

袁梅, 尹红刚, 商建, 等. FY-3G 降水测量雷达海洋定标精度检验与评估. 应用气象学报, 2024, 35(5): 526-537.
DOI: 10.11898/1001-7313.20240502

FY-3G 降水测量雷达海洋定标精度检验与评估

袁梅¹⁾²⁾³⁾ 尹红刚¹⁾²⁾³⁾ 商建¹⁾²⁾³⁾* 江柏森⁴⁾ 杨润峰⁴⁾
谷松岩¹⁾²⁾³⁾ 张鹏⁵⁾

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⁾(北京遥测技术研究所, 北京 100076)

⁵⁾(中国气象局气象探测中心, 北京 100081)

摘要

2023 年 4 月发射的风云三号气象卫星 G 星(FY-3G)是我国首颗专用降水测量卫星, 双频降水测量雷达(precipitation measurement radar, PMR)是该卫星上最核心的仪器。基于 2023 年 7 月数据, 利用海洋定标理论模型, 模拟海洋表面后向散射截面, 与观测海洋表面后向散射截面进行比对, 实现对 PMR 定标精度的初步评估。通过与国外星载双频降水测量雷达(global precipitation measurement, dual-frequency precipitation radar, GPM DPR)海洋定标检验结果比对, 评估 FY-3G PMR 定标的准确性。海洋定标精度检验结果表明: FY-3G PMR Ku 波段在入射角小于 15° 时观测值与模型模拟值的偏差较小, 此时 FY-3G PMR 的偏差为 1.65~2.73 dB, 偏差标准差为 0.74~1.82 dB。FY-3G PMR Ka 波段在 18° 入射角时偏差小于 0.27 dB, 偏差的标准差为 3.49 dB。FY-3G PMR 与 GPM DPR 的定标偏差存在较为固定的偏差, 差异主要源自于数据本身的后向散射统计特性, 各入射角下 FY-3G PMR Ku 与 Ka 波段海洋表面后向散射数据稳定性与 GPM DPR 相当。

关键词: 降水测量雷达; FY-3G; 后向散射截面; 海洋定标; 精度检验

引言

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, 降水量的准确观测和预报与人类日常生活密切相关。一方面, 通过对降水的定量观测可以进行洪水概率预报, 及时发布预警, 对防灾减灾有重要作用^[1]; 另一方面, 降水过程是全球水循环的重要组成部分, 在大气的潜热交换中发挥重要作用^[2-3]。因此, 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。

降水时空变化很大, 很难对其进行准确观测和预报。目前的观测数据主要来源于地面雨量计、地

基雷达和星载被动遥感仪器^[4-7]。雨量计和地基雷达的观测范围均受地理条件影响, 无法覆盖广阔的洋面、沙漠和高山地区^[8-9]。能够观测全球云雨分布的有效手段是卫星探测^[10-11], 但目前采用的星载被动遥感技术无法探测降水系统内部的垂直结构^[12-13]。星载降水测量雷达可以克服雨量计、地基雷达和卫星被动遥感的缺陷, 有效弥补当前观测数据的不足^[14-15]。星载降水测量雷达是主动式微波遥感仪器, 与被动遥感仪器相比, 能够发射微波脉冲, 通过测量不同高度降水粒子的雷达反射率因子, 获得降水的垂直廓线与三维结构, 实现对全球大范围的全天时、全天候降水测量。目前国外有两颗星载降水雷达成功应用, 分别是 1997 年美国与日本联合

2024-03-17 收到, 2024-05-06 收到再改稿。

资助项目: 中国气象局青年创新团队(CMA20240N10), 国防科工局“十四五”民用航天预研项目(D040204, D030303), 中国科学院国际伙伴计划项目(183311KYSB20200015)

* 通信作者, 邮箱: shangjian@cma.gov.cn

发射的 TRMM (tropical rainfall measuring mission) 卫星上搭载的降水雷达 (precipitation radar, PR)^[16-17] 和 2014 年联合发射的 GPM (global precipitation measurement) 卫星上搭载的双频降水雷达 (dual-frequency precipitation radar, DPR)^[18-19]。我国于 2023 年 4 月 16 日成功发射了风云三号气象卫星 G 星 (FY-3G) (也称风云三号降水星)^[20], 携带的核心仪器为工作在 Ku 与 Ka 波段的双频降水测量雷达 (precipitation measurement radar, PMR)。

PMR 是 FY-3G 卫星上最核心的遥感仪器, 主要目标是监测全球中低纬地区的降水和极端天气事件, 提供降水系统的三维观测信息。降水测量雷达采用 Ku 与 Ka 双频观测, 为降水数据的双频高精度反演提供宝贵的观测数据^[21]。广阔海洋区域的后向散射性能较为稳定, 可基于对海洋表面后向散射截面的研究, 开展对在轨雷达的定标精度检验^[22]。通过研究海洋表面后向散射理论模型^[23-27], 建立后向散射截面与海洋表面风速、风向、雷达入射角等参数的函数, 模拟无雨条件下海洋表面后向散射截面, 与雷达实际测量的海洋表面后向散射截面进行比较, 进而实现对 FY-3G PMR 定标精度的有效评估^[21, 26]。本文分析 FY-3G 卫星 Ka 及 Ku 波段双频降水测量雷达海洋表面的后向散射统计特性, 通过海洋表面后向散射理论模型, 实现 PMR 定标精度

评估, 并通过与全球降水测量任务搭载的双频降水测量雷达 GPM DPR 的海洋定标精度进行对比, 评估 FY-3G PMR 海洋定标精度结果的准确性。

1 仪器与数据

1.1 仪器

降水测量雷达作为 FY-3G 上的核心仪器, 能够提供台风、暴雨、暴雪等降水的三维结构, 反演得到精确的降水强度和降水类型等信息, 提高天基降水测量能力, 加深理解风暴结构、云微物理和中尺度天气系统, 提高降水预报准确率。降水观测模式是 FY-3G PMR 的主模式, 在该模式下雷达工作在短脉冲体制, Ku/Ka 波段的的天线波束在星下点左右 20.3° (即 $\pm 20.3^\circ$) 范围内按照 0.7° 步进开展跨轨扫描。雷达发射 Ku 和 Ka 波段脉冲信号, 接收大气中雨、雪以及地表的后向散射回波, 获得海拔 $-5 \sim 18$ km 范围内不同高度的降水及地表回波功率, 星下点水平方向分辨率为 5 km, 距离方向分辨率为 0.25 km, 观测刈幅可达 300 km。Ku 波段最小可检测降水强度为 $0.5 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$, Ka 波段最小可检测降水强度为 $0.2 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$, 具体指标如表 1 所示^[20]。

FY-3G 降水测量雷达在轨测试期间, 数据预处理

表 1 FY-3G 降水测量雷达主要性能指标
Table 1 Main performance indexes of FY-3G PMR

参数	Ku 波段	Ka 波段
工作中心频率	$13.35 \pm 0.01 \text{ GHz}$	$35.55 \pm 0.01 \text{ GHz}$
极化	HH	HH
脉冲体制	短脉冲	短脉冲/脉冲压缩
扫描方式	交轨方向一维扫描	交轨方向一维扫描
距离方向观测范围	$-5 \sim 18 \text{ km}$ (海拔)	$-5 \sim 18 \text{ km}$ (海拔)
6 dB 距离分辨率	$\leq 250 \text{ m}$	$\leq 250 \text{ m}$
单程 3 dB 波束宽度	$0.7^\circ \pm 0.02^\circ$	$0.7^\circ \pm 0.02^\circ$
观测刈幅	300 km	300 km
最小可检测降水强度	$0.5 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ (18 dBZ)	$0.2 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ (12 dBZ)
辐射精度	$\leq \pm 1 \text{ dB}$ (3σ)	$\leq \pm 1 \text{ dB}$ (3σ)

理工作已基本完成, 目前已对外正式发布 1 级 (level 1, L1) 数据, 其中, 降水测量雷达 0 级 (level 0, L0) 数据是地面系统接收到的仪器原始观测数据。L1 数据是经过质量检验、几何定位、辐射定标等处理后得到的基础数据, 包括利用回波信号获得无衰减校正的雷达反射率因子、地表后向散射截面以及质量码等数据。2 级 (level 2, L2) 数据是 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、亮带检测等数据。FY-3G PMR L1 数据主要包含时间码、地理定位结果 (经纬度、每个波束的本地天顶角、每个距离单元海拔高度等)、辐射定标数据 (反射率因子、后向散射截面) 以及质量标识等信息。FY-3G PMR L1 数据单个文件为半轨数据, 每日生成 28 个文件, 周期为

47 min。FY-3G PMR L1 数据的科学数据集包括地理定位数据集、预处理数据集、表面参考技术数据集和质量标识数据集,每个数据集按照 Ku、Ka 两个频段分组记录。

1.2 数据

本文采用 2023 年 7 月 FY-3G PMR L1 数据、GPM DPR L2A 数据以及欧洲中期天气预报中心第 5 代再分析数据集(ECMWF reanalysis v5, ERA5)数据,开展 FY-3G PMR 定标数据质量分析。其中, FY-3G PMR L1 数据以及 GPM DPR L2A 数据涉及的参量主要包括无衰减校正的地表后向散射截面测量值、本地天顶角、地表类型、降水标志、陆表积雪或海冰覆盖标识、经纬度以及扫描时间。FY-3G PMR L1 数据无衰减校正的地表后向散射截面在预处理数据集,为每个波束分别计算了无衰减校正的地表后向散射截面(测量值),有效值范围是 $-50 \sim 50$ dB。本地天顶角在地理定位数据集,为每个波束分别计算了本地天顶角,有效值范围是 $0^\circ \sim 180^\circ$ 。地表类型在地理定位数据集,为每个波束分别计算了测量点的地表类型,0、1、2、3 分别代表海洋、陆地、水陆边界、陆地水体。降水标志在预处理数据集,为每个波束分别计算了降水标志,0、1、2 分别代

表无降水、有降水、可能有降水。陆表积雪或海冰覆盖标识在预处理数据集,为每个波束分别计算了陆表积雪或海冰覆盖标识,0、1、2、3 分别代表水体、陆地、陆地雪、海冰。经纬度在地理定位数据集,为每个波束分别计算了地球椭球之上约 18 km 高度和地球椭球表面两个位置的经纬度。扫描时间在地理定位数据集,分别计算了每个扫描行对地观测起始时刻的日计数以及毫秒计数。所采用的 ERA5 再分析数据每 6 h 1 组,空间分辨率为 0.25° 的背景场风速数据^[28-29]。

2 全球海洋表面后向散射特性

2.1 海洋表面后向散射统计特性

利用 2023 年 7 月 FY-3G PMR L1 数据以及 GPM DPR L2A Ka 及 Ku 波段观测数据,对无雨、无海冰条件下的全球海洋表面后向散射截面测量值进行统计与分析,并评估雷达性能。后向散射截面月平均值如图 1 所示,为了更细致地分析星下点两侧的不同情况,图 1 中对入射角分别取正值表示(星下点左侧为负,右侧为正)。

根据图 1 中后向散射截面月平均值的统计情

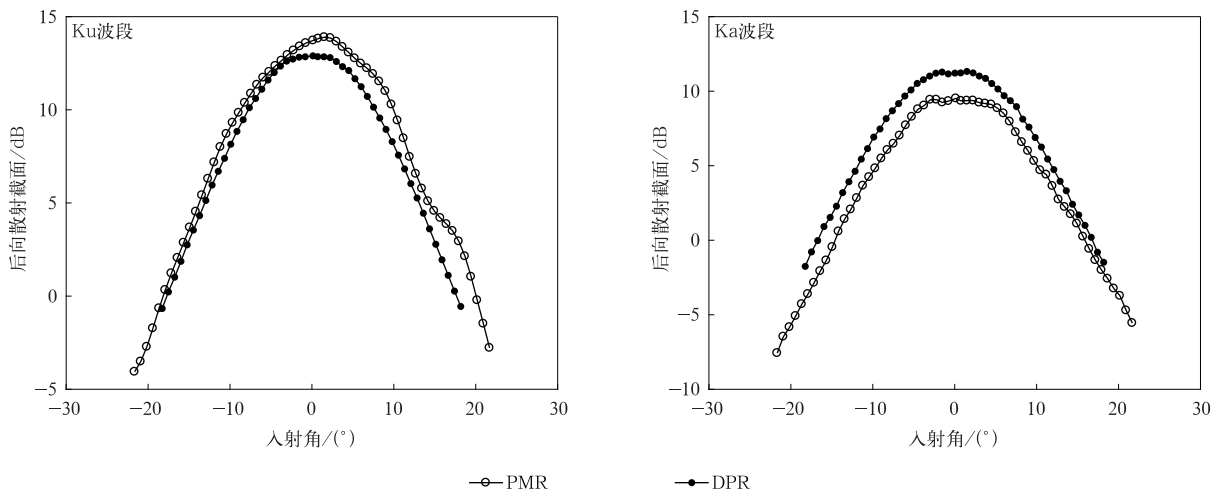


图 1 2023 年 7 月海洋表面后向散射截面月平均值

Fig. 1 Monthly mean of sea surface backscattering cross section in Jul 2023

况, FY-3G PMR Ku 波段海洋表面的后向散射观测值较 Ka 波段海洋表面的后向散射观测值偏大。Ku 和 Ka 波段 FY-3G PMR 海洋表面后向散射截面月平均值随入射角的增大而减小,但星下点右侧各入

射角的后向散射截面月平均值比左侧略大,且存在较明显起伏,后续将对此开展进一步的分析修正。GPM DPR 海洋表面左右两侧入射角处后向散射截面月平均值接近,呈对称分布,与 TRMM PR 的表

现相似^[23]。对于 Ku 波段, FY-3G PMR 海洋表面后向散射截面月平均值大于 GPM DPR 海洋表面的后向散射截面月平均值, 图 1 中左侧各入射角处 FY-3G PMR 与 GPM DPR 后向散射截面月平均值的偏差约为 0.44~1.16 dB, 右侧偏差约为 1.09~3.49 dB。对于 Ka 波段, FY-3G PMR 海洋表面的后向散射截面月平均值小于 GPM DPR 的后向散射截面月平均值, 左侧各入射角处的偏差约为 -2.32~-1.80 dB, 右侧偏差约为 -1.57~-0.52 dB。

在上述分析基础上, 对两部仪器 Ku 及 Ka 波段海洋表面 0° 入射角的后向散射截面统计特性进行深入分析, 统计直方图如图 2 所示。由图 2 可知, 海洋表面 0° 入射角的后向散射截面分布近似呈正态分布。对于 Ku 波段, FY-3G PMR 0° 入射角下海洋表面的后向散射截面主要分布于 9~17 dB, GPM

DPR 0° 入射角下海洋表面的后向散射截面主要分布于 9~16 dB, FY-3G PMR 与 GPM DPR 海洋表面后向散射截面测量值在 0° 入射角处接近。对于 Ka 波段, FY-3G PMR 0° 入射角下海洋表面的后向散射截面主要分布于 5~12 dB, GPM DPR 0° 入射角下海洋表面的后向散射截面主要分布于 7~14 dB, FY-3G PMR 0° 入射角处海洋表面的后向散射截面观测值小于 GPM DPR。

进一步对不同入射角条件下, FY-3G PMR 和 GPM DPR Ku 及 Ka 波段海洋表面后向散射截面测量值出现较大值的概率进行分析, 概率分布如图 3 所示。对于海洋表面, 两者的后向散射截面在 ±10° 入射角范围内出现大于 10 dB 的概率较高, 越接近星下点出现大值的概率越高。

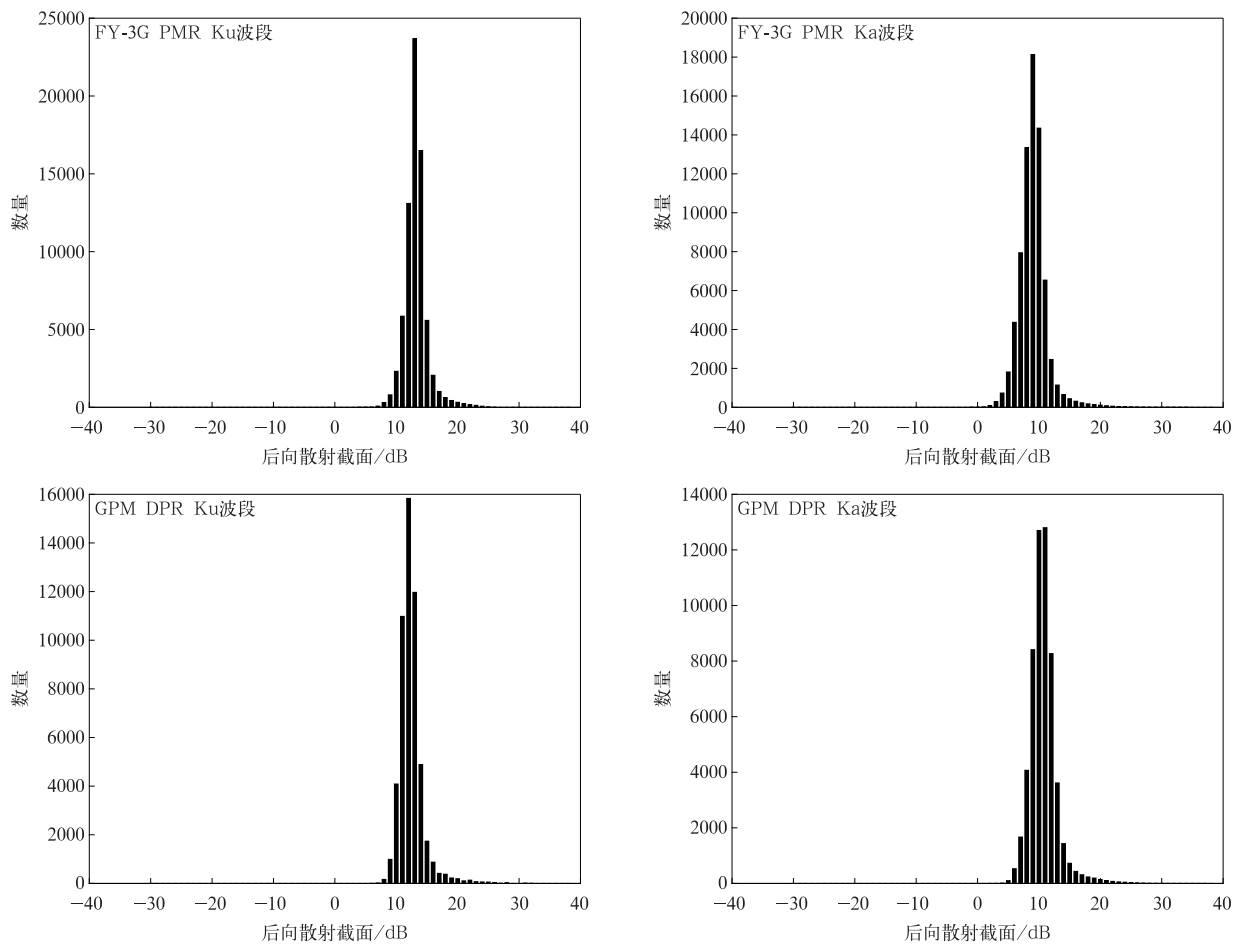


图 2 2023 年 7 月 FY-3G PMR 和 GPM DPR 0° 入射角下海洋表面后向散射截面统计直方图
 Fig. 2 Statistical histogram of sea surface backscattering cross section at 0° incidence angle of FY-3G PMR and GPM DPR in Jul 2023

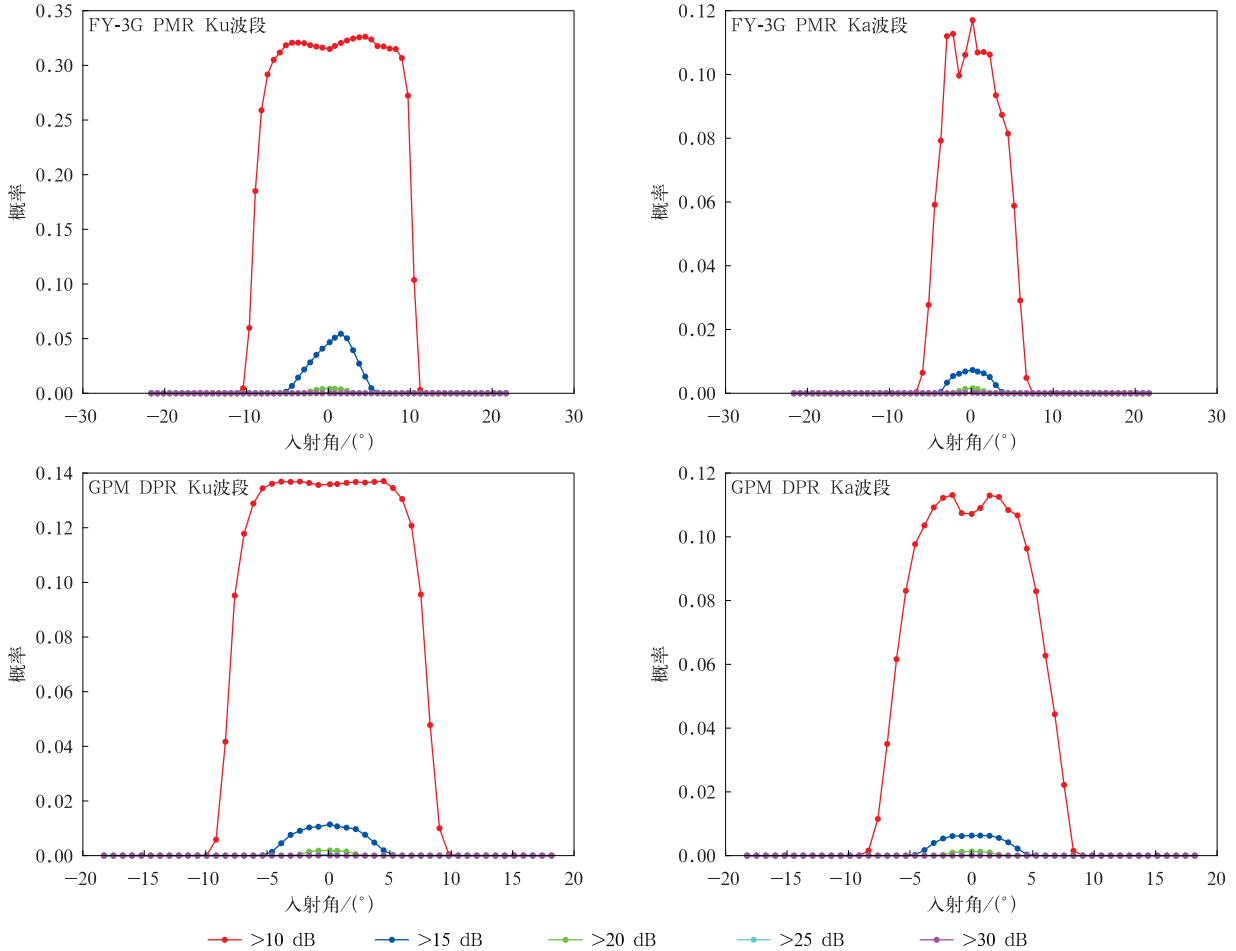


图 3 2023 年 7 月 FY-3G PMR 和 GPM DPR 海洋表面不同后向散射截面概率
 Fig. 3 Probability density of different sea surface backscattering intensity of FY-3G PMR and GPM DPR in Jul 2023

2.2 基于海洋表面的数据稳定性分析

利用 2023 年 7 月 FY-3G PMR L1 以及 GPM DPR L2A Ka 及 Ku 波段的观测数据,对无雨、无海冰条件下的全球海洋表面后向散射截面的稳定性进行分析。后向散射截面的月均方差及后向散射截面的每轨平均值的均方差如图 4 所示。由图 4 可知, FY-3G PMR Ku 和 Ka 波段海洋表面左右两侧入射角处后向散射截面月均方差及后向散射截面每轨平均值均方差接近,呈对称分布。后向散射截面的稳定性与入射角、波段及地表类型相关。对于海洋表面,后向散射截面的月均方差随入射角的分布呈“W”型,与前人研究成果一致^[30]。FY-3G PMR Ku 波段在入射角为±6°左右时后向散射截面月均方差最小,约为 1.05 dB, FY-3G PMR Ka 波段在入射角为±5°左右时后向散射截面的月均方差最小,约为 1.45 dB,数据自身稳定性最高。相比于 FY-3G

PMR, GPM DPR 海洋表面 Ku 及 Ka 波段后向散射截面月均方差在入射角为±5°附近时最小。对比 GPM DPR 的后向散射截面月均方差可以看到,海洋表面 FY-3G PMR Ku 及 Ka 波段后向散射截面的月均方差与 GPM DPR 的月均方差非常接近, Ku 波段两者月均方差的偏差不超过 0.12 dB, Ka 波段不超过 0.27 dB。FY-3G PMR Ku 及 Ka 波段后向散射截面每轨平均值的均方差小于月均方差。图 4 各入射角下 FY-3G PMR Ku 及 Ka 波段每轨平均值的均方差小于 0.82 dB,表明海洋表面每轨测量的数据稳定性高,可用于星载降水测量雷达长时间的稳定性评估。GPM DPR 数据特性与此类似。

根据以上星载降水雷达后向散射截面的统计分析结果可知:后向散射截面的大小以及后向散射截面的稳定性与入射角、雷达波段、仪器及地表类型有关, Ku 波段海洋表面的后向散射观测值较 Ka 波段

偏大; FY-3G PMR 与 GPM DPR 海洋表面后向散射截面月平均值存在固定差异, Ku 波段 FY-3G PMR 月平均值大于 GPM DPR, Ka 波段则小于

GPM DPR; 海洋表面 FY-3G PMR 与 GPM DPR 的后向散射观测数据的稳定性相当。

星载降水雷达观测数据的后向散射统计特性对

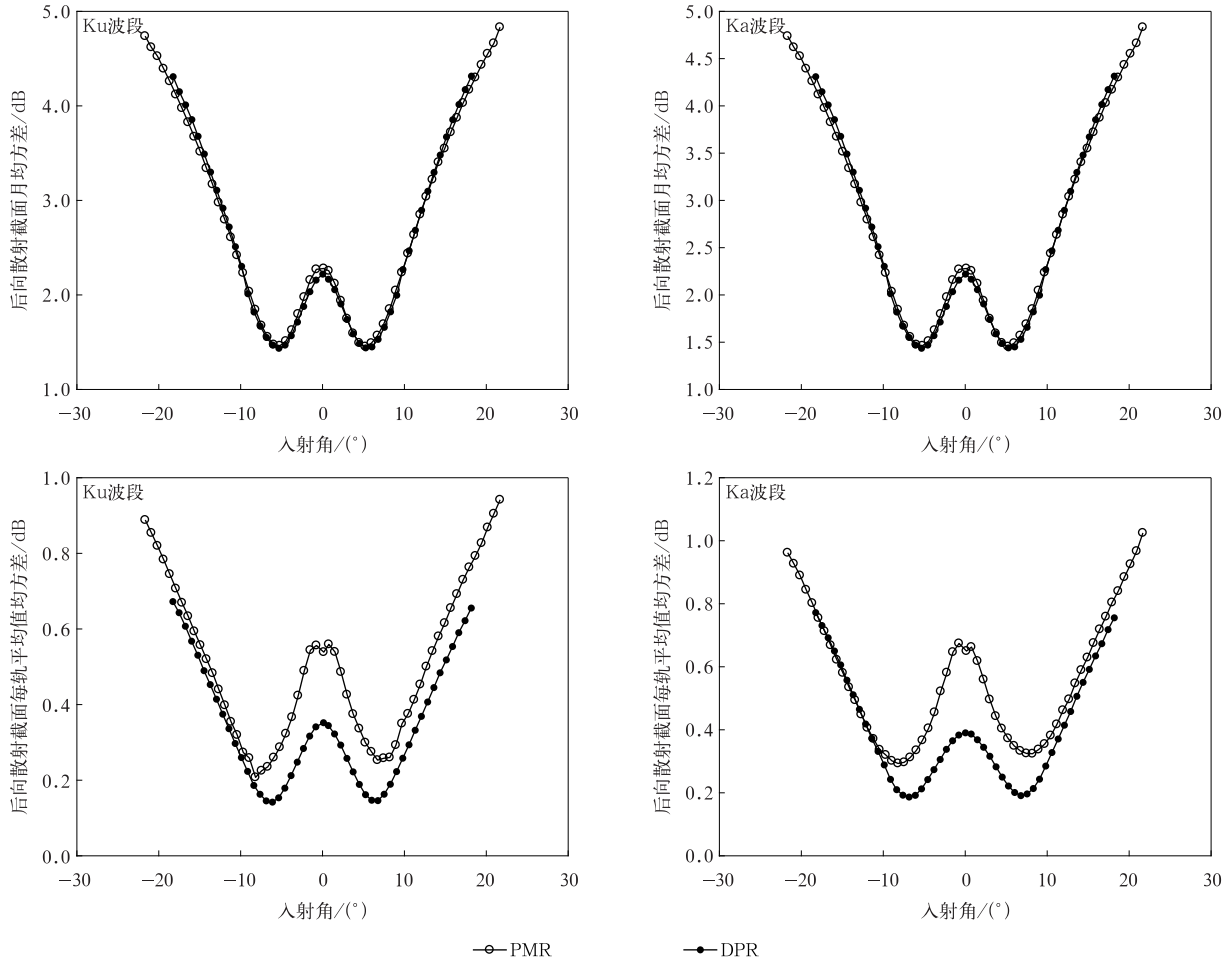


图 4 2023 年 7 月海洋表面后向散射截面月均方差及每轨平均值均方差
Fig. 4 Mean square errors of monthly and orbit mean of sea surface backscattering cross section in Jul 2023

利用稳定地表目标开展雷达定标精度检验有很大影响。基于上述分析,我国首颗降水测量雷达 FY-3G PMR Ku 及 Ka 波段的海洋表面后向散射数据稳定性与 GPM DPR 相当,可以基于海洋表面后向散射理论模型,实现对 FY-3G PMR 在轨定标精度的评估。

3 基于海洋散射模型的 FY-3G PMR 定标精度检验

3.1 海洋定标精度检验方法

如上所述, FY-3G PMR Ka 及 Ku 波段雷达测

量精度可以通过海洋表面后向散射理论散射模型进行评估,该模型是海洋表面参数如风速、风向、粗糙度、温度等的函数。在高斯、各项同性的海洋表面坡度的限制下,模型可以表示为^[26-27]

$$\sigma_j^0(\theta) = 10 \lg \left(\frac{\rho}{m} \sec^4 \theta e^{-\frac{\tan^2 \theta}{m}} \right) \quad (1)$$

式(1)中: σ_j^0 为后向散射截面模拟值(单位: dB)。 θ 为入射角(单位: $^\circ$), 当入射角 $\theta < 15^\circ$, 该海洋表面后向散射理论散射模型被认为是准确的^[21, 23-24, 30-31], 当入射角 $\theta > 15^\circ$, 模型的准确性略差。 ρ 为有效菲涅尔系数, 是海洋表面风速和风向、温湿度以及卫星天顶角的函数, 可根据 Fastem-6 模型^[32-33] 计算得

到。计算 ρ 所需的海洋表面风速和风向数据取自与降水卫星数据时空匹配的 ERA5 数据;时空匹配时,空间上采用双线性内插进行匹配,将 ERA5 数据的风速和风向插值到 PMR L1 数据的经纬度位置上,时间上采用反距离加权插值进行匹配,将 ERA5 数据的风速和风向插值到距离 PMR L1 数据时间最近的点的经纬度位置上。 m 为海洋表面有效均方斜率,是影响海洋表面后向散射模型模拟准确性的主要因素^[25,34-35]。海洋表面准镜面回波的雷达后向散射截面(单位: dB)与入射角的平方存在线性关系^[26,36], m 可以通过海洋表面后向散射截面随入射角平方变化的衰减(即负斜率)求得, m 仅依赖于后向散射截面随入射角的下降幅度而非后向散射截面的大小,对定标误差不敏感,气体衰减校正误差对 m 估计的影响可以忽略不计^[26]。

采用上述海洋表面后向散射理论模型,分别模拟 FY-3G PMR 及 GPM DPR 的 Ku 及 Ka 波段海洋表面后向散射截面 $\sigma_f^0(\theta)$, 求其观测值与模拟值的偏差。对于 Ku 波段,取有效菲涅尔系数 ρ 在 0.4 ~ 0.46 间进行模拟,在该范围内 Ku 波段模型模拟值与观测值更加一致^[26]。其中, GPM DPR 数据海洋定标检验的结果用于验证式(1)理论模型的准确性,并用于评估 FY-3G PMR 海洋定标检验的准确性。对于 1 个月的观测数据,需要根据降水标志、地表类型标志及海冰覆盖标志,剔除有雨、有海冰及非海洋区域的数据,进而分析海洋表面后向散射截面观测值与模拟值的偏差,从而评估 FY-3G 降水雷达的在轨定标精度。

3.2 海洋定标精度检验结果

3.2.1 海洋定标初步结果

采用上述海洋定标精度检验算法对 2023 年 7 月 FY-3G PMR 和 GPM DPR Ku 及 Ka 波段的后向散射截面进行处理,表 2 和表 3 分别为 FY-3G PMR 和 GPM DPR Ku 波段、Ka 波段海洋定标评估结果。

对于 Ku 波段,由表 2 可知,各入射角下 FY-3G PMR 和 GPM DPR 后向散射截面观测值略大于后向散射截面模拟值,海洋定标检验偏差为正值。入射角小于 15°时, FY-3G PMR 和 GPM DPR 的海洋定标观测值与模型模拟值的偏差均较小,在该入射角范围内 GPM DPR 偏差为 0.59 ~ 1.30 dB,此时 FY-3G PMR 左侧入射角偏差小于 1.70 dB,星下点及右侧入射角偏差小于 2.73 dB。15°入射角内,

FY-3G PMR 海洋定标观测值与模拟值的偏差大于 GPM DPR 的偏差,其中左侧典型入射角处 FY-3G PMR 与 GPM DPR 两者海洋定标检验偏差的差值约为 0.39 ~ 1.11 dB,星下点及右侧约为 0.93 ~ 2.1 dB。通过对比观测值和模拟值的统计特性可以看出, FY-3G PMR 与 GPM DPR 的模拟数据接近, 15°入射角内两者模拟数据的偏差为 -0.03 ~ 0.68 dB。FY-3G PMR 观测值大于 GPM DPR 观测值,左侧典型入射角两者观测值的偏差约为 0.59 ~ 1.35 dB,星下点及右侧约为 0.78 ~ 2.20 dB。由此可得, FY-3G PMR 与 GPM DPR Ku 波段海洋定标偏差的差异可能源于数据自身处理过程的差异。

对于 Ka 波段,由表 3 可知,部分入射角下后向散射截面观测值小于后向散射截面模拟值,此时海洋定标检验偏差为负值。入射角小于 15°时 GPM DPR 的海洋定标观测值与模型模拟值偏差的绝对值较小,在该入射角范围内 GPM DPR 偏差的绝对值小于 0.61 dB,此时 FY-3G PMR 左侧入射角偏差的绝对值小于 2.80 dB,星下点及右侧入射角偏差的绝对值小于 2.29 dB。在 18°入射角附近, FY-3G PMR 偏差最小,小于 0.27 dB。15°入射角内, FY-3G PMR 海洋定标观测值与模型模拟值偏差的绝对值大于 GPM DPR 偏差的绝对值,左侧典型入射角处两者海洋定标检验偏差的差值约为 -2.34 ~ -1.87 dB,星下点及右侧约为 -1.71 ~ -0.91 dB。通过对比分析观测值和模拟值的统计特性可以看到, FY-3G PMR 和 GPM DPR 的模拟值基本接近,两者模拟值的偏差最大不超过 0.33 dB。FY-3G PMR 观测值小于 GPM DPR 观测值,左侧典型入射角两者观测值的偏差约为 -2.11 ~ -1.81 dB,星下点及右侧约为 -1.69 ~ -0.54 dB,由此可得, FY-3G PMR 与 GPM DPR Ka 波段海洋定标偏差的差异可能源于数据自身处理过程的差异。

对于 Ku 和 Ka 波段,由表 2 及表 3 可知,入射角小于 15°时, GPM DPR Ku 波段与 Ka 波段海洋定标检验偏差的绝对值接近。Ku 频段偏差的绝对值与 Ka 频段偏差绝对值的偏差为 0.02 ~ 1.09 dB,此时 FY-3G PMR Ku 频段偏差的绝对值与 Ka 频段偏差绝对值的偏差为 -0.42 ~ 1.55 dB。在 10°入射角时, GPM DPR 双频雷达偏差很小,两个频段偏差绝对值的偏差小于 0.07 dB,此时 FY-3G PMR 两个频段偏差绝对值的偏差小于 0.44 dB。

结合表 2 和表 3 可知,各入射角下 Ku 及 Ka 波

段 FY-3G PMR 海洋定标检验偏差标准差与 GPM DPR 偏差标准差接近, Ku 波段两者偏差标准差的差值为 $-0.69 \sim -0.21$ dB, Ka 波段为 $-0.02 \sim 0.13$ dB, 这表明我国星载降水测量雷达 FY-3G PMR 观测数据的稳定性与国际同类仪器水平相当。FY-3G PMR 和 GPM DPR 在 15° 入射角左右时偏

差标准差有转折, 反映了该海洋定标模型对小入射角 ($\theta < 15^\circ$) 的稳定性。本文未考虑气体衰减, Ka 波段海洋表面后向散射截面受气体衰减的影响较大, 未来将评估气体衰减对 FY-3G PMR Ku 和 Ka 波段海洋定标精度检验的影响。

表 2 2023 年 7 月 FY-3G PMR 和 GPM DPR 海洋定标评估结果 (Ku 波段典型入射角)

Table 2 FY-3G PMR and GPM DPR ocean calibration evaluation results (Ku-band typical incidence angle) in Jul 2023

仪器	入射角/ $^\circ$	观测值/dB	模拟值/dB	平均偏差/dB	偏差标准差/dB
FY-3G PMR	-18	0.37	-2.37	2.74	3.20
	-15	3.72	2.07	1.65	1.82
	-10	9.33	7.63	1.70	1.68
	-5	12.04	10.36	1.68	0.74
	0	13.71	11.48	2.23	1.26
	5	12.77	10.36	2.41	0.74
	10	10.32	7.58	2.73	1.74
	15	4.62	2.06	2.55	1.82
	18	2.98	-2.38	5.36	3.17
GPM DPR	-18	-0.69	-3.39	2.70	3.41
	-15	2.65	1.39	1.26	2.08
	-10	7.98	7.39	0.59	2.27
	-5	11.45	10.39	1.06	1.24
	0	12.93	11.63	1.30	1.95
	5	11.53	10.45	1.09	1.21
	10	8.12	7.49	0.63	2.23
	15	2.67	1.54	1.13	2.10
	18	-0.58	-3.22	2.64	3.39

表 3 2023 年 7 月 FY-3G PMR 和 GPM DPR 海洋定标评估结果 (Ka 波段典型入射角)

Table 3 FY-3G PMR and GPM DPR ocean calibration evaluation results (Ka-band typical incidence angle) in Jul 2023

仪器	入射角/ $^\circ$	观测值/dB	模拟值/dB	平均偏差/dB	偏差标准差/dB
FY-3G PMR	-18	-3.59	-2.30	-1.29	3.51
	-15	-0.45	2.06	-2.51	2.00
	-10	4.83	7.63	-2.80	2.02
	-5	8.28	10.38	-2.10	1.02
	0	9.52	11.49	-1.97	1.57
	5	8.86	10.38	-1.52	1.02
	10	5.33	7.62	-2.29	2.01
	15	1.13	2.13	-1.00	2.01
	18	-1.98	-2.25	0.27	3.49
GPM DPR	-18	-1.72	-2.85	1.13	3.40
	-15	1.56	1.73	-0.17	1.99
	-10	6.94	7.46	-0.52	2.04
	-5	10.09	10.32	-0.23	1.04
	0	11.21	11.47	-0.26	1.46
	5	10.15	10.35	-0.20	1.03
	10	6.90	7.51	-0.61	2.02
	15	1.72	1.81	-0.09	1.98
	18	-1.44	-2.77	1.33	3.36

3.2.2 不同风速下的海洋定标结果

在以上工作的基础上,进一步考虑不同风速的影响,细化对 FY-3G PMR 的海洋定标检验。针对 2023 年 7 月 FY-3G PMR 和 GPM DPR Ku 及 Ka 波段观测数据,区分不同风速区间,分别对 $1.5 \sim 2.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 、 $5.5 \sim 6.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 、 $9.5 \sim 10.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 、 $13.5 \sim 14.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 、 $17.5 \sim 18.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 以及 $19.5 \sim 20.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 风速区间下的后向散射截面数据进行处理,图 5 为各风速区间下 FY-3G PMR 和 GPM DPR Ku 波段、Ka 波段海洋定标模型模拟结果及对应的偏差。分析表明:①对于 Ku 波段的 FY-3G PMR 和 GPM DPR, 10° 左右入射角时各风速的海洋表面后向散射截面观测值与模拟值最接近,该入射角附近的海洋表面后向散射截面已被证实对海洋表面风况不敏感^[26],也证实了在该入射角

内布拉格散射对后向散射截面的影响较小。所有风速下,入射角在 $0 \sim 15^\circ$ 时海洋定标观测值与模型模拟值的偏差较小,故该海洋定标模型对于小入射角 ($\theta < 15^\circ$) 的适用性更高;除了 $1.5 \sim 2.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的低风速情况,假设大气条件相同,在中高风速下,风速越大则 FY-3G PMR 观测值与模型模拟值的偏差越小,定标精度越高。GPM DPR 数据随风速的变化情况与 FY-3G PMR 类似。②对于 Ka 波段的 FY-3G PMR 和 GPM DPR,同样在 10° 左右入射角时各风速的海洋表面后向散射截面观测值与模拟值较为接近。除了在 $1.5 \sim 2.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的低风速情况,假设大气条件相同,当风速增大时,定标偏差出现负值(即观测值小于模拟值),并且风速越大则偏差的绝对值越大。

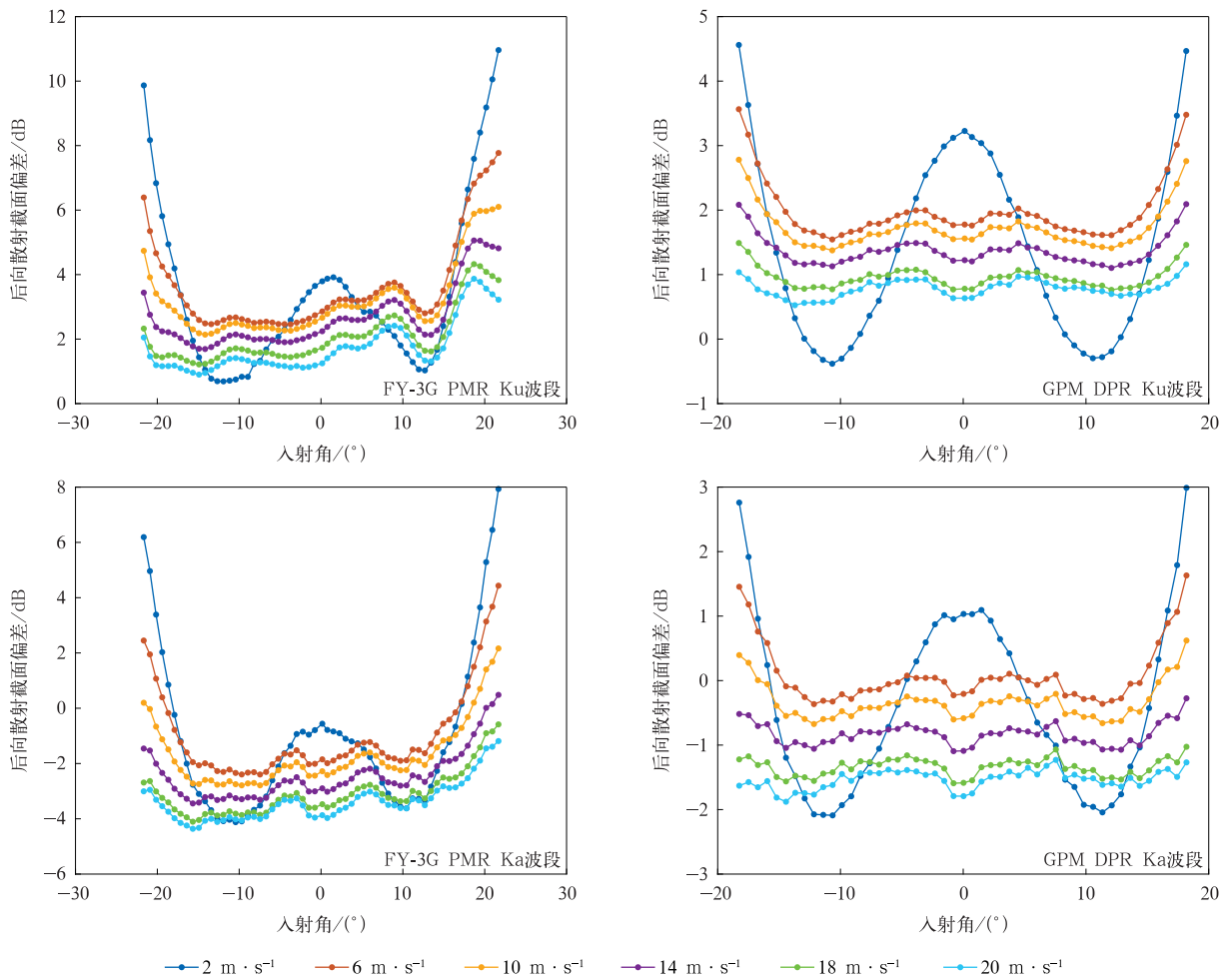


图 5 2023 年 7 月 FY-3G PMR 和 GPM DPR 不同风速区间的海洋定标结果

Fig. 5 Ocean calibration results of FY-3G PMR and GPM DPR at different wind speed intervals in Jul 2023

4 小 结

2023年4月发射的FY-3G是我国首颗低倾角轨道降水测量卫星,作为世界气象组织框架下全球降水探测的重要组成部分,可显著增强全球气候变化背景下灾害性天气系统云和降水监测、预报及气象防灾减灾救灾能力。降水测量雷达是该卫星上最核心的仪器,本文利用广阔的海洋目标对降水测量雷达的定标精度进行初步检验,结果表明:

1) 后向散射截面的大小及稳定性与入射角、地表类型以及雷达波段有关,FY-3G PMR Ku 波段海洋表面的后向散射截面较 Ka 波段偏大;Ku 波段 FY-3G PMR 海洋表面后向散射截面大于 GPM DPR 同波段,Ka 波段 FY-3G PMR 海洋表面后向散射截面则小于 GPM DPR 同波段。FY-3G PMR Ku 波段和 Ka 波段海洋表面后向散射截面的统计均方差分别在入射角为 $\pm 6^\circ$ 和 $\pm 5^\circ$ 左右时最小,数据自身的稳定性最高。

2) 不区分风速情况时,对于 Ku 波段,入射角小于 15° 后向散射截面的海洋定标检验观测值与模拟值的偏差较小,此时 FY-3G PMR 的偏差为 1.65~2.73 dB,偏差标准差为 0.74~1.82 dB。对于 Ka 波段,当入射角在 18° 左右时,FY-3G PMR 观测值与模拟值的偏差小于 0.27 dB,偏差的标准差为 3.49 dB。FY-3G PMR Ku 波段在中高风速下,风速越大,偏差越小,定标精度越高。Ka 波段在中高风速下,当风速增大时,偏差的绝对值增大。

FY-3G 降水测量雷达海洋定标精度检验评估是对在轨雷达定标精度开展分析与验证的重要手段。目前未考虑气体衰减的影响,后续将进一步评估气体衰减对 FY-3G PMR Ku 和 Ka 波段定标精度检验的影响,根据定标检验结果对后向散射数据进行分析修正,并将基于多种手段分析的定标精度,更新降水测量雷达的数据处理算法,发布更新版本的数据。

参 考 文 献

- [1] McKee J L, Binns A D. A review of gauge-radar merging methods for quantitative precipitation estimation in hydrology. *Canadian Water Resources Journal/Revue Canadienne Des Ressources Hydriques*, 2016, 41(1/2): 186-203.
- [2] Trenberth K E, Smith L, Qian T T, et al. Estimates of the global water budget and its annual cycle using observational and model data. *J Hydrometeorol*, 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. 合肥: 中国科学技术大学, 2021.
- Li Q K. Research on the Algorithm of Three-Dimensional Precipitation Structure Inversion with GPM/DPR and CINRAD Data. Hefei: University of Science and Technology of China, 2021.
- [4] 蒋银丰, 寇蕾蕾, 陈爱军, 等. 双偏振雷达和双频测雨雷达反射率因子对比. *应用气象学报*, 2020, 31(5): 608-619.
- Jiang Y F, Kou L L, Chen A J, et al. Comparison of reflectivity factor of dual polarization radar and dual-frequency precipitation radar. *J Appl Meteor Sci*, 2020, 31(5): 608-619.
- [5] 东高红, 刘黎平. 雷达与雨量计联合估测降水的相关性分析. *应用气象学报*, 2012, 23(1): 30-39.
- Dong G H, Liu L P. Correlation analysis on estimating rainfall using radar-rain gauge calibration. *J Appl Meteor Sci*, 2012, 23(1): 30-39.
- [6] 周冰雪, 朱朗峰, 吴昊, 等. 微波辐射计反演大气廓线精度及降水预报应用. *应用气象学报*, 2023, 34(6): 717-728.
- Zhou B X, Zhu L F, Wu H, et al. Accuracy of atmospheric profiles retrieved from microwave radiometer and its application to precipitation forecast. *J Appl Meteor Sci*, 2023, 34(6): 717-728.
- [7] 王洪, 周后福, 王琛, 等. 基于微波辐射计和探空的 FY-4A 温度廓线检验. *应用气象学报*, 2023, 34(3): 295-308.
- Wang H, Zhou H F, Wang C, et al. Accuracy validation of FY-4A temperature profile based on microwave radiometer and radiosonde. *J Appl Meteor Sci*, 2023, 34(3): 295-308.
- [8] 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. 合肥: 中国科学技术大学, 2005.
- Li R. Study on Structure Characteristics of Tropical Precipitation and Passive Microwave Retrieval of Precipitation with TRMM Rain Measuring Radar. Hefei: University of Science and Technology of China, 2005.
- [9] 王成刚. TRMM PR 降水探测及天气雷达降水量估测的方法研究. 南京: 南京大学, 2003.
- Wang C G. Research on Precipitation Detection by TRMM PR and Precipitation Estimation by Weather Radar. Nanjing: Nanjing University, 2003.
- [10] 毛冬艳, 程明虎. 用 TRMM 资料研究 1999 年 Sam 台风. *气象科技*, 2001, 29(2): 37-40.
- Mao D Y, Cheng M H. Study on Typhoon Sam in 1999 with TRMM data. *Meteor Sci Technol*, 2001, 29(2): 37-40.
- [11] 文稼齐, 王改利, 周任然, 等. 藏东南墨脱地区季风期降水的垂直结构特征. *应用气象学报*, 2023, 34(5): 562-573.
- Wen J Q, Wang G L, Zhou R R, et al. Vertical structure characteristics of precipitation in Mèdog area of southeastern Tibet during the monsoon period. *J Appl Meteor Sci*, 2023, 34(5): 562-573.
- [12] 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. *气象学*

- 报,2003,61(4):421-431.
- Fu Y F, Yu R C, Xu Y P, et al. Analysis on precipitation structures of two heavy rain cases by using TRMM PR and IMI. *Acta Meteor Sinica*, 2003, 61(4):421-431.
- [13] 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. *气象学报*, 2001, 59(5):591-601.
- Li W B, Chen Y, Zhu Y J, et al. Retrieval of rain over land by using TRMM/TMI measurements. *Acta Meteor Sinica*, 2001, 59(5):591-601.
- [14] 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. *应用气象学报*, 2011, 22(5):590-596.
- Shang J, Guo Y, Wu Q, et al. Airborne field campaign results of Ka-band precipitation measuring radar in China. *J Appl Meteor Sci*, 2011, 22(5):590-596.
- [15] 吴庆梅,程明虎,苗春生.用TRMM资料研究江淮、华南降水的微波特性. *应用气象学报*, 2003, 14(2):206-214.
- Wu Q M, Cheng M H, Miao C S. Study of microwave characteristics of rainfall over South China and Yangtze River Basin using TRMM data. *J Appl Meteor Sci*, 2003, 14(2):206-214.
- [16] Chiu L, Serafino G, Teng W L. Applications of Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM) Data//IGARSS 2001. Scanning the Present and Resolving the Future. IEEE 2001 International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Sydney, NSW, Australia. IEEE, 2001:2118-2120.
- [17] Chiu L S, Liu Z, Rui H L, et al. Tropical Rainfall Measuring Mission Data and Access Tools//Earth Science Satellite Remote Sensing. Berlin, Heidelberg:Springer, 2006:202-219.
- [18] Kojima M, Miura T, Furukawa K, et al. Dual-frequency Precipitation radar (DPR) Development on the Global Precipitation Measurement (GPM) Core Observatory//Earth Observing Missions and Sensors: Development, Implementation, and Characterization II. Kyoto, Japan. SPIE, 2012, 8528:234-243.
- [19] Masaki T, Kubota T, Oki R, et al. Current status of GPM/DPR Level 1 Algorithm Development and DPR Calibration//2015 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS). Milan, Italy. IEEE, 2015:2615-2618.
- [20] 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 Remote Sensing*, 2023, 3. DOI: 10.34133/remotesensing.0097.
- [21] Shang J, Yang H, Yin H G, et al. Performance analysis of China dual-frequency airborne precipitation radar. *IEEE Aerosp Electron Syst Mag*, 2013, 28(4):16-27.
- [22] Hossain A, Jones W L. Ku- and Ka-band ocean surface radar backscatter model functions at low-incidence angles using full-swath GPM DPR data. *Remote Sens*, 2021, 13(8). DOI: 10.3390/rs13081569.
- [23] Barrick D. Wind dependence of quasi-specular microwave sea scatter. *IEEE Trans Antennas Propag*, 1974, 22(1):135-136.
- [24] Brown G S. Quasi-specular Scattering from the Air-sea Interface//Geernaert G L, Plant W L. Surface Waves and Fluxes. Dordrecht:Springer, 1990:1-39.
- [25] Freilich M H, Vanhoff B A. The relationship between winds, surface roughness, and radar backscatter at low incidence angles from TRMM precipitation radar measurements. *J Atmos Oceanic Technol*, 2003, 20(4):549-562.
- [26] Tanelli S, Durden S L, Im E. Simultaneous measurements of Ku- and Ka-band sea surface cross sections by an airborne Radar. *IEEE Geosci Remote Sens Lett*, 2006, 3(3):359-363.
- [27] Valenzuela G R. Theories for the interaction of electromagnetic and oceanic waves—A review. *Bound Layer Meteor*, 1978, 13(1):61-85.
- [28] 廖蜜,张鹏,刘健,等.风云卫星的掩星干大气温度廓线精度度特征. *应用气象学报*, 2023, 34(3):270-281.
- Liao M, Zhang P, Liu J, et al. Accuracy and stability of radio occultation dry temperature profiles from Fengyun satellites. *J Appl Meteor Sci*, 2023, 34(3):270-281.
- [29] 邢彩盈,吴胜安,朱晶晶.基于不同资料的影响南海热带气旋环流背景对比. *应用气象学报*, 2023, 34(2):179-192.
- Xing C Y, Wu S A, Zhu J J. Comparison on the circulation background of tropical cyclone affecting the South China Sea based upon different reanalysis datasets. *J Appl Meteor Sci*, 2023, 34(2):179-192.
- [30] 杨润峰,于勇,李凉海,等.全球地表雷达后向散射系数的特性分析及其对星载降水测量雷达系统设计的影响. *电子与信息学报*, 2013, 35(11):2721-2727.
- Yang R F, Yu Y, Li L H, et al. Characteristics of surface NRCS and the effect on the spaceborne precipitation radar system design. *J Electron Inf Technol*, 2013, 35(11):2721-2727.
- [31] Holliday D, St-Cyr G, Woods N E. A radar ocean imaging model for small to moderate incidence angles. *Int J Remote Sens*, 1986, 7(12):1809-1834.
- [32] Liu Q H, Weng F Z, English S J. An improved fast microwave water emissivity model. *IEEE Trans Geosci Remote Sens*, 2011, 49(4):1238-1250.
- [33] Stephen J, Hewison T J. A Fast Generic Millimetre-wave Emissivity Model//Proc of SPIE, 1998, 3503. DOI: 10.1117/12.319490.
- [34] Wu J. Mean square slopes of the wind-disturbed water surface, their magnitude, directionality, and composition. *Radio Sci*, 1990, 25(1):37-48.
- [35] Nougier F, Mouche A, Rasclé N, et al. Analysis of dual-frequency ocean backscatter measurements at Ku- and Ka-bands using near-nadir incidence GPM radar data. *IEEE Geosci Remote Sens Lett*, 2016, 13(9):1310-1314.
- [36] Walsh E, Vandemark D, Friehe C, et al. Measuring sea surface mean square slope with a 36-GHz scanning. *J Geophys Res Atmos*, 1998, 1031(C6):12613-12628.

Validation and Evaluation of Ocean Calibration Accuracy of FY-3G Precipitation Measurement Radar

Yuan Mei¹⁾²⁾³⁾ Yin Honggang¹⁾²⁾³⁾ Shang Jian¹⁾²⁾³⁾ Jiang Baisen⁴⁾
Yang Runfeng⁴⁾ Gu Songyan¹⁾²⁾³⁾ Zhang Peng⁵⁾

¹⁾ (National Satellite Meteorological Center/National Center for Space Weather, Beijing 100081)

²⁾ (Innovation Center for Fengyun Meteorological Satellite, Beijing 100081)

³⁾ (Key Laboratory of Radiometric Calibration and Validation for Environmental Satellites, Beijing 100081)

⁴⁾ (Beijing Research Institute of Telemetry, Beijing 100076)

⁵⁾ (Meteorological Observation Center, CMA, Beijing 100081)

Abstract

FY-3G precipitation satellite launched in April 2023 is the first dedicated precipitation measurement satellite in China. The dual-frequency precipitation measurement radar (PMR) is the core instrument on the satellite. Because the backscattering performance of the vast ocean area is relatively stable, the calibration accuracy of the on-orbit radar can be tested by studying the backscattering cross-section of the sea surface. FY-3G PMR level 1 data in July 2023 and GPM DPR (global precipitation measurement, dual-frequency precipitation radar) level 2A data are used to analyze the mean value and mean square error of the global sea surface backscattering cross section under no-rain conditions to evaluate the radar performance. At the same time, the theoretical model of ocean surface backscattering is studied to simulate the sea surface backscattering cross-section under the condition of no rain, and the sea surface backscattering cross-section is compared with the actual radar measurement, so as to realize the preliminary evaluation of FY-3G PMR calibration accuracy. Furthermore, the accuracy of FY-3G PMR calibration is evaluated by the ocean calibration test results of GPM DPR data. Test results of ocean calibration accuracy show that when the incidence angle of FY-3G PMR Ku-band is less than 15° , the deviation between the observed value and the model simulation value is small. The deviation of FY-3G PMR ranges from 1.65 to 2.73 dB, while the standard deviation ranges from 0.74 to 1.82 dB. The deviation of FY-3G PMR Ka-band at an 18° incidence is less than 0.27 dB, and the standard deviation of the deviation is 3.49 dB. The calibration deviation of FY-3G PMR and GPM DPR is relatively constant, with the difference is primarily attributed to the backscattering statistical characteristics of the data itself. The stability of the backscattering data of FY-3G PMR Ku- and Ka-band sea surfaces at each incidence angle is comparable to that of GPM DPR. Gas attenuation is not considered at the moment. In the future, the impact of gas attenuation on the Ku- and Ka-band ocean calibration accuracy validation will be further evaluated, and the systematic deviation of FY-3G PMR will be corrected.

Key words: precipitation measurement radar; FY-3G; backscattering cross section; ocean calibration; accuracy validation