

# 风云三号气象卫星风场测量雷达在轨性能初步评价

商建<sup>1,2,3</sup>, 窦芳丽<sup>1,2,3</sup>, 刘丽霞<sup>4</sup>, 袁梅<sup>1,2,3</sup>, 尹红刚<sup>1,2,3\*</sup>, 孙凌<sup>1,2,3</sup>, 胡秀清<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,中国;
2. 许健民气象卫星创新中心,北京 100081,中国;
3. 中国气象局中国遥感卫星辐射测量和定标重点开放实验室,北京 100081,中国;
4. 中国航天科技集团公司中国空间技术研究院西安分院,西安 710000,中国

**摘要:** 风场测量雷达是我国风云系列气象卫星的第一部主动遥感仪器,是国际上第一部星载双频双极化散射计,采用先进的扇形波束圆锥扫描体制,通过地球系统的后向散射测量获取全球海面风场、土壤湿度和海冰覆盖等地球物理参数。本文介绍了风场测量雷达的测量原理、信号特性与主要性能指标,给出了风场测量雷达数据预处理方法;根据卫星发射后的测试数据,初步分析了仪器在轨工作性能。分析结果表明,风场测量雷达在轨状态良好,性能指标达到预期,为其数据的遥感应用、同化应用与天气预报奠定了基础。

**关键词:** 风场测量雷达, 散射计, 仪器性能, 在轨测试, 初步评价, 辐射分辨率, 数据预处理, 风云三号, 气象卫星

中图分类号: P4

引用格式: 商建, 窦芳丽, 刘丽霞, 袁梅, 尹红刚, 孙凌, 胡秀清. XXXX. 风云三号气象卫星风场测量雷达在轨性能初步评价. 遥感学报, XX(XX): 1-13

SHANG Jian, DOU Fangli, LIU Lixia, YUAN Mei, YIN Honggang, SUN Ling, HU Xiuqing. XXXX. Preliminary evaluation of in-orbit performance for FY-3E Wind Radar. National Remote Sensing Bulletin, DOI:10.11834/jrs.20242677]

## 1 引言

星载散射计通过地球系统的后向散射测量获取全球海洋表面包括风速和风向的风场信息等地球物理参数,是开展气象与海洋参数测量的重要星载遥感仪器。目前国内外已有多个用于海面风场测量的星载微波散射计成功在轨应用,如美国的 QuikSCAT/Seawinds (Lin, 1999)、欧洲的 Metop/ASCAT (Scarville, 2009)、中国的 HY-2 SCAT (Wang, 2013; Mu, 2014) 以及中法联合研制的 CFOSAT SCAT (Dong, 2020) 等。国内外典型散射计的主要性能指标见表1。

2021年发射了风云系列极轨气象卫星的第五颗星——风云三号E星(Fengyun-3E, FY-3E),

这是国际上第一颗民用晨昏轨道业务气象卫星(Zhang, 2021)。FY-3E卫星的主载荷之一风场测量雷达(Wind Radar, WindRAD)是一部微波散射计,这是我国气象卫星首次实现主动遥感探测,国际上首次实现星载双频(C波段、Ku波段)双极化(HH极化、VV极化)全球海面风场主动探测。风场测量雷达的主要工作目标是对全球海面风矢量(包括风速和风向)进行全天候、全天时、高精度、高分辨率测量。风场测量雷达通过对海面后向散射系数的测量,间接完成对海面风场的测量功能,为同化应用研究和天气预报提供重要数据。此外风场测量雷达也可对土壤湿度、海冰等地物特性进行测量(Naeimi, 2009; Remund, 2013)。

收稿日期: 2022-12-22; 预印本: 2023-05-05

基金项目: 国家重点研发计划资助(2021YFB3900400、2021YFB3900402); 中国气象局青年创新团队资助(CMA20240N10); 风云卫星应用先行计划资助(FY-APP-2021.0510); 国家自然科学基金项目资助(No.U2242212)

第一作者简介: 商建, 正高级工程师, 研究方向为星载微波遥感。E-mail: shangjian@cma.gov.cn

通信作者简介: 尹红刚, 正高级工程师, 研究方向为星载微波遥感。E-mail: yinhg@cma.gov.cn

表 1 典型散射计的主要性能指标

Table 1 Main parameters of typical scatterometers

卫星/ 散射计	QuikSCAT/ SeaWinds	Metop/ ASCAT	HY-2/ SCAT	CFOSAT/ SCAT	FY-3/ WindRAD
波段	Ku	C	Ku 波段	Ku	C、Ku
极化	VV、HH	VV	VV、HH	VV、HH	VV、HH
扫描模式	笔形波束 圆锥扫描	固定扇形波束	笔形波束 圆锥扫描	扇形波束圆锥扫描	扇形波束圆锥扫描
幅宽	1600km	550km×2	1780km	1000km	1300km
分辨率	25km	25km	50/25km	25/12.5km	20/10km
风场探测精度	2m/s 或 10%; 20°	2m/s 或 10%; 20°	2m/s 或 10%; 20°	2m/s; 20°	2m/s; 20°

本文在介绍 FY-3E 风场测量雷达的工作特点、测量原理、信号特性与主要性能指标的基础上，详细给出在风云卫星地面业务系统中设计的风场测量雷达数据预处理方法与数据分级情况。根据 FY-3E 卫星发射后的在轨测试数据，初步分析风场测量雷达重要遥测参数、空间分辨率、观测幅宽、辐射分辨率、内定标精度等在轨工作性能。

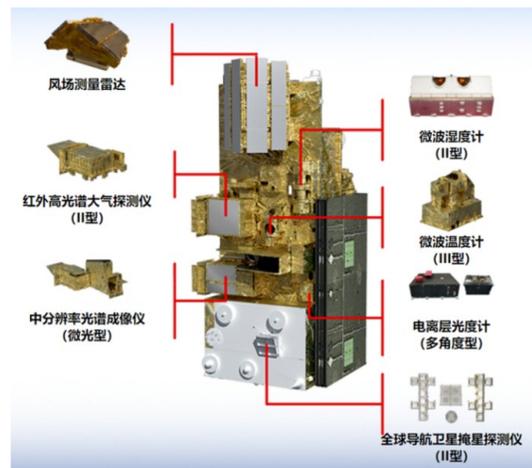
## 2 风场测量雷达仪器特点

### 2.1 风场测量雷达工作特点

风场测量雷达安装在 FY-3E 卫星的头部，采用先进的扇形波束圆锥扫描体制，包含天线的探测头部 360° 无间断旋转。安装位置与仪器观测几何如图 1 所示。C 和 Ku 双波段同时工作，每个波段包含水平和垂直两种极化测量方式，同频段的两种极化测量分时间间隔进行，不同频段之间的测量相互独立。天线采用波导缝隙阵形式，收发通道采用超外差式二级变频方式，其不稳定性通过内定标回路消除。

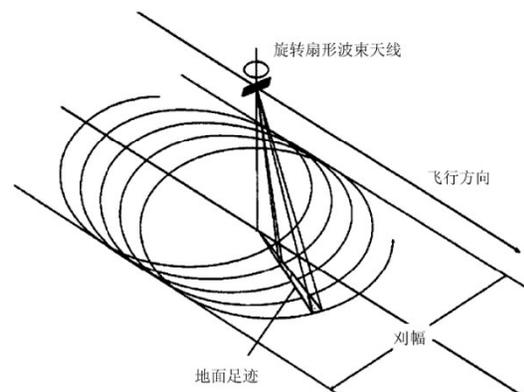
风场测量雷达的工作模式包括：双波段工作模式、测试工作模式和待机工作模式。其中，双波段工作模式为主要的在轨工作模式，包括回波测量模式和外定标子模式，如图 2 所示。在双波段工作模式下，雷达扫描一圈时共包括海面观测、内定标、噪声测量三类观测，如图 3 所示。

海面观测为常规观测模式，雷达天线向海面发射脉冲，接收海面后向散射回到天线的回波。在每圈扫描中，开展两次内定标测量和两次噪声测量。外定标则需要通过上注遥控指令完成模式切换。



(a) 风场测量雷达在卫星上的安装位置

(a) Mounting position of WindRAD onboard FY-3E



(b) 风场测量雷达观测几何

(b) Observation geometry

图 1 风场测量雷达安装位置与观测几何示意图

Fig.1 WindRAD installation and observation geometry diagram

### 2.2 风场测量雷达测量原理

风场测量雷达的首要目标为观测全球海面风场。海面风场的测量原理为：海面风场产生的海

面毛细波能够对厘米波长的微波产生布拉格 (Bragg) 散射。风生毛细波的幅度随着风速的增大而增大，从而 Bragg 散射的强度也增大。由于风生毛细波造成海面小尺度斜率，即与 Bragg 散射有关的散射单元的方向与风的方向有关，所以后向散射的强度也与风的方向有关。风场测量雷达通过对海面后向散射系数的测量，间接完成对海面风

场的测量功能，这一过程分为两步实现：(1) 风场测量雷达从空间不同方位测量海面某单元雷达后向散射系数  $\sigma^0$ ；(2) 地面系统根据风场测量雷达测得的  $\sigma^0$  与海面风速和风向之间的关系，计算得出海面风场矢量，为同化应用研究和天气预报等提供重要数据。

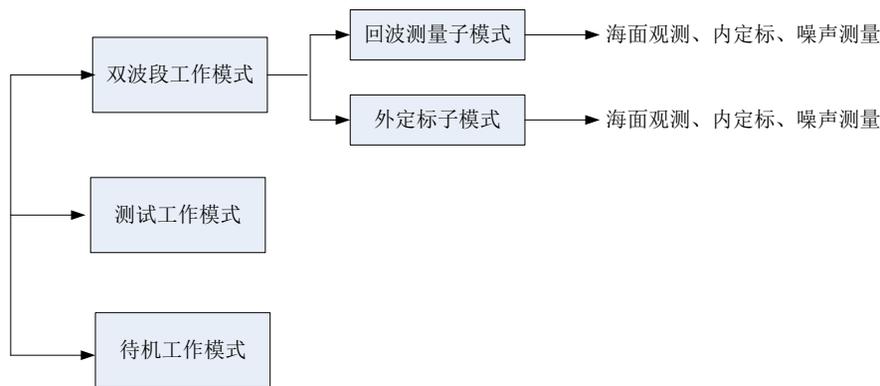


图2 风场测量雷达在轨工作模式  
Fig.2 WindRAD in-orbit operational mode

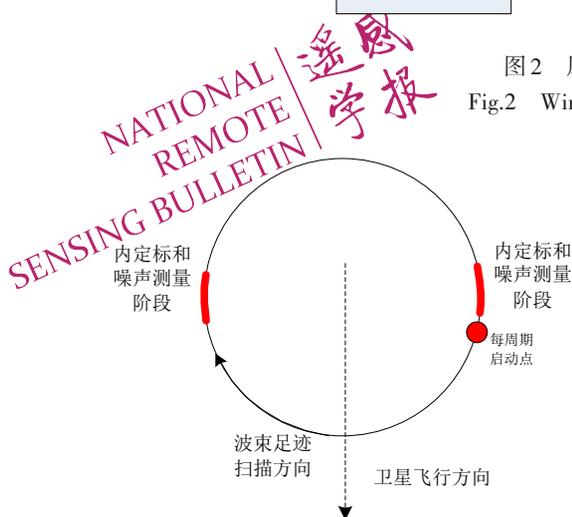


图3 测量周期示意图  
Fig.3 Scan period demonstration

在海面风场反演过程中，需要综合使用多个入射角和多个方位角下的观测数据。风场测量雷达所采用的先进的扇形波束圆锥扫描体制，可提供更多的独立样本数和更高的测量精度；结合双频率、双极化观测，可显著提高海面风场反演精度。

### 2.3 风场测量雷达的信号特性及性能指标

风场测量雷达采用脉冲雷达体制，发射信号为线性调频脉冲信号，接收端进行解线性调频的脉冲压缩处理。地面处理系统可以根据对雷达的空间分辨率需求及信号能量进行二次组合平均来

使用。风场测量雷达的主要性能指标见表2。

注1：在空间分辨率25km\*25km下考核；风速5m/s时对应的海面归一化后向散射截面分别为-24.2dB (C波段)和-25.5dB (Ku波段)。

表2 风场测量雷达主要性能指标

Table 2 The main parameters of WindRAD

参数	指标	
工作中心频率	5.4 GHz (C波段)	13.256 GHz (Ku波段)
极化方式	VV、HH	VV、HH
空间分辨率	20/10km	20/10km
观测刈幅	> 1200km	
扫描方式	360°圆锥扫描	
最小可检测风速	3 m/s(-26.2dB)	3 m/s(-30.8dB)
辐射分辨率 <sup>[注1]</sup>	0.5dB(刈幅远端,风速≥5 m/s) 1.0dB(刈幅远端,风速=3 m/s)	
辐射精度(天线增益精度、内定标精度,峰峰值)	≤ 0.6dB	

### 3 风场测量雷达数据预处理

风场测量雷达一级数据产品(L1)是基于卫星观测的原始数据(L0)以及预处理静态参数,经过解码、质量检查、拆分分流、地理定位、辐射定标、后向散射系数计算、重采样等处理过程之后生成的后向散射系数数据,提供给用户进行海面风场等地球物理参数反演和同化等应用。本节给出风场测量雷达数据预处理方法与数据分级情况。

#### 3.1 风场测量雷达数据预处理流程设计

风场测量雷达数据预处理中的实时链路处理流程设计为三步:

(1) L1A处理:完成风场测量雷达预处理辅助数据和L0数据等的汇集,对输入数据进行质量检验并输出质量检验数据集,完成输入数据的拆分和分配形成不同数据流,生成的数据记为L1A

数据。

(2) L1B处理:分离地表观测和内定标观测数据,完成处理准备。利用观测时刻的卫星位置、姿态及仪器扫描参数,根据地表样本采样点的星地斜距,确定遥感数据中每个采样点的地理定位信息。利用内定标观测数据,完成辐射定标。利用辐射定标结果,校正信号通道和噪声通道数据,计算系统噪声功率能量,计算回波的相对功率,并对处理过程进行质量判断和标识,生成的数据记为L1B数据。这一步骤的详细处理过程见3.2节。

(3) L1C处理:根据回波功率完成地面归一化后向散射截面的计算,生成不同空间采样间隔的网格,对原始后向散射进行重采样和统计平均,生成的数据记为L1数据,为对外发布的一级数据产品。

风场测量雷达数据预处理流程如图4所示。

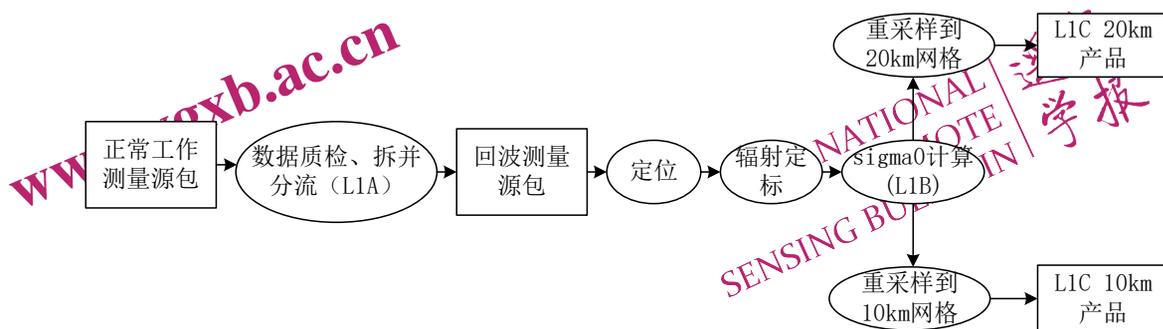


图4 风场测量雷达预处理流程

Fig.4 WindRAD data preprocessing diagram

### 3.2 风场测量雷达辐射定标

根据测量面目标的雷达方程，风场测量雷达测量地表的归一化雷达后向散射截面  $\sigma^0$  (RCS, Radar Cross Section) 可以表示为

$$\sigma^0 = \frac{(4\pi)^3}{\lambda^2} \frac{p_s}{\int G^2(\theta, \phi) dA} \frac{R^4}{\alpha^2 p_i L_i L_r L_a^2} \quad (1)$$

式中， $p_i$  是雷达发射机输出功率， $p_s$  是接收机输入功率， $L_i$  和  $L_r$  分别是发射链路和接收链路的损耗因子， $\alpha$  表示天线驻波引起的损耗因子， $\lambda$  是雷达波长， $G$  是天线增益方向图， $\int G^2(\theta, \phi) dA$  是天线照射因子， $R$  表示雷达到地表目标的距离， $L_a$  表示大气对雷达电磁波的衰减。雷达实际接收的信号中除了地表回波外还有系统噪声。对风场测量雷达而言，接收信号在信号处理器中分别通过两个带宽、增益都不相同的滤波器（即所谓的信号通道和噪声通道）进行检波，其中噪声通道在时域处理输出整个接收窗内接收信号的和，信号通道通过对整个接收窗内的时域信号进行快速傅立叶变换（Fast Fourier Transformer, FFT）处理得到频域检波信号  $E_n$  和  $E_{ei}$  分别为

$$\begin{aligned} E_n &= \frac{G_m P_s}{G_{s,AGC}} + N_n \\ E_{ei} &= \frac{G_{re} P_{si} H_i}{G_{s,AGC}} + N_{ei} \end{aligned} \quad (2)$$

式中， $G_m$  和  $G_{re}$  分别是噪声通道和信号通道的接收机增益， $N_n$  和  $N_{ei}$  分别是噪声通道的系统噪声和信号通道内在频点  $i$  处的系统噪声， $G_{s,AGC}$  是地表测量阶段接收机增益的自动控制值， $H_i$  是信号通道内在频点  $i$  处的幅度加权特性。定义

$$\begin{aligned} \beta &= \frac{G_m}{G_{re}} \\ \gamma &= \frac{1}{\beta} \frac{N_n}{N_{ei}} = \frac{B_n}{B_e} \end{aligned} \quad (3)$$

式中， $B_n$  和  $B_e$  分别是噪声通道和信号通道的带宽。于是，可以得到信号通道的总地表回波为

$$E_s = \frac{G_{re} P_s}{G_{s,AGC}} = \frac{E_n - \gamma \beta \tilde{E}_e}{\beta - \gamma \beta} \quad (4)$$

这样公式 (1) 可以改写为

$$\begin{aligned} \sigma^0 &= \frac{(4\pi)^3}{\lambda^2} \frac{G_{s,AGC}}{\int G^2(\theta, \phi) dA} \frac{E_s}{\alpha^2 L_i L_r L_a^2} R^4 \\ &= \frac{(4\pi)^3}{\lambda^2} \frac{G_{s,AGC}}{\int G^2(\theta, \phi) dA} \frac{E_{e,cal}}{\alpha^2 L_i L_r L_a^2} R^4 \end{aligned} \quad (5)$$

式中， $G_{s,AGC}$  是内定标阶段接收机增益的自动控制值， $L_f$  是内定标链路的损耗因子， $E_{e,cal}$  是内定标阶段信号通道的总检波信号，上标  $\sim$  表示经过信号通道频谱形状校正后的结果。

由式 (5) 可见，为了准确估计地表 RCS，需要对雷达的多个参数进行精确测量，这些测量全部在发射前实验室完成，有的还需要在轨实时开展。

## 4 风场测量雷达在轨测试

FY-3E 卫星于 2021 年 7 月 5 日成功发射，7 月 9 日风场测量雷达开机运行，国家卫星气象中心联合卫星总体和仪器研制单位对风场测量雷达开展了在轨测试，在轨测试内容包括重点遥测参数、空间分辨率、观测幅宽、辐射分辨率、内定标精度、最小可检测风速等 16 项 50 余个参数。测试结果表明，风场测量雷达在轨运行状态良好，各项性能参数均符合探测需求，为开展全球海面风场反演与同化应用奠定了良好的基础。

### 4.1 遥测参数分析

从风场测量雷达遥感数据中与卫星遥测数据中提取风场测量雷达的重点遥测参数数据并进行相应转换，分析探测头部转动特性、内定标值、重点单机温度等遥测参数特征的稳定性。采用 2021 年 9 月 1 日-11 月 30 日三个月的风场测量雷达 C 波段、Ku 波段的遥测数据，对重点遥测特征参数进行测试。图 5 为三个月期间风场测量雷达探测头部实际转速的变化情况，可见转速非常稳定，仅进行工作模式切换等测试时导致遥测数据有异常。图 6 给出了三个月期间 Ku 波段和 C 波段内定标值的变化情况，蓝色为 Ku 波段，绿色为 C 波段；受卫星平台温度变化的影响，内定标值有缓慢变化，总体较为稳定，三个月期间的波动在 0.4dB 以内。内定标值存在的偶发跳变，经分析原因，多为单粒子事件的影响。图 7 给出了三个月期间遥感包中的重点单机温度遥测数据。C、Ku 波段中频接收机工作温度用于校准自动增益控制值，同时

监测接收机工作是否正常；C、Ku波段微波前端工作温度用于校准内定标回波功率链路插损，同时监测微波前端工作是否正常；电机温度用于监测电机工作是否正常；扫描机构扩热板温度用于

校准旋转关节插损，同时监测扫描机构工作是否正常。各重点单机的在轨温度非常稳定，均在正常温度范围内。

www.ygzb.ac.cn

NATIONAL REMOTE SENSING BULLETIN 遥感学报

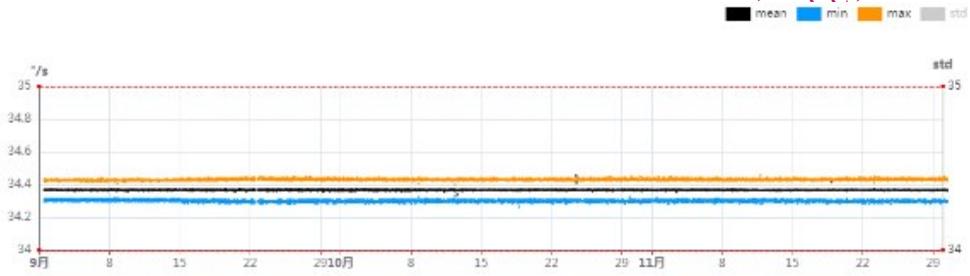


图5 风场测量雷达探测头部实际转速  
Fig.5 Actual rotation speed

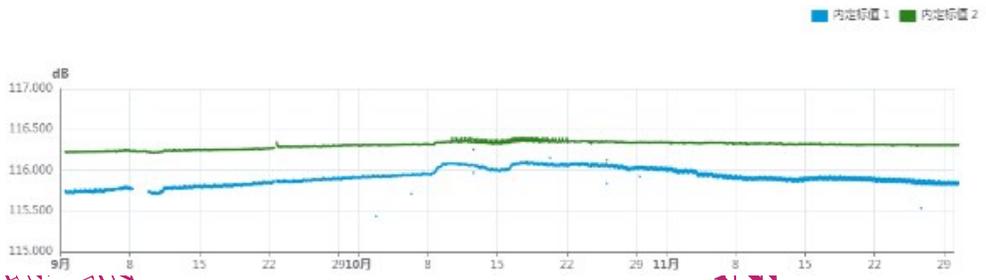


图6 Ku波段和C波段内定标值(蓝色为Ku波段,绿色为C波段)  
Fig.6 Internal calibration value of Ku and C bands

NAT RE... SENSING BULLETIN

.cn

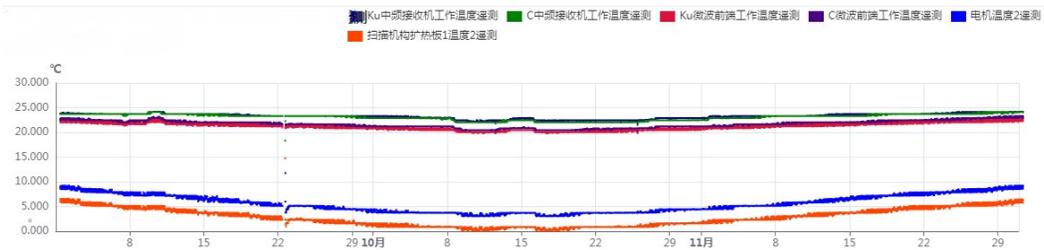


图7 重点单机温度遥测数据  
Fig.7 Temperature telemetry data of important components

4.2 空间分辨率分析

雷达的空间分辨率包括方位分辨率和距离分辨率两项。方位分辨率综合利用发射前测试结果和在轨数据计算得到，其中方位向天线波束宽度与视角采用发射前测试值，卫星高度为在轨实际值。

根据每个切片数据的斜距和方位向双程天线波束宽度，计算得到方位向分辨率；公式如下(6)所示，其中  $R_0$  为卫星到地面切片的距离，即观测斜距； $\beta$  为方位向双程天线波束宽度；

$$R_a = R_0 \cdot \beta \tag{6}$$

风场测量雷达距离分辨率由发射信号带宽、非相干积累的距离门个数及频率分辨率三者共同决定。

(1) 距离向空间分辨率(斜距分辨率)通过脉冲压缩实现，距离向空间分辨率与发射线性调频脉冲信号的带宽有关：

$$R_r = \frac{c}{2B} \tag{7}$$

其中， $R_r$  为距离分辨率， $c$  为光速， $B$  为发射线

性调频脉冲信号的带宽。

(2) 为降低下传码速率，雷达需要在星上对脉冲压缩获得的原始距离分辨率进行非相干积累，也影响距离向空间分辨率。非相干积累在频域进行。最终的距离分辨率由发射信号带宽、非相干积累的距离门个数及频率分辨率共同决定。

(3) 综合上述二者的测试结果，取二者中的较差者作为距离空间分辨率评价结果。

采用2021年9月1日风场测量雷达C波段、Ku波段一天的全球数据，对方位向分辨率进行测试的结果见图8。C波段HH、VV极化与Ku波段

HH、VV极化的方位向分辨率平均值分别为22.92、23.17、10.24、10.62km，标准差分别为0.17、0.18、0.07、0.08km。可见，C波段HH与VV极化的方位向分辨率优于25km，Ku波段HH与VV极化的方位向分辨率为10km左右。距离分辨率由发射信号带宽、非相干积累的距离门个数及频率分辨率三者共同决定，取带宽决定的距离向空间分辨率及非相干积累对应的距离向采样间隔二者中的较差作为距离空间分辨率评价结果，优于250m。空间分辨率评价结果见表3。

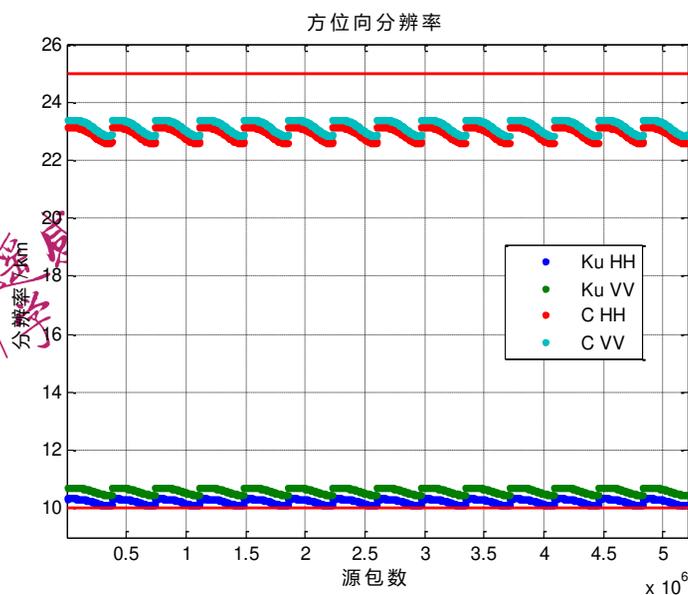


图8 方位向分辨率测试结果

Fig.8 Test results of azimuthal resolution

表3 空间分辨率测试结果

Table 3 Test results of spatial resolution

测试内容	测试结果
C空间分辨率 (方位×距离)	HH: 22.92km × 0.22km VV: 23.17km × 0.22km
Ku空间分辨率 (方位×距离)	HH: 10.24km × 0.25km VV: 10.62km × 0.25km

### 4.3 观测幅宽分析

风场测量雷达采用圆锥扫描体制，在一定轨道高度情况下，雷达观测幅宽由波束外侧入射角决定。采用两种思路对观测幅宽进行评价。

方法一基于网格点数和网格分辨率计算观测幅宽。提取风场测量雷达各通道20km网格的后向散射系数数据，判断后向散射系数是否为有效值；

根据有效网格数和网格分辨率，计算风场测量雷达的观测幅宽。

方法二利用实测的卫星轨道高度和发射前测试的视角、距离向双程天线波束宽度、地球半径，按照公式(8) - (11)计算观测幅宽。

$$W = 2R_g \theta \quad (8)$$

$$R_g \approx R_e \times \sin \theta \quad (9)$$

$$\gamma = \theta - (\alpha + \text{Angle\_elevation}/2) \quad (10)$$

$$\theta = \arcsin \left[ \left( 1 + \frac{H}{R_e} \right) \sin \alpha \right] \quad (11)$$

式中， $W$ 为幅宽， $R_g$ 为半幅宽， $R_e$ 为地球半径， $H$ 为轨道高度， $\theta$ 为入射角， $\alpha$ 为视角， $\text{Angle\_elevation}$ 为雷达俯仰向波束宽度。采用

2021年9月1日风场测量雷达C波段、Ku波段一天的全球数据，观测幅宽的测试结果见图9，评价结

果见表4。C波段HH与VV极化、Ku波段HH与VV极化的观测幅宽均优于1200km。

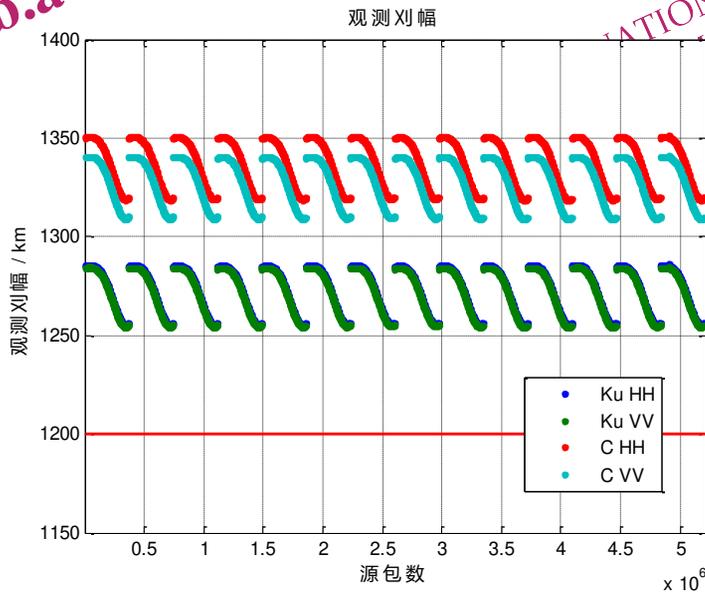


图9 观测幅宽测试结果

Fig.9 Test results of swath

表4 观测幅宽测试结果

Table 4 Test results of swath

测试内容	方法一测试结果	方法二测试结果
C观测刈幅	HH:1400km	HH:1337km
	VV:1400km	VV:1327km
Ku观测刈幅	HH:1400km	HH:1273km
	VV:1400km	VV:1272km

#### 4.4 辐射分辨率分析

辐射分辨率采用后向散射系数测量值的相对标准差来表征，主要受回波信号衰落噪声和接收机热噪声的影响。在对接收机热噪声多次测量的情况下，可用回波功率归一化标准偏差 $K_p$ 表示； $K_p$ 与辐射分辨率 $S$ 之间的转换关系为：

$$S = 10^3 \log_{10}(1 + K_p) \quad (12)$$

式中， $K_p$ 为原始值， $S$ 为dB值。根据由独立采样数和信噪比(SNR)计算得到的每个视数的 $K_p$ ，选取海洋上特定后向散射系数下的或对应风速下的 $K_p$ 值进行分析。

选取风场测量雷达位于海洋上的数据；对预报场数据开展时空匹配后，提取风速大于等于5m/s和介于3~5m/s的位置点；对风场测量雷达Ku波段、C波段数据中分别对应于风速大于等于5m/s和介于3~5m/s的数据分别计算其 $K_p$ 值进行评价。

采用2021年10月13日风场测量雷达C波段、Ku波段一天的全球数据和ERA5分析场数据对辐射分辨率进行测试；ERA5分析场是ECMWF（欧洲中期天气预报中心）对1950年1月至今全球气候的第五代大气再分析数据集。图10为ERA5分析场中筛选出来不同情况下的匹配点风速情况。为帮助用户区分 $\sigma_0$ 数据的质量，在风场测量雷达L1数据中设计了质量码数据集，对后向散射系数按照数据质量从高到低划分为0、1、2三级，推荐使用质量码为0的高质量数据进行海面风场等物理参数反演；在图11和图12中分别给出C波段与Ku波段高质量数据的辐射分辨率直方图分布，图中红线代表设计要求，在5m/s以上风速条件下，C/Ku波段的辐射分辨率目标为优于0.5dB，在5m/s以下风速条件下，C/Ku波段的辐射分辨率目标为优于1.0dB。C波段HH与VV极化的辐射分辨率分别优于0.35dB、0.34dB，Ku波段HH与VV极化的辐射分辨率分别优于0.35dB、0.34dB，均满足仪器使用要求。

#### 4.5 内定标精度分析

平均一天的辐射精度计算结果，取平均值代表在轨测试结果。内定标精度综合利用发射前测

试结果和在轨数据进行计算分析。内定标精度影响因素主要包括：雷达发射前端插损测量误差、雷达接收前端插损测量误差、内定标回路耦合度测量误差、雷达天线（探测头部）发射功率传输比即天线驻波测量误差、内定标时接收机自动增

益控制值误差、回波测量时接收机自动增益控制值误差、旋转关节360度扫描插损波动量、内定标信号精度（内定标时泄漏信号对内定标信号干扰引起的误差）。内定标精度计算公式为：

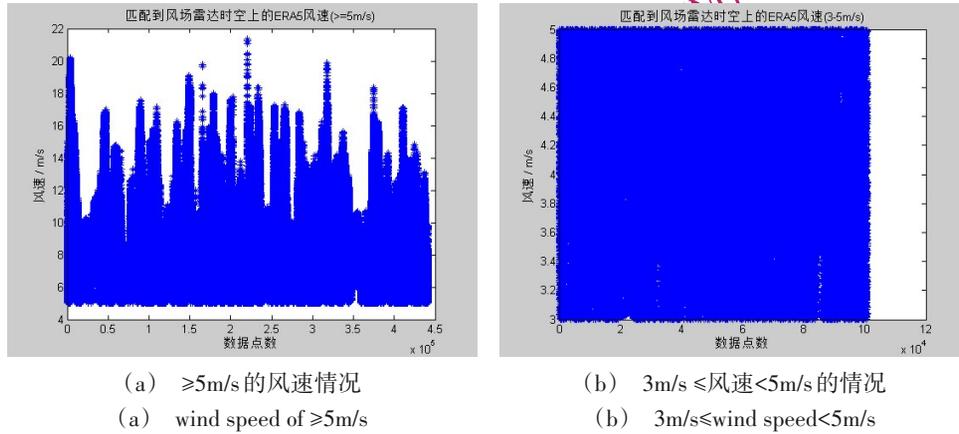


图 10 ERA5 分析场中筛选出来不同情况下的风速情况  
Fig.10 Wind speed under different conditions from ERA5

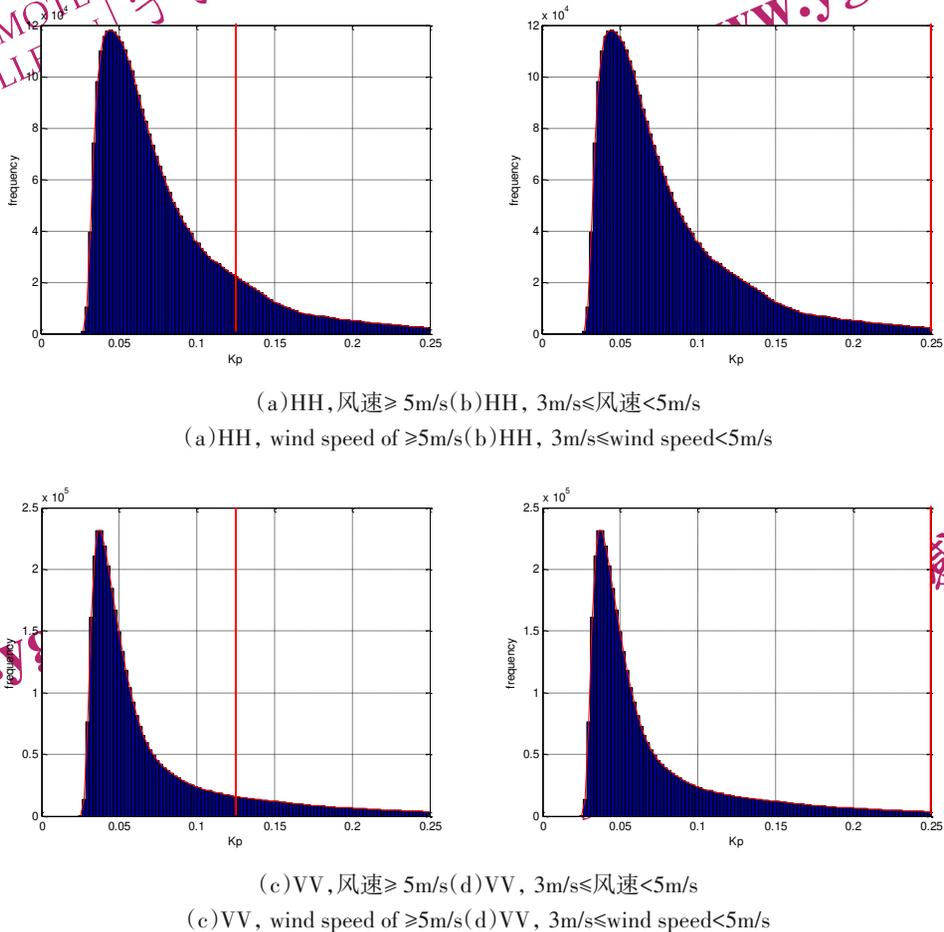
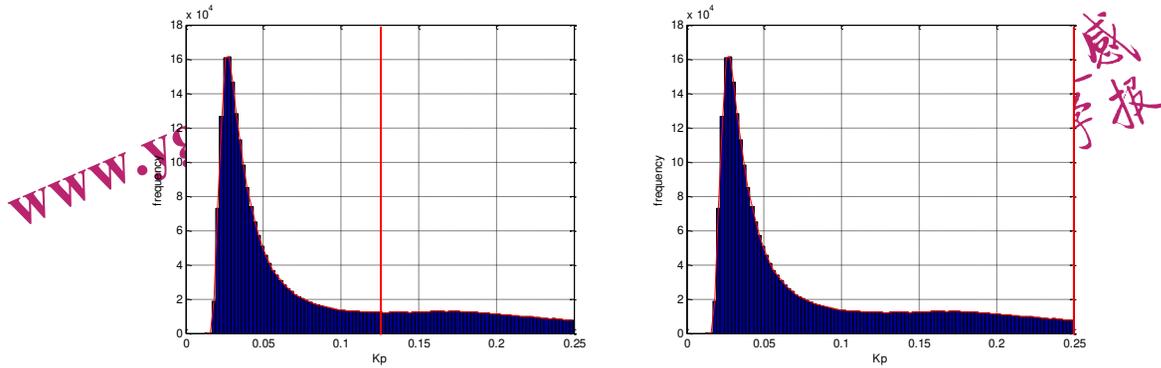
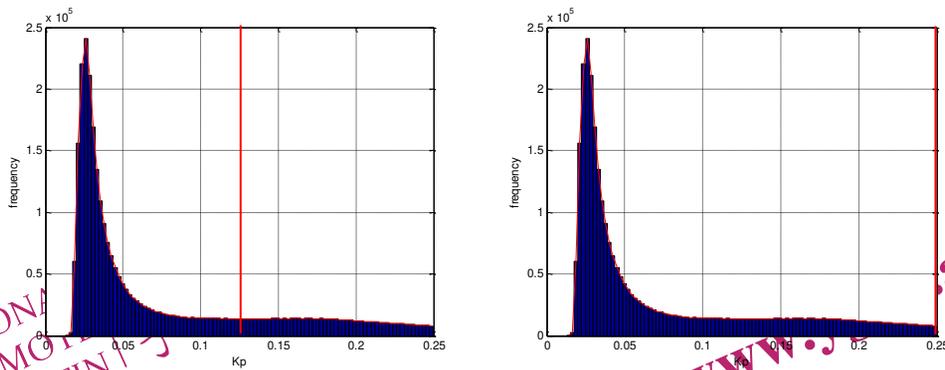


图 11 辐射分辨率直方图分布(C band)

Fig.11 Histogram distribution of radiometric resolution (C band)



(a) HH, 风速  $\geq 5$  m/s (b) HH,  $3$  m/s  $\leq$  风速  $< 5$  m/s  
 (a) HH, wind speed of  $\geq 5$  m/s (b) HH,  $3$  m/s  $\leq$  wind speed  $< 5$  m/s



(c) VV, 风速  $\geq 5$  m/s (d) VV,  $3$  m/s  $\leq$  风速  $< 5$  m/s  
 (c) VV, wind speed of  $\geq 5$  m/s (d) VV,  $3$  m/s  $\leq$  wind speed  $< 5$  m/s

图 12 辐射分辨率直方图分布 (Ku band)

Fig.12 Histogram distribution of radiometric resolution (Ku band)

$$K_{pc-1} = \Delta L_{wt} + \Delta L_{wr} + \Delta L_f + \Delta \alpha + \Delta G_c + \Delta G_{s,AGC} + \Delta L_{rotary} + \Delta P_c \quad (13)$$

其中,  $\Delta L_{wt}$  为发射前端插损测量误差,  $\Delta L_{wr}$  为接收前端插损测量误差,  $\Delta L_f$  为定标回路耦合度测量误差,  $\Delta \alpha$  为天线 (探测头部) 驻波测量误差,  $\Delta G_c$  为内定标时接收机自动增益控制值误差,  $\Delta G_{s,AGC}$  为回波测量时接收机自动增益控制值误差,  $\Delta L_{rotary}$  为旋转关节 360 度扫描插损波动量。  $\Delta L_{wt}$ 、 $\Delta L_{wr}$ 、 $\Delta \alpha$ 、 $\Delta L_f$  为测试仪器的测量精度,  $\Delta G_c$ 、 $\Delta G_{s,AGC}$  在测试时进行了长时间平均而消除了频谱仪底噪的影响, 因此也取为仪器测量精度,  $\Delta L_{rotary}$  分别取 C 和 Ku 波段的实际测量值。计算中上式各项使用  $3\sigma$  值, 即 3 倍标准差。基于在轨实时获取的遥感数据包中的内定标数据, 对一段时间内 (与业务上对内定标数据的使用方式保持一致, 与信号的波动程度有关) 的内定标值取平均, 计算  $3\sigma$ , 作为内定标时泄漏信号对内定标信号干扰引起的误差  $\Delta P_c$ , 即雷达内定标信号精度。平均一天的内定标

精度计算结果, 取平均值代表该天的内定标精度评价结果。采用 2021 年 10 月 13 日风场测量雷达 C 波段、Ku 波段一天的全球数据, 对内定标精度进行测试。图 13 和图 14 分别展示了 C 波段和 Ku 波段一天的内定标值变化情况, 可以看到, 每组内定标观测的第 1 个值为大值, 因还未进入稳定状态, 不能代表实际情况, 评估时去掉此类数据。此外, 还可根据业务上实际使用内定标数据的方式, 计算内定标信号精度, 估算内定标精度。表 5 中给出了 C 波段与 Ku 波段内定标精度的具体测试结果, 两种评价方法的结果都表明, C 波段 HH 与 VV 极化、Ku 波段 HH 与 VV 极化的内定标精度均优于 0.3dB。

#### 4.6 后向散射系数 $\sigma^0$ 测量结果

根据第 3 节中给出的风场测量雷达数据预处理

算法，对风场测量雷达L0数据进行几何定位与辐射定标等处理后，在业务系统中稳定生成L1数据产品；L1产品规格为半轨，目的是为了提提高观测数据的时效性。风场测量雷达L1数据产品提供10km和20km两种网格分辨率的全球后向散射系

数，图15为风场测量雷达全球陆海表后向散射产品示例，数据时间为2021年12月12日，所展示的为10km分辨率网格产品。后续的反演工作，如海面风场反演、陆地土壤水分反演、极地海冰反演等均在此数据基础上展开。

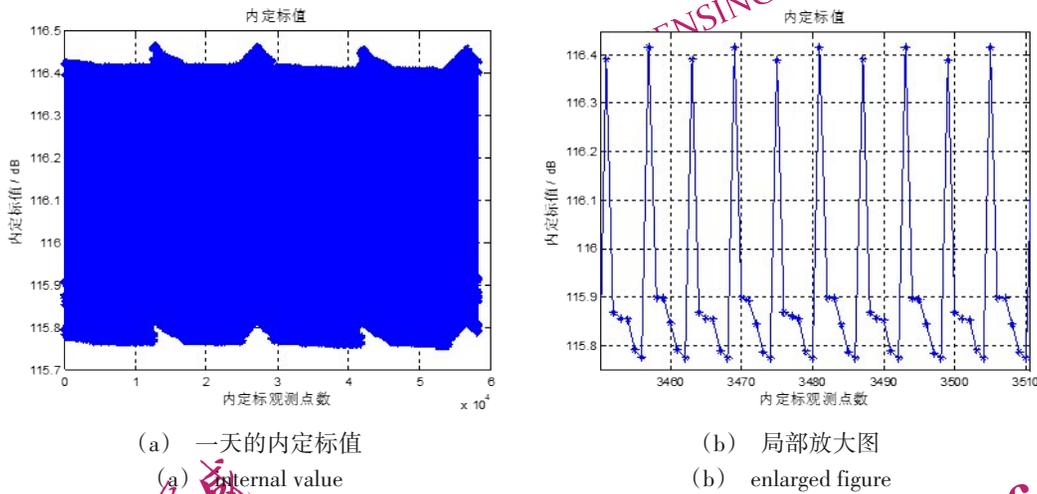


图13 C波段内定标值

Fig.13 Internal calibration values (C band)

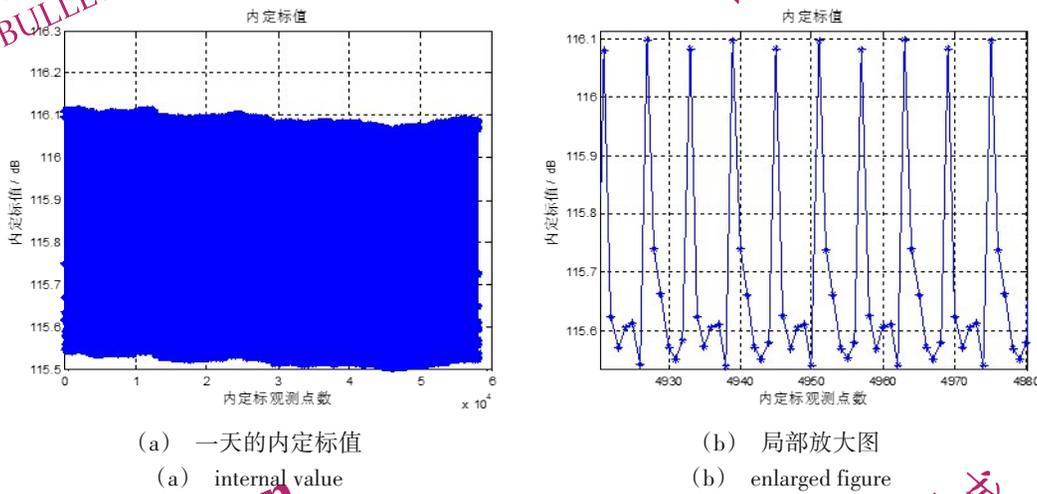


图14 Ku波段内定标值

Fig.14 Internal calibration values (Ku band)

表5 内定标精度测试结果

Table 5 Test results of internal calibration accuracy

测试内容	测试结果(dB)	
	方法一	方法二
C内定标精度	0.0327	0.2399
Ku内定标精度	0.0597	0.1937

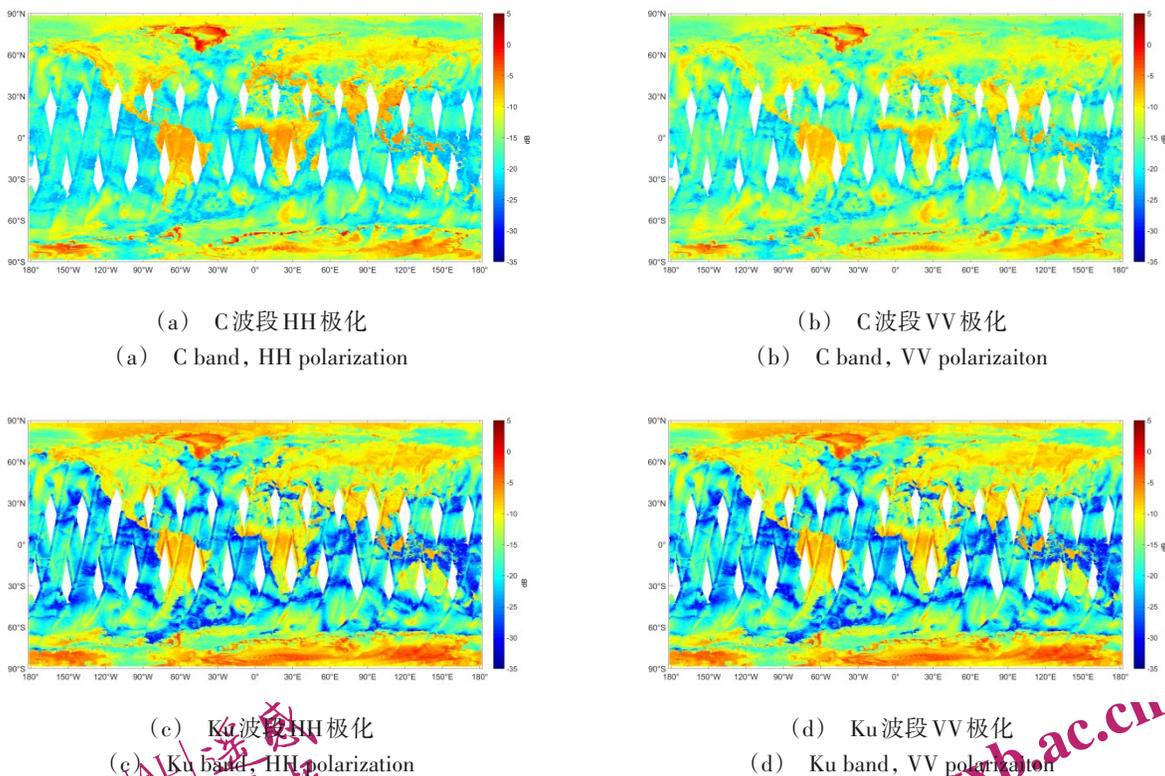


图15 风场测量雷达全球陆海表后向散射产品

Fig.15 Global backscattering product of WindRAD

## 5 结论

FY-3E 风场测量雷达是我国气象卫星首次实现主动遥感探测、国际上首次实现双频双极化全球海面风场主动探测的微波散射计，在轨运行后通过数月的在轨测试，验证了各项功能性能，可为遥感应应用、同化应用和天气预报提供高质量全球海面风场数据。未来高分辨率数值预报模式将对卫星微波观测资料提出更高的要求，微波海面风观测仪器面临的难点之一是高分辨率测量问题，目前正在开展风场测量雷达分辨率增强研究，以期为用户提供更高分辨率的高质量观测数据。

## 参考文献(References)

Dong X L, Zhu D, Lin W M, Zhang K, Yun R S, Liu J Q, Lang S Y, Ding Z Y, Ma J Y, Xu X O. 2020. Orbit Performances Validation for CFOSAT Scatterometer. Chinese Journal of Space Science, 40(3):425-431. (董晓龙, 朱迪, 林文明, 张阔, 云日升, 刘建强, 郎姝燕, 丁振宇, 马剑英, 徐星欧. 2020. 中法海洋卫星微波散射计在轨性能验证. 空间科学学报, 40(3):425-431.)

Lin C C, Wilson J, Impagnatiello F, Park P S. 1999. A rotating, range-gated, fanbeam spaceborne scatterometer concept. IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. IGARSS'99 (Cat. No. 99CH36293). 1: 431-433.

Mu B, Song Q T. 2014. In-orbit radiometric calibration of the HY-2A microwave scatterometer through open ocean measurements. Journal of Remote Sensing, 18(5): 1072-1078.

Nacimi V, Bartalis Z, Wagner W. 2009. ASCAT soil moisture: An assessment of the data quality and consistency with the ERS scatterometer heritage. Journal of Hydrometeorology, 10(2): 555-563.

Remund Q P, Long D G. 2013. A decade of QuikSCAT scatterometer sea ice extent data. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 52(7): 4281-4290.

Sarchilli C, Salvo M D, Lin C C, Betto M. 2009. Candidate scatterometer concepts for the Post-ERS mission. European Radar Conference (EuRAD). 164-167.

Wang X N, Liu L X, Chen W W. 2013. The system design and application of HY-2A scatterometer. China Engineering Science, 15(7): 33-38. (王小宁, 刘丽霞, 陈文新. 2013. 海洋二号卫星微波散射计系统设计与应用. 中国工程科学, 15(7):33-38.)

Zhang P, Hu X Q, Lu Q F, Zhu A J, Lin M Y, Sun L, Chen L, Xu N. 2021. The first operational meteorological satellite mission in an early morning orbit. Advances in Atmospheric Sciences, 39(1): 1-8.

## Preliminary evaluation of in-orbit performance for FY-3E Wind Radar

SHANG Jian<sup>1,2,3</sup>, DOU Fangli<sup>1,2,3</sup>, LIU Lixia<sup>4</sup>, YUAN Mei<sup>1,2,3</sup>, YIN Honggang<sup>1,2,3</sup>, SUN Ling<sup>1,2,3</sup>, HU Xiuqing<sup>1,2,3</sup>

1. National Satellite Meteorological Center (National Center 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. Xi'an Branch of China Academy of Space Technology, China Aerospace Science and Technology Corporation, Xi'an 710000, China

**Abstract:** The Wind Radar (WindRAD) onboard Fengyun-3E (FY-3E) meteorological satellite is the first active remote sensing instrument of China's Fengyun series satellites and the first spaceborne dual frequency & dual polarization scatterometer in the world. Spaceborne scatterometer is important remote sensing instrument for measuring meteorological and ocean parameters, which obtains geophysical parameters such as wind speed and wind direction on the global ocean surface through backscattering measurement of the earth system. WindRAD uses the advanced fan beam with conical scanning system, mainly aiming at measuring the sea surface wind vector all weather and all day with high precision as well as high resolution. In addition, the WindRAD can also measure soil moisture, sea ice and other geophysical parameters. This paper aims to give the preliminary evaluation of in-orbit performance for the WindRAD. The observation principle, signal characteristics and main performance indicators of the WindRAD are introduced, and the detailed data preprocessing method is proposed, that is, the level 1 processing to generate backscattering coefficient of global land and sea surface. According to WindRAD's in-orbit test after the launch in 2021, the performance of the instrument is preliminarily analyzed. Key telemetry parameters including rotation speed, internal calibration value and temperatures of important components are analyzed. Azimuth resolution, range resolution, observation swath width, radiometric resolution, and internal calibration accuracy are evaluated using WindRAD actual remote sensing data as well as parameters measured before the launch. The analysis results show that WindRAD works steadily in orbit, all of the performance indicators meet the expectations, and can provide high-quality backscattering coefficient data in both C and Ku bands for product retrieval. This work paves the way for WindRAD remote sensing application, assimilation application and weather forecast. WindRAD observation data is received and processed in FY-3E satellite ground system. The operational data is public to the users worldwide and can be obtained from the FENGYUN Satellite Data Center of National Satellite Meteorological Center, China Meteorological Administration (<http://satellite.nsmc.org.cn/PortalSite/Data/DataView.aspx>).

**Key words:** Wind Radar, scatterometer, instrument performance, in-orbit test, preliminary evaluation, radiometric resolution, data preprocessing, FY-3, meteorological satellite

**Supported by** Supported by National Key Research and Development Program of China under Grant 2021YFB3900400 and 2021YFB3900402, China Meteorological Administration Youth Innovation Team (CMA20240N10), Fengyun Application Pioneering Project No. FY-APP-2021.0510, National Natural Science Foundation of China No. U2242212