

# 星载降水测量雷达反射率因子宽幅计算调度策略及应用

袁梅<sup>1,2,3</sup>, 张小雯<sup>4</sup>, 覃平<sup>5</sup>, 张媛媛<sup>1,2,3</sup>, 尹红刚<sup>1,2,3</sup>, 安宏达<sup>5</sup>,  
商建<sup>1,2,3\*</sup>, 徐娜<sup>1,2,3</sup>, 谷松岩<sup>1,2,3</sup>

(1 国家卫星气象中心(国家空间天气监测预警中心) 北京 100081;

2 许健民气象卫星创新中心 北京 100081;

3 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;

4 国家气象中心 北京 100081;

5 北京华云星地通科技有限公司 北京 100081)

**摘要:** 我国首颗降水测量卫星于 2023 年 4 月成功发射, 联合使用主被动微波仪器双频降水测量雷达和微波成像仪开展高精度降水探测。针对降水测量雷达幅宽覆盖有限的现状, 利用同平台微波成像仪资料, 采用深度学习模型研发了宽幅雷达反射率因子产品, 实现了降水测量雷达现有幅宽的 2.67 倍覆盖, 显著增大了降水测量雷达的观测范围。以 2023 年台风“泰利”和华北极端短时强降水为例对业务生成的宽幅结果进行应用潜力分析, 结果显示, 宽幅雷达反射率因子的计算结果与地基雷达反射率因子的结果较为一致, 在实际业务中具有较强的参考性。在地面系统业务调度中, 为了支撑持续不断的宽幅雷达反射率因子数据的高时效计算, 设计了宽幅雷达反射率因子业务流程, 综合考虑业务实施的资源消耗、时效性及可靠性等, 提出数据驱动的最佳业务调度策略, 可以有效地减少运行时间, 提高业务产品生成与服务的时效性。

**关键词:** 星载降水测量雷达; 宽幅计算; 雷达反射率因子; 业务调度

中图分类号: P49; P237 文献标志码: A 文章编号: 2095-1000(2024)06-0021-16

DOI: 10.12347/j.ycyk.20240819002

引用格式: 袁梅, 张小雯, 覃平, 等. 星载降水测量雷达反射率因子宽幅计算调度策略及应用[J]. 遥测遥控, 2024, 45(6): 21-36.

## Scheduling Strategy and Application for Wide Swath Radar Reflectivity Factor Calculation of Spaceborne Precipitation Measurement Radar

YUAN Mei<sup>1,2,3</sup>, ZHANG Xiaowen<sup>4</sup>, QIN Ping<sup>5</sup>, ZHANG Yuanyuan<sup>1,2,3</sup>, YIN Honggang<sup>1,2,3</sup>, AN Hongda<sup>5</sup>, SHANG Jian<sup>1,2,3\*</sup>,  
XU Na<sup>1,2,3</sup>, GU Songyan<sup>1,2,3</sup>

(1. National Satellite Meteorological Center (National Centre for Space Weather), Beijing 100081, China;

2. Innovation Center for FengYun Meteorological Satellite (FYSIC), Beijing 100081, China;

3. Key Laboratory of Radiometric Calibration and Validation for Environmental Satellites, Beijing 100081, China;

4. National Meteorological Center, Beijing 100081, China;

5. Beijing Huayun Shinetek Science and Technology Co., Ltd., Beijing 100081, China)

**Abstract:** China's first precipitation measurement satellite has been successfully launched in April 2023, combining active and passive microwave instruments dual-frequency precipitation measurement radar and microwave imager to carry out high precision precipitation detection. In view of the limited coverage of precipitation measurement radar, the radar reflectivity factor data of wide swath radar is developed by using the microwave radiometer imager data of the same platform and the deep learning model, and the coverage of 2.67 times the width of precipitation measurement radar is achieved, which significantly increases the observation range of precipitation measurement radar. Taking Typhoon "Tali" in 2023 and extreme short-time heavy precipitation in North China as ex-

基金项目: 中国气象局青年创新团队(CMA2024N10); 民用航天技术预先研究项目(D040204, D030303); 中国科学院国际大科学计划培育专项(183311KYSB20200015); 风云卫星应用先行计划 2023 (FY-APP-ZX-202301)

通信作者: 商建 (shangjian@cma.gov.cn)

收稿日期: 2024-08-19; 修回日期: 2024-09-04

amples, the application potential of the wide swath results generated by the service is analyzed. The calculation result of the radar reflectivity factor of wide swath radar is consistent with that of ground based radar, which has a good reference in practice. In the ground system operation scheduling, in order to support the continuous high-timeliness calculation of wide swath radar reflectivity factor data, this paper designs the wide swath radar reflectivity factor operation flow, comprehensively considers the resource consumption, timeliness and reliability of the operation implementation, and proposes the best data-driven operation scheduling strategy, which can effectively reduce the running time and improve the timeliness.

**Keywords:** Spaceborne precipitation radar; Wide swath calculation; Radar reflectivity factor; Operation scheduling

**Citation:** YUAN Mei, ZHANG Xiaowen, QIN Ping, et al. Scheduling Strategy and Application for Wide Swath Radar Reflectivity Factor Calculation of Spaceborne Precipitation Measurement Radar[J]. Journal of Telemetry, Tracking and Command, 2024, 45(6): 21–36.

## 0 引言

降水是重要的气候要素之一, 降水的全球分布及微物理结构影响着全球气候与环境变化, 通过对降水的定量观测可以对洪水的发生概率进行预报, 从而及时向公众发布预警, 对防灾、减灾有着重要作用<sup>[1]</sup>。同时, 降水是地球水循环的重要过程, 在大气的潜热交换中发挥着重要作用<sup>[2,3]</sup>。实现准确的降水定量观测具有极其重要的社会及科学意义。目前, 降水观测资料主要来源于地面上的雨量计、地基天气雷达和星载被动遥感仪器。雨量计和地基雷达无法覆盖广阔的海面、沙漠和高山地区<sup>[4,5]</sup>, 星载被动遥感技术难以探测降水系统内部的三维垂直结构<sup>[6,7]</sup>。星载降水测量雷达通过主动发射微波脉冲, 测量不同高度上降水粒子的反射率, 获得降水系统的垂直廓线与三维结构, 实现全天时、全天候、大范围降水立体测量, 有效弥补雨量计、地基雷达和卫星被动遥感技术的不足<sup>[8]</sup>。

2023年4月16日, 我国首颗降水测量卫星——风云三号降水卫星(FengYun-3G, FY-3G)成功发射, 可以提高全球中低纬度地区降水测量及极端天气预测的能力, 并且有助于更好地研究地球水循环和降水气候学特征<sup>[9-11]</sup>。FY-3G卫星的核心仪器——降水测量雷达(Precipitation Measurement Radar, PMR)是工作在Ku与Ka频段的双频降水测量雷达, 主要目标是监测全球中低纬地区的降水和极端天气事件, 提供对高达18 km的降水系统的三维观测资料, 可以反演得到精确的降水强度和降水类型等信息<sup>[11]</sup>。美中不足的是, 降水测量雷达的观测幅宽仅有300 km, 虽然与国际上的两颗同类型卫星上的雷达TRMM PR(Tropical Rainfall Measuring Mission, Precipitation Radar, 热带测雨任

务, 降水雷达)和GPMCO DPR(Global Precipitation Measurement Core Observatory, Dual-frequency Precipitation Radar, 全球降水测量核心观测站, 双频降水雷达)相比已有提升, 但仍不能满足应用需求, 在一定程度上限制了降水测量雷达的实际应用。同平台搭载了被动微波遥感仪器——降水型微波成像仪(Microwave Radiometer Imager-Rainfall Mission, MWRI-RM), 通过10.65 GHz~183 GHz频段的被动微波辐射能量测量, 可获取陆表和海面降水、大气可降水、云水等信息, 为全球降水测量服务; 其800 km的宽刈幅能够大大提高降水测量的地面覆盖率<sup>[9-12]</sup>。

本研究利用深度学习方法, 使用同平台的微波成像仪亮温数据计算降水测量雷达无衰减校正的反射率因子垂直剖面(测量值)(Vertical profile of reflectivity factor without attenuation correction (as measured), zFactorMeasured)数据, 获得与微波成像仪同幅宽的雷达反射率因子, 大大提高降水测量雷达的观测范围, 并以2023年的台风“苏拉”、台风“泰利”和华北极端短时强降水为例对业务生成的宽幅结果进行应用潜力分析。同时, 面向宽幅雷达反射率因子计算在业务系统中的调度问题, 综合考虑业务流程设计及业务实施的资源消耗、时效性及可靠性等, 设计最佳业务调度策略, 提升星载降水测量雷达在强降水事件中的应用效益。

## 1 雷达反射率因子宽幅计算

### 1.1 数据介绍

FY-3G降水测量雷达采用一维有源相控阵实现跨轨扫描, 在星下点两侧各20.3°范围内获得300 km幅宽的三维降水观测资料。降水测量雷达的主要参数见表1<sup>[11]</sup>。FY-3G地面系统接收到的

PMR原始观测数据为0级(level 0, L0)数据,经过解包、质量检验与分流后得到1A级(levle 1A, L1A)数据,再经几何定位、辐射定标、噪声功率计算、回波功率计算和降水判断等处理后得到1B级(level 1B, L1B)数据,之后计算雷达反射率因子、后向散射系数、路径积分衰减等,并给出合理的质量标识,生成对外发布的1级(level 1, L1)数据。2级(level 2, L2)产品是L1数据经过反演及其他计算得到的各种微物理参数,包括三维降雨率、雨滴谱参数廓线、降水相态、亮带检测、降水分类等降水产品。PMR在2023年10月完成第一阶段在轨测试后就正式发布了版本1的L1数据产品,单个文件为HDF5(层级数据格式)标准格式的半轨(升轨/降轨)数据,水平分辨率为5 km,垂直分辨率为250 m(采样间隔为50 m),时间长度约46 min。本项工作使用该数据中的时间码、几何定位结果(经纬度、每个波位的天顶角)、辐射定标数据(雷达反射率因子)以及质量标识(降水判识、杂波判断、数据质量码)等。

FY-3G卫星的另一台微波仪器是微波成像仪-降水型(MWRI-RM),共有17个频点、26个通道(部分频点为双极化),首次实现了成像与探测一体化设计。MWRI-RM采用圆锥扫描体制,观测幅宽

表1 PMR主要参数  
Table 1 Main specifications of PMR

参数	指标	
雷达类型	一维有源相控阵	
工作波段	Ku	Ka
极化	HH	
扫描角度	降水观测模式:±20.3°(间隔0.7°) 外定标模式:±3°(间隔0.1°)	
天线	类型	128元波导缝隙阵列
	尺寸	2.1 m×2.1 m 0.9 m×0.9 m
	波束宽度	0.7°(星下点)
	峰值旁瓣	<-30 dB
发射机/ 接收机	峰值功率	720 W 360 W
	脉冲宽度	1.67 μs×4
	带宽	0.6 MHz×4
	脉冲重复频率	3 700 Hz ~ 4 700 Hz

约800 km。MWRI-RM的具体参数见表2。MWRI-RM数据预处理系统读取L0数据后,完成数据解包、质量控制、几何定位与辐射定标等处理,生成包含每个观测像元经纬度、天顶角、方位角、各通道亮温的L1数据。MWRI-RM L1单个文件为HDF5标准格式的半轨(升轨/降轨)数据,与PMR类似。本项工作使用该数据中的时间码、几何定位结果(经纬度、角度)、辐射定标数据(亮温)以及质量标识(数据质量码)等。

表2 MWRI-RM主要参数  
Table 2 Main specifications of MWRI-RM

参数	指标
通道数	17频点/26通道
扫描方式	圆锥扫描
扫描周期	1.7 s、1.8 s、2.0 s三种模式
地面入射角	天顶角:窗区通道48.7°±0.5°,探测通道46.4°±0.5°; 入射角:窗区通道53°±1°,探测通道50°±1°
工作频率/GHz	10.65、18.7、23.8、36.5、50.3、52.61、53.24、53.75、89.0、118.750 3±3.2、118.750 3±2.1、 118.750 3±1.4、118.750 3±1.2、165.5±0.75、183.31±2.0、183.31±3.4、183.31±7
极化	V <sub>H</sub> 、V <sub>H</sub> 、V <sub>H</sub> 、V <sub>H</sub> 、V <sub>H</sub> 、V <sub>H</sub> 、V <sub>H</sub> 、V <sub>H</sub> 、V <sub>H</sub> 、V <sub>H</sub> 、V <sub>H</sub> 、V <sub>H</sub> 、V <sub>V</sub> 、V <sub>V</sub> 、V <sub>V</sub> 、V <sub>V</sub> 、V <sub>V</sub> 、V <sub>V</sub>
带宽/MHz	180、200、400、900、400、400、400、400、3 000、2×500、2×400、2×400、2×400、2×1 350、2×1 500、2×1 500、2×2 000
瞬时视场/(km×km)	21×35、14×23、13×21、9×15、7×11、7×11、7×11、7×11、5×8、4×7、4×7、4×7、4×7、4×6、4×7、4×7、4×7
灵敏度@2.7KNEDT/K	0.071、0.196、0.195、0.132、0.32、0.33、0.35、0.327、0.178、0.427、0.426、0.408、0.423、0.384、0.389 8、0.410、0.361
灵敏度@298KNEDT/K	0.282、0.436、0.413、0.327、0.527、0.575、0.562、0.594、0.34、0.689、0.709、0.726、0.707、0.565、0.589、0.601、0.513
定标精度/K	0.8、0.8、0.8、0.8、0.8、0.8、0.8、0.8、0.9、1.2、1.2、1.2、1.2、1.2、1.2、1.2、1.2

## 1.2 宽幅雷达反射率因子计算方法

如上所述,降水测量雷达具有三维观测能力但观测幅宽较窄,而微波成像仪的观测幅宽较宽,能够大大提高降水测量的地面覆盖率。为充分发

挥同平台主被动微波观测的优势,抽取FY-3G降水卫星的微波成像仪亮温数据与降水测量雷达反射率因子数据的映射关系,建立降水测量雷达幅宽扩展模型,根据模型计算降水测量雷达新的反

射率因子数据, 达到在保持降水测量雷达三维探测能力的同时还能扩展幅宽的目的。基于深度学习的宽幅雷达反射率因子计算模型, 可将雷达反射率因子及相关信息由 300 km 幅宽拓宽到 800 km, 实现原幅宽的 2.67 倍覆盖, 丰富雷达数据应用场景, 提升应用效益。

宽幅雷达反射率因子计算过程如下。

① 数据质量控制

为避免低质量数据进入机器学习, 在生成样本数据前首先对 PMR 和 MWRI-RM 数据进行严格的质量控制。利用 PMR 数据预处理过程中的质量信息, 滤除定标/定位质量较差的数据、受主瓣/副瓣杂波影响的数据、灵敏度以下的数据、无降水的数据、卫星机动过程中的数据等; 利用 MWRI-RM 数据预处理过程中的质量信息, 滤除定标/定位质量较差的数据、卫星机动过程中的数据等。

② 观测数据匹配

开展建模前需要对 MWRI-RM 和 PMR 的观测数据进行时空匹配。通过 PMR 每个采样点的经纬度位置, 计算 300 km 幅宽中 MWRI-RM 的采样点, 生成匹配样本数据。由于两种仪器放置在同平台

上, 具有观测时间相近的天然优势, 故可不考虑进一步的时间匹配。

③ 通道选择及高度层设计

MWRI-RM L1 数据中有 26 个通道的辐射亮温, 如表 2 所示。各通道的作用不同, 例如在 50 GHz 和 118 GHz 大气氧气吸收线附近新设置的两组探测通道有助于探测陆地弱降水, 在 183 GHz 水汽吸收线附近新设置的探测通道可对云冰和降雪进行探测, 10.6 GHz 低频窗区通道的亮温数据则对陆地强降水探测具有更多的优势<sup>[12-15]</sup>。各通道对宽幅雷达反射率因子计算的贡献度可能不同, 在图 1 中给出了各通道观测数据参数贡献度统计情况, 支撑对通道的使用选择。图中横轴为通道号, 纵轴为参数贡献度; 参数贡献度指模型在使用 26 个通道数据计算雷达反射率因子数据时, 对 26 个通道数据相乘的权重参数, 该指标可以体现出输入模型各类数据对于计算最终结果的贡献程度。通过对统计图的分析可知, MWRI-RM 26 个通道数据的参数贡献度没有表现出明显的差别, 也没有贡献度过低的通道数据, 因此在计算宽幅雷达反射率因子时, 选取 MWRI-RM 的全部通道参与计算。

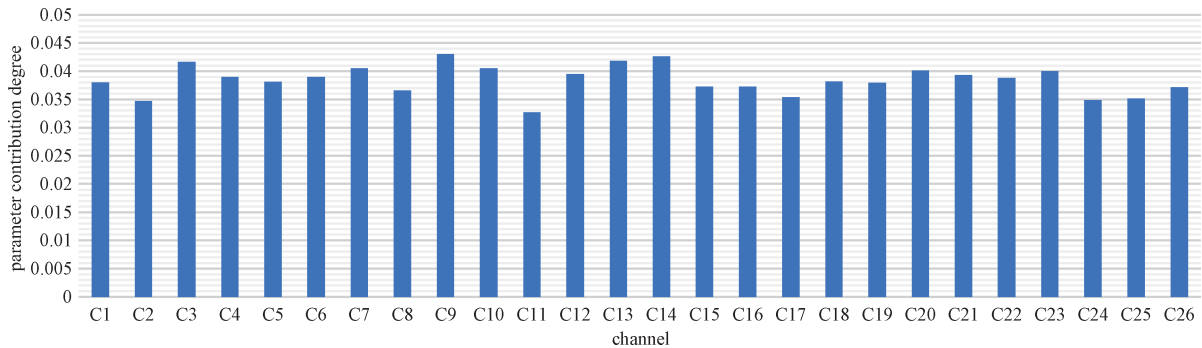


图 1 微波成像仪各通道观测数据参数贡献度

Fig. 1 Contribution degree of observation data parameters of each channel of MWRI-RM

PMR 雷达反射率因子数据按照 50 m 采样间隔, 从地表至 20 km 高度共分为 400 层, 考虑镜像回波后共有 500 层。由于普遍产生降水的高积云、雨层云等垂直高度常常分布在 2 km~10 km<sup>[16-18]</sup>, 同时考虑到 7.5 km 以上高度层降水回波信号较少, 模型计算的数据量小, 影响了模型计算的性能。为了更好地对降水测量雷达进行降水散射信号的模拟和研究, 并避免近地表杂波的影响, 选择 PMR 的第 250 层(距地面 7.5 km)到第 345 层(距地面

2.75 km)中的 20 层数据进行宽幅计算。

④ 宽幅建模及雷达反射率因子计算

采用基于深度神经网络的 MtPDNN 方法<sup>[19-21]</sup>, 建立 MWRI-RM 的 26 个通道的亮温与 PMR 雷达反射率因子之间的转化模型, 如公式(1)所示。

$$A_i^{l+1} = w_{1i}^l * A_1^l + w_{2i}^l * A_2^l + \dots + w_{ji}^l * A_j^l + b_{ji}^l \quad (1)$$

其中,  $A_i^{l+1}$  表示第  $l+1$  层神经网络的第  $i$  个神经元,  $A_j^l$  表示第  $l$  层神经网络的第  $j$  个神经元,  $w_{ji}^l$  表示第  $l$  层神经网络由第  $j$  个神经元到第  $i$  个神经元的权重,

$b_{ij}^l$ 表示第*l*层神经网络第*j*个神经元到第*i*个神经元的偏执量。MtPDNN方法包含1个输入层、8个中间层和1个输出层，中间层采用全链接网络。模型输入数据为MWRI-RM所有通道的亮温数据，目标数据为PMR的雷达反射率因子数据。

建立转化模型后，根据PMR观测几何进行几何重建，获得与MWRI-RM相同幅宽的几何数据。在顺轨方向和跨轨方向上分别实施重建，在星下点左右两侧分别拓展39个波位，即由PMR自身的59个波位扩展为137个波位，获得与MWRI-RM相同幅宽的观测几何数据。利用上述模型与新的观测几何，利用MWRI-RM亮温数据计算800 km幅宽、5 km水平分辨率的降水测量雷达反射率因子数据。

### 1.3 宽幅雷达反射率因子计算结果

本文使用2个月的FY-3G实际观测数据作为训练集和验证集，训练集和验证集数据量比例为7:2，训练集中晴空数据与降水数据的比例在1:1左右参与学习，以提高模型计算结果中晴空数据和降水数据分类的准确性。同时，对实际观测结果与模型计算结果之间的均方差进行迭代，当均方差在迭代时不再下降，此时模型收敛，停止迭代。为了评估利用MWRI-RM亮温数据计算PMR雷达反射率因子的效果，选择台风案例进行定量分析。

2023年第9号台风“苏拉”<sup>[22]</sup>于9月2日11点30分前后(UTC时间)在广东省珠海市南部沿海登陆，利用2023年9月2日的MWRI-RM亮温数据和PMR Ku波段与Ka波段雷达反射率因子数据，生成了宽幅雷达反射率因子数据。图2给出了FY-3G地面业务系统生成的PMR 300 km幅宽数据和模型计算的800 km宽幅数据，包含Ku及Ka波段在第260层、第280层、第300层、第320层以及

第340层(距地面7 km、6 km、5 km、4 km以及3 km)的雷达反射率因子。可以看出，各层模拟的台风云系完整，螺旋结构清晰，距地面3 km~5 km海拔高度模型计算的雷达反射率因子的强度更高。

图3与图4分别突出展示了PMR Ku波段与Ka波段在第340层、第300层及第280层(距地面3 km、5 km和6 km)的雷达反射率因子数据以及模型计算的Ku波段与Ka波段宽幅雷达反射率因子数据。为便于比较台风结构，在图5中给出了MWRI-RM的亮温数据(118.750 3±3.2 GHz通道)。结合图3、图4和图5可以看出，相比于300 km的雷达反射率因子数据，Ku及Ka波段宽幅雷达反射率因子数据的幅宽得到了明显拓宽，与微波成像仪的覆盖范围接近，实现了PMR原幅宽的2.67倍覆盖。并且，Ku及Ka波段宽幅计算结果能很好地揭示降水测量雷达在台风区域的后向散射信号，台风云系完整，螺旋结构清晰。Ku波段各层模型计算的宽幅雷达反射率因子的强度高于Ka波段的宽幅雷达反射率因子的强度。对Ku及Ka波段PMR的雷达反射率因子及利用宽幅模型计算的宽幅雷达反射率因子进一步定量分析，结果如表3所示。相比于第340层和第280层，Ku及Ka波段在第300层时模型计算的雷达反射率因子的强度最强，此时Ku波段宽幅雷达反射率因子的最大值可以达到40.17 dBZ，Ka波段宽幅雷达反射率因子的最大值可以达到29.43 dBZ，强降水云主要分布在5 km高度附近。Ku波段第340层、第300层及第280层计算的宽幅雷达反射率因子略小于PMR的雷达反射率因子，模型计算的宽幅雷达反射率因子的强度略低。其中，两者对应位置雷达反射率因子的平均偏差在-2.09 dBZ~-0.78 dBZ，偏差的标准差在5.33 dBZ~5.97 dBZ。Ka波段两者对应位

表3 雷达反射率因子宽幅计算结果统计

Table 3 Statistical table of zFactorMeasured calculation results

波段	高度/km	宽幅有效值	宽幅最大值/dBZ	宽幅最小值/dBZ	宽幅平均值/dBZ	PMR有效值	PMR最大值/dBZ	PMR最小值/dBZ	PMR平均值/dBZ	平均偏差/dBZ	偏差标准差/dBZ
Ku	3	4 175	36.60	15.0	24.44	3 244	40.92	15.0	27.45	-0.93	5.42
Ku	5	3 893	40.17	15.0	24.72	2 974	44.11	15.0	28.12	-0.78	5.97
Ku	6	3 600	34.83	15.0	21.33	2 740	41.83	15.0	25.08	-2.09	5.33
Ka	3	3 672	24.86	12.0	19.12	2 871	28.44	12.0	19.57	0.34	3.41
Ka	5	3 508	29.43	12.0	20.72	2 834	31.96	12.0	22.27	-0.36	3.64
Ka	6	2 967	24.73	12.0	17.81	2 444	31.27	12.0	19.74	-1.90	3.42

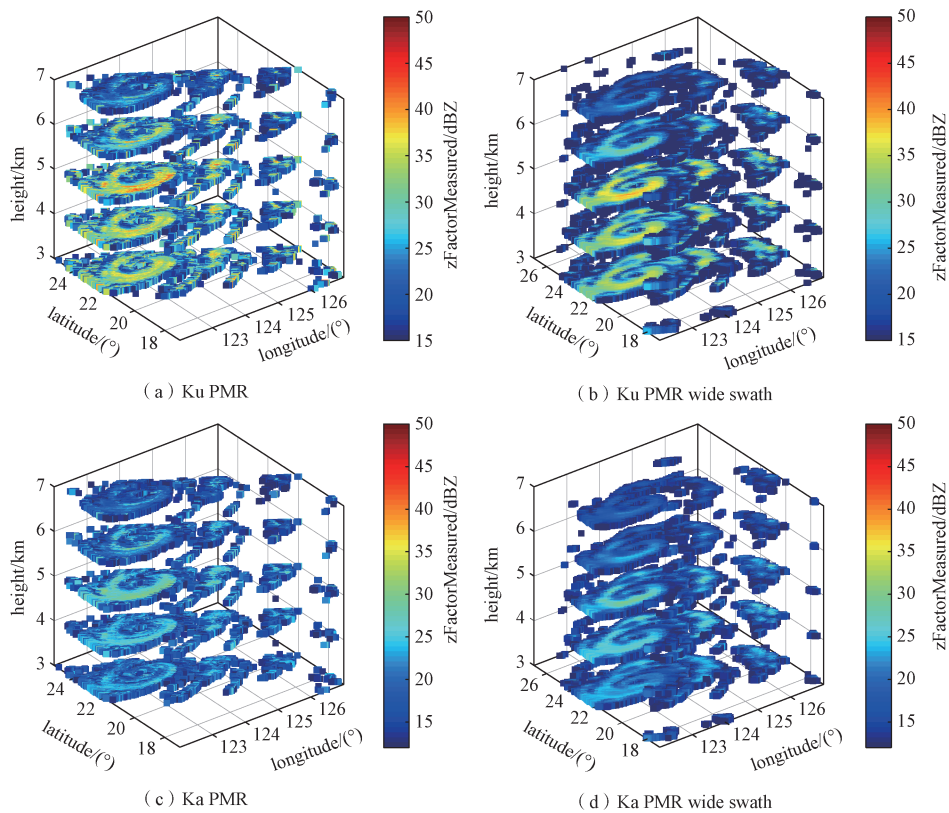


图2 2023年9月2日16时37分强台风“苏拉”典型高度层雷达反射率因子

Fig. 2 Typical altitude level zFactorMeasured of severe Typhoon Sula at 16:37 on September 2, 2023

置雷达反射率因子的平均偏差在 -1.90 dBZ~

### 2 气象领域应用初探

2023年7月29日至8月1日, 台风杜苏芮北上, 其减弱后的低涡在华北地区长时间停滞, 造成华北地区历史罕见的特大暴雨过程, 本次过程小时降水量大, 持续时间长, 多个测站降水量突破历史极值<sup>[23,24]</sup>, 导致严重山洪、泥石流和城市内涝等次生灾害的发生<sup>[25]</sup>, 部分地面观测站由于信号中断导致没有雨量记录, 因此星载降水测量雷达为本次强降水观测提供了有力的定量支撑。基于星载降水测量雷达观测数据、宽幅扩展数据以及中国气象局灾害性天气短临预报系统SWAN (Severe Weather Automatic Nowcasting) 三维雷达拼图数据<sup>[26]</sup>开展雷达回波分析。

图6所示为2023年7月30日22时41分(UTC时间)华北地区PMR Ka波段3 km、5 km和6 km高度的雷达反射率因子实际观测结果与宽幅计算结果。图7分别给出了PMR Ka波段原幅宽数据、宽幅数据沿117°E的回波剖面。从图6中可以看出, 相比于原始PMR的数据, 宽幅扩展后观测到的降

0.34 dBZ, 偏差的标准差在3.41 dBZ~3.64 dBZ。

水区域显著提升。从图7中可以看出, Ka波段宽幅扩展的雷达回波剖面与未扩展的原始回波剖面结构相似, 最强回波位于4 km~5 km附近, 宽幅回波强度接近23 dBZ, 原始回波强度接近26 dBZ, 宽幅回波强度略低于原始回波强度。图8所示为2023年7月30日22时41分(UTC时间)华北地区PMR Ku波段3 km、5 km和6 km高度的雷达反射率因子实际观测结果、宽幅计算结果以及SWAN三维雷达拼图数据的雷达反射率因子。图9分别给出了PMR Ku波段原幅宽数据、宽幅数据以及SWAN三维雷达拼图数据沿117°E的回波剖面。从图8中可以看出, 相比于原始PMR的幅宽, 宽幅扩展后观测到的降水区域显著提升, 图8中的雨带位置和形态与地基雷达较为一致, 特别是在北京南部、天津南部等地区的雷达回波大值区, 宽幅数据的强回波范围和强度与地基雷达均较为吻合, 中心值超过45 dBZ。从图9雷达回波剖面来看, 宽幅扩展的雷达回波能够准确反映出降水的垂直结构, 降水呈现出低质心特征, 最强回波位于4 km~5 km附近, 这与地基雷达回波剖面一致, 在实际

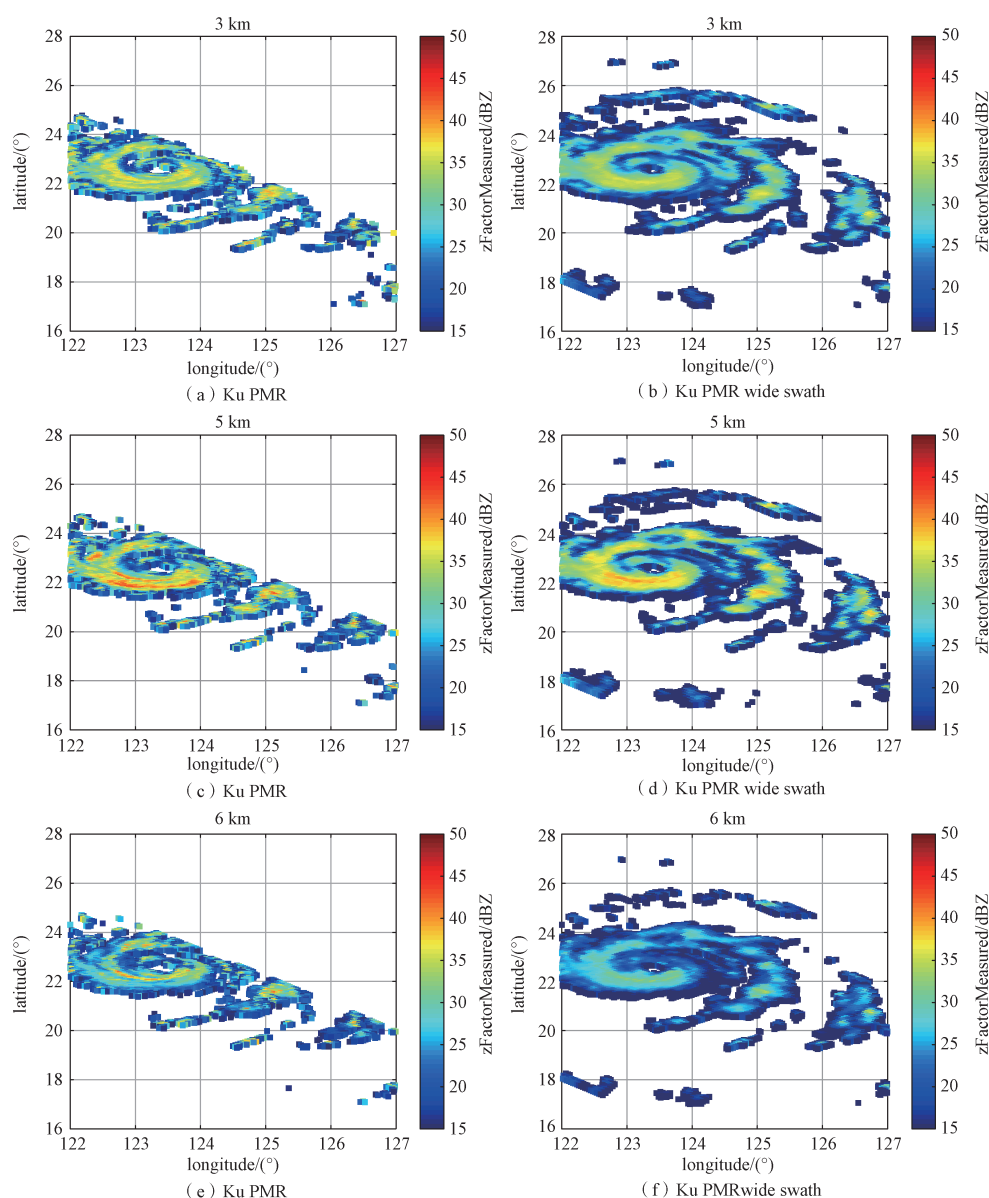


图3 2023年9月2日16时37分强台风“苏拉”(Ku波段)

Fig. 3 Typhoon Sula at 16:37 on September 2, 2023 (Ku band)

业务中具有较好的参考性。相比于Ku波段雷达反射率因子的宽幅计算结果，Ka波段各层计算的雷达反射率因子的强度较低。

2023年7月17日晨，第4号台风“泰利”由强热带风暴级加强为台风级，其中心在凌晨0点钟(UTC时间)位于中国广东省湛江市东偏南方向约325 km的南海西北部海面上(20.1°N, 113.2°E)，中心附近最大风力有12级(33 m/s)。

图10为7月17日12时48分(UTC时间)台风“泰利”PMR Ka波段3 km、5 km和6 km高度的雷达反射率因子实际观测结果与宽幅计算结果。图

11分别给出了PMR Ka波段原幅宽数据、宽幅数据沿117°E的回波剖面。从图10和图11中可以看出，相比于原始PMR的数据，宽幅扩展后观测到的降水区域显著提升。从图11中可以看出，Ka波段宽幅扩展的雷达回波剖面与未扩展的原始回波剖面结构相似，最强回波位于4 km~5 km附近，两者雷达回波强度最强可达25 dBZ。图12为2023年7月17日12时48分(UTC时间)华北地区PMR Ku波段3 km、5 km和6 km高度的雷达反射率因子实际观测结果、宽幅计算结果以及SWAN三维雷达拼图数据的雷达反射率因子结果。图13为PMR Ku波

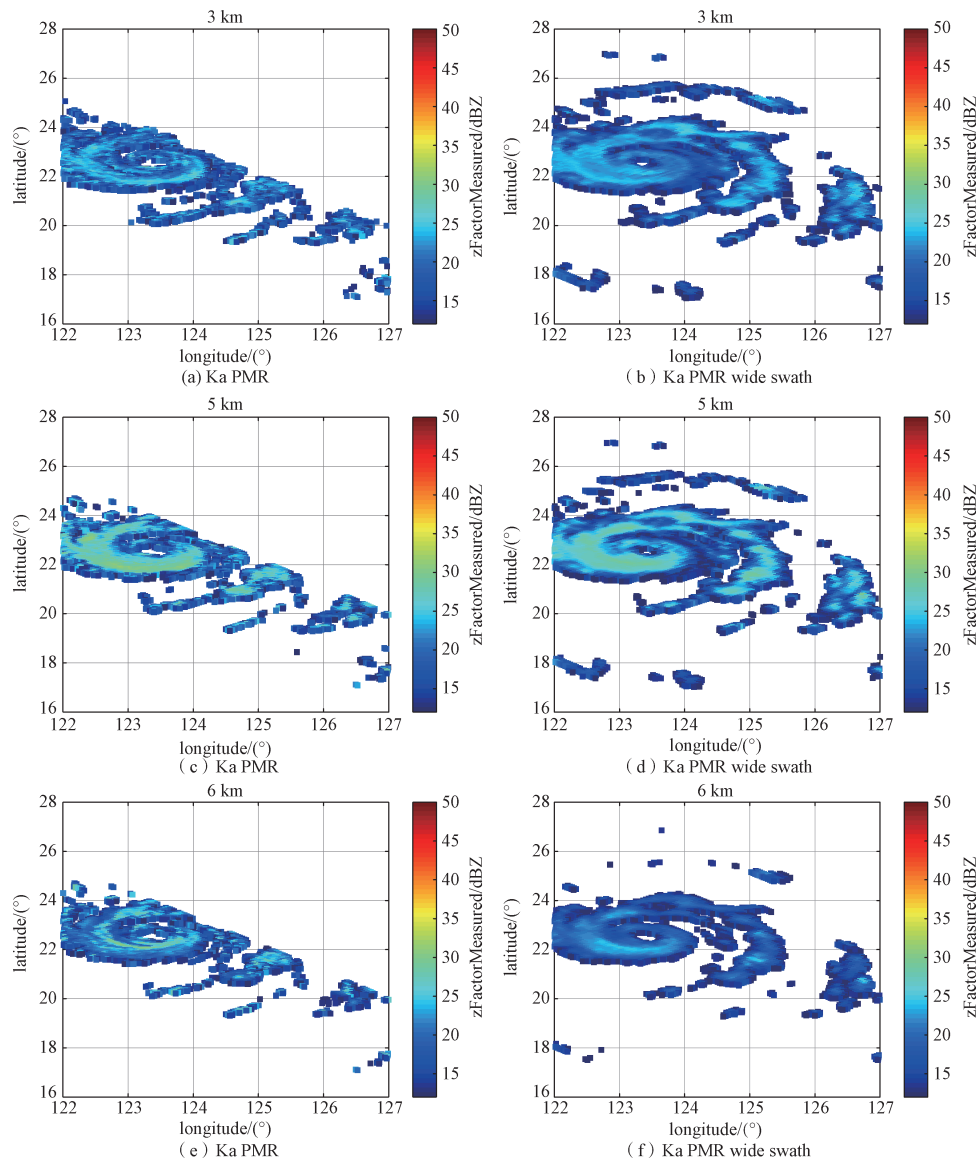


图 4 2023 年 9 月 2 日 16 时 37 分强台风“苏拉”(Ka 波段)

Fig. 4 Typhoon Sula at 16:37 on September 2, 2023 (Ka band)

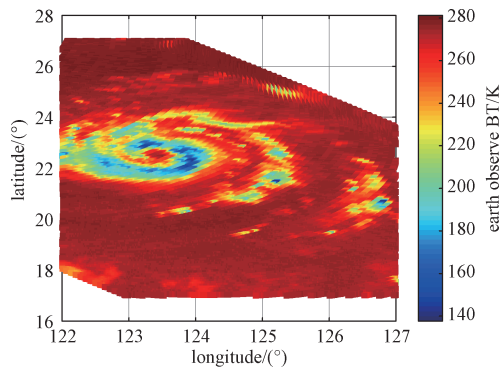


图 5 2023 年 9 月 2 日 16 时 37 分强台风“苏拉”(MWRI-RM 亮温)

Fig. 5 Typhoon Sula at 16:37 on September 2, 2023 (brightness temperature of MWRI-RM)

段沿 110°E 的回波剖面、宽幅数据 Ku 波段沿 110°E 的回波剖面, 以及 SWAN 三维雷达拼图数据沿 110°E 的回波剖面。从图 12 可以看出, 原始幅宽的 PMR 数据能够观测到台风眼区的雷达反射率因子结构, 但未能观测到外围的螺旋雨带的位置和强度信息。宽幅扩展后则能够清晰地揭示台风眼区南侧和东侧的螺旋雨带, 雨带位置和强度与地基雷达反射率因子观测一致。从台风的垂直结构来看(图 13), Ku 波段宽幅雷达最强反射率因子的高度位于 5 km 附近, 与地基雷达观测一致。在眼区附近, Ku 波段宽幅雷达最强可达 40 dBZ, 与地基雷达一致。相比于 Ku 波段雷达反射率因子的宽幅

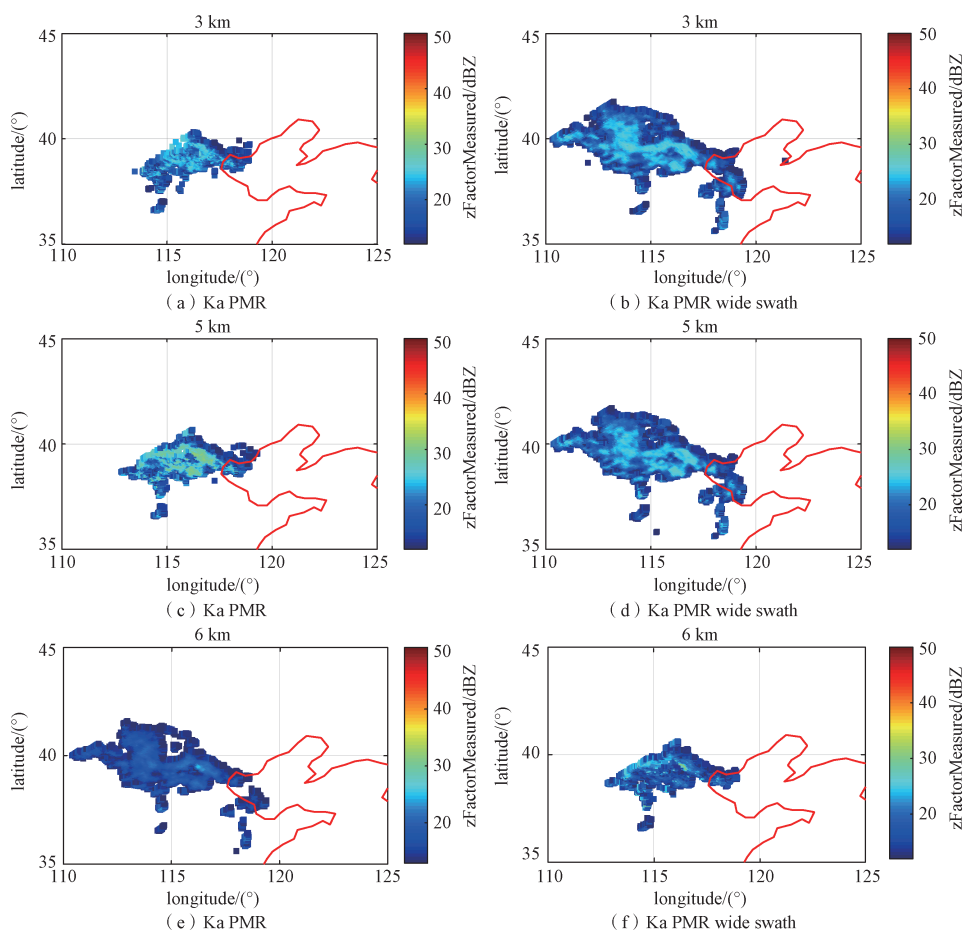


图6 2023年7月30日22时41分华北极端短时降水(Ka波段)

Fig. 6 Extreme short-time precipitation in North China at 22:41 on July 30, 2023 (Ka band)

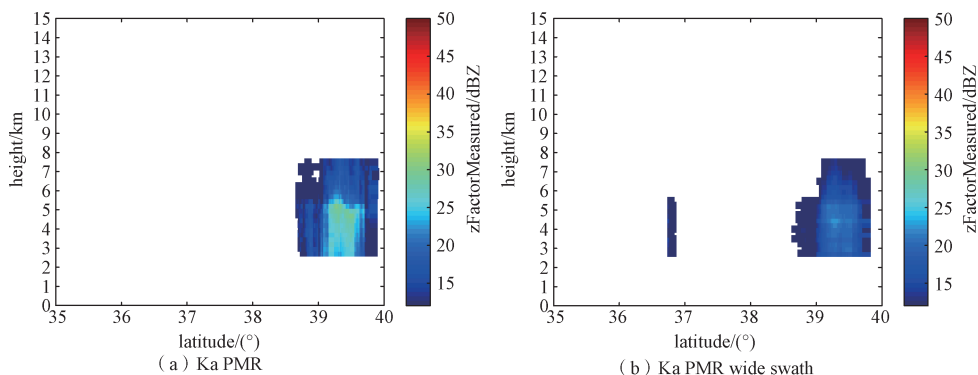


图7 2023年7月30日22时41分华北极端短时降水沿117°E雷达回波剖面(Ka波段)

Fig. 7 Extreme short-time precipitation in North China at 22:41 on July 30, 2023 along 117°E radar echo profile (Ka band)

计算结果，Ka波段各层的雷达反射率因子的强度更低。

### 3 业务调度策略设计

采用上述数据及模型，可以获得幅宽扩展的雷达反射率因子数据。考虑到台风、暴雨等灾害性天气对数据的时效性要求很高，不仅针对PMR

全球延时数据(Delay Picture Transmit, DPT)计算幅宽扩展后的雷达反射率因子数据，还要针对中国区高时效数据(Moderate resolution Picture Transmit, MPT)的数据，计算相应的幅宽扩展后的雷达反射率因子。在布设到地面业务系统前需要设计完备的业务流程，分析业务调度策略，综合考虑业务实施的难易程度、可靠性、时效性、资源消耗等，

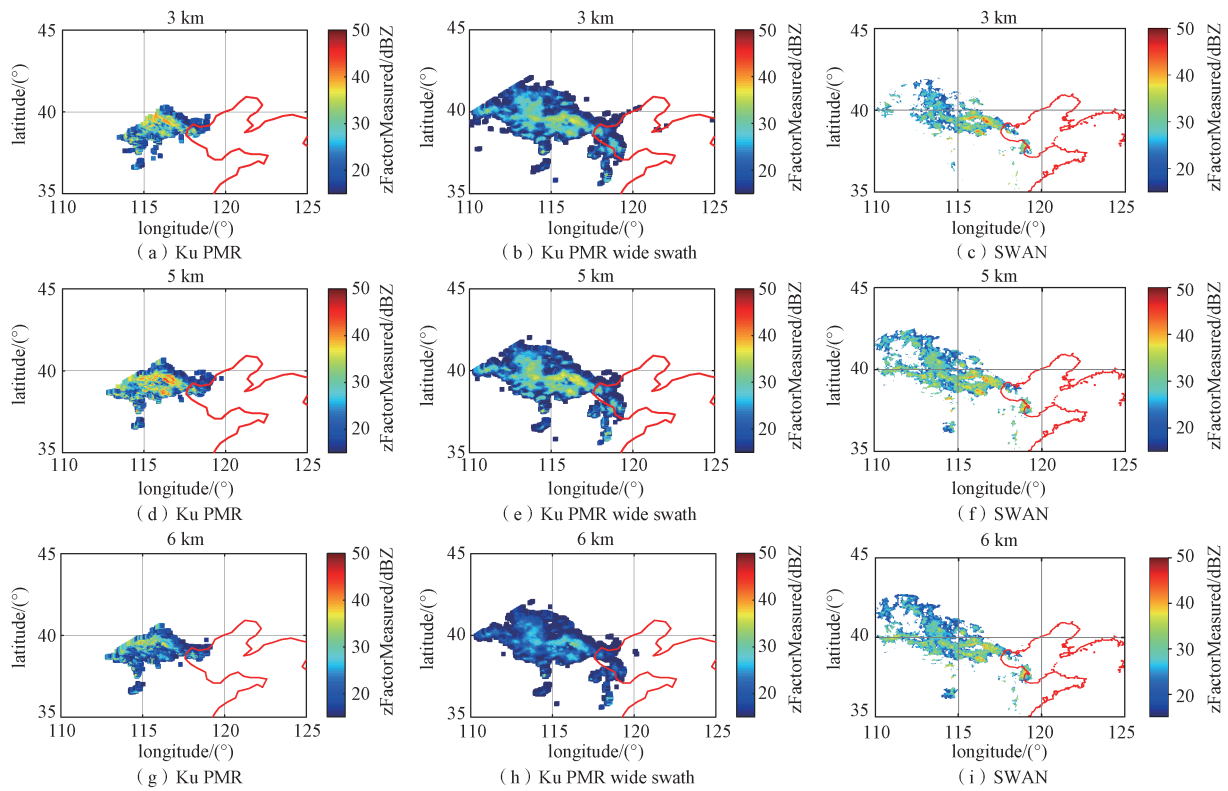


图8 2023年7月30日22时41分华北极端短时降水(Ku波段)

Fig. 8 Extreme short-time precipitation in North China at 22:41 on July 30, 2023 (Ku band)

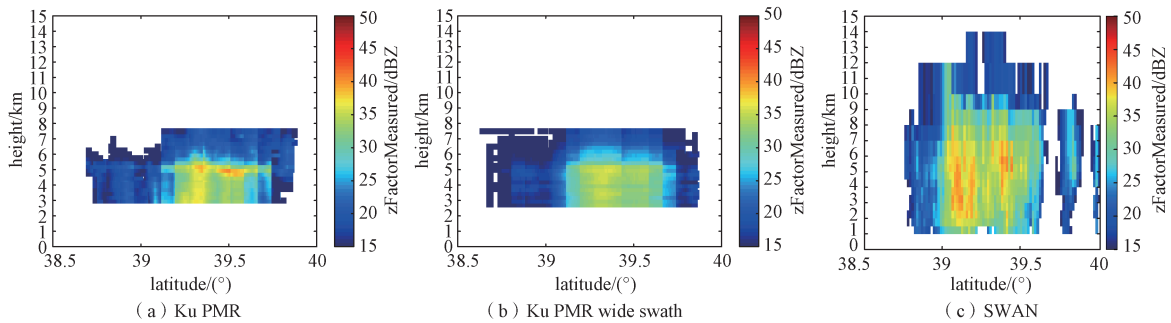


图9 2023年7月30日22时41分华北极端短时降水沿117°E雷达回波剖面(Ku波段)

Fig. 9 Extreme short-time precipitation in North China at 22:41 on July 30, 2023 along 117°E radar echo profile (Ku band)

设计最佳策略, 支撑持续不断的宽幅雷达反射率因子数据的高时效计算, 后续才可基于业务生成的数据开展台风监测、强降水分析、重大服务气象保障等应用。

### 3.1 业务流程设计

基于深度学习的宽幅雷达反射率因子计算业务需要使用FY-3G卫星地面系统生成的MWRI-RM亮温数据, 该数据的幅宽宽于PMR数据, 因此该业务流程设计的目的是为拓宽PMR的数据幅宽。但是MWRI-RM的扫描方式与PMR的扫描方式不同, 需要将MWRI-RM数据投影到扩展了幅宽的

PMR经纬度网格中。因此, 基于深度学习的宽幅雷达反射率因子计算的业务流程设计为宽幅PMR定位信息(包含扩展幅宽的经纬度)生成与宽幅雷达反射率因子计算两部分。

#### ① 宽幅PMR定位信息生成

宽幅PMR定位信息生成业务的目的是生成800 km幅宽的雷达经纬度信息, 用以对MWRI-RM数据进行投影。该业务可分为降水测量雷达L1A数据插值和宽幅降水测量雷达定位两部分, 具体流程如图14所示。

降水测量雷达L1A数据插值部分是通过输入

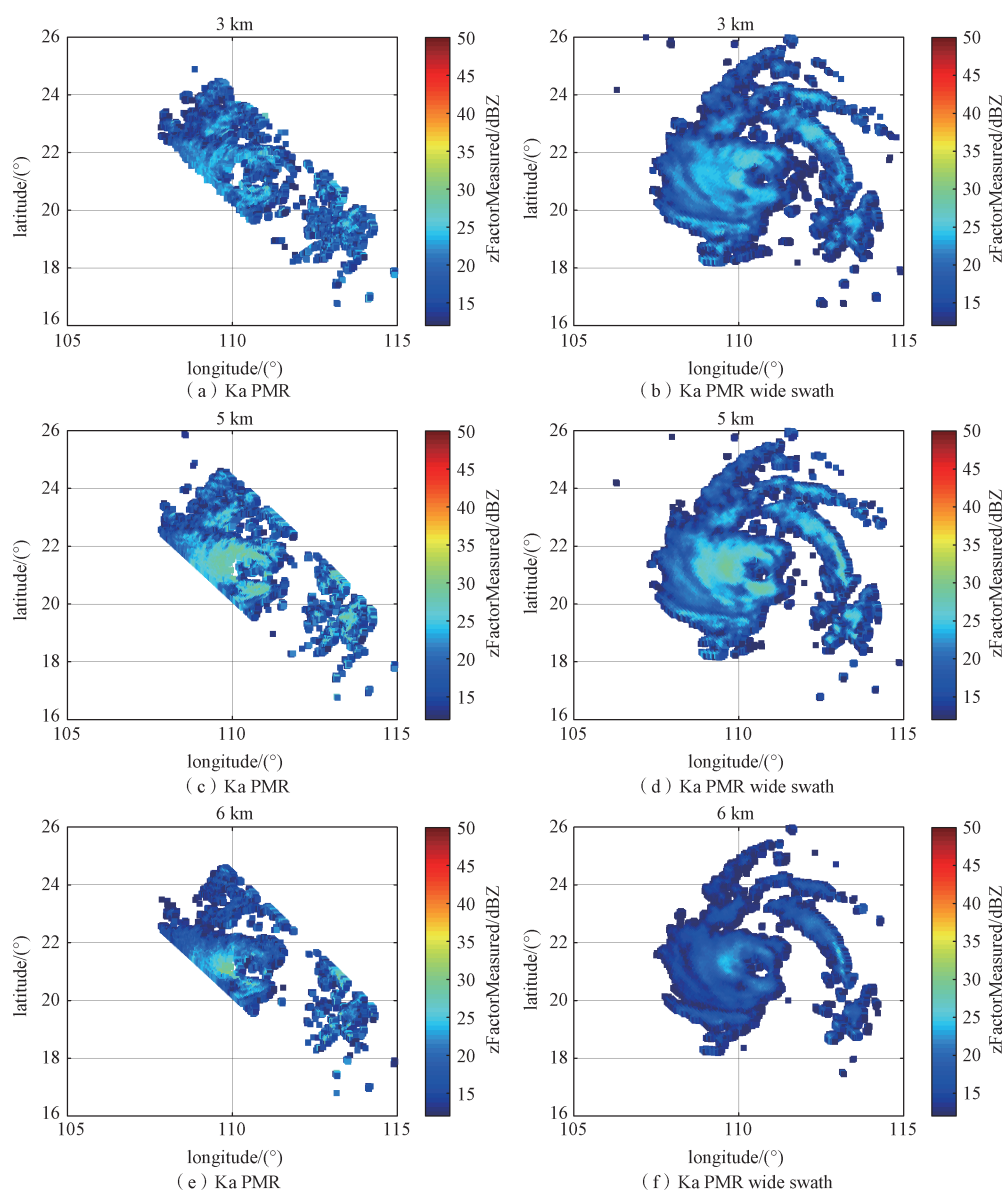


图 10 2023年7月17日12时48分台风泰利(Ka波段)  
Fig. 10 Typhoon Tali at 12:48 on July 17, 2023 (Ka band)

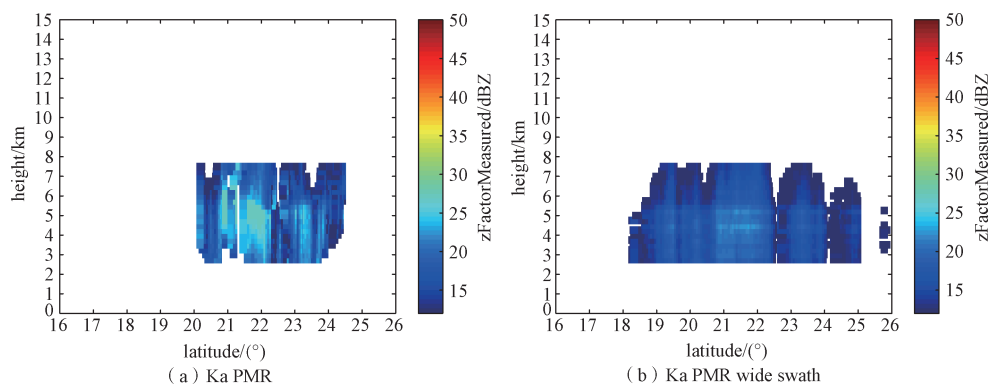


图 11 2023年7月17日12时48分台风泰利沿110°E雷达回波剖面(Ka波段)  
Fig. 11 Typhoon Tali at 12:48 on July 17, 2023 along 110°E radar echo profile (Ka band)

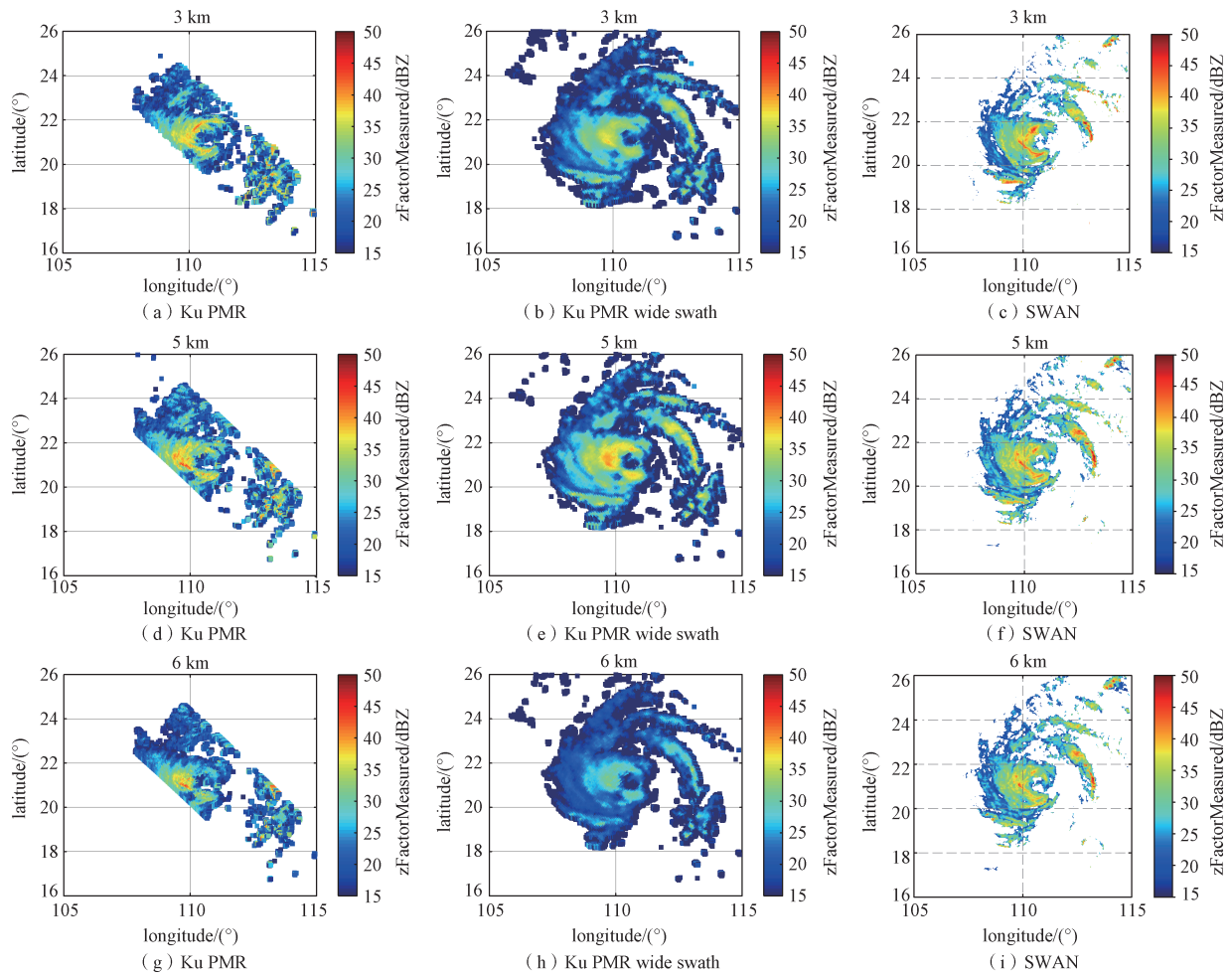


图 12 2023 年 7 月 17 日 12 时 48 分台风泰利(Ku 波段)

Fig. 12 Typhoon Tali at 12:48 on July 17, 2023 (Ku band)

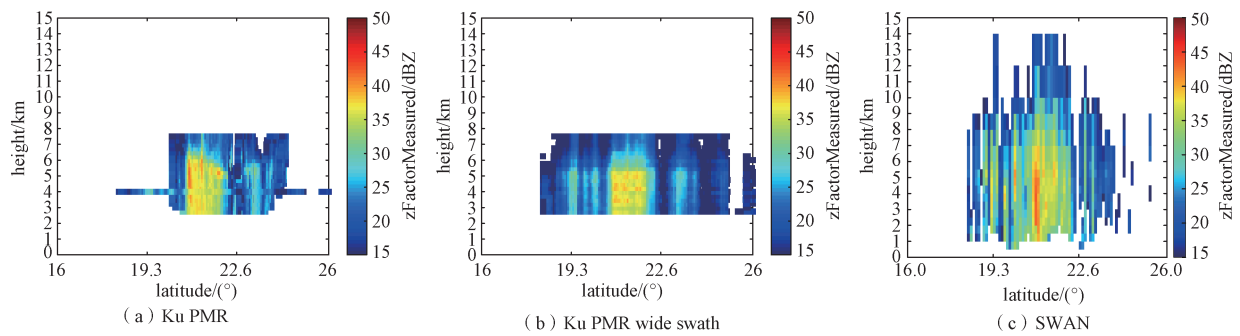


图 13 2023 年 7 月 17 日 12 时 48 分台风泰利沿 110°E 雷达回波剖面(Ku 波段)

Fig. 13 Typhoon Tali at 12:48 on July 17, 2023 along 110°E radar echo profile (Ku band)

降水测量雷达 L1A 数据, 采用插值的方法将降水测量雷达 L1A 数据中的角度库由 59 个拓宽为 137 个, 输出新的宽幅降水测量雷达 L1A 数据。

宽幅降水测量雷达定位部分是利用宽幅降水测量雷达 L1A 数据进行定位计算, 生成宽幅雷达定位文件, 包含了扩展幅宽后的降水测量雷达经

度和纬度数据, 纬度维数为扫描行数×137。宽幅 PMR 定位信息生成业务需要实时业务流中 PMR 质检流程输出的 L1A 数据作为输入, 因此将宽幅 PMR 定位信息生成流程部署到 PMR 的实时业务流中质检流程与定位流程之间。

② 宽幅雷达反射率因子计算

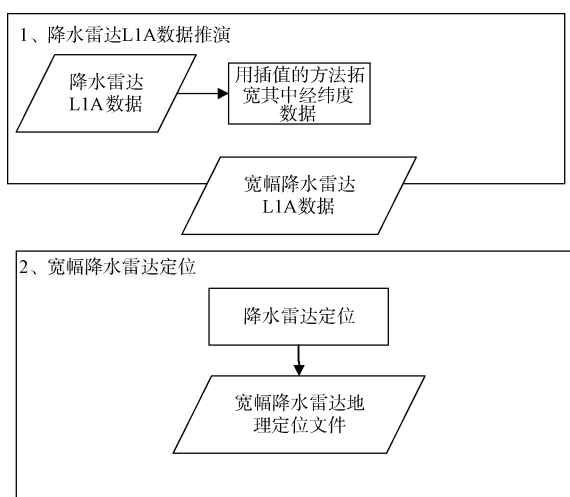


图 14 宽幅 PMR 定位信息(经纬度)生成业务流程图

Fig. 14 Operation flow chart for generating the geolocation information (latitude and longitude) of wide swath PMR

宽幅雷达反射率因子计算业务利用 MWRI-RM 亮温数据计算宽幅降水测量雷达数据。该业务分为 MWRI-RM 数据转换、宽幅雷达反射率因子计算、宽幅雷达反射率产品生成三部分，具体流程如图 15 所示。

### ③ MWRI-RM 数据转换

MWRI-RM 数据转换业务根据最近距离匹配原则将 MWRI-RM 数据匹配到宽幅雷达经纬度网格中，获得与降水测量雷达扫描方式一致的微波成像仪数据，用以解决微波成像仪和降水测量雷达扫描方式不同可能造成的误差。该业务输入微波成像仪 L1 数据、宽幅雷达定位文件，输出宽幅微

波成像仪数据，即与宽幅降水测量雷达定位数据具有相同维度的微波成像仪数据，为微波成像仪数据投影到宽幅降水测量雷达网格后的数据，数据维度由扫描行数 $\times 492 \times 26$ 变为扫描行数 $\times 137 \times 26$ ，其中 26 表示微波成像仪的 26 个通道。

### ④ 宽幅雷达反射率因子计算

宽幅雷达反射率因子计算业务根据宽幅微波成像仪数据和雷达反射率因子计算模型，计算降水测量雷达的宽幅雷达反射率因子数据。降水测量雷达数据包括 Ku 和 Ka 两个波段，每个波段抽取 500 个高度层中的 20 层(第 250、255、260、265、270、275、280、285、290、295、300、305、310、315、320、325、330、335、340、345 层)，按每层一个雷达反射率计算模型计算宽幅降水测量雷达反射率因子。最后将这 20 层数据合并，维度为扫描行数 $\times$ 扩展的角度数 $\times$ 层数(即扫描行数 $\times 137 \times 20$ )。该业务的输入是宽幅微波成像仪数据，输出是宽幅降水测量雷达反射率因子数据。

### ⑤ 宽幅雷达反射率产品生成

宽幅雷达反射率产品生成业务将新生成的雷达反射率因子、经纬度、对应的时间信息及质量码写入到宽幅降水测量雷达 L1 数据中。该业务的输入是宽幅降水测量雷达的雷达反射率因子数据以及定位数据，输出是宽幅降水测量雷达 L1 数据。

## 3.2 业务调度策略分析

基于深度学习的宽幅雷达反射率因子计算业务可以按照时间驱动、数据驱动两种业务调度策略进行设计。其中，Ku 及 Ka 波段采用并行处理。

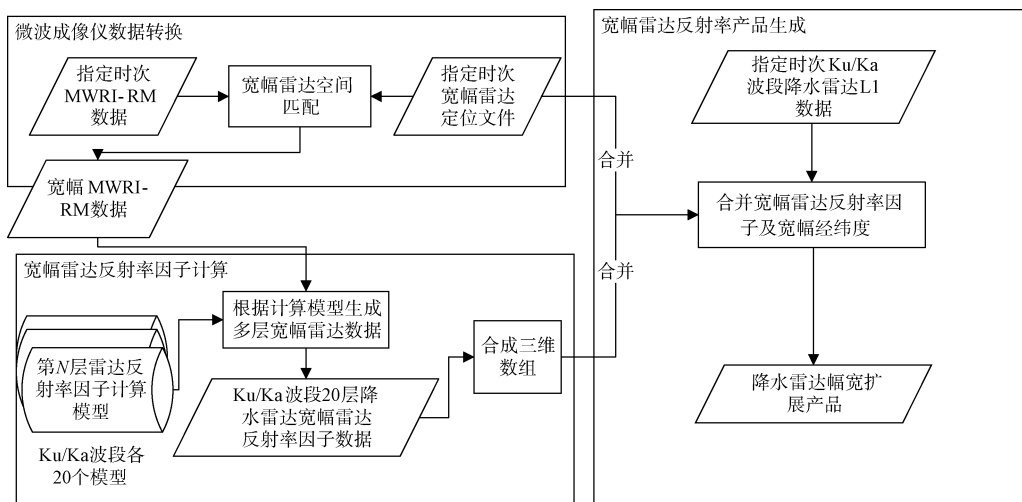


图 15 宽幅 PMR 雷达反射率因子计算业务流程图

Fig. 15 Operation flow chart for calculating zFactorMeasured of wide swath PMR

时间驱动策略的整体业务流程部署设计为:

- ① 宽幅 PMR 定位信息生成业务部署到 FY-3G 卫星地面系统的 PMR 实时业务流: 在 PMR 质检和定位之间添加 L1A 数据推演进程, 经过 PMR 定位后得到宽幅 PMR 定位文件。
- ② 确定开启定时流的时间及时间跨度: 例如设定以 UTC 0 时为起点, 每隔 6 小时开启一次定时流; 因为 6 小时间隔预计将有 4~6 个实时时次的的数据, 对于定时流的运行情况将处于较为健康的状态。
- ③ 获取定时流运行时次: 获取当前时间点到上一时间点的所有运行时次, 根据时次查找宽幅雷达反射率因子计算业务所需输入, 包括指定时次的 MWRI-RM 亮温数据及宽幅 PMR 定位文件。
- ④ 运行定时流: 得到各时次输入后依次完成每个时次的定时流三个部分, MWRI-RM 数据转换、宽幅雷达反射率因子计算、宽幅雷达反射率产品生成, 获得输出结果; 若输入不全或运行失败则跳过并记录该时次;
- ⑤ 补充异常时次: 为提高整体系统的可靠性与鲁棒性, 在定时流运行时, 宽幅 PMR 工程化程序除了要运行本时间段时次的的数据外, 还要运行之前运行失败的数据, 例如设定一个时次连续 8 次失败(预计 2 天)则不再继续参与运行, 并记录该时次以供人工查改。

数据驱动策略的整体业务流程部署设计为:

- ① 与时间驱动策略的前一段中第②步相同, 得到宽幅 PMR 定位文件。
- ③ 宽幅雷达反射率因子计算实时业务部署: 该实时业务流包含 MWRI-RM 数据转换程序、宽幅雷达反射率因子计算程序、宽幅雷达反射率因子生成程序。
- ④ 实时流运行: 当完成对应时次的 FY-3G PMR Ka、FY-3G PMR Ku 及 FY-3G MWRI-RM 实时业务流后, 启动 MWRI-RM 数据转换、宽幅雷达反射率因子计算、宽幅雷达反射率因子生成程序, 得到相应的输出结果。
- ⑤ 补充异常时次: 为提高整体系统的可靠性与数据的完整性, 在宽幅 PMR 工程化程序的实时流运行时, 若实时流中某轨数据连续 2 次运行失败, 则对该时次开启定时驱动处理。

以上两种业务调度策略均可满足宽幅雷达反射率因子计算业务的需求, 但从宽幅计算的目来看, 为更好地提升星载降水测量雷达在强降水事件中的应用效益, 时效性非常重要, 数据驱动的业务调度策略优于时间驱动策略。为此, 进一步估算了两种业务调度策略的运行成本, 分别见表 4 和表 5。其中, 时间成本表示对应程序单次运

行消耗的时间(单位: s), 资源成本表示对应程序单次运行消耗的内存(单位: Mbit)。通过分析可知, 采用时间驱动策略时总时间成本为 400 s, 总资源成本为 56.64 GB, 采用数据驱动时总时间成本为 180 s, 总资源成本为 85.93 GB。在内存充足的情况下, 为了尽可能减少运行时间, 提高时效性, 可以选取数据驱动的业务调度策略。

表 4 时间驱动策略运行成本估计

Table 4 Time driven strategy operation cost estimation

程序名称	波段	时间成本/s	资源成本/Mbit
PMR L1A 数据插值程序	Ku	5	7 000
	Ka	5	7 000
宽幅降水测量雷达定位程序	Ku	5	7 000
	Ka	5	7 000
MWRI-RM 数据转换程序	双波段	60	10 000
宽幅雷达反射率因子计算程序	双波段	300	15 000
宽幅雷达反射率产品生成程序	双波段	20	5 000
共计	—	400	58 000

表 5 数据驱动策略运行成本估计

Table 5 Data driven strategy operation cost estimation

程序名称	波段	时间成本/s	资源成本/Mbit
PMR L1A 数据插值程序	Ku	5	7 000
	Ka	5	7 000
宽幅降水测量雷达定位程序	Ku	5	7 000
	Ka	5	7 000
MWRI-RM 数据转换程序	双波段	60	20 000
宽幅雷达反射率因子计算程序	双波段	60	30 000
宽幅雷达反射率产品生成程序	双波段	40	10 000
共计	—	180	88 000

## 4 结束语

我国首台星载降水测量雷达成功发射后, 依据其观测降水系统三维结构的能力与较好的稳定性, 已在灾害性天气监测与分析、重大气象服务保障中发挥了重要作用。为进一步发挥降水测量雷达的应用效益, 基于深度学习的宽幅雷达反射率因子计算模型, 利用同平台的微波成像仪亮温数据计算了宽幅雷达反射率因子数据, 成功将雷达反射率因子及相关信息由 300 km 幅宽拓宽为 800 km, 实现原幅宽的 2.67 倍覆盖, 极大地减少了轨道间隙, 连续的降水观测资料可大大丰富降

水测量雷达数据的应用场景。进一步定量地对宽幅雷达反射率因子的计算结果进行评价, Ku波段宽幅雷达反射率因子与PMR的雷达反射率因子在中低层对应位置的平均偏差在 $-0.93\text{ dBZ}\sim -0.78\text{ dBZ}$ , Ka波段宽幅雷达反射率因子与PMR的雷达反射率因子在中低层对应位置的平均偏差在 $-0.36\text{ dBZ}\sim -0.34\text{ dBZ}$ , 两种波段计算的宽幅雷达反射率因子的精度较高。为了确保宽幅雷达反射率因子数据能够在台风监测、强降水分析、重大服务气象保障中进行应用, 以台风“泰利”和华北极端短时强降水为例对业务生成的宽幅结果开展应用潜力分析, 结果显示, 宽幅雷达反射率因子的计算结果与地基雷达反射率因子的结果较为一致, 两者的强回波范围和强度以及雷达回波剖面均较为吻合, 在实际业务中具有较好的参考性。在地面系统业务调度中, 设计了宽幅雷达反射率因子业务流程, 综合考虑业务实施的资源消耗、时效性及可靠性等, 提出数据驱动的最佳业务调度策略, 相比于时间驱动业务调度策略的400 s的运行时间, 数据驱动的业务调度策略运行时间仅为180 s, 可以有效地减少运行时间, 提高时效性。该方法与业务调度流程可适用于其他同类仪器, 助力提升降水测量雷达三维探测数据的应用效益。

### 参考文献

- [1] MCKEE J L, BINNS A D. A review of gauge-radar merging methods for quantitative precipitation estimation in hydrology[J]. Canadian Water Resources Journal/Revue Canadienne Des Ressources Hydriques, 2016, 41(1-2): 186-203.
- [2] TRENBERTH K E, SMITH L, QIAN T, et al. Estimates of the global water budget and its annual cycle using observational and model data[J]. Journal of Hydrometeorology, 2007, 8(4): 758-769.
- [3] 李青琨. GPM/DPR 联合地面CINRAD 估测三维降水结构的算法研究[D]. 安徽: 中国科学技术大学, 2021.
- [4] 李锐. TRMM 测雨雷达对热带降水结构特征及被动微波反演降水的研究[D]. 安徽: 中国科学技术大学, 2005.
- [5] 王成刚. TRMM PR 降水探测及天气雷达降水量估测的方法研究[D]. 南京: 南京大学, 2003.
- [6] 傅云飞, 宇如聪, 徐幼平, 等. TRMM 测雨雷达和微波成像仪对两个中尺度特大暴雨降水结构的观测分析研究[J]. 气象学报, 2003, 61(4): 421-431.
- LI Yunfei, YU Rucong, XU Youping, et al. Analysis on precipitation structures of two heavy rain cases by using TRMM PR and IMI[J]. Acta Meteorologica Sinica, 2003, 61(4): 421-431.
- [7] 李万彪, 陈勇, 朱元竞, 等. 利用热带降雨测量卫星的微波成像仪观测资料反演陆地降水[J]. 气象学报, 2001, 59(5): 591-601.
- LI Wanbiao, CHEN Yong, ZHU Yuanjing, et al. Retrieval of rain over land by using TRMM/TMI measurements[J]. Acta Meteorologica Sinica, 2001, 59(5): 591-601.
- [8] 商建, 郭杨, 吴琼, 等. 我国Ka频段降水测量雷达机载校飞试验结果[J]. 应用气象学报, 2011, 22(5): 590-596.
- SHANG Jian, GUO Yang, WU Qiong, et al. Airborne field campaign results of Ka-band precipitation measuring radar in China[J]. Journal of Applied Meteorological Science, 2011, 22(5): 590-596.
- [9] 尹红刚, 吴琼, 谷松岩, 等. 风云三号(03)批降水测量卫星探测能力及应用[J]. 气象科技进展, 2016, 6(3): 55-61.
- YIN Honggang, WU Qiong, GU Songyan, et al. Analysis of rainfall measurement power in the FY-3(03) rain measurement satellite[J]. Advances in Meteorological Science and Technology, 2016, 6(3): 55-61.
- [10] 谷松岩, 张鹏, 陈林, 等. 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, 2023, 42(5): 489-498.
- GU Songyan, ZHANG Peng, CHEN Lin, et al. Overview and prospect of the detection capability of China's first precipitation measurement satellite FY-3G[J]. Torrential Rain and Disasters, 2023, 42(5): 489-498.
- [11] ZHANG P, GU S, CHEN L, et al. FY-3G satellite instruments and precipitation products: First report of China's Fengyun rainfall mission in-orbit[J]. Journal of Remote Sensing, 2023, 3: 0097.
- [12] 谷松岩, 卢乃锰, 吴琼, 等. FY-3 气象卫星降水探测能力分析 & 展望[J]. 海洋气象学报, 2022, 42(2): 1-10.
- GU Songyan, LU Naimeng, WU Qiong, et al. Analysis and prospect of precipitation detection capability of FY-3 meteorological satellites[J]. Journal of Shandong Meteorology, 2022, 42(2): 1-10.
- [13] IUGCHI T, OKI R, SMITH E A, et al. Global precipitation measurement program and the development of dual-frequency precipitation radar[J]. Review of the Communications Research, 2002, 48(2): 37-45.
- [14] KOZU T, KAWANISHI T, KUROIWA H, et al. Development of precipitation radar onboard the TRMM satellite [J]. IEEE Trans Geosci Remote Sensing, 2001, 39(1): 102-116.
- [15] 王雨, 傅云飞. 微波成像仪通道对降水云参数响应的

- 数值模拟研究[J]. 气象学报, 2010, 68(3): 315-324.  
WANG Yu, FU Yunfei. Responses of TMI channels to precipitation cloud parameters as suggested by numerical simulation[J]. Acta Meteorologica Sinica, 2010, 68(3): 315-324.
- [16] 傅云飞, 刘栋, 王雨. 热带测雨卫星综合探测结果之“云娜”台风降水云与非降水云特征[J]. 气象学报, 2007, 65(3): 318-328.  
FU Yunfei, LIU Dong, WANG Yu. Characteristics of precipitating and non-precipitating clouds in Typhoon Ranan as viewed by TRMM combined measurements [J]. Acta Meteorologica Sinica, 2007, 65(3): 318-328.
- [17] 尚博, 周毓荃, 刘建朝, 等. 基于 Cloudsat 的降水云和非降水云垂直特征[J]. 应用气象学报, 2012, 23(1): 1-9.  
SHANG Bo, ZHOU Yuquan, LIU Jianzhao, et al. Comparing vertical structure of precipitation cloud and non-precipitation cloud using Cloudsat[J]. Journal of Applied Meteorological Science, 2012, 23(1): 1-9.
- [18] 游然, 卢乃锰, 邱红, 等. 用 PR 资料分析热带气旋卡特里娜降水特征[J]. 应用气象学报, 2011, 22(2): 203-213.  
YOU Ran, LU Naimeng, QIU Hong, et al. Precipitation characteristics in tropical cyclone Katrina using TRMM precipitation radar[J]. Journal of Applied Meteorological Science, 2011, 22(2): 203-213.
- [19] 张吉祥, 张祥森, 武长旭, 等. 知识图谱构建技术综述[J]. 计算机工程, 2022, 48(3): 23-37.  
ZHANG Jixiang, ZHANG Xiangsen, WU Changxu, et al. Survey of knowledge graph construction techniques[J]. Computer Engineering, 2022, 48(3): 23-37.
- [20] 梁肇敏, 梁婷婷, 黎利辉. 基于深度神经网络的高维数据序列化推荐算法[J]. 计算机仿真, 2023, 40(10): 473-476, 500.  
LIANG Zhaomin, LIANG Tingting, LI Lihui. High dimensional data serialization recommendation algorithm based on deep neural network[J]. Computer Simulation, 2023, 40(10): 473-476, 500.
- [21] 李劲, 齐文, 郭玮, 等. 基于深度学习的知识图谱构建方法, 系统及存储介质: 202110903706.9[P]. 2024-05-26.
- [22] 王晓东, 王旭, 郑键鹏, 等. 广东省全力应对台风“苏拉”“海葵”接连登陆[J]. 中国防汛抗旱, 2023, 33(10): 86-88.
- [23] 张芳华, 杨舒楠, 胡艺, 等. “23·7”华北特大暴雨过程的水汽特征[J]. 气象, 2023, 49(12): 1421-1434.  
ZHANG Fanghua, YANG Shunan, HU Yi, et al. Water vapor characteristics of the July 2023 severe torrential rain in North China[J]. Meteor Mon, 2023, 49(12): 1421-1434.
- [24] 杨晓亮, 金晓青, 孙云, 等. “23·7”河北太行山东麓罕见特大暴雨特征及成因[J]. 气象, 2023, 49(12): 1451-1467.  
YANG Xiaoliang, JIN Xiaoqing, SUN Yun, et al. Evolution characteristics and formation of the July 2023 severe torrential rain on the eastern foothills of Taihang Mountains in Hebei Province[J]. Meteor Mon, 2023, 49(12): 1451-1467.
- [25] 杨舒楠, 张芳华, 胡艺, 等. “23·7”华北特大暴雨过程的基本特征与成因初探[J]. 暴雨灾害, 2023, 42(5): 508-520.  
YANG Shunan, ZHANG Fanghua, HU Yi, et al. Analysis on the characteristics and causes of the “23·7” torrential rainfall event in North China[J]. Torrential Rain and Disasters, 2023, 42(5): 508-520.
- [26] 韩丰, 高嵩, 薛峰, 等. 基于 CUDA 的并行雷达拼图算法研究[J]. 气象, 2023, 49(10): 1246-1253.  
HAN Feng, GAO Song, XUE Feng, et al. Study of algorithms for radar networking based on CUDA[J]. Meteor Mon, 49(10): 1246-1253.

## [作者简介]

- 袁 梅 1994 年生, 硕士, 工程师。  
张小雯 1983 年生, 硕士, 研究员。  
覃 平 1979 年生, 硕士, 高级工程师。  
张媛媛 1986 年生, 博士, 高级工程师。  
尹红刚 1979 年生, 博士, 正高级工程师。  
安宏达 1993 年生, 硕士, 工程师。  
商 建 1983 年生, 博士, 正高级工程师。  
徐 娜 1982 年生, 博士, 正高级工程师。  
谷松岩 1963 年生, 博士, 正高级工程师。

(本文编辑: 傅 杰)  
(英文编辑: 赵尹默)