

基于机载微波辐射计数据反演热带气旋下 海面降雨的方法研究

闫俊衡^{1,2} 王振占¹

1(中国科学院国家空间科学中心微波遥感技术重点实验室 北京 100190)

2(中国科学院大学 北京 100149)

摘要 热带气旋等强对流天气过程中常伴随着空间分布剧烈变化的强降雨。为了准确获取剧烈变化的降雨等参数信息,需要高时空分辨率的观测数据,机载遥感是获取这些信息的有效手段。本文针对国产新型机载风雨微波辐射计(CXMR)的应用需求,构建了一种适用于热带气旋条件下的海面发射率模型,并基于国外机载微波辐射计 SFMR 实测数据开展海面降雨反演方法的研究,为 CXMR 在降雨反演中的应用提供方法支撑。针对发射率模型在中高风速区间($20 \sim 45 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$)发射率高估的问题,在 FASTEM-5 模型中引入了与风速相关的发射率修正项。在中高风速条件($U \geq 20 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$)下,修正后发射率模型与 SFMR 发射率之间的平均偏差由 0.0656 降低至 0.007。同时,在大气辐射传输模型中采用逐层积分方式计算大气及降雨的吸收贡献,构建了物理机理更加完善的辐射传输模型。模型改进后的亮温模拟结果表明,各频率通道模拟亮温相对于实测值的偏差由 $5.8 \sim 7.7 \text{ K}$ 降低至 $-1.6 \sim -2.1 \text{ K}$,标准差由接近 7 K 降低至 $1.6 \sim 1.9 \text{ K}$,亮温模拟精度与一致性显著提升。利用 2014~2023 年间多个热带气旋的 SFMR 飞行数据对反演方法进行验证,反演降雨率与 SFMR 降雨率之间的相关系数为 0.915, RMSE 为 $2.54 \text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 。这表明该反演方法在热带气旋环境下具有良好的反演精度与适用性。

关键词 热带气旋、机载微波辐射计、海面降雨反演、海面发射率、SFMR

中图分类号 P732

A Retrieval Method for Sea Surface Rainfall under Tropical Cyclones Based on Airborne Microwave Radiometer Data

YAN Junheng^{1,2} WANG Zhenzhan¹

1 (key Laboratory of Microwave Remote Sensing, National Space Science Center,
Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190)

2 (University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049)

Abstract Strong convective weather systems, such as tropical cyclones, are commonly accompanied by intense rainfall characterized by pronounced spatial variability. Accurate

* 基金项目: 国家重点研发计划资助(2022YFB3903303)

投稿日期: 2025 年 10 月

E-mail: yanjunheng23@mails.ucas.ac.cn

retrieval of rapidly varying rainfall and related geophysical parameters therefore requires observations with high temporal and spatial resolution, for which airborne remote sensing provides an effective and flexible observational platform. To meet the application requirements of the newly developed airborne wind–rain microwave radiometer (CXMR), this study constructs a sea surface emissivity model specifically tailored for tropical cyclone conditions. Based on in situ observations acquired by the airborne Stepped Frequency Microwave Radiometer (SFMR), a sea surface rainfall retrieval method is developed to provide methodological support for the application of CXMR in rainfall retrieval under severe weather conditions. To address the overestimation of sea surface emissivity by the FASTEM-5 model under moderate-to-high wind speed conditions ($20 \sim 45 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$), a wind-speed-dependent emissivity correction term is introduced. Under moderate-to-high wind conditions ($U \geq 20 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$), the mean bias between the corrected emissivity model and SFMR-derived emissivity is reduced from 0.0656 to 0.007, indicating a substantial improvement in emissivity representation at high wind speeds. In addition, a physically more complete atmospheric radiative transfer model is established by explicitly calculating the absorption contributions of both the atmosphere and rainfall using a layer-by-layer integration approach. Brightness temperature simulations based on the improved model demonstrate that the bias between simulated and observed brightness temperatures across all frequency channels is reduced from $5.8 \sim 7.7 \text{ K}$ to $-1.6 \sim -2.1 \text{ K}$, while the standard deviation decreases from nearly 7 K to $1.6 \sim 1.9 \text{ K}$, reflecting a marked enhancement in both simulation accuracy and consistency. The proposed rainfall retrieval method is further validated using SFMR flight observations collected during multiple tropical cyclones over the period 2014 $\sim$ 2023. The retrieved rainfall rates exhibit a correlation coefficient of 0.915 with the SFMR operational rainfall products, with a root mean square error (RMSE) of $2.54 \text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$, indicating that the proposed method achieves reliable retrieval accuracy and robustness under tropical cyclone conditions.

Key words Tropical cyclone, Airborne microwave radiometer, Retrieval of sea surface rainfall rate, Sea surface emissivity, Stepped Frequency Microwave Radiometer

0 引言

热带气旋 (Tropical Cyclone, TC) 是一种发生在热带或副热带洋面、具有显著环流结构的剧烈天气系统, 其引发的极端降雨常导致沿海地区严重的洪涝灾害, 是造成社会经济损失的主要气象灾害之一^[1-4]。微波辐射计因具备良好的云雨穿透能力及对风雨过程的敏感性, 已成为研究热带气旋降雨结构的关键遥感器。尽管当前多种星载微波辐射计 (如 AMSR2、SSMIS、风云系列卫星等) 以及 GPM DPR 等降雨雷达可提供大范围降雨反演产品, 但其空间分辨率通常在 $10 \sim 25 \text{ km}$, 仅能反映台风区域的平均降雨特征, 在台风眼墙等区域, 星载微波辐射计难以有效识别降雨的梯度变化^[5-8]。因此, 发展面向热带气旋应用的机载高

分辨率观测仪器，并建立与之相匹配的物理反演模型，对于提升台风降雨监测与高分辨率数值预报的准确性具有重要意义。

在早期热带气旋降雨观测研究中，降雨信息主要通过机载遥感观测获取。机载平台能够实现对热带气旋区域的高分辨率观测，为降雨反演的开展奠定了基础。步进频率微波辐射计（Stepped Frequency Microwave Radiometer, SFMR）是热带气旋条件下开展高分辨率海面风速与降雨强度观测的主要机载遥感仪器之一，在台风降雨反演研究中发挥着重要作用。SFMR 最早由美国国家航空航天局（National Aeronautics and Space Administration, NASA）于 1978 年研制^[9]，并于 1980 年首次搭载于 NOAA C-130 飓风侦察机对飓风 Allen 进行了观测，随后逐步发展成为飓风业务化观测的重要手段。早期热带气旋下海面降雨的遥感反演依赖于经验反演模型，后续研究通过建立降雨衰减与雨强（K-R）的幂函数参数化关系增强了物理约束^[10-12]。之后针对台风条件下反演精度与降雨强度之间的关系，Klotz 和 Uhlhorn 通过更新 K-R 模型显著扩大了降雨率反演的动态范围^[13]。Sanchez 建立了一个适用于冬季风暴的新发射率模型，显著提高了 SFMR 在非热带系统中反演的准确性^[14]。

机载全极化微波辐射计（Airborne full Polarization Microwave Radiometer, APMR）是由中国科学院国家空间科学中心研制用于海面风场反演的微波辐射计，并于 2020 年 6 月在东营完成首次海面飞行试验。APMR 是一台 5 频段微波辐射计，中心频点为 10.7、18.7、23.8、37.0 和 90 GHz，能够接收来自地球表面和大气的微波辐射，并通过反演获取海面风速风向、海表温度、大气水汽含量及云中液态水含量等信息^[15]。APMR 所采用的中高频段在海洋及大气参数探测方面具有显著优势，但在强降雨条件下该频段信号易受降水粒子散射效应的干扰，这限制了其在台风环境中降雨率的反演能力。为弥补不足，中国科学院国家空间科学中心进一步研制了 CX 双频段机载微波辐射计系统（以下简称 CXMR），目标是增强对海面风场和强降雨的探测能力。与 SFMR 在 C 波段采用 6 个离散频点进行观测不同，CXMR 的观测为一条在频率 4.64~6.6GHz 范围内连续采样的谱曲线，其频谱形态同时受到海面发射、降雨衰减以及背景大气吸收等多因素共同影响。这意味着观测信息由 SFMR 的少量离散频点亮温扩展为 CXMR 覆盖整个工作频段的宽带谱观测，原有基于 SFMR 离散频点观测建立的反演框架难以直接迁移应用，需要建立与 CXMR 宽带频段观测特性一致的物理正演与反演流程作为应用基础。CXMR 与 SFMR 的主要技术指标对比见表 1。

表 1 CXMR 与 SFMR 技术指标对比

Table.1 Comparison of Technical Specifications between CXMR and SFMR

仪器名称/参数	CXMR			SFMR
工作频率	C 波段		X 波段	C 波段
具体频带 (GHz)	4.64~6.6	6.95~7.3	10.6~10.8	4.55、5.06、5.64、6.34、6.96、7.22
极化方式	V、H	全极化	全极化	V
3dB 波束宽度 (°)	12~18	~11	~7	20~28
亮温分辨率 (K)	<0.2 (积分时间 50 ms)			0.4 (积分时间 500 ms)
观测方式	交轨摆扫 (-179°~+179°)			近天底观测
体积 (长×宽×高) (mm)	628×590.6×550			736.6×279.4×381.0
重量 (Kg)	<45			0
功耗 (w)	<240			168

基于此，本文面向机载双频段微波辐射计 CXMR 在热带气旋条件下降雨反演的应用，构建了一套与其观测特性相匹配的物理反演方法。然而，开展针对台风飞行观测的实验具有极大挑战，暂时无法获得 CXMR 台风实测数据。所以，本文基于 SFMR 台风飞行观测数据建立降雨率反演算法。首先，修正了发射率模型在高风速条件下的发射率偏差，并通过逐线积分的方式计算了辐射传输中氧气、云中液态水等大气吸收和降雨的影响，在此基础上构建了正演亮温模拟模型。其次，采用最小二乘法对 2014~2023 年多个台风实例进行了降雨率反演与验证。研究为未来利用 CXMR 开展降雨遥感应用提供了重要的理论支撑和方法基础，并为具备相似观测特性的微波辐射计在复杂风雨条件下开展降雨反演提供了方法参考。

1 研究数据

1.1 SFMR 数据

作为目前热带气旋条件下应用最为成熟的机载微波遥感仪器之一，SFMR 已在飓风业务观测与相关研究中得到长期、广泛应用，其数据产品被广泛用于台风风速与降雨的研究。本研究使用的亮温与降雨率数据来自美国国家海洋和大气管理局（NOAA）公开发布的 SFMR 台风飞行观测资料。SFMR 观测数据具有较高的时空分辨率，其空间分辨率约为 1.5 km，时间分辨率为 4 s^[16]。本文选取了 2014—2023 年间多个热带气旋的 SFMR 观测数据，包括 SFMR L1 亮温 (T_B) 数据与 L2 海面风速与降雨率数据。围绕正演模型构建与反演验证两个研究阶段，本文对 SFMR 观测数据进行了划分。其中，选取约 20% 的观测数据用

于正演模型的建立。其余约 80% 的观测数据作为独立样本，用于降雨率反演与验证实验。为保证数据质量，对每一组 SFMR 的观测剔除了 T_B 缺失或异常 ($T_B < 100\text{ K}$ 或 $T_B > 300\text{ K}$) 的样本及其所对应的风速与降雨率数据。

1.2 ERA5 数据

本研究采用欧洲中期天气预报中心 (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, ECMWF) 发布的 ERA5 再分析资料提供辐射传输模拟所需的大气与海面环境参数。ERA5 是第五代全球气候再分析数据集，可提供全球 1 小时时间分辨率、约 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ 空间分辨率的大气剖面和海洋表面变量。

在热带气旋等高速条件下，海面发射率主要受海面风速影响，而其他海洋表面变量的影响相对较弱。ERA5 风速作为再分析数据，是一定时空尺度内的最优估计，但由于台风眼墙附近风速梯度变化剧烈，ERA5 风速数据分辨率有限。因此，为保证海面发射率计算的准确性，本文统一采用 SFMR 的风速数据作为正演模型的输入。ERA5 大气剖面数据主要用于大气辐射传输的逐层积分计算，从而得到大气吸收系数、透过率以及上行与下行辐射通量。在辐射传输计算前，本文对 ERA5 大气剖面进行垂直插值，根据气压大小将大气分为 60 层，将原始数据 37 个气压层上的大气温度、比湿及云水混合比等剖面变量插值到新的层结构上，用于辐射传输计算中的逐层积分。

1.3 数据匹配

由于 SFMR 与 ERA5 数据在空间和时间分辨率上存在差异，需要对两种数据进行时空匹配。在空间上，对每个 SFMR 观测点，选取与其距离最近且不大于一个 ERA5 网格间距的 ERA5 网格点数据，作为该观测点的背景场。其次，在空间匹配确定的 ERA5 网格点上，选取与 SFMR 观测时刻最接近的 0.5 小时之内的 ERA5 数据作为最终背景场数据。背景场数据主要包括 ERA5 的表面温度、大气温度和湿度廓线数据。海面风速采用 SFMR 的高分辨率风速产品数据。

2 研究方法

2.1 包含降雨的微波辐射传输模式

利用微波辐射计进行海面观测时，距海面高度 h 处接收到的亮温信号由以下四部分组成：

(1) 宇宙背景辐射经过海面反射后的辐射；(2) 大气下行辐射、再由海面反射后的辐射；(3) 经大气吸收与衰减后的海面辐射；(4) 大气自身的上行辐射。在空间传播过程中，这些辐射分量会受到大气气体分子、云水及降水粒子的吸收和散射影响。其中，液态降水粒子（主要为雨滴）对微波辐射的影响主要体现为吸收和散射两个物理过程。由于 C 波段（4~8 GHz）对应的波长约为 3.7~7 cm，而典型雨滴直径通常为 0.1~3 mm，两者量级相差约 10~100 倍，因此在该波段下散射效应通常可近似忽略，雨滴的吸收作用占主导地位。基于辐射传输理论，机载微波辐射计接收到的亮温可简单表示为^[17]：

$$T_B = [eT_{ss} + r(T_{down} + \tau_{down}T_{BC})]\tau_{up} + T_{up} \quad (1)$$

式中， T_{ss} 为海洋表面温度， T_{BC} 为宇宙背景辐射亮温， e 和 r 分别表示海洋表面的发射率和反射率， τ_{up} 、 τ_{down} 分别为海面至仪器观测高度与顶层大气至海面的路径透过率， T_{up} 、 T_{down} 分别为上、下行大气的辐射亮温。其中，在 C 波段晴空条件下， τ_{up} 和 τ_{down} 的差异可忽略，而在降雨条件下需要按照各自路径积分分别计算，其差异取决于频率和降水强度的大小。

为使辐射传输模型能适用于非晴空条件，需要考虑降水对大气透过率和辐射分量的影响。在降雨条件下，来自海面的向上辐射会受到更强的吸收而减弱，而大气自身的辐射则相应增强。当降雨强度足够大时，大气可近似视为不透明介质，此时海面辐射信号几乎被完全吸收，因此仪器接收到的亮温趋近于雨滴本身的物理温度（约 300 K），表现为亮温的“饱和效应”。为此，在辐射传输模型中我们引入了基于 Jorgensen 和 Willis^[18]以及 Olsen^[12]等人提出的降雨吸收模型来模拟降雨引起的辐射衰减。该模型通过幂律关系描述了吸收系数与降雨率之间的定量关系，其形式如下：

$$k_{rain} = aR^b \quad (2)$$

其中， k_{rain} 表示雨滴对微波辐射的吸收系数（ $\text{Np} \cdot \text{km}^{-1}$ ）； R 为降雨率（ $\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$ ）；指数 b 表征吸收与降雨强度之间的非线性关系；系数 a 与频率 f （GHz）及降雨率相关，其具体表达如下：

$$a = gf^{n(R)} \quad (3)$$

$$n \cong cR^d \quad (4)$$

在此基础上，Klotz 与 Uhlhorn^[13]利用 SFMR 实测亮温与机尾多普勒雷达（TDR）导

出的降雨率进行回归拟合，得到了一组优化的经验参数集（见表 2），提升了强降水条件下反演的准确性。

表 2 降雨吸收经验模型的参数对比

Table.2 Comparison of empirical model parameters for rainfall absorption

版本	<i>g</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>d</i>
Jorgensen 与 Willis（1982）	1.87×10^{-6}	1.15	2.60	0.0736
Klotz 与 Uhlhorn（2014）	3.94×10^{-6}	0.87	2.63	0.0600

图 1 给出了 C 波段不同频率下降雨吸收系数与降雨率之间的关系，吸收系数随降雨率增加呈非线性增强，且高频通道对强降雨更为敏感。

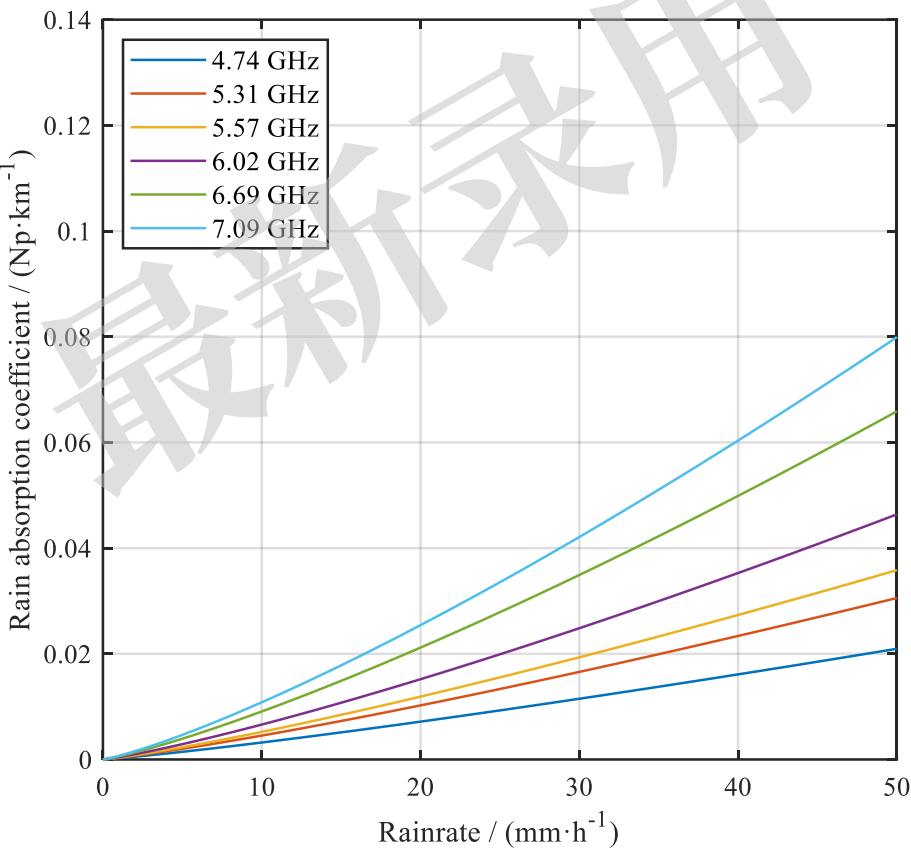


图 1 Klotz 与 Uhlhorn（2014）修正的在不同频率下降雨吸收系数与降雨率之间的关系

Figure.1 Frequency-dependent relationship between the rain absorption coefficient and rainfall rate, modified by Klotz and Uhlhorn (2014)

对于热带气旋下的辐射传输过程,本文采用 MPM93 模型^[19]计算大气吸收。目前 SFMR 通常采用简化的辐射传输模型计算大气吸收,将大气整体等效为单层大气。针对台风的复杂环境,本文结合 ERA5 数据对氧气、水汽、云中液态水和降雨的吸收贡献进行逐层积分计算。因此,降雨条件下的总透过率 τ 可表示为:

$$\tau = \exp[-\sec(\theta) \cdot \sum_{i=1}^N \Delta z_i \cdot (k_{O_2} + k_{H_2O} + k_{cloud} + k_{rain})_i] \quad (5)$$

其中, θ 为观测入射角,单位为弧度(rad); Δz_i 为第*i*层大气层厚度(km); N 为辐射传输计算中设定的大气层数,本文根据气压大小将大气分为 60 层,即 $N = 60$ 。 $k_{O_2,i}$ 、 $k_{H_2O,i}$ 、 $k_{cloud,i}$ 、 $k_{rain,i}$ 分别表示第*i*层大气中氧气、水汽、云中液态水和降雨粒子的微波吸收系数。逐层积分方式可以更准确计算氧气、水汽、云中液态水和降雨的吸收贡献,从而构建更符合实际台风条件的正演模型。

2.2 海面发射率模型校正

海面发射率的计算是海面微波辐射模拟的核心。本文利用 FASTEM-5 海表发射率模型^[20]进行强对流条件下海面辐射和散射的计算。在 FASTEM-5 中,目标区域平均发射率 e 的表达式为^[21]:

$$e = (1 - F) \cdot (e_{smooth} + e_{rough}) + F \cdot e_{foam} \quad (6)$$

式中, F 为泡沫覆盖率,表示单位面积海面中泡沫覆盖的比例(范围 0~1); e_{smooth} 为平静海面发射率,由 Fresnel 公式与海水复介电常数计算得到。 e_{rough} 为与风速相关的粗糙海面发射率; e_{foam} 为泡沫覆盖区的发射率,通常近似取为 1。

然而已有研究表明,海面发射率模型在高风速条件下会存在系统性“过发射率”问题,表现为发射率随风速升高呈现出过快的非线性增长趋势^[22]。FASTEM-5 模型也存在相同的问题:即在风速超过 $30 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时,模型计算的发射率显著偏高。这种偏差会影响亮温模拟的准确性,进而降低降雨率的反演精度。所以本文基于 SFMR 观测的高风速数据对 FASTEM-5 海表发射率模型进行了偏差校正。

由于强降水会显著增强大气吸收,影响发射率的准确计算。因此,为计算 FASTEM-5 模型发射率与基于 SFMR 数据计算得到的海面发射率之间的偏差,需要构建一个弱降水背景下的数据样本集。构建样本集所用数据来自 2017 年飓风 Irma 期间的 SFMR 飞行观测。Irma 是 2017 年大西洋飓风季中强度最强的热带气旋,也是有观测记录以来第二强的大西

洋热带气旋。该风暴于 8 月 30 日生成后迅速增强，并于 9 月 4 日达到峰值强度，最大风速超过 $82 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ，这期间伴随大范围风暴潮和持续性强降水。飓风 Irma 飞行观测提供了 $0 \sim 80 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的连续风速样本，各风速段均有经严格质量控制的数据，并多次穿越风眼墙及雨带，保证了风速降水联合分布的完整性和代表性，从而为发射率修正提供了可靠的数据基础。

实验相较于以往研究^[13]制定了更严格的数据筛选标准，根据不同风速区间降水对辐射影响的差异，设定不同的降雨率阈值。在低风速区间 ($U_{SFMR} < 20 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$)，海面发射率受降水影响很大，所以仅保留降雨率低于 $2 \text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 的样本；在中风速区间 ($20 \leq U_{SFMR} < 55 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$) 常伴随较强降水，为最大程度降低降水的影响同时保证样本数量，保留降雨率低于 $5 \text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 的样本；在高风速区间 ($U_{SFMR} \geq 55 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$)，降水的影响远小于风速的影响，但为降低系统误差，保留降雨率低于 $15 \text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 的观测样本。通过筛选，在 $0 \sim 70 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的风速范围内共获得 12461 个有效观测值，为计算发射率偏差提供了可靠的数据基础。

利用 SFMR 的观测数据和 ERA5 背景场数据，SFMR 的海面发射率可以通过辐射传输方程 (1) 推导得到：

$$e_{SFMR} = \frac{\tau_{up}^{-1}(T_B - T_{up}) - (T_{down} + \tau_{down}T_{BC})}{T_{ss} - (T_{down} + \tau_{down}T_{BC})} \quad (7)$$

其中， e_{SFMR} 为基于 SFMR 观测反演得到的海面发射率； T_B 为 SFMR 的观测亮温； T_{ss} 为基于 ERA5 再分析数据的海表温度； T_{BC} 为宇宙背景辐射亮温，取常数 2.7 K 。

利用筛选后的 SFMR 实测亮温数据计算得到在 7.09 GHz 下的海面发射率，拟合其随风速变化的曲线，并与 FASTEM-5 模型在 7.09 GHz 下的海面发射率进行对比，结果如图 2 所示。图中可以看到，当风速超过约 $20 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 后，FASTEM-5 模型的发射率明显高于 SFMR 的海面发射率，且偏差随风速的增大持续增大。

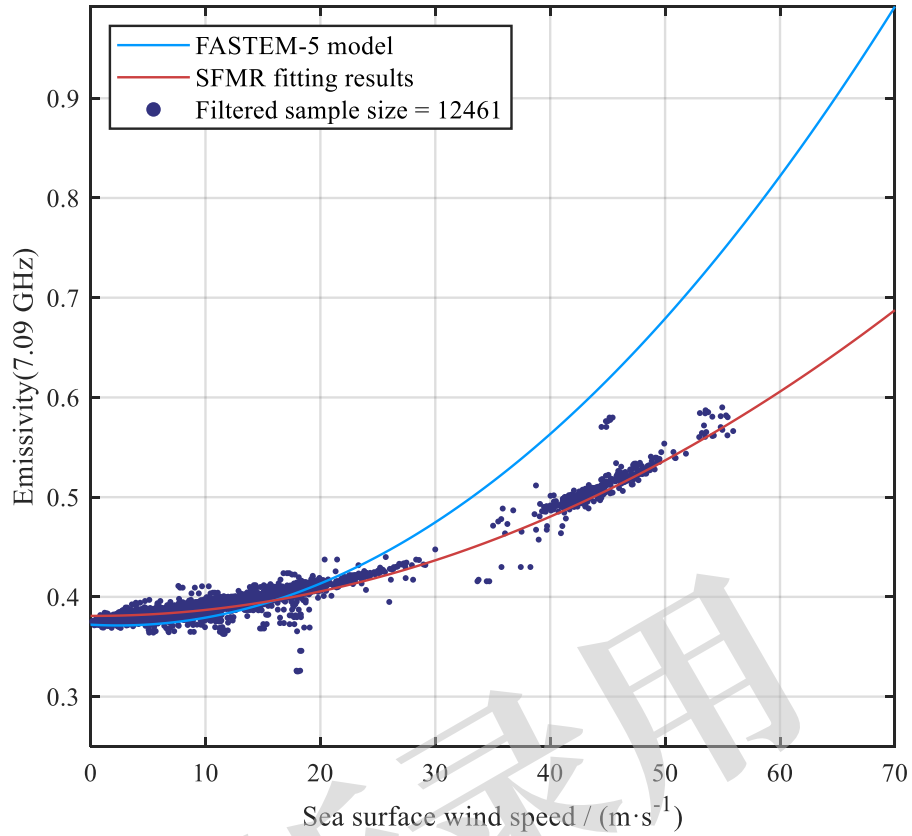


图2 FASTEM5 模型发射率与 SFMR 观测发射率风速响应曲线对比

Figure.2 Comparison of wind-speed-dependent emissivity responses between the corrected FASTEM-5 model and SFMR observations

在不同风速区间内，对 FASTEM-5 模型与 SFMR 观测数据计算的海面发射率差异（模型 - 观测）进行了统计。结果表明，在低风速区间（ $0 \sim 20 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ），FASTEM-5 模型略低于 SFMR 海面发射率，平均偏差为 -0.007 ，均方根误差（RMSE）为 0.008 ；而在中等风速区间（ $20 \sim 40 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ），模型已出现一定高估，平均偏差为 $+0.014$ ，RMSE 增大至 0.026 ；在高风速区间（ $40 \sim 60 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ），模型偏差显著增大，平均偏差达 $+0.103$ ，RMSE 为 0.106 ，这表明 FASTEM-5 在强风条件下存在系统性“过发射率”问题。

所以，针对 FASTEM-5 在高风速条件下的系统性高估，有必要对其发射率计算方法进行修正。研究在原发射率 e 的基础上引入修正项，得到修正后发射率为：

$$e_{correct} = e - \Delta e(f, U) \quad (8)$$

其中， $\Delta e(f, U)$ 参考 Klotz^[13]提出的经验模型，将风速引起的过发射率表示为：

$$\Delta e(f, U) = e_0(U) + e_f(f, U) \quad (9)$$

式中 $e_0(U)$ 是与风速相关的频率无关项； $e_f(f, U)$ 是与风速相关的频率依赖项。

对于频率无关项 $e_0(U)$ ，根据 FASTEM-5 模型与 SFMR 观测发射率的偏差，构建了更简洁的分段函数。这使函数在全风速区间保持连续且光滑，显著提升了在中高风速区间对 FASTEM-5 模型修正能力。

$$e_0(U) = \begin{cases} a_1 U & U < U_0, \\ a_2 + a_3 U + a_4 U^2 & U \geq U_0 \end{cases} \quad (10)$$

其中，在低风速区间， $e_0(U)$ 随风速线性增长，符合海面粗糙度增强初期导致的发射率上升趋势；在中高风速区间，海面开始出现泡沫并引起发射率的非线性升高，故采用二次函数进行修正。式中， U 表示海面风速， U_0 为线性函数段与二次函数段之间的过渡点。由于在零风速时，风致额外发射率应当为 0，所以低风速段采用过原点的线性函数，并且在过渡点处与二次函数的斜率相同。可解得其数值为：

$$U_0 = \sqrt{\frac{a_2}{a_4}} \approx 12.1988 \quad (11)$$

并且，为保证函数在过渡点 U_0 处满足函数值与一阶导数的连续性，将线性函数的斜率系数定义为：

$$a_1 = a_3 + 2a_4 U_0 \quad (12)$$

频率相关项 $e_f(f, U)$ 基于 Sapp^[23]提出的函数结构，用来刻画不同频率间的系统性差异。由于 CXMR 工作频率范围更广，所以对 SFMR 不同频率发射率关系的函数进行了扩展与修正，使其能够更有效地修正更宽频段下的过发射率。修正后的形式为：

$$e_f(f, U) = (a_5 + a_6 U + a_7 U^2)(7.3 - f) \quad (13)$$

表 3 给出了重新拟合得到的系数 $a_1 - a_7$ 。

表 3 过发射率修正模型系数

Table.3 Coefficients of the exceed emissivity correction model

系数	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5	a_6	a_7
值	1.18×10^{-3}	6.25×10^{-3}	1.56×10^{-4}	4.2×10^{-5}	5.81×10^{-4}	-1.16×10^{-4}	-2.2×10^{-6}

图 3 给出了修正后的 FASTEM-5 模型与 SFMR 观测发射率的对比结果。整体统计结果

表明, FASTEM-5 与 SFMR 观测发射率的平均偏差(模型-观测)由 0.0036 降至 0.0016, RMSE 由 0.0213 降至 0.0061, 表明修正后 FASTEM-5 模型与 SFMR 观测发射率的整体偏差明显减小。在中高风速条件 ($U \geq 20 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$) 下修正效果更加显著, 平均偏差由 0.0656 降低至约 0.007, RMSE 由 0.0824 降低至 0.0124。上述结果表明, 所建立的过发射率修正模型能够有效抑制 FASTEM-5 在强风条件下的系统性过发射率问题, 进而有助于提升亮温模拟的准确性。

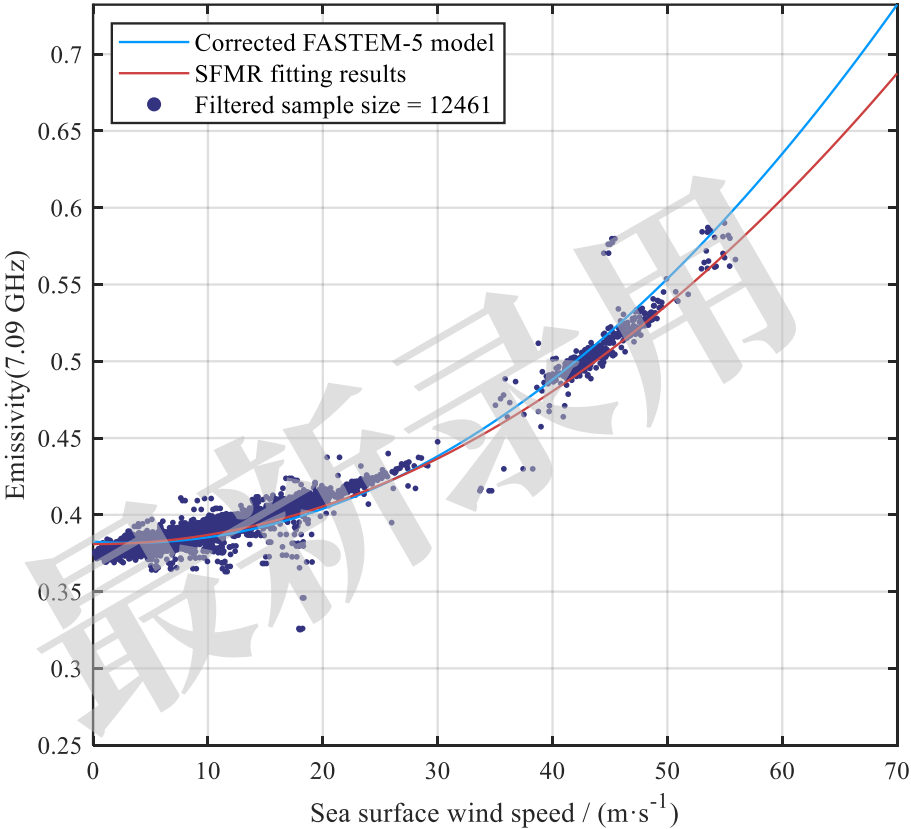


图 3 修正后 FASTEM-5 模型发射率与 SFMR 实测发射率风速响应曲线对比

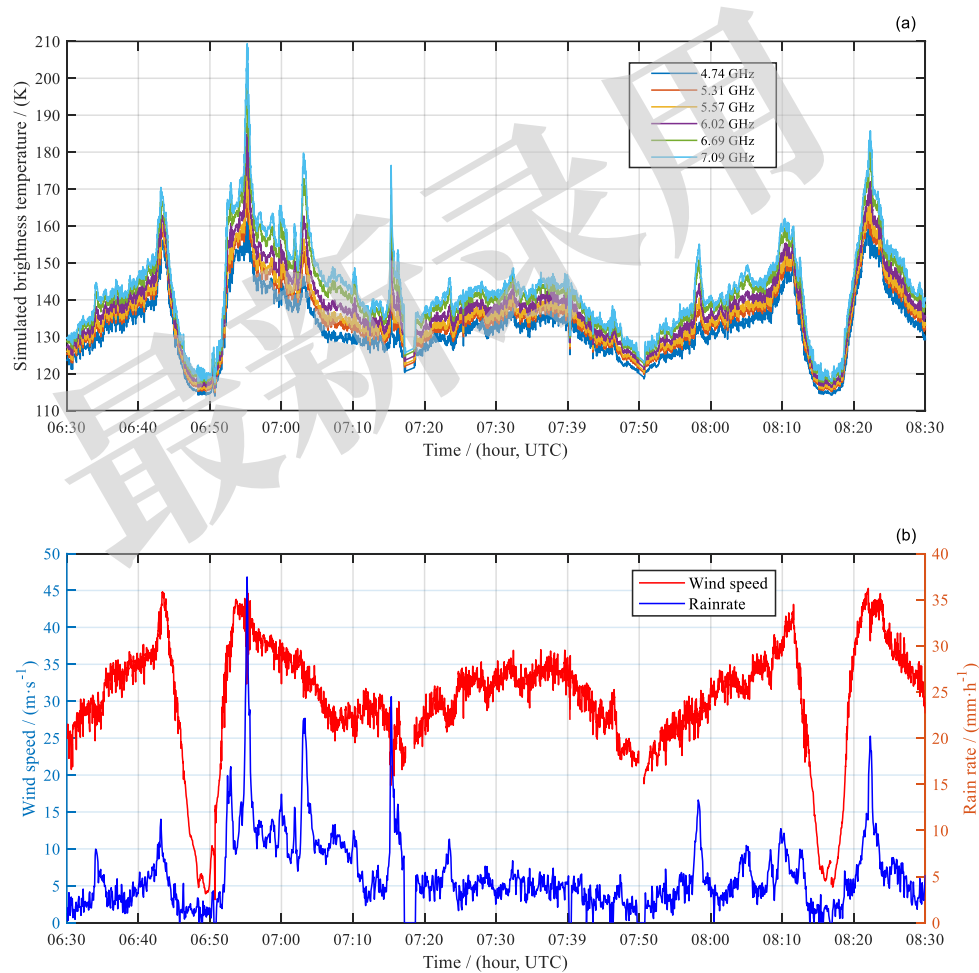
Figure.3 Comparison of wind-speed-dependent emissivity responses between the corrected FASTEM-5 model and SFMR observations

从图 3 可以看到, 在极端风速条件 ($> 55 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$) 下, 修正后模型的发射率相对实测数据仍存在一定程度的高估。这种现象的原因有两个方面: 一方面利用 SFMR 数据反演的观测发射率中存在误差, 主要受云廓线、风速、海面温度等输入参数误差的影响; 另一方面, 观测发射率数据样本数在高风速下相对较少, 未来可以通过增加高风速下的样本数来提升拟

合的整体精度。

2.3 亮温模拟及其与实测数据比较

基于修正后的正演模型，选取 2017 年 9 月飓风 Maria 期间的部分 SFMR 飞行航段，利用 SFMR 飞行观测的风速与降雨率数据，开展热带气旋条件下的亮温模拟。飓风 Maria 是 2017 年大西洋飓风季中另一极为强烈的热带气旋。该风暴于 9 月 16 日生成，最大持续风速超过 $77\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。SFMR 对 Maria 进行了长达七小时的观测飞行（04:49 ~ 12:58 UTC），飞行航迹覆盖风暴中心及风眼墙区域。当天 Maria 的最大风速仍超过 $50\sim55\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ，降雨强度大，中心气压最低降至 908 hPa，局部区域伴随强对流降水。图 4 给出了比较结果：上



图（a）为亮温模拟结果，下图（b）为对应每一个时刻 SFMR 观测的风速与降雨率结果。

图 4 2017 年 9 月 24 日飓风 Maria 期间，6 个频率通道下沿 SFMR 航迹的模拟亮温（a）以

及对应每一个时刻 SFMR 观测的风速与降雨率 (b)

Figure.4 Simulated brightness temperatures at six frequency channels along the SFMR flight track during Hurricane Maria on September 24, 2017 (a), and the corresponding wind speed and rain rate observed by SFMR (b)

由图 4 可见, 多个亮温峰值均对应同一时刻下降雨率的快速上升, 这表明了飞行穿越飓风强对流中心及其外围雨带等强降水区域时, 降雨过程会显著增强微波辐射, 引起亮温的明显升高。不同频率之间的亮温差异则反映了不同频率波段对降雨敏感性的差异: 低频波段具有较强的穿透能力, 亮温变化相对平缓; 相比之下, 高频波段对强降雨更为敏感, 在强降雨率下呈现出更显著的响应。

为评估模拟亮温与 SFMR 观测亮温之间的一致性, 将各频率的模拟结果与 SFMR 观测亮温进行对比, 如图 5 所示。由结果可见, 模拟亮温与观测亮温整体一致, 呈现良好的线性相关性, 表明构建的辐射传输模型在不同频率上具有良好的模拟精度。

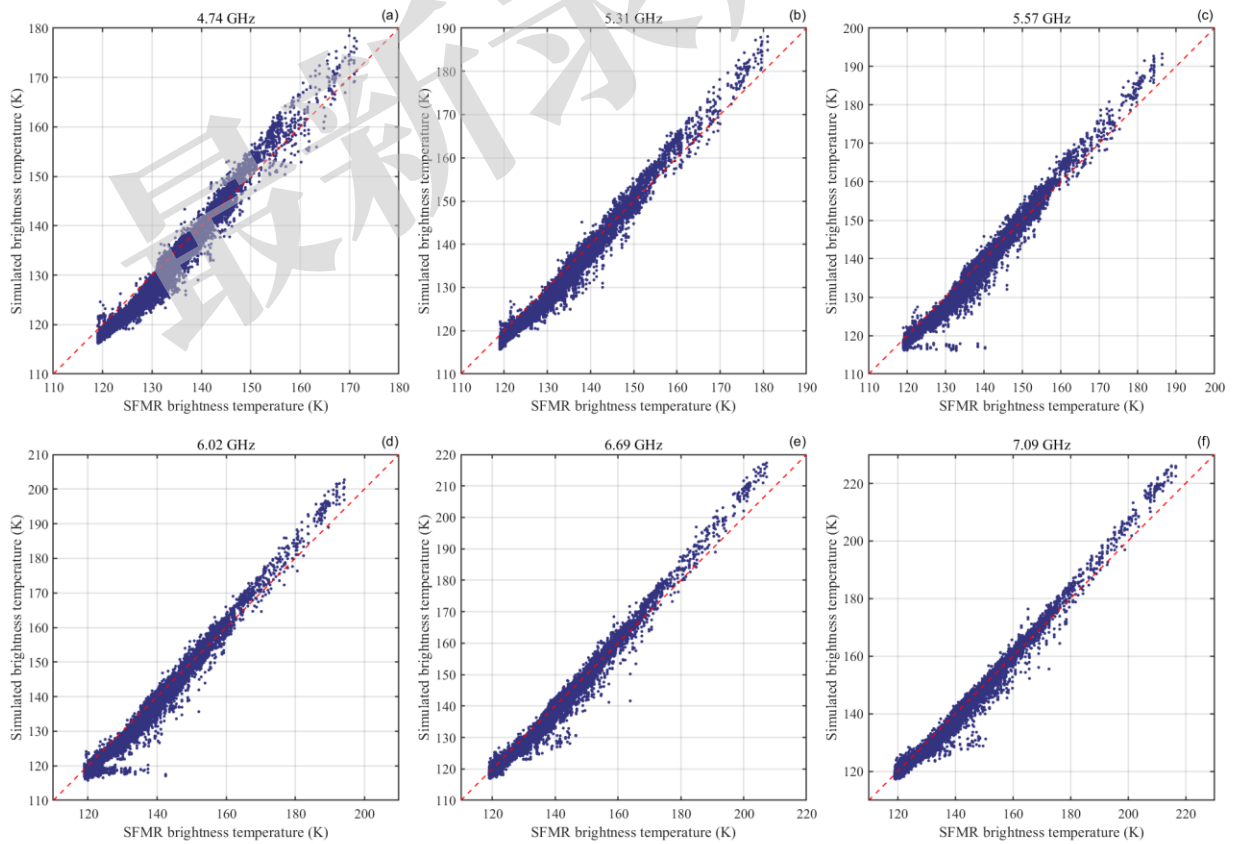


图 5 各频率通道模拟亮温与 SFMR 实测亮温的对比散点图

Figure.5 Comparison between simulated brightness temperatures and SFMR brightness

表 4 统计了发射率模型修正前后模拟亮温与实测亮温之间的偏差（模拟－实测）。结果表明，在未修正发射率模型的情况下，各频率通道的模拟亮温整体明显高于实测值，平均偏差约为 5.8~7.7 K，且标准差接近 7 K，这说明原始模型模拟的亮温存在明显高估。在对海面发射率进行修正后，各频率通道亮温平均偏差显著减小，降低至 -1.6~-2.1 K，标准差降低至 1.6~1.9 K。对比表明，引入发射率修正后，正演模型在不同频率通道下模拟亮温的准确性与一致性均得到明显改善。

表 4 海面发射率修正前后模拟亮温与实测亮温偏差统计

Table.4 Statistics of brightness temperature deviations before and after emissivity correction

频率/（GHz）	平均偏差 ΔT_b /（K）		标准差 σ /（K）	
	修正前	修正后	修正前	修正后
4.74	+5.83	-1.98	6.97	1.70
5.31	+6.28	-1.93	7.16	1.64
5.57	+6.44	-1.95	7.33	1.75
6.02	+6.55	-2.14	7.59	1.86
6.69	+7.52	-1.56	7.65	1.82
7.09	+7.69	-1.62	7.69	1.87

3 基于机载辐射计数据的降雨反演

3.1 反演流程及实现

本文利用物理反演方法开展海面降雨反演，反演整体流程如图 6 所示。反演过程中，首先输入海面温度、盐度、风速等参数，利用修正后的 FASTEM-5 发射率模型计算海面发射率。同时，输入云中液态水等 ERA5 大气数据以及降雨率计算大气透过率和上、下行辐射亮温，利用微波辐射传输模型（式 1）模拟亮温。最后，采用最小二乘法对降雨率进行迭代，通过最小化模拟亮温与 SFMR 实测亮温之间的差获得降雨率的最优估计。

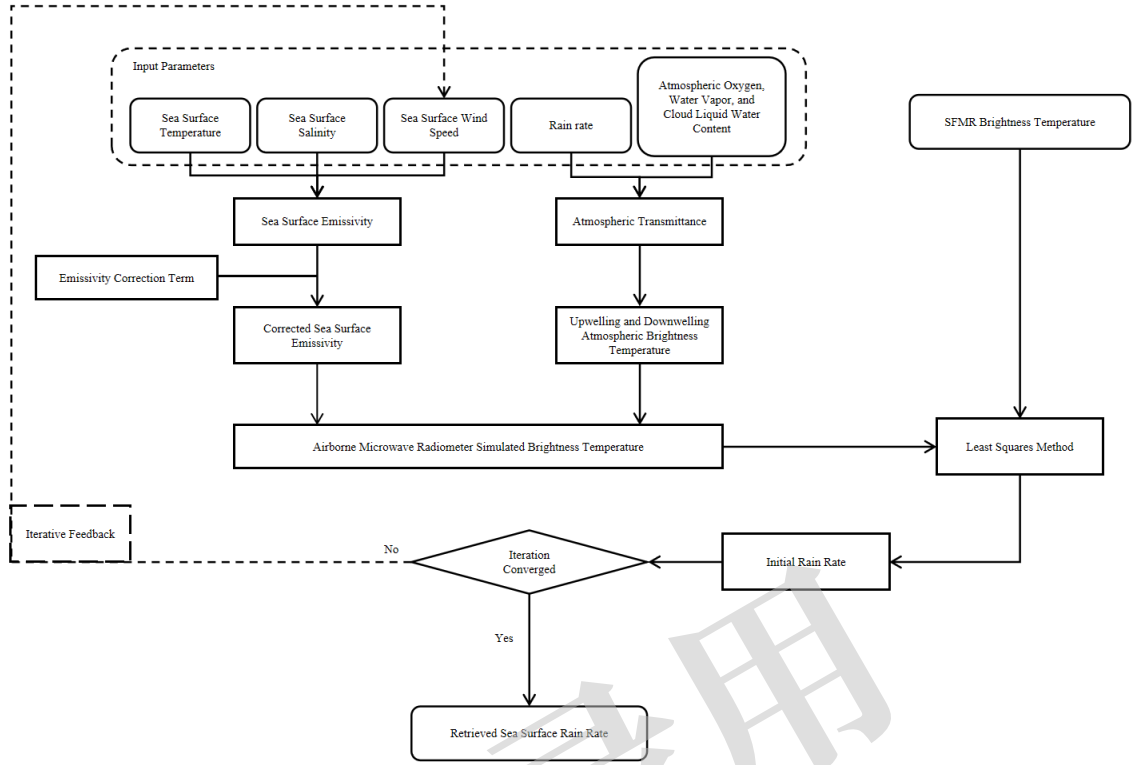


图 6 海面降雨率反演流程

Figure.6 Flowchart of sea surface rainfall rate retrieval

实施过程如下：假设 $T_{B,SFMR}^{(i)}$ 为 SFMR 第 i 个频率通道的观测亮温， $T_{B,sim}^{(i)}(RR)$ 为在降雨率 RR 下由前向模型计算得到的模拟亮温，则降雨率的估计值 $\widehat{RR}$ 为：

$$\widehat{RR} = \arg \min_{RR} \sum_{i=1}^{N_f} \left[T_{B,sim}^{(i)}(RR) - T_{B,SFMR}^{(i)} \right]^2 \quad (14)$$

其中， N_f 为频率通道数；在前述质量控制与异常值剔除基础上，对每个观测点独立求解 $\widehat{RR}$ ，并沿航迹输出逐点反演结果。

图 7 给出了降雨率反演结果与 SFMR 降雨率之间的密度散点图。结果表明，二者相关系数(Corr)为 0.909,海面降雨率反演的结果与 SFMR 观测降雨率之间具有显著的一致性；均方根偏差 (RMSE) 为 $2.57 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ ，表明反演结果具有较高精度。

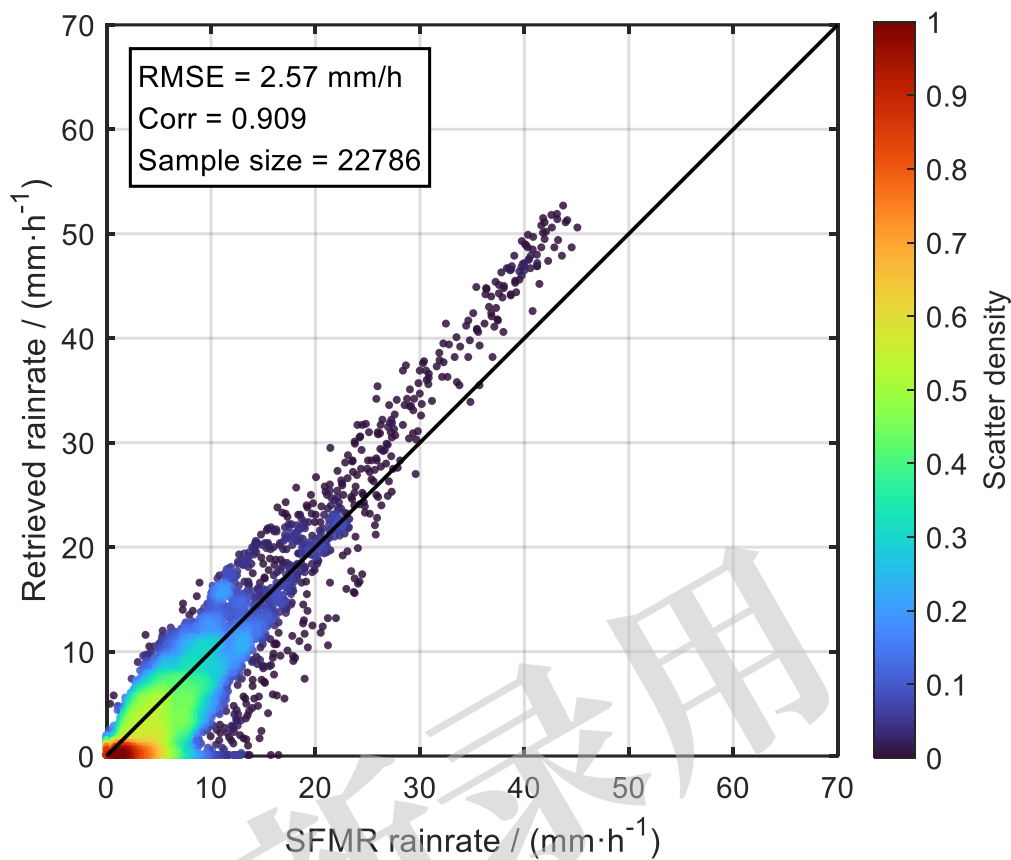


图 7 反演降雨率与 SFMR 观测降雨率对比

Figure.7 Comparison between Retrieved Rain Rate and SFMR Rain Rate

总体来看，该反演方法能够在 CXMR 观测体系下实现降雨率的准确反演，但其反演偏差随着降雨强度的增大逐渐增大。这是因为在热带气旋条件下，强降雨同时伴随着强风，在风速超过 $20 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时，风速对亮温的影响显著高于降雨的影响^[23]。因此，模型会将部分风速引起的亮温升高判断为降雨影响，从而高估降雨率。未来，随着 CXMR 海面观测数据的获取，可望同时反演强降雨和风场，从而提升热带气旋等的强降雨和风场的反演精度，这也是本研究的初衷与后续研究方向。

3.2 反演结果的验证

为验证本研究所构建的反演模型在台风环境下反演能力的稳定性，选取了 2014~2023 年间多个热带气旋的 SFMR 飞行观测资料进行反演计算。这些数据覆盖了不同强度等级和演变阶段的热带气旋。验证过程所用的观测数据均独立于模型构建及参数修正部分使用的数

据。图 8 为本文验证过程中所使用的部分 SFMR 飞行航迹及反演降雨率的空间分布。可以看出，观测点连续分布，反演降雨率在部分航段呈现出明显的空间梯度变化。

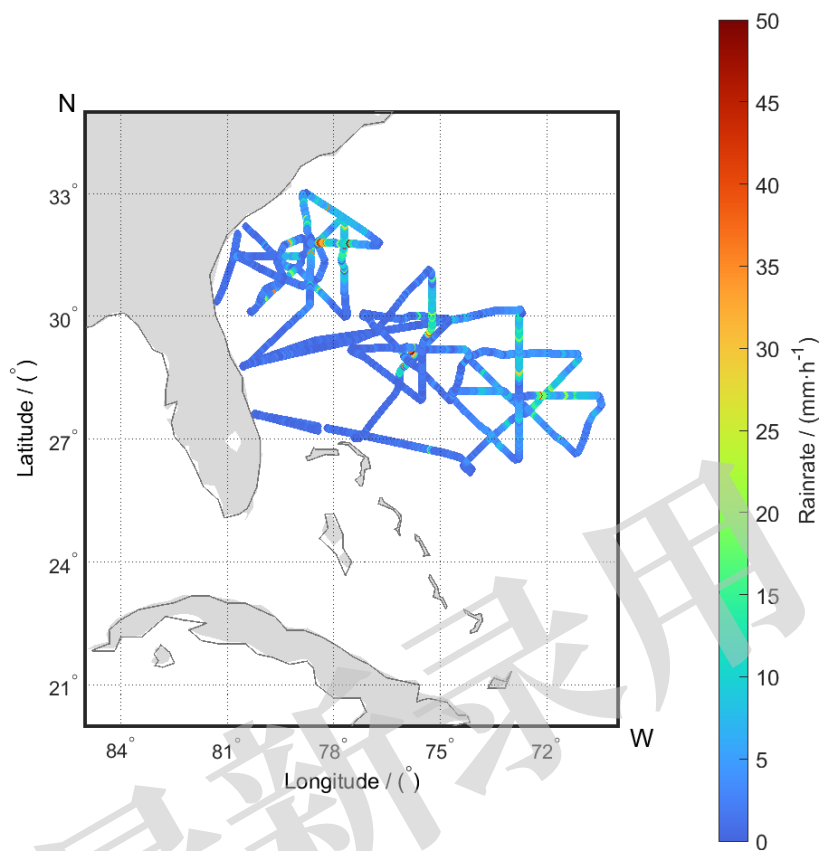


图 8 使用的部分 SFMR 探测航迹及对应降雨率反演结果

Figure. 8 SFMR flight tracks used for validation and the corresponding retrieved rain rates

表 5 给出了各次台风过程的降雨率反演的误差统计结果，包括均方根误差（RMSE）、相关系数、样本数量以及当日对应的最大风速。

表 5 海面降雨率反演误差统计

Table.5 Statistical evaluation of sea surface rain rate retrieval errors

台风名称及时间	RMSE / (mm·h ⁻¹)	相关系数	样本数	最大风速 (m·s ⁻¹)
Arthur (20140703)	2.97	0.952	20969	47.64
Danny (20150823)	1.66	0.713	13166	41.81

Kate (20151110)	2.41	0.924	18335	36.39
Maria (20170924)	2.57	0.909	22786	59.06
Lane (20180820)	2.55	0.958	20184	63.12
Lorenzo (20190929)	1.92	0.943	24933	48.03
Larry (20210907)	3.04	0.970	21902	38.66
Idalia (20230910)	2.75	0.949	24146	53.71
总计	2.54	0.915	166421	—

从整体结果来看，本研究的反演方法表现出了较高的精度与稳定性。在所有 166421 个样本中，反演结果与实测数据的 RMSE 为 $2.54 \text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ ，相关系数为 0.915。各台风案例的 RMSE 均控制在 $3.1 \text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 以内，且相关系数均较高，表明该反演方法具有较高的反演精度和适用性。但台风 Danny 反演结果的相关系数仅为 0.713，显著低于其他案例。为进一步分析原因，本文对 TY20150823 过程中的降雨率样本分布进行了统计。如图 9 所示，该台风过程中的降雨样本主要集中在无雨及小雨区间，其中无雨与小雨样本占比超过 96%，而中强度降雨样本占比不足 4%。因此，由于降雨缺乏明显的强度梯度变化，数据整体方差较小，导致反演结果的相关系数有所降低。

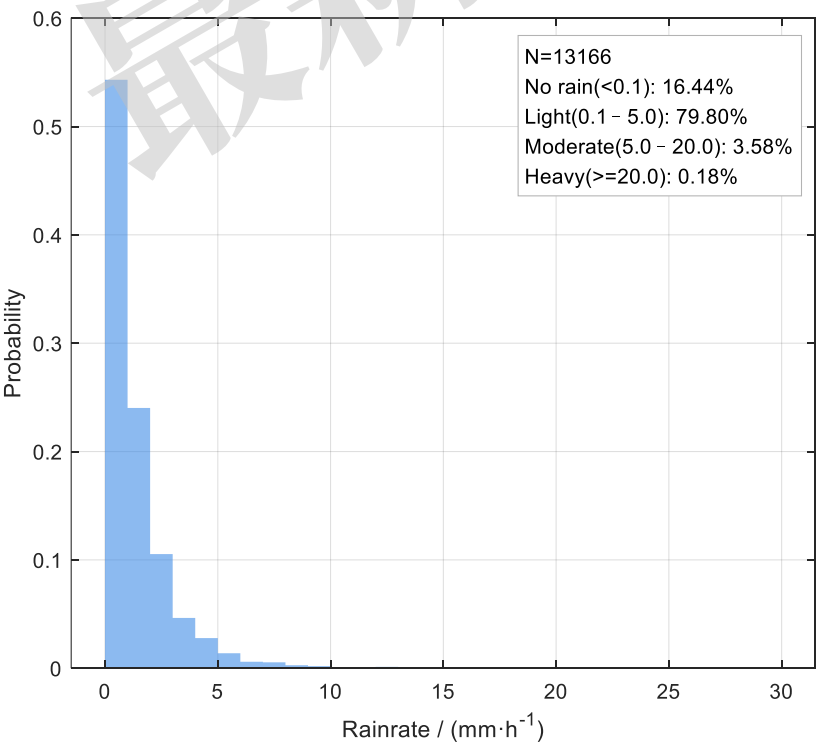


图 9 台风 Danny 期间 SFMR 观测降雨率样本分布直方图

Figure 9. Histogram of SFMR-observed rain rate samples during Typhoon Danny

4 结论

在热带气旋监测与研究中，对高分辨率海面风速、风向与降雨等参数的应用需求不断增强。本文面向机载双频段微波辐射计 CXMR 的台风降雨反演应用，利用 SFMR 台风飞行观测数据构建了与风速和频率相关的过发射率修正模型，在很大程度上解决了 FASTEM-5 发射率模型中的高估问题，并完善大气辐射传输计算中的背景温度、湿度、液水和降水等参数引起吸收贡献。

在中高风速条件 ($U \geq 20 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$) 下，修正后 FASTEM-5 模型与 SFMR 观测发射率之间的平均偏差由 0.0656 降低至约 0.007，RMSE 由 0.0824 降至 0.0124。这表明修正模型能够有效抑制 FASTEM-5 在强风条件下的过发射率问题。利用修正后的模型模拟的亮温与观测亮温表现出良好的线性相关性。分析结果表明：修正后模型各频率通道亮温平均偏差 $-1.6 \sim -2.1 \text{ K}$ ，标准差 $1.6 \sim 1.9 \text{ K}$ ，相比未修正模型的平均偏差约为 $5.8 \sim 7.7 \text{ K}$ 、标准差接近 7 K ，显著提升了模拟亮温的准确性。

文中利用 2014~2023 年多个热带气旋过程中的 SFMR 飞行观测资料，采用最小二乘法开展海面降雨率反演与验证。根据 166421 个样本的统计结果，反演结果与实测数据之间的 RMSE 为 $2.54 \text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ ，相关系数为 0.915，这表明反演方法在台风环境下具有较好的精度和稳定性，为后续机载微波辐射计在降雨反演中的应用提供了方法支撑。

未来研究将进一步结合机载 CXMR 高分辨率观测数据，开展海面风场、降雨及海表温度等参数的反演研究，以进一步提升机载微波辐射计在热带气旋监测与研究中的综合应用能力。

致谢 感谢 NOAA 提供的 SFMR 数据支持了本文的研究。

参考文献

- [1] NEGRI A J, BURKARDT N, GOLDEN J H, *et al.* The hurricane-flood-landslide continuum[J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2005, **86**(9): 1241-1247
- [2] FAN X T, ZHAO D J, LI Y, *et al.* Exploring synoptic patterns contributing to extreme rainfall from landfalling tropical cyclones in China[J]. *Weather and Climate Extremes*, 2025, **48**: 100768
- [3] ZHONG Junjie, WANG Zhixiong, ZOU Juhong, *et al.* Comparisons of SFMR and satellite microwave remote sensed sea surface wind speed in hurricane weather[J]. *Chinese Journal of Space Science*, 2023, **43**(6): 1100-1110 (钟俊杰, 王志雄, 邹巨洪, 等. 飓风天气下机载 SFMR 与星载微波遥感海面风速的对比分析[J]. *空间科学学报*, 2023, **43**(6): 1100-1110)
- [4] GAO T, ZOU L W, CAO F Q, *et al.* Impacts of tropical cyclones on summertime short-duration precipitation extremes over the middle-lower reaches of the Yangtze River valley[J]. *Atmospheric Research*, 2023, **282**: 106520
- [5] RAZIN M N, SLOCUM C J, KNAFF J A, *et al.* Tropical cyclone precipitation, infrared, microwave, and environmental dataset (TC PRIMED)[J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2023, **104**(11): E1980-E1998
- [6] YANG Yunfan, HAN Wei, SUN Haofei, *et al.* Reconstruction of 3D DPR observations using GMI radiances[J]. *Geophysical Research Letters*, 2024, **51**(5): e2023GL106846
- [7] PFREUNDSCHUH S, GUILLOTEAU C, BROWN P J, *et al.* GPROF V7 and beyond: assessment of current and potential future versions of the GPROF passive microwave precipitation retrievals against ground radar measurements over the continental US and the Pacific Ocean[J]. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2024, **17**(2): 515-538
- [8] LIU K W, HE J Y, CHEN H N. Precipitation retrieval from fengyun-3D microwave humidity and temperature sounder data using machine learning[J]. *Remote Sensing*, 2022, **14**(4): 848
- [9] HARRINGTON R F. The Development of A Stepped Frequency Microwave Radiometer and Its Application to Remote Sensing of the Earth[D]. Norfolk: Old Dominion University, 1980
- [10] JONES W L, BLACK P G, DELNORE V E, *et al.* Airborne microwave remote-sensing measurements of Hurricane Allen[J]. *Science*, 1981, **214**(4518): 274-280
- [11] BLACK P G, SWIFT C L. Airborne stepped frequency microwave radiometer measurements of rainfall rate and surface wind speed in hurricanes[C]//Proceedings of the 22nd Conference on Radar Meteorology. Zurich: American Meteorological Society, 1984: 433-438
- [12] OLSEN R, ROGERS D, HODGE D. The aR^b relation in the calculation of rain attenuation[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 1978, **26**(2):

318-329

- [13] KLOTZ B W, UHLHORN E W. Improved stepped frequency microwave radiometer tropical cyclone surface winds in heavy precipitation[J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2014, **31**(11): 2392-2408
- [14] SANCHEZ J V, SAPP J W, JELENAK Z, *et al.* Improving retrievals by the stepped frequency microwave radiometer in midlatitude winter storms[J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2025, **42**(7): 815-826
- [15] WANG Zhenzhan, DING Jia, LU Hao, *et al.* Design of airborne full polarization microwave radiometer system and extraction method of sea surface brightness temperature[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2023, **51**(2): 275-285 (王振占, 丁甲, 陆浩, 等. 机载全极化微波辐射计系统设计与海面亮温的提取方法[J]. 电子学报, 2023, **51**(2): 275-285)
- [16] UHLHORN E W, BLACK P G, FRANKLIN J L, *et al.* Hurricane surface wind measurements from an operational stepped frequency microwave radiometer[J]. *Monthly Weather Review*, 2007, **135**(9): 3070-3085
- [17] 丁甲. 全极化微波辐射计全链路信号传递模型及其应用研究[D]. 北京: 中国科学院国家空间科学中心, 2024
- [18] JORGENSEN D P, WILLIS P T. A Z-R relationship for hurricanes[J]. *Journal of Applied Meteorology*, 1982, **21**(3): 356-366
- [19] LIEBE H J. MPM—An atmospheric millimeter-wave propagation model[J]. *International Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 1989, **10**(6): 631-650
- [20] WENTZ F J. A two-scale scattering model for foam-free sea microwave brightness temperatures[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1975, **80**(24): 3441-3446
- [21] WANG Zhenzhan. Sea Surface Wind Vector Measured by Polarimetric Microwave Radiometer—Principle, System Design, and Simulation Study[D]. Beijing: Center for Space Science and Applied Research, Chinese Academy of Sciences, 2005 (王振占. 海面风场全极化微波辐射测量——原理、系统设计与模拟研究[D]. 北京: 中国科学院空间科学与应用研究中心, 2005)
- [22] MEISSNER T, WENTZ F J. The emissivity of the ocean surface between 6 and 90 GHz over a large range of wind speeds and earth incidence angles[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2012, **50**(8): 3004-3026
- [23] SAPP J W, ALSWEISS S O, JELENAK Z, *et al.* Stepped frequency microwave radiometer wind-speed retrieval improvements[J]. *Remote Sensing*, 2019, **11**(3): 214

闫俊衡 (第一作者): 闫俊衡, 男, 2000 年 11 月出生于山东省烟台市, 现为中国科学院国家空间科学中心硕士研究生, 主要研究方向为微波遥感信息处理、定标及应用研究等。

E—mail: yanjunheng23@mailsucas.ac.cn

王振占(通信作者): 王振占, 男, 1969 年生, 现为中国科学院国家空间科学中心研究员

博士生导师，主要研究方向为微波遥感定标、定量反演与应用技术等。

E—mail: wangzhenzhan@mirslab.cn

