</sup> 国家自然科学基金气象联合基金重点项目(U2442214)资助

2025 年 5 月 1 日收稿; 2025 年 7 月 25 日收修定稿

第一作者:张鹏,主要从事大气物理学与大气环境、星地降水雷达应用研究. E-mail:zhangp@cma.gov.cn

achieving world-class overall technical capabilities. Weather radars and precipitation satellites are crucial components of the integrated space-ground precipitation observation network, and are key technical support for accurately capturing precipitation dynamics and comprehensively analyzing precipitation characteristics. While weather radars offer high spatiotemporal resolution, their coverage is geographically constrained, limiting continuous global observation. Spaceborne precipitation radars can provide three-dimensional precipitation structure information over global mid-to-low latitudes, particularly over the regions difficult to be covered by ground-based equipment, such as in oceans and plateaus. The fusion application of space-ground integrated systems achieves an organic combination of continuous large-scale precipitation monitoring and refined detection of local precipitation features, which can provide more precise and comprehensive data support and decision-making basis for meteorological forecasting, disaster warning, and water resource management. This paper introduces the technical characteristics, operational quality, and data products of the multi-band weather radar network and the FY-3G precipitation satellite in China in detail. It also presents preliminary thoughts and prospects on collaborative observation and the fusion and application of the fundamental data from China's weather radar network and FY-3G precipitation satellite in four aspects: (1) the cross validation of satellite-ground radar reflectivity factor, (2) data fusion of satellite-ground radar reflectivity factor, (3) the simulation of ground-based radar signals using geostationary satellite data, and (4) the fusion of active/passive microwave and geostationary satellite infrared data.

**Key words:** multi-band weather radar, spaceborne precipitation-measuring radar, space-ground integrated system, cross validation, data fusion application

## 引 言

天气雷达通过主动发射微波并接收回波信号,获取云和降水的宏观特征和微物理参数,已经成为各国气象部门开展临近天气预报和灾害性天气预警工作的重要支柱。美国是天气雷达发源地,引领了雷达信号数字化、脉冲多普勒、双偏振等技术的发展方向,并在 20 世纪 90 年代中期,基于 WSR-88D (Weather Surveillance Radar-1988 Doppler) 雷达建成了新一代气象雷达网络 (NeXRAD) (Crum and Alberty, 1993)。我国早期天气雷达以引进和仿制为主,20 世纪 90 年代通过合作引进多普勒雷达技术,逐步完成国产化技术改造,并于 1999 年在安徽省合肥市建成首部新一代天气雷达 (CINRAD),2013 年第一部双偏振业务雷达在广东省珠海市投入业务运行。截至 2025 年 3 月,我国已经建成世界最大规模的天气雷达观测网,大型 S 和 C 波段天气雷达数量达到 275 部,2/3 以上的雷达已完成双偏振升级,雷达反射率因子一致性等核心指标达到世界先进水平。此外,382 部 X 波段天气雷达有效弥补了山区地形遮挡造成的大型雷达网的观测盲区,并实现了大小雷达智能化协同观测,特别是其中的

171 部 X 波段相控阵雷达已经在京津冀、长三角、珠三角等经济发达地区组网运行,有效提升了天气雷达网的时空分辨率,增强了突发强天气过程的监测预警能力(李柏等,2013)。

地基天气雷达受限于探测半径,仅能获取到雷达站附近有限区域的降水信息,难以实现全球范围的全面观测。为了研究全球水循环特征,特别是占地球 71% 的海洋上空的云和降水,20 世纪 80 年代国外学者提出星载微波雷达探测降水的概念,并在 1997 年由美国宇航局 (NASA) 和日本宇航局 (JAXA) 合作研制并成功发射了人类历史上首颗降水测量卫星 (Tropical Rainfall Measuring Mission, TRMM),核心载荷是测雨雷达 (Precipitation Radar, PR)。为了获取连续的星载雷达降水观测资料,在继承 TRMM 卫星成功经验的基础上,NASA 和 JAXA 继续合作并于 2014 年发射了全球降水计划卫星 (Global Precipitation Mission, GPM),星上搭载了双频测雨雷达 (Dual-frequency Precipitation Radar, DPR),进一步提升了对雨滴谱、相态转变高度和降雪的遥感能力。基于主动降水测量卫星的重要意义,2006 年中国气象局提出发展我国降水测量卫星的需求,中国航天科技集团在“十一五”民用航天计划项目支持下开启了星载降水测量 Ka 和 Ku

波段雷达的预研。历经 17 年技术攻关,2023 年我国首颗降水测量卫星风云三号 G 星(FY-3G)成功发射并投入应用(谷松岩等,2023; Zhang et al, 2023)。

雷达反射率因子是天气雷达定量遥感的主要基础参量之一,对全面支撑气象预报、防灾减灾及水文研究具有重要意义(肖艳姣等,2021)。就定量遥感而言,地基天气雷达具有高时空分辨率的优势,能够随时开展高精度全链路标定,确保了全生命周期定量遥感产品的质量和稳定性,但覆盖范围受架设环境和地形影响,遮挡严重的山区、境外或远海等重点区域存在明显的观测空白。星载降水测量雷达通过低倾角轨道运行能够实现中低纬度的全球覆盖,突破了海上、地形遮挡等环境因素的制约,能有效补充海洋、山地和偏远区域观测。然而星载平台时空分辨率有限,其数据获取能力目前仅限于双频段反射率因子,无法同步获取多普勒速度场及偏振特征量等风场和云微物理等额外信息。

目前我国既有世界上规模最大、性能先进的天气雷达观测网,又有独立自主发展的星载降水测量雷达,共同构建了多空间尺度观测体系。为深度融合星载平台全球覆盖优势与地基网络高精度探测能力,亟需在现有星载和地基雷达分别高精度标定、高质量观测的基础上,突破星地雷达反射率因子( $Z_H$ )

等观测数据的交叉检验技术和融合应用方法。通过互为补充、相互校验的多源雷达观测资料的深度融合应用,显著提升天气监测的精度与可靠性,为气象预报、灾害预警等提供更为科学、准确的数据支撑。

## 1 地基多波段天气雷达网

目前我国地基天气雷达网由新一代天气雷达(包括 S、C 两个波段,均为速调管发射机体制)和 X 波段天气雷达(主要为固态发射机体制,包括机械扫描和相控阵电扫两种)组成(图 1),截至 2025 年 3 月,数量分别为 275 部和 382 部,整体技术水平达到国际先进,对我国近地面 1 km 高度覆盖范围超过了 40%。作为提升强对流天气监测预警的国之重器,该网络遵循地理气候与气象灾害风险协同原则,考虑 400 mm 等降水量线东西差异性,构建了“大范围预警+精细化探测”的多波段雷达立体化观测体系(朱丹等,2018)。S 和 C 波段雷达负责大范围监测预警,X 波段雷达补充大雷达网盲区,提升中小尺度对流活动的探测精度。两者空间上“接力”,时间上“衔接”,通过数据融合与智能算法,实现全链条监测,凸显“各精所长”的技术特性,共同筑牢气象防灾减灾防线。

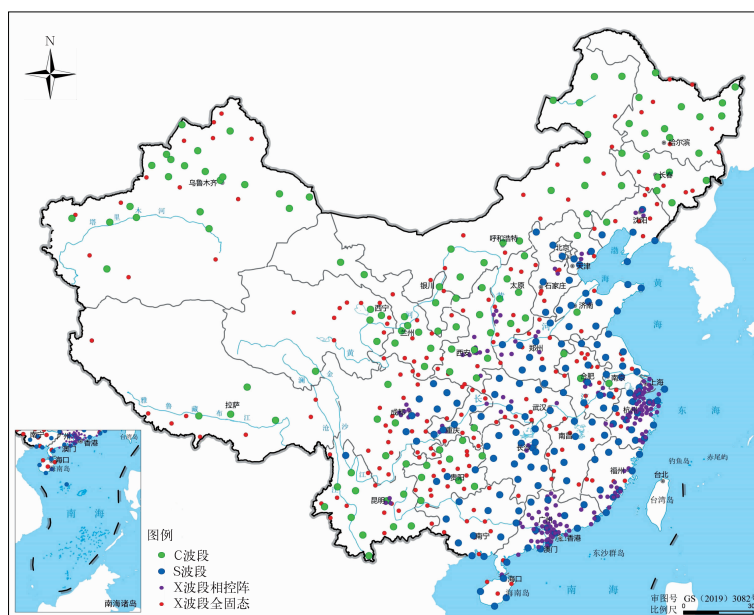


图 1 我国天气雷达网站点布局现状

Fig. 1 The current deployment status of the weather radar network in China

### 1.1 新一代天气雷达网

我国新一代多普勒天气雷达网始建于 20 世纪 90 年代末期,共包括 7 种型号(表 1),经历了技术引进、自主创新与全面升级的过程,逐步建成了全球规模最大、性能先进的大型 S 和 C 波段天气雷达网。初期建设的雷达系统采用单偏振技术体制,配备速调管发射机和模拟接收机。为适应气象监测预警业务对观测数据精度和准确性的要求,中国气象局自 21 世纪初相继主导实施了两次系统性改造升级工

程:设备大修与技术标准统一、双偏振技术升级,目前正在开展第三次技术改进——精细化及高速天线改造升级,具体技术指标见表 2。目前已建成的新一代天气雷达总数为 275 部(双偏振 230 部),至《综合气象观测业务发展“十四五”规划》完成时,总数量将达到 284 部,其中相位噪声、灵敏度、反射率因子、速度、差分反射率因子( $Z_{DR}$ )等关键指标水平与美国 WSR-88D 雷达相当,动态范围、扫描速度和俯仰扫描范围等优于 WSR-88D 雷达。

表 1 新一代天气雷达型号及生产厂家

Table 1 Models and manufacturers of the CINRAD

S 波段	厂家	C 波段	厂家
SA	华云敏视达雷达(北京)有限公司	CA	华云敏视达雷达(北京)有限公司
SB	国睿科技股份有限公司	CB	国睿科技股份有限公司
SC	成都锦江电子系统工程有限公司	CC	四创电子股份有限公司
		CD	成都锦江电子系统工程有限公司

表 2 新一代天气雷达主要技术变更(S 波段)

Table 2 Key technical upgrades in the CINRAD (S band)

参数	单偏振	技术标准统一	双偏振升级	精细化和高速天线改造升级
极化方式	H	H	H+V	H+V
脉冲宽度/ $\mu\text{s}$	1.57/4.70	1.57/4.70	1.57/4.70	0.42/0.83/1.57/4.70
分辨率/m	1000/1000	250/250	250/250	62.5/125/250/250
超级分辨率	否	否	否	是
方位最大转速/ $(^{\circ}\cdot\text{s}^{-1})$	36	36	36	60
信号处理器	板卡式	网络信处	网络信处	网络信处
机外动态范围/dB	$\geq 85$	$\geq 95$	$\geq 115$	1.57 $\mu\text{s}$ : $\geq 115$ 0.83 $\mu\text{s}$ : $\geq 112$ 0.42 $\mu\text{s}$ : $\geq 109$

#### 1.1.1 技术标准统一

设备大修及技术标准统一工程重点完成了:(1)接收系统数字化改造,采用新一代数字接收机替代原有模拟设备;(2)信号处理系统升级,处理能力提升至 512 亿次 $\cdot\text{s}^{-1}$ 运算量级;(3)算法体系优化,新增地物识别、电磁干扰识别等核心算法,使地物抑制能力从 52 dB 提高到 55 dB;(4)相位编码技术改进,速度最大距离模糊恢复率提升 60% 以上。这些改进显著提高了雷达数据定量应用的可用性和可靠性。

新一代天气雷达首先对信号处理器进行了升级(图 2),采用高度集成的数字中频/信号处理模块,以及多通道 16 位 A/D 转换能力,实现对 4 K 以上距离库数据的实时处理,降低系统故障率,增强信号处理性能。其次,支持雷达远程控制,以及雷达系统

67 项参数和机房等运行环境的实时监测,通过健康评估算法,实现了雷达运行状态的高效监测,确保了雷达稳定运行。

#### 1.1.2 双偏振技术升级

双偏振技术升级实现了从单偏振到双偏振的技术跨越,通过同时发射和接收水平/垂直偏振波,大幅提升了降水粒子相态识别能力和杂波抑制能力。此外,优化了信号处理算法,地物抑制能力从 55 dB 提高到 60 dB(吴艳锋,2022)。

双偏振技术拓宽了雷达观测维度,引入了多种双偏振参量,包括差分反射率因子( $Z_{DR}$ )、相关系数( $\rho_{HV}$ )、差分传播相移( $\phi_{DP}$ )、差分传播相移率( $K_{DP}$ )和退偏振比( $L_{DR}$ )等,能有效区分气象与非气象回波,精准刻画目标粒子尺寸、形状特征及降水类型分类,特别是在冰雹探测预警(图 3;北京时,下同)、融



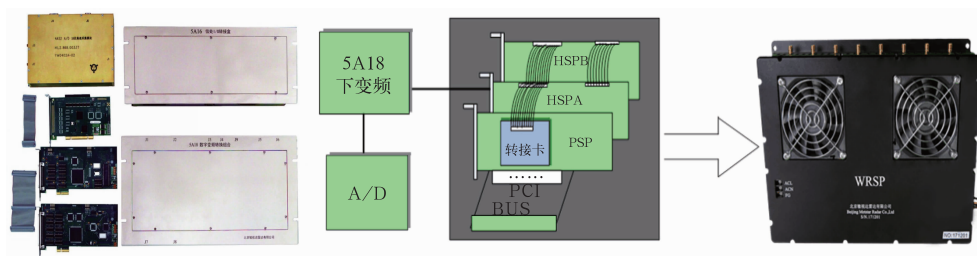


图 2 网络信号处理器

Fig. 2 Network signal processor architecture

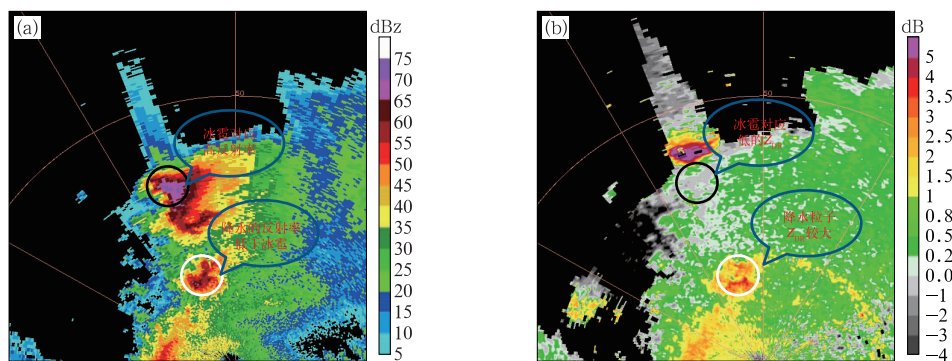


图 3 2016 年 3 月 17 日 19:36:00 仰角为 9.9° 双偏振雷达冰雹识别

(a) 反射率因子, (b) 差分反射率因子

Fig. 3 Hail identification by dual-polarization radar at elevation 9.9° at 19:36:00 BT 17 March 2016

(a) reflectivity factor, (b) differential reflectivity factor

化层识别方面更具优势。

### 1.1.3 精细化和高速天线改造升级

目前正在开展的精细化及高速天线改造升级试验(陈昊, 2022), 将雷达工作脉宽数量从 1 个窄脉宽扩展到 3 个窄脉宽(新增 2 个脉宽), 距离分辨率由 250 m 提高到 62.5 m; 天线转速由  $36^\circ \cdot s^{-1}$  提升至  $60^\circ \cdot s^{-1}$ , 时空分辨率较改造前提升 8 倍, 数据更新周期从 6 min 缩短至  $\leq 4$  min, 为强对流天气监测预警提供了更精细的观测数据。后期根据试验进展, 逐步在全国推广。

在原有的 1 km 分辨率(图 4a)的基础上, 雷达系统新增的  $0.83 \mu s$  和  $0.42 \mu s$  两个窄脉宽能够实现 125 m(图 4b)和 62.5 m(图 4c)物理距离分辨率, 方位扫描速度由  $36^\circ \cdot s^{-1}$  提升到  $60^\circ \cdot s^{-1}$ 。针对新增的窄脉宽, 设计了具有较高脉冲重复频率(pulse repetition frequency, PRF)和更快天线转速的降水水体扫描模式, 11 个仰角扫描耗时 240 s(4 min)(汪章维等, 2020), 相比现有业务降水水体扫描模式, 减少了 2 min。另外, 实现了观测数据方位向的超分辨加工

处理能力, 波束宽度分辨率由  $1^\circ$  提升至  $0.5^\circ$ , 有效提升了基数据等产品的时空分辨率(张晶等, 2024)。

### 1.1.4 S/C 波段大型相控阵雷达预研

2021 年, 我国首部 S 波段平板双偏振相控阵天气雷达在福建闽侯建成(图 5), 采用全数字相控阵和双偏振技术, 集成 16000 余个可控单元天线阵列, 最大探测距离 460 km, 双偏振的有效探测半径 230 km, 距离分辨率达 31.25 m, 具备 1 min 内完成 20 层仰角扫描的快速三维观测能力, 有效提升了福建等东南沿海及台湾海峡的台风、强对流等灾害性天气的监测预警水平(刘新安等, 2024)。气象部门利用这部雷达开展了标校、扫描模式和信号处理等关键技术研究, 并深入分析了台风和强对流等天气过程的观测数据。2024 年, 中国气象局印发了《相控阵天气雷达研发与试验工作方案(2024—2030 年)》, 计划用 5~6 年时间, 通过迭代升级的方式, 研制出世界先进水平的大型相控阵天气雷达。2026 年和 2027 年, 中国气象局将分别在安徽合肥和河北保定建设 1 部 S 波段平板双偏振相控阵天气雷达,

并开展一系列观测试验,进一步攻关雷达测试、标校以及数据质量控制和产品加工算法方面的关键技术。

## 1.2 X 波段天气雷达网

在全球气候变暖持续深化的背景下,我国气象灾害呈现出突发性、极端性愈发显著的特征,这对天气雷达监测网的覆盖度及精细化提出了更为迫切的要求。新一代天气雷达虽然探测范围较大,且在强降水条件下信号衰减较小,但受到电磁波传播特性和地球曲率的影响,在远距离处会形成低空探测盲区。此外,我国地形复杂多变,尤其在山川、河谷等遮挡严重的地区建设新一代天气雷达,探测能力和性价比将大打折扣。随着固态发射机技术的逐步成熟,从“十三五”开始,我国开始建设 X 波段天气雷达,虽然探测范围相对有限、强降水条件下衰减较大,但其体积小、重量轻、价格较低、维护成本低且架设方便,是开展新一代天气雷达网低空补盲的有效手段(Schwartzman et al, 2021)。我国 X 波段天气雷达主要分为 X 波段全固态双偏振天气雷达(图 6a)、X 波段相控阵天气雷达(图 6b)和微小型 X 波段全

固态天气雷达(图 6c)三种类型,前两者已经建成全国性网络,第三种计划从 2025 年开始试点建设,并在“十五五”期间全面推广。X 波段固态双偏振天气雷达主要用于补充新一代天气雷达的探测盲区,并能与新一代天气雷达组网开展协同观测(刘于新等, 2024);X 波段相控阵天气雷达扫描速度快,空间分辨率高,主要用于提升对龙卷、冰雹等短时强天气易发区域的监测预警能力;微小型 X 波段固态天气雷达主要用于提升我国中西部人口稀少、地质灾害频发区域的灾害性天气监测能力。

### 1.2.1 X 波段全固态双偏振天气雷达

2021 年,我国启动 X 波段全固态双偏振天气雷达的布网建设工作。2022 年,重点提升了发射功率、脉压距离副瓣抑制比、相位噪声、指向精度等 16 项雷达性能参数,使得雷达在运行稳定性、探测威力、地物抑制能力等 7 个方面有显著提高,定性探测距离 $\geq 150$  km,定量 $\geq 75$  km,体扫时间 $\leq 3$  min,空间分辨率 $\leq 30$  m,整体技术水平基本达到国际先进,详细指标见表 3。2023 年,聚焦雷达信号处理器开展了技术标准统一,规范了数字中频硬件性能参

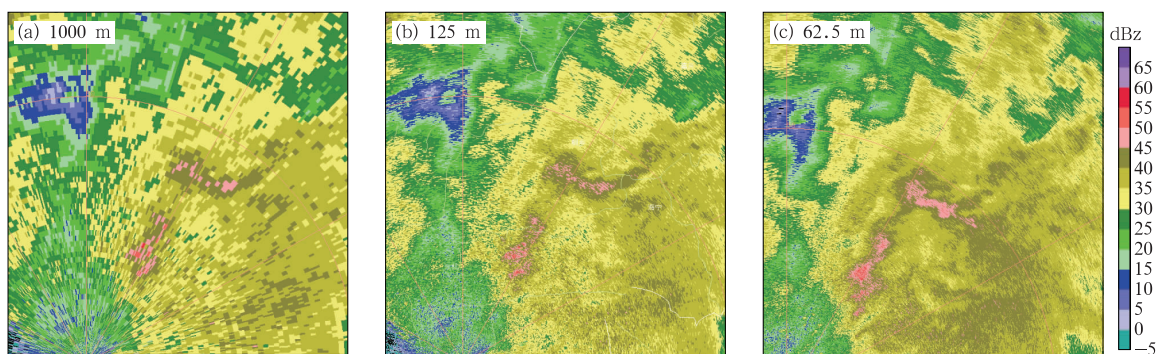


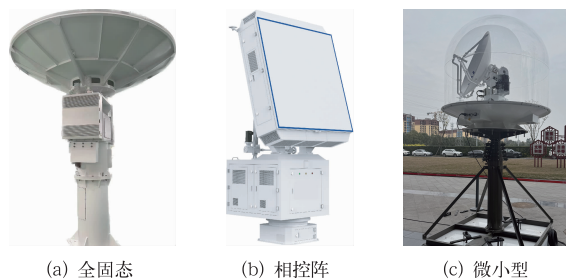
图 4 2020 年 9 月 17 日 01:51:10 仰角为  $1.5^\circ$  精细化天线改造(a)前,(b,c)后的杭州雷达  $Z_H$  对比

Fig. 4 Comparison of  $Z_H$  (a) before and (b, c) after upgrade of Hangzhou Radar at elevation  $1.5^\circ$  at 01:51:10 BT 17 September 2020



图 5 福建闽侯 S 波段双偏振相控阵天气雷达

Fig. 5 Minhou S-Band Dual-Polarization Phased Array Weather Radar of Fujian Province



(a) 全固态 (b) 相控阵 (c) 微小型

图 6 我国 X 波段天气雷达

Fig. 6 X-band weather radars in China

数、信号处理算法、雷达标校功能等 6 个方面的要求,有效提升了观测数据质量和组网数据一致性。

表 3 X 波段全固态天气雷达关键技术指标  
Table 3 Key technical indicators of X-band solid-state weather radars

分系统	指标名称	技术要求
天线	波束宽度	$\leq 1^\circ$
	增益	$\geq 44$ dB
	第一副瓣电平	$\leq -29$ dB
	交叉极化隔离度	$\geq 35$ dB
伺服	波束指向误差	$\leq 0.05^\circ$
接收机	脉压主副比(脉压比 $\geq 100$ )	$\geq 50$ dB
	动态范围	$\geq 95$ dB
发射机	地物抑制能力	$\geq 55$ dB
	相位稳定度	$\leq 0.05^\circ$
	发射功率	$\geq 500$ W

表 4 X 波段相控阵天气雷达关键技术指标(增强型)

Table 4 Key technical indicators of X-band phased array weather radars (enhanced version)

分系统	指标名称	技术要求
天线	波束宽度	法向 $\leq 1^\circ$
	发射增益	法向 $\geq 43.5$ dB
	接收增益	法向 $\geq 42.5$ dB
	交叉极化隔离度	偏离法向 $\pm 10^\circ$ 内 $\geq 35$ dB
伺服	波束指向误差	$\leq 0.05^\circ$
发射单元	单极化峰值功率	$\geq 1000$ W
	等效全向辐射功率	法向 $\geq 101.5$ dBm
	噪声系数	$\leq 3$ dB
接收单元	增益与噪声温度比	法向 $\geq 11.5$ (dB $\cdot$ K $^{-1}$ )
	动态范围	$\geq 77$ dB
数字波束控制与合成单元	最小可测功率	$\leq -110$ dBm(带宽 1 MHz)
	发射最大副瓣电平	电扫方向: $\leq -25$ dB
	接收最大副瓣电平	电扫方向: $\leq -35$ dB
信号处理器	脉冲压缩主副瓣比	$\geq 50$ dB(脉压比 $\geq 100$ )
	最小可测反射率因子	$\leq 3$ dBz@50 km
系统指标	相位噪声	$\leq 0.1^\circ$
	噪声系数	$\leq 3.5$ dB
	动态范围	$\geq 95$ dB
	实际地物抑制能力	$\geq 50$ dB

1.2.3 微小型 X 波段固态天气雷达

在条件艰苦、位置偏远、架设不便的主要天气系统上游地区和灾害性天气重点关注区域,仍存在大量的雷达观测“真空地带”。空间观测的碎片化,直接影响了灾害性天气的预警响应时间,削弱了气象监测作为防灾减灾体系第一道防线的预警效能。因此,我国正在布网建设一种成本低、免维护、重量轻、功耗小、架设方便的微小型 X 波段天气雷达,其定量探测距离 $\geq 35$  km,距离库长 $\leq 75$  m,角度分辨率

1.2.2 X 波段相控阵天气雷达

我国 X 波段相控阵天气雷达自“十三五”期间开始布网建设,目前运行数量达到 171 部。2019 年,中国气象局首次对 X 波段相控阵雷达的功能规格参数进行了详细规定,发布了《X 波段双线偏振一维相控阵天气雷达系统功能规格需求书(试行)》(以下简称功能需求书)。2024 年,中国气象局对功能需求书中的 60 余项参数进行了新增、提升和细化,最小可测反射率因子、交叉极化隔离度、发射功率、噪声系数等关键指标有较大提升(表 4),其中天线增益、波束宽度等指标超过了美日等发达国家水平。X 波段相控阵天气雷达的时空分辨率分别达到了 $\leq 1$  min 和 $\leq 30$  m,在龙卷、冰雹等短时强天气监测预警中发挥了重要作用(刘黎平等,2014)。

$\leq 2.7^\circ$ ,体扫周期同样为分钟级,天线增益、脉冲宽度、脉冲重复频率、脉冲峰值功率重量等关键指标(表 5)高于日本主流微小型雷达技术水平。在保证雷达基本性能的基础上,微小型 X 波段雷达支持长期无人值守的自主观测模式,同时可搭载于移动观测平台实现灵活机动部署,针对灾害易发区、观测空白区等关键区域实施精准扫描,为短时临近预报提供实时支撑,真正实现了“观测即服务”的即时响应理念,构建起从数据采集到服务输出的高效闭环。

表 5 微小型 X 波段固态天气雷达关键技术指标(简易型)

Table 5 Key technical indicators of miniaturized X-band solid-state weather radars (simplified version)

分系统	指标名称	技术要求
天线	波束宽度	$\leq 2.7^\circ$
	增益(含天线罩)	$\geq 34.4$ dB
	最大副瓣电平(含天线罩)	$\leq -17$ dB
伺服	交叉极化隔离度	$\geq 30$ dB
	波束指向误差	$\leq 0.3^\circ$
发射机	脉冲峰值功率	200~300 W
	峰值功率波动(24 h)	-1~1 dB
	脉冲重复频率	500~3000 Hz
	脉冲宽度	0.5~200 $\mu$ s(可选)
接收机	噪声系数(带宽 1 MHz)	$\leq 3$ dB
	线性动态范围(带宽 1 MHz)	$\geq 80$ dB
	最小可测功率(带宽 1 MHz)	$\leq -110$ dBm
信号处理器	接收增益波动(24 h)	-2~2 dB
	脉冲压缩主副瓣比	$\geq 50$ dB(脉压比 $\geq 100$ )
	最小可测反射率因子	$\leq 18$ dBz@35 km
系统指标	占用带宽	$\leq 30$ MHz
	重量	$\leq 100$ kg(含天线罩)
	整机功耗	$\leq 800$ W

## 2 天气雷达测试评估及数据应用

### 2.1 天气雷达测试标定及运行状态监控

#### 2.1.1 天气雷达测试标定

天气雷达高精度测试标定是确保不同波段、不同型号雷达观测数据质量和一致性的关键环节。按照方法特点不同,主要分为机内外仪表静态测试标定和外场动态比对标定,形成 7 大类 61 项关键参数的标定评估体系,如图 7 所示。

机内外仪表静态测试标定依托高精度示波器、功率计等专用仪表及雷达内置校准模块(如功率计、噪声源),实现发射功率、脉冲宽度、相位噪声、接收增益及噪声系数等参数的实时监测。机外仪表测试标定精度高但无法实时监测,而机内仪表标定支持实时在线运行但精度有限,故需通过周期性机外测试标定来验证机内测试标定结果,形成闭环校准机制。新一代天气雷达机内外静态测试标定遵循周、月、年三级维护章程,按照发射系统、接收系统、天伺系统和整机系统指标等分类开展。X 波段雷达测试标定参数参考新一代天气雷达要求制定,但指标存

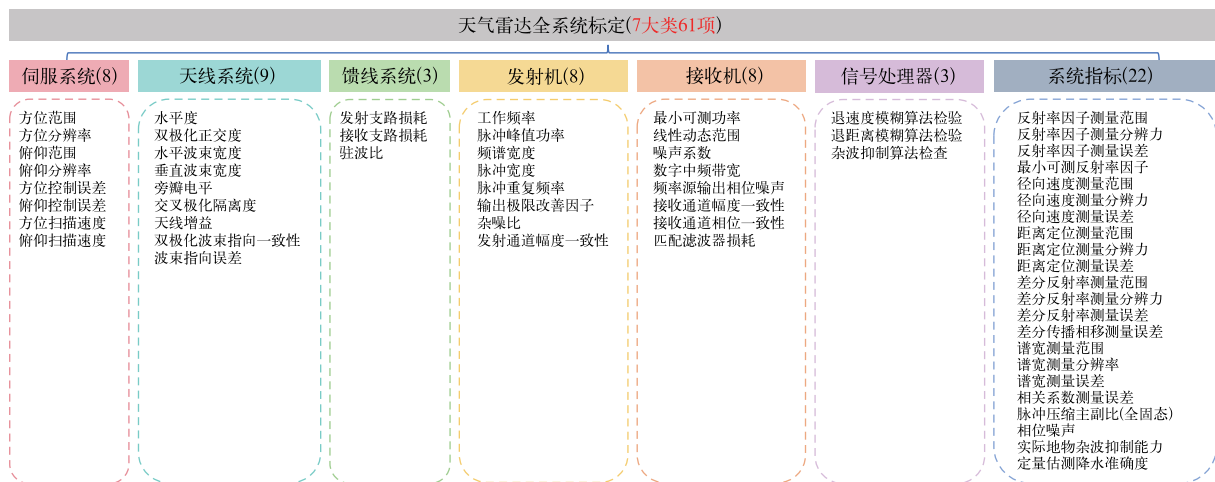


图 7 天气雷达标定评估体系

Fig. 7 Calibration and evaluation framework for weather radars



在差异。

外场动态比对标定在真实的外场观测环境下,采用远场有源辐射标定系统、高精度金属球等标准目标体,对雷达天线波束宽度、副瓣电平及发射接收全链路增益等测试标定,弥补了机内外仪表在雷达天线等系统标定方面的局限性。通过同址高性能天气雷达数据比对分析,进一步提升了雷达系统的误差校正精度。这些方法各具优势,互相补充、验证,共同构成天气雷达全链路高精度测试标定体系。目前,中国气象局在湖南长沙建成了国际先进的天气雷达标校基地,包括高性能 S 波段双偏振天气雷达(以下简称长沙参考雷达)、远场有源辐射标定系统和无人机载金属球标定系统,以及自动化标定数据处理平台,为全国天气雷达系统的质量控制与性能提升提供了高标准参考依据和技术支撑。

### 2.1.2 天气雷达运行状态及环境实时监控

天气雷达构建了科学完备的运行状态监测体系,依托模块化设计实现设备环境、机内运行参数及系统故障的全流程管控,为气象预报提供高精度、高可靠性的数据支撑(刘洁等,2024)。该体系通过设备环境监测子系统对机房、发射机及天线罩等关键区域实施 24 小时温湿度连续监测,规避极端环境对电子元件性能的劣化影响;机内运行参数监测子系统在线采集发射功率、脉宽、噪声系数等核心参数,实时修正雷达方程中的系统常数,避免参数变化导致的数据偏差;智能故障告警系统则通过多参数阈值监控实现异常状态的即时预警,支持运维人员快速响应设备故障。该体系通过预防性维护与动态校准机制,显著提升了天气雷达的观测效能,确保为气象监测预警业务及科学研究提供高质量的观测数据。

### 2.1.3 相邻地基天气雷达观测数据一致性评估

天气雷达观测数据一致性是全国范围内灾害性天气精准监测和有效预警的基础,是实现天地一体化降水观测网高效运行的关键。我国气象部门开发了专门用于评估天气雷达网数据一致性的算法和软件(鲁德金等,2024),通过设置雷达数据一致性评估的最低阈值,结合实时运行评估结果,及时发现并定位问题雷达,进而开展针对性的标校工作,实现对全网天气雷达数据一致性的动态监控与持续优化。如图 8 所示,评估首先开展基数据非降水回波质量控制,剔除地形遮挡,经时空匹配获取邻近雷达观测重叠区,考虑信噪比、波束充塞程度影响,结合垂直液

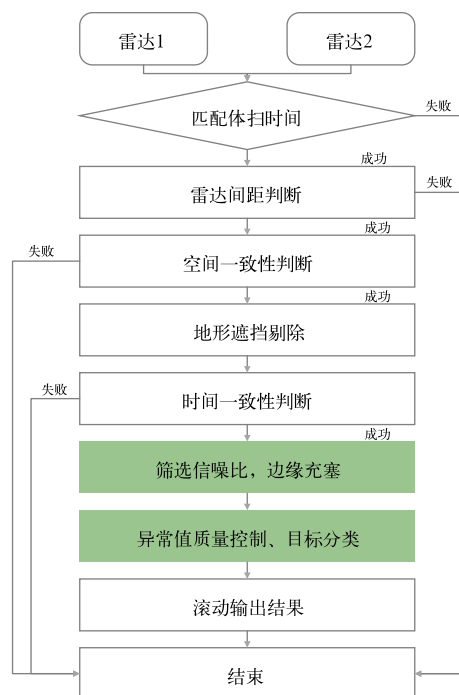


图 8 全网天气雷达反射率因子一致性比对算法流程

Fig. 8 Algorithm flowchart for radar reflectivity factor consistency validation in weather radar network

态水含量实现层状性和对流性降水分,评估层状性降水观测重叠区的标准偏差、平均偏差,分析相邻雷达间的一致性。

2024 年 8—10 月,全国范围内共有 222 部新一代天气雷达(S 波段 133 部,C 波段 89 部)参与组网反射率因子一致性评估,占全网新一代天气雷达的 87.3%,结果表明参与评估的雷达反射率因子一致性标准偏差为 2.62 dB,平均偏差为 0.93 dB。同时开展了全国新一代天气雷达差分反射率因子、相关系数、径向速度等参量一致性分析,具体结果见表 6。

## 2.2 天气雷达主要数据产品及应用

天气雷达数据产品根据数据源可分为单站产品与组网产品两大类。天气雷达单站产品又可分为基本产品和导出产品,其中基本产品是由天气雷达直接测得各仰角径向数据,例如反射率因子、径向速度、速度谱宽,双偏振体制的天气雷达还可获得差分反射率因子、相关系数等双偏振物理量产品,导出产品则是由基本数据资料通过气象产品算法处理后生成的产品。我国早期天气雷达产品及其配套算法引用自美国 WSR-88D 天气雷达。经过气象工作者多

年产品算法研发及攻关,现阶段纳入我国设备端业务软件各类天气雷达单站产品算法已支持包括风暴识别跟踪、冰雹指数、中尺度气旋、龙卷特征识别、

双偏振雷达降水估测、双偏振相态识别等在内的 36 个单偏振产品、21 个双偏振产品以及 5 种用户报警产品,总计 62 种气象应用产品。

表 6 全国新一代天气雷达网一致性比对  
Table 6 Consistency statistics of CINRAD network

参数	雷达数量			标准偏差均值
	总数	S	C	
反射率因子( $Z_H$ )	222	133	89	2.62 dB
差分反射率因子( $Z_{DR}$ )	138	88	50	0.56 dB
相关系数( $\rho_{HV}$ )	116	88	28	0.038
径向速度(V)	250	137	113	3.21 m·s <sup>-1</sup>

除了天气雷达单站产品,天气雷达组网产品研发也在持续推进,如图 9 为京津冀多波段天气雷达组网拼图的组合反射率产品。自 1998 年中国气象局试行全国天气雷达实时观测拼图业务以来,截至 2023 年天气雷达拼图系统 v3.0 版本上线,已形成基础类、物理量类、降水类产品体系,包含混合扫描反射率、组合反射率、垂直积分液态水含量、1 h 估测降水等 11 种天气雷达组网产品,时间分辨率 6 min,空间分辨率 0.25 km×0.25 km。

天气雷达产品已实时提供给中央气象台、中国气象局人工影响天气中心以及中国民用航空局、南方电网等多家单位,在多次冰雹、雷暴大风、龙卷等强对流天气过程中得到应用。除了在强对流监测预警中发挥作用,天气雷达也在数值模式中得到广泛应用(沈学顺等,2025)。截至 2024 年,在基于业务运行的区域数值预报模式(CMA-MESO)中,天气雷

达资料使用占比提高至 90%以上,雷达径向风同化率达 54.76%。

### 3 FY-3G 降水测量雷达现状和在轨性能

#### 3.1 FY-3G 卫星轨道及载荷

2023 年成功发射的风云三号降水测量卫星(FY-3G)是我国风云系列气象卫星中独特的一颗卫星(图 10)。与其他极轨气象卫星不同,FY-3G 运行在高度 407 km、倾角 50°的非太阳同步轨道上,以不同的地方时观测全球中低纬度地区的降水变化。由于轨道类型所致,轨道面与太阳矢量的夹角( $\beta$ 角)在卫星运行期间不断变化,对维持能源供应带来很大挑战(Zhang et al, 2019)。为了保持其能量平衡以及仪器的不间断运行,从而获取全球中低纬度观测数据,FY-3G 采用了双太阳能阵列,并利用精确的卫星姿态自动控制策略,确保轨道上的长期平衡能源供应。FY-3G 卫星的运行高度受到大气阻力的显著影响,导致轨道高度不断衰减。为了确保在(407±5) km 的高度范围内稳定运行,FY-3G 定期实施抬轨机动操作(Forbes, 2015)。FY-3G 卫星姿态特性的另一复杂之处在于卫星姿态需要频繁调整,主要为 180°偏航机动。在这一过程中,数据管理系统不断计算  $\beta$  角的变化,当  $\beta$  角接近 0°且卫星进入阴影区时,则卫星执行 180°偏航机动,以确保太阳能电池板的最大能量捕获。该控制周期约为 29.2 d,在正常情况下,偏航机动可以在 15 min 内完成。FY-3G 卫星还支持滚动机动的应急观测模式,可以有效提高对台风、强对流等降水事件的捕获能力。在卫星机动期间,遥感仪器持续观测,在一级数据(L1)中写入机动标记,以帮助用户识别有效的观测数据。

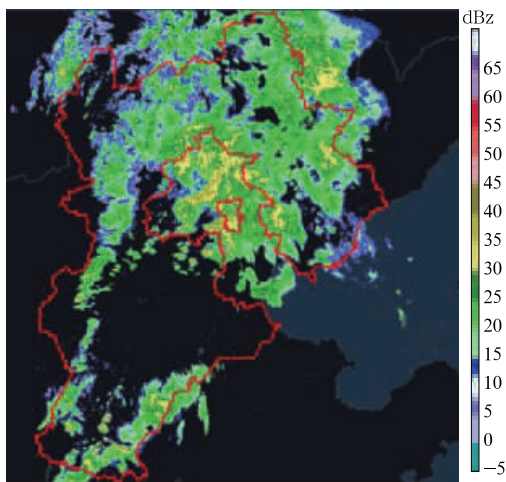


图 9 京津冀多波段天气雷达  
组合反射率因子拼图产品

Fig. 9 Radar reflectivity factor of multi-band  
weather radar mosaic products for the  
Beijing-Tianjin-Hebei Region



图 10 FY-3G 降水测量卫星  
Fig. 10 FY-3G precipitation measurement satellite

FY-3G 卫星以降水为主要观测目标,所配置的业务遥感仪器包括:主动降水测量雷达(precipitation measurement radar,PMR)、被动微波成像仪-降水型(microwave imager for the rainfall mission,MWRI-RM)、中分辨率光谱成像仪-降水型(medium resolution spectral imager for the rainfall mission,MERSI-RM)和全球导航卫星系统掩星探测仪(global navigation satellite system occultation sounder,GNOS-II)等。通过在同一平台上集成有源雷达和无源微波成像,FY-3G 卫星充分利用了两种技术的优势:有源雷达的三维降水探测能力和高精度,以及无源仪器的宽覆盖与路径积分信息。这种配置能够对降水系统进行高精度探测,对于提高降水数值预报的准确性和优化云微物理参数化方案至关重要。此外,FY-3G 还携带了两台试验仪器:短波红外偏振多角度成像仪(short-wave infrared polarized multi-angle imager,PMAI)和高精度星上定标器(high-accuracy onboard calibrator,HAOC)。FY-3G 自成功发射以来,为气象预报业务和大气科学研究持续

提供了宝贵的降水观测数据。

3.2 FY-3G PMR 设计指标及在轨性能

FY-3G 卫星的核心仪器是降水测量雷达(PMR)。PMR 是我国首台星载降水测量雷达,其工作波段为 Ku 和 Ka 波段。PMR 可以准确区分不同高度的降水回波,其测得的雷达反射率因子与降水强度直接相关,可以提供台风、暴雨和其他降水系统的三维结构,并反演降水强度和降水类型等准确信息。与被动遥感仪器相比,PMR 可以进一步提高天基降水测量能力,加深对风暴结构、云微物理特征和中尺度天气系统动力机制的理解。

PMR 的主要设计指标见表 7(谷松岩等,2023)。PMR 在垂直于卫星飞行轨道的方向上扫描,在常规观测模式下,PMR 在 $\pm 20.3^\circ$ 的扫描角度范围内测量从海平面(ASL)到 18 km 高度的降水回波。通过频率捷变技术和可变脉冲重复频率技术,PMR 在每个扫描角度都可以获得至少 124 个独立样本,远超指标要求。表 7 中还列出了 PMR 与国际第一代、第二代星载降水雷达的指标对比。与 TRMM PR 相比,FY-3G PMR 和 GPM DPR 均新增了 Ka 波段,可以获得比单频雷达更精确的降水测量。在水平分辨率相同的情况下,PMR 观测幅宽大于 PR 和 DPR,可以覆盖更多的降水事件。此外,PMR 的天线峰值旁瓣电平低于 DPR 和 PR,有利于抑制地杂波的影响,减小测量误差。因此,FY-3G PMR 的降水测量能力优于 TRMM 卫星,整体上与国际上第二代降水雷达 GPM DPR 的测量能力相当,部分特性略优于 DPR(Zhang et al,2023)。

表 7 FY-3G PMR 主要设计指标及对比

Table 7 Main design indicators and comparison of FY-3G PMR			
雷达	FY-3G PMR	GPM DPR	TRMM PR
频段	双频(Ku/Ka)	双频(Ku/Ka)	单频(Ku)
地面刈幅/km	303	245(Ku)/115(Ka)	245
水平分辨率(天底点)/km	5	5	5
距离分辨率/m	250	250(Ku) 250/500(Ka)	250
观测距离/km	-5~18 ASL	-5~18 ASL(Ku) -3~18 ASL(Ka)	-5~15 ASL
脉冲重复技术	可变	可变	固定
最小可检测降水强度/(mm·h <sup>-1</sup> )	0.5(Ku) 0.2(Ka)	0.5(Ku) 0.2(Ka)	0.7
动态范围/dB	≥70	≥70	≥70
测量精度/dB	≤±1	≤±1	≤±1
波束匹配精度/(°)	≤0.1	≤0.14	无
独立样本数	≥64	≥96	≥64
天线峰值旁瓣电平/dB	≤-30	≤-25	≤-25



为了确保准确的降水观测,PMR 测量精度需要优于 1 dB,因此,PMR 发射入轨后,采用内标定与外标定相结合的手段实现高精度测量。内标定主要采用系统内部的传感器,对雷达的发射功率、接收性能、TR 组件相对幅相误差、内部环境温度等相关参数进行测量。外标定通过地面高精度有源和无源定标器对降水测量雷达进行“端到端”式的绝对校正,以消除天线方向图以及雷达方程近似等因素的影响。PMR 利用有源雷达定标器主动发射信号,模拟后向散射截面已知的点目标标定基准,实现降水测量雷达外标定。同时海面作为大范围分布式目标,其后向散射在小入射角时相对稳定,能够用于估计 PMR 测量的辐射精度(袁梅等,2024)。图 11 给出了 PMR 与 DPR 在无降水条件下测量的海面归一化雷达后向散射截面的统计结果,即日均值的均方差。结果表明,PMR Ku 和 Ka 波段的辐射精度均优于 1 dB ( $3\sigma$ ),且在大部分入射角上略优于 DPR。

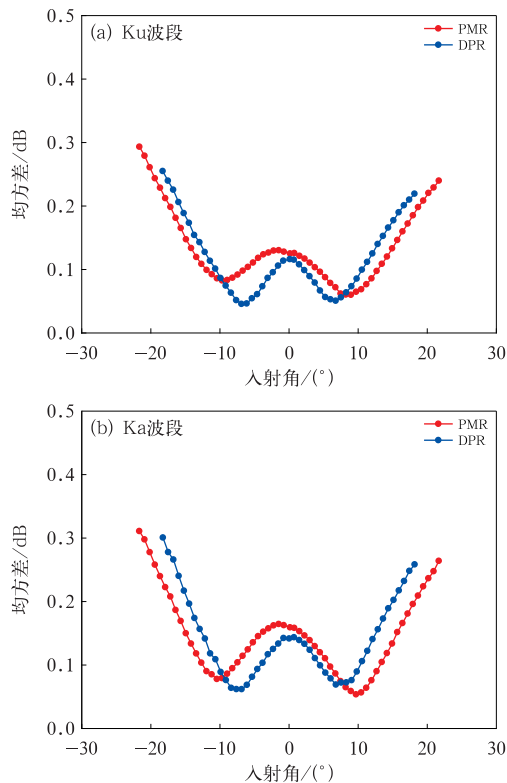


图 11 不同入射角下 FY-3G PMR 和 GPM DPR 后向散射截面日均值的均方差  
Fig. 11 Mean square error of FY-3G PMR and GPM DPR for the daily average backscattering cross-section under different incident angles

### 3.3 FY-3G 卫星主要产品

FY-3G 产品系统采用四级产品结构,即 L0~L3 级。L0 产品为卫星原始观测数据;L1 产品是经过辐射定标和地理定位的轨道级观测数据;L2 产品是基于 L1 反演得到的地球物理参数及其日合成产品,其空间分辨率和地理覆盖范围与 L1 相同;L3 产品是基于 L2 生成的网格数据,具有统一的时空属性,包括旬、月产品以及融合产品。FY-3G 卫星上的仪器可以通过完整的遥感产品系统产生重要的地球物理参数,包括云、降水、冰冻圈参数和大气剖面。

作为降水观测任务中的核心遥感仪器,PMR 可以提供降水的三维结构,反演获得降水强度、滴谱参数、降水类型、降水相态、亮带参数、潜热等准确信息,提高天基降水测量能力。MWRI-RM 是 FY-3 系列卫星中重要的微波成像仪器,利用对地球表面 10.65~183 GHz 的微波辐射观测数据,可反演获得地表降水、大气可降水量、云水含量、海面风速、陆海表温度、土壤湿度、积雪深度、雪水当量等定量产品。MERSI-RM 利用 5 个太阳反射波段和 3 个热红外波段的观测数据,可反演得到的产品包括云掩膜、云量、云顶特征、云分类/相态、陆海表温度、积雪参数等;通过与主动雷达等微波仪器配合,对云和降水进行精确观测。GNOS-II 利用接收的多种类型的全球导航信号和海面反射信号,生成大气温度和湿度廓线、大气密度及海面风速等产品(Zhang et al, 2023)。此外,利用 PMR 和 MWRI-RM 观测数据开展融合反演,还设计生成了主被动微波融合降水产品。FY-3G 卫星系统与地面系统完成在轨测试后,L1 和 L2 产品已陆续向公众发布,相关数据产品可从风云卫星遥感数据服务网下载获取(<http://satellite.nsmc.org.cn/DataPortal/cn/home/index.html>)。

## 4 天地一体化融合应用初步进展

反射率因子作为表征降水粒子后向散射能力的核心参数,直接决定了降水强度、相态及空间分布的定量反演精度。开展星地融合应用研究,通过天地一体化降水观测网络,实现地基天气雷达高时空分辨率与星载降水雷达广域覆盖的优势互补,是突破当前降水监测技术瓶颈、提升气象观测精度的关键路径。针对星地观测差异及融合产品需求,在海量

观测数据的基础上,本文探讨并展望了星地雷达反射率因子交叉检验、星地雷达反射率因子融合、基于静止卫星数据的地基雷达反射率因子模拟、极轨卫星主被动微波观测与静止卫星红外观测资料融合等方面的关键技术,为极端天气预警、水资源管理及气候研究提供更精准的降水时空演变信息。

#### 4.1 星地雷达反射率因子交叉检验

星地雷达反射率因子交叉检验能够揭示星载与地基观测的定标误差与系统偏差,提升降水条件下的观测一致性,是实现高质量数据融合和降水估计的关键环节。由于地基天气雷达和星载降水测量雷达工作频段、波束宽度、观测模式及定标策略存在差异,通过数据筛选、频率订正、时空匹配等(Chen et al, 2025a; 2025b)方法,能够实现星载降水雷达和地基天气雷达网数据的一致性校验(Zhong et al, 2017)。数据筛选通常以星载降水雷达标称灵敏度(Louf et al, 2019)为阈值,优选层状降水以减少空间照射不均(Morris and Schwaller, 2011)和散射机制差异(Warren et al, 2018)引入的误差,并对遮挡区域进行滤除或加权修正(张帅等, 2019)。时空匹配方面,时间匹配采用动态时间窗以最小化星地雷达时间差,空间匹配采用体积匹配法,通过三维坐标投影与波束位置交集加权计算实现垂直和水平的空间一致性(Bolen and Chandrasekar, 2000)。频率订正则针对星地雷达工作波段不同引起的降水粒子散射差异,建立 Ku 向 S、C、X 波段的校正查找表,同时结合融化层信息近似区分散射粒子类型,实现频率转换与校正(商建等, 2009)。

在保证观测数据精度的基础上,星地雷达在观测方式与工作频率方面的差异性,形成了多维度大气信息表达体系。一方面,星载雷达具备良好的空间覆盖能力与可移动性,可作为数据偏差传递的“桥梁”,实现地基高性能天气雷达数据精度向地基雷达网络中其他雷达的有效扩展与传递。以长沙参考雷达为基准,通过 FY-3G 开展相邻 4 部天气雷达反射率因子一致性验证,结果显示:星地偏差传递结果与相邻地基雷达间一致性比对结果呈正相关趋势,偏差传递最小相差 0.29 dB,最大 1.13 dB,为非相邻雷达观测比对提供了新的解决方案(Wang et al, 2025)。另一方面,高性能地基天气雷达能够对星载雷达在轨运行期间的衰减特性进行长期监测与系统评估。长沙参考雷达在比对期间需要完成 1 次全链

路高精度标校,确保观测数据保持在高质量状态。同时长期监控评估要求星地有效数据匹配条件满足:有效匹配点( $\geq 500$  个),相关系数( $> 0.8$ ),标准偏差( $\leq 2.5$  dB)。通过星地互补的联合校准机制,有望实现星地雷达间的交叉比对与精度验证,进一步提升观测系统一致性与定量化观测能力。

#### 4.2 星地雷达反射率因子融合应用

星地反射率因子交叉检验能够量化星载与地基降水雷达间的系统性差异,反映了星地雷达在观测视角、空间分辨率、频率响应及定标策略等方面的偏差。然而,交叉检验本身难以弥补多源观测平台在时空分辨率和空间范围上的不足。基于交叉检验开展融合处理,能够兼顾星载雷达广覆盖与空间连续以及地基雷达高时效与高分辨率的优势,进一步提升融合数据的物理一致性和可信度。多源降水数据融合从早期的加权平均、最优插值到近年来广泛应用的卡尔曼滤波、贝叶斯推断方法,再到深度学习等智能算法,融合精度与适应性不断提升。加权平均法简便直观,同时支持主客观先验偏差订正,但对权重设置较为敏感,常作为复杂算法的初始融合场(Gavahi et al, 2023)。卡尔曼滤波则结合系统动态和误差协方差,实现时序优化更新(Chen et al, 2016)。贝叶斯方法通过引入先验信息实现概率最优融合,适用于不确定性建模(Mazzetti and Todini, 2004; Verdin et al, 2015; Kim et al, 2018)。近年来,基于卷积神经网络(CNN)与长短期记忆网络(LSTM)等的深度学习方法展现出在复杂空间结构建模与多源数据非线性融合方面的显著优势(Chen et al, 2019; Huang et al, 2024)。结合多源降水数据融合的先验经验,基于雷达反射率因子的基础数据融合思路主要包括以下四步:

(1)在星地雷达共同覆盖区域内随机选取点位计算数值比,得到扰动偏差因子和偏差场的集合,计算卫星偏差校正反射率因子。

(2)利用周边有效地基雷达数据,通过空间插值逐点对空白区域进行填充,生成完整的雷达参考数据源。

(3)分析星地雷达共同覆盖区域的系统偏差,通过多种方法确定最佳融合权重,指导空白区卫星数据与插值地基雷达数据融合。

(4)以地基雷达数据为基础,分区实现星地数据融合。对雷达覆盖区,直接保留原始雷达观测数据;

对过渡区,以空白区为中心向外划定缓冲区,对雷达实测数据和卫星数据加权融合并平滑;对空白区,以大范围权重场为基础实现插值后的雷达数据和升采样后的卫星数据融合。

总体来看,星地雷达反射率因子融合是实现全球-区域-局地多尺度降水监测的重要路径。除了星载雷达的主动观测外,星载被动观测也是星地融合应用的一个重要方面。通过天气雷达云、雨及湍流弱回波与红外光谱成像仪监测到的云、气溶胶、水汽信息进行融合,解决现有天气雷达在无降水或降水粒子较小时的“静默期”,捕捉降水及对流触发前兆信号,实现对云雨初生、发展及消亡过程的精细化、全生命周期观测。

#### 4.3 基于静止卫星数据的地基雷达反射率因子模拟

降水测量卫星观测能够弥补地基天气雷达覆盖空白,具备全球覆盖与降水垂直结构探测能力,但 FY-3G 作为我国首颗双频降水测量卫星,受其运行轨道影响,重访周期长,难以满足快速变化的天气全生命周期的监测需求。FY-4 静止轨道气象卫星,运行于地球同步轨道,能够实现时空分辨率为 15 min/4 km 的中国区域连续观测,相较于 FY-3G 卫星重访周期得到了明显提升。FY-4B 卫星搭载的先进的静止轨道辐射成像仪 (AGRI) 获取的高频次大气图像已经很好地应用于云团跟踪、云顶温度、水汽分布等识别与监测,为全球降水监测提供了另一种可能性。

由于地面天气雷达和静止卫星成像仪观测数据都可以反映云的物理属性,因此就理论而言,两种观测数据之间存在内在联系,从静止卫星观测数据中模拟构建的雷达反射率产品可用于没有雷达覆盖的区域。通过物理分析,在静止气象卫星的众多观测数据中,确定对雷达反射率因子具有意义的关键影响因子,据此采用深度学习方法估计雷达组合反射率。研究表明,深度学习模型可以重构雷达回波的整体位置、形状和强度等细节(李俊等,2024)。尽管在强回波的重建方面仍需改进,但是该模型仍可以再现超过 50 dBz 的强雷达回波(Yang et al,2023),特别是基于注意力机制的综合改进模型检测概率、关键成功指数和均方根误差等统计数据方面都比传统模型具有更好的性能。当前基于 FY-4 卫星观测的时、空、谱、角信息联合的模拟雷达反射率产品已进入业务试应用,在西部、海上等地基雷达观测缺失

的区域中发挥不可或缺的补位作用。

#### 4.4 主被动微波与静止卫星红外降水数据融合

卫星降水观测常用的技术主要有主动微波遥感、被动微波遥感和被动红外遥感三类技术。其中,被动微波遥感主要基于大气窗区降水粒子的散射辐射物理特征实现降水估算,而被动红外遥感主要基于云顶红外亮温和红外亮温距平统计特征实现降水估算。星载降水测量雷达是一种主动微波遥感仪器,通过发射特定频率的微波,并根据回波延迟时间和强度精准解析降水垂直结构。一般而言,星载降水测量雷达的降水产品精度优于被动微波,而被动微波优于红外遥感。被动红外降水估计尽管精度最低,但可以搭载在静止卫星上实现高频次观测,可以弥补主被动微波遥感在小时尺度上的降水观测瓶颈。

星载主动降水测量雷达测量精度高,但扫描范围受限,需要与被动微波和红外遥感技术联合使用,才能实现全球、高时间分辨率的降水观测。利用全球多颗静止卫星的红外降水观测以及低轨卫星主被动微波降水观测,通过空间滤波、空间最优插值、变分等方法进行数据融合,从而实现各类卫星优势互补,提升数据集的时空分辨率与准确性。以IMERG 产品为例,总体融合方案可以分为四步:

(1)以 DPR 降水雷达为基准,使用分位数匹配法交叉订正 GPM 星链中其他的被动微波产品,得到高质量被动微波降水数据(仅有轨道覆盖数据);

(2)使用云运动矢量外推,将高质量被动微波轨道数据外推至全球覆盖(IMERG-Early);

(3)使用卡尔曼滤波融合微波外推降水和静止卫星的红外降水,约束外推误差,提升产品准确性(IMERG-Late);

(4)使用地基雨量计进行偏差订正(IMERG-Final)。

除了 IMERG 以外,现有的 CMORPH、GsMaP 和 GPCP 等多源降水融合产品等均采取类似的融合方案。风云气象卫星平台已形成极轨卫星与静止卫星协同观测体系,并且同时业务运行晨昏、上午、下午和倾斜四条近地轨道气象卫星,满足生产联合多卫星融合降水资料的条件。

星地雷达相互校验和融合应用一直是欧美主动降水卫星计划中的一项重要组成内容,例如美国国家航空航天局(NASA)牵头、联合国家海洋与大气

管理局(NOAA)等机构提出并实施了 GPM 地面验证计划 GPM-Ground Validation(GV),旨在对全球降水测量卫星 GPM 产品进行系统验证和精度提升,科学目标包括改进雷达降水估计,研究微波衰减技术,开展降水系统特征和降水微物理研究等。GV 项目不仅限于美国本土,还在全球范围布设了验证点,形成了覆盖广泛的校验网络。

我国建成了全球规模最大的地基多波段天气雷达网,成功发射了国内首颗、全球第三颗主动降水测量卫星,在国际上具有开展星地降水测量雷达组网协同观测和数据融合应用的最有利条件。考虑到中国地域辽阔,降水类型与特征非常复杂,开展星地雷达相互校验和融合应用在我国灾害性天气监测和防灾减灾中具有更为迫切的现实意义。因此有针对性的选择梅雨降水、台风季风降水、高原地形降水以及固态降水等多个区域,通过星地雷达反射率因子交叉检验、雷达反射率因子融合应用、基于静止卫星的地基雷达反射率因子模拟、主被动微波与静止卫星红外降水数据融合等技术,实现我国地基多波段天气雷达网与 FY-3G PMR、FY-3 被动微波遥感、FY-4 被动红外遥感的融合应用,将不断丰富和深化降水遥感产品在多领域的科学和业务应用。

**致谢:**感谢国家卫星气象中心李博研究员、尹红刚正高级工程师、吴琼正高级工程师为本文提供了星载降水雷达、卫星云图反演反射率因子和地基验证方面的资料,感谢中国气象局气象探测中心胡姮正高级工程师,王箫鹏、腾玉鹏、韩旭三位高级工程师,以及朱默研、李萌工程师提供的天气雷达网方面的资料。

## 参考文献

- 陈昊,(2022-08-30). 浙北天气雷达精细化探测组网协同应用研究[EB/OL]. 浙江省大气探测技术保障中心. Chen H, (2022-08-30). Research on collaborative application of refined detection network for weather radars in Northern Zhejiang[EB/OL]. Zhejiang Atmospheric Sounding Technology Support Center(in Chinese).
- 谷松岩,张鹏,陈林,等,2023. 中国首颗降水测量卫星(风云三号 G 星)的探测能力概述与展望[J]. 暴雨灾害,42(5):489-498. Gu S Y, Zhang P, Chen L, et al, 2023. Overview and prospect of the detection capability of China's first precipitation measurement satellite FY-3G[J]. Torr Rain Dis, 42(5):489-498(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).
- 李俊,郑婧,闵敏,等,2024. 风云气象卫星观测在短时临近天气预报中的定量应用进展(特邀)[J]. 光学学报,44(18):1800002. Li J, Zheng J, Min M, et al, 2024. Progress in quantitative applications of Fengyun meteorological satellite observations in weather nowcasting(invited)[J]. Acta Optica Sin, 44(18):1800002(in Chinese).
- 刘洁,王烁,王箫鹏,等,2024. 基于模糊理论和层次分析法的新一代天气雷达健康指数评价方法[J]. 气象科学,44(6):1171-1181. Liu J, Wang S, Wang X P, et al, 2024. An evaluation method for the health index of the CINRADs based on fuzzy theory and analytic hierarchy process[J]. Sci Meteor Sin, 44(6):1171-1181(in Chinese).
- 刘黎平,吴林林,吴翀,等,2014. X 波段相控阵天气雷达对流过程观测外场试验及初步结果分析[J]. 大气科学,38(6):1079-1094. Liu L P, Wu L L, Wu C, et al, 2014. Field experiment on convective precipitation by X-band phased-array radar and preliminary results[J]. Chin J Atmos Sci, 38(6):1079-1094(in Chinese).
- 刘新安,曾正茂,陈玉宝,等,2024. 双线偏振全数字相控阵天气雷达设计与试验[J]. 现代雷达,46(4):65-75. Liu X A, Zeng Z M, Chen Y B, et al, 2024. Design and experiment of dual polarization all-digital phased array weather radar[J]. Mod Radar, 46(4):65-75(in Chinese).
- 刘于新,马建立,陈明轩,等,2024. S 波段与 X 波段天气雷达探测参量差异及组网融合处理研究[J]. 气象,50(4):488-498. Liu Y X, Ma J L, Chen M X, et al, 2024. Study on differences and fusion mosaic methods of parameters between S-band and X-band weather radars[J]. Meteor Mon, 50(4):488-498(in Chinese).
- 鲁德金,胡姮,吴蕾,等,2024. 天气雷达间一致性评估算法影响因子分析及改进[J]. 气象,50(4):475-487. Lu D J, Hu H, Wu L, et al, 2024. Influence factors analysis and improvement of consistency evaluation algorithm between weather radars[J]. Meteor Mon, 50(4):475-487(in Chinese).
- 商建,范学花,杨汝良,2009. TRMM 卫星测雨雷达与地基雷达的数据匹配问题研究[J]. 遥感技术与应用,24(2):164-166. Shang J, Fan X H, Yang R L, 2009. Data matching of TRMM precipitation radar and ground-based radar[J]. Remote Sens Technol Appl, 24(2):164-166(in Chinese).
- 沈学顺,苏勇,李兴良,等,2025. 中国业务数值天气预报自主发展中的理论和方法创新[J]. 气象,51(11):1293-1320. Shen X S, Su Y, Li X L, et al, 2025. Innovation of theory and methodology in the independent development of operational numerical weather prediction in China[J]. Meteor Mon, 51(11):1293-1320(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).
- 吴艳锋,(2022-08-29). 新一代天气雷达关键技术升级与应用[EB/OL]. 北京:北京敏视达雷达有限公司. Wu Y F, (2022-08-29). Upgrading and application of key technologies for the new generation weather radar[EB/OL]. Beijing: Beijing METSTAR Radar Company, Limited(in Chinese).
- 肖艳姣,王珏,王志斌,等,2021. 基于 S 波段新一代天气雷达观测的

- 下击暴流临近预报方法[J]. 气象, 47(8):919-931. Xiao Y J, Wang J, Wang Z B, et al, 2021. A downburst nowcasting method based on observations of S-band new generation weather radar [J]. Meteor Mon, 47(8):919-931 (in Chinese).
- 袁梅, 尹红刚, 商建, 等, 2024. FY-3G 降水测量雷达海洋定标精度检验与评估[J]. 应用气象学报, 35(5):526-537. Yuan M, Yin H G, Shang J, et al, 2024. Validation and evaluation of ocean calibration accuracy of FY-3G precipitation measurement radar[J]. J Appl Meteor Sci, 35(5):526-537 (in Chinese).
- 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).
- 张帅, 王振会, 赵兵科, 等, 2019. 星载雷达在订正地基天气雷达标定误差中的应用[J]. 气候与环境研究, 24(5):576-584. Zhang S, Wang Z H, Zhao B K, et al, 2019. Using space-borne radar data to correcting calibration errors in ground-based radar[J]. Climatic Environ Res, 24(5):576-584 (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).
- Bolen S M, Chandrasekar V, 2000. Quantitative cross validation of space-based and ground-based radar observations [J]. J Appl Meteor Climatol, 39(12):2071-2079.
- Chen H N, Chandrasekar V, Tan H M, et al, 2019. Rainfall estimation from ground radar and TRMM precipitation radar using hybrid deep neural networks[J]. Geophys Res Lett, 46(17-18):10669-10678.
- Chen J Q, Yong B, Ren L L, et al, 2016. Using a Kalman filter to assimilate TRMM-based real-time satellite precipitation estimates over Jinghe Basin, China[J]. Remote Sens, 8(11):899.
- Chen P, Chen L, Wu Q, et al, 2025a. Analysis of satellite-ground radar reflectivity consistency: first evaluation results of FY-3G and GPM precipitation radar[J]. Geophys Res Lett, 52(13):e2025GL115785.
- Chen P, Chen L, Wang G, et al, 2025b. Comparison of reflectivity consistency between spaceborne precipitation radar and ground-based weather radar in China and the United States[J]. Adv Atmos Sci, 42(7):1376-1394.
- Crum T D, Alberty R L, 1993. The WSR-88D and the WSR-88D operational support facility[J]. Bull Amer Meteor Soc, 74(9):1669-1688.
- Forbes J R, 2015. Fundamentals of spacecraft attitude determination and control [bookshelf][J]. IEEE Contr Syst Mag, 35(4):56-58.
- Gavahi K, Foroumandi E, Moradkhani H, 2023. A deep learning-based framework for multi-source precipitation fusion [J]. Remote Sens Environ, 295:113723.
- Huang A F, Kou L L, Liang Y Z, et al, 2024. Fusion of ground-based and spaceborne radar precipitation based on spatial domain regularization[J]. J Meteor Res, 38(2):285-302.
- Kim T J, Kwon H H, Lima C, 2018. A Bayesian partial pooling approach to mean field bias correction of weather radar rainfall estimates: application to Osungsan Weather Radar in South Korea [J]. J Hydrol, 565:14-26.
- Louf V, Protat A, Warren R A, et al, 2019. An integrated approach to weather radar calibration and monitoring using ground clutter and satellite comparisons[J]. J Atmos Ocean Technol, 36(1):17-39.
- Mazzetti C, Todini E, 2004. Combining raingages and radar precipitation measurements using a Bayesian approach[C]// Proceedings of the Fourth European Conference on Geostatistics for Environmental Applications on geoENV IV-Geostatistics for Environmental Applications. Barcelona: Springer, 401-412.
- Morris K R, Schwaller M R, 2011. Sensitivity of spaceborne and ground radar comparison results to data analysis methods and constraints[C]// 35th Conference on Radar Meteorology. Pittsburgh: American Meteorological Society.
- Schvartzman D, Torres S M, Yu T Y, 2021. Distributed beams: Concept of operations for polarimetric rotating phased array radar [J]. IEEE Trans Geosci Remote Sens, 59(11):9173-9191.
- Verdin A, Rajagopalan B, Kleiber W, et al, 2015. A Bayesian kriging approach for blending satellite and ground precipitation observations[J]. Water Resour Res, 51(2):908-921.
- Wang X P, Lei Y H, Fu Y Y, et al, 2025. Analysis of consistency and bias traceability in ground-based weather radar reflectivity using FY-3G precipitation measurement radar[J]. IEEE Trans Geosci Remote Sens, 63:5103013.
- Warren R A, Protat A, Siems S T, et al, 2018. Calibrating ground-based radars against TRMM and GPM [J]. J Atmos Ocean Technol, 35(2):323-346.
- Yang L, Zhao Q, Xue Y H, et al, 2023. Radar composite reflectivity reconstruction based on FY-4A using deep learning[J]. Sensors, 23(1):81.
- Zhang P, Gu S Y, Chen L, et al, 2023. FY-3G satellite instruments and precipitation products: first report of China's Fengyun rainfall mission in-orbit[J]. J Remote Sens, 3:0097.
- Zhang P, Lu Q F, Hu X Q, et al, 2019. Latest progress of the Chinese meteorological satellite program and core data processing technologies[J]. Adv Atmos Sci, 36(9):1027-1045.
- Zhong L Z, Yang R F, Wen Y X, et al, 2017. Cross-evaluation of reflectivity from the space-borne precipitation radar and multi-type ground-based weather radar network in China[J]. Atmos Res, 196:200-210.

(本文责编:俞卫平)