

星载 GNSS-R 与散射计联合探测能力分析及其海陆典型应用

万献慈¹, 万玮¹, 郭祉轶¹, 胡秀清^{2,3,4}

1. 北京大学 遥感与地理信息系统研究所, 北京 100871;

2. 国家卫星气象中心(国家空间天气监测预警中心), 北京 100081;

3. 许健民气象卫星创新中心, 北京 100081;

4. 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

摘要: 星载卫星导航系统反射计 GNSS-R (Global Navigation Satellite System-Reflectometry) 具有独特的前向散射观测方式、较高的空间分辨率以及小卫星组网条件下的高频次观测潜力, 可与传统主被动微波遥感手段形成优势互补。传统的主动微波遥感散射计与 GNSS-R 空间尺度相近, 二者在前、后向散射机理、主、被动观测模式等方面具有显著互补性。为寻求星载 GNSS-R 应用突破, 本文从理论和应用两个层面, 基于星载 GNSS-R 和散射计的工作特点, 深入分析星载 GNSS-R 与散射计的联合探测能力, 并结合海面风速、土壤湿度两个典型海陆应用场景分别进行试验。结果表明: 在近实时应用场景下, 二者联合比单源传感器在共同观测区域海面风速反演的均方根误差至少降低了 13%; 在大尺度应用场景下, 具备将联合高精度优势拓展至散射计全域的可行性, 将单源散射计全域土壤湿度反演的均方根误差至少降低了 6%。因此, 未来海陆参量反演研究可从信号源出发, 针对二者的观测几何、极化组合、波段组合等在具体场景深入研究, 从而拓宽反演方法及应用模式。

关键词: 星载 GNSS-R, 散射计, 前向散射, 后向散射, 联合反演, 海面风速, 土壤湿度, 时延-多普勒图, 反射率, 归一化雷达截面

中图分类号: TP701/P2

引用格式: 万献慈, 万玮, 郭祉轶, 胡秀清. 2025. 星载 GNSS-R 与散射计联合探测能力分析及其海陆典型应用. 遥感学报, 29(8): 2544-2558

Wan X C, Wan W, Guo Z Z and Hu X Q. 2025. Spaceborne GNSS-R and scatterometers and their typical applications in ocean and land surfaces. National Remote Sensing Bulletin, 29(8): 2544-2558 [DOI: 10.11834/jrs.20254368]

1 引言

全球卫星导航系统 GNSS (Global Navigation Satellite System) 不仅将直射信号用于导航定位 (杨元喜等, 2017; 张小红和马福建, 2019), 其反射信号还可用于遥感测量 GNSS-R (GNSS-Reflectometry) (万玮等, 2016; Chew 和 Small, 2020)。GNSS-R 是一种收发分置的双/多基地雷达技术 (贾燕等, 2023)。其接收经由地表散射的导航卫星信号 (L 波段, 频率约 1—2 GHz, 波长约 0.3—0.15 m) 以探测地表信息 (Clarizia 和 Ruf,

2016; Carreno-Luengo 等, 2017)。由于对海洋及陆地不同表面的敏感性 (刘经南等, 2007; 金双根等, 2017), 星载 GNSS-R 已逐步成为许多领域的关注热点 (Clarizia 和 Ruf, 2017; Al-Khaldi 等, 2019; Carreno-Luengo 等, 2019; Rodriguez-Alvarez 等, 2019)。

不同于传统主动微波遥感的后向散射, GNSS-R 通过接收前向散射信号进行地表探测, 可在高粗糙度下突破后向散射的观测限制 (Carreno-Luengo 等, 2017, 2020; Rodriguez-Alvarez 等, 2023)。同时, GNSS-R 独特的收发分置工作模式

收稿日期: 2024-09-05; 预印本: 2025-01-16

基金项目: 国家自然科学基金(编号:42471511);北京市科技新星计划(编号:20230484327, 20240484540);北京大学中央高校基本科研业务费

第一作者简介: 万献慈, 研究方向为全球导航卫星反射遥感。E-mail: wanxianci@stu.pku.edu.cn

通信作者简介: 万玮, 研究方向为全球导航卫星反射遥感。E-mail: w.wan@pku.edu.cn

和低成本小卫星组网能力有望使其兼具主被动遥感高空间分辨率(1—25 km)(Clarizia和Ruf, 2016; Bussy-Virat等, 2019; Llaveria等, 2021)和高时间分辨率(3—20 h)(Bussy-Virat等, 2019; Bu等, 2024)的优点,可与其他传统主被动微波遥感手段形成优势互补(陈锐志等, 2019)。现有GNSS-R和辐射计联合应用中(Carreno-Luengo等, 2019; Liu等, 2021; Wernicke等, 2022),充分发挥了GNSS-R高频次探测和高空间分辨率优势,以填补辐射计观测空缺并提升辐射计产品空间分辨率。GNSS-R和合成孔径雷达SAR(Synthetic Aperture Radar)的联合应用(Zhao等, 2020; Liu等, 2021; Bozdag等, 2023)则利用GNSS-R前向散射在高粗糙度下不易饱和的优势,以突破SAR在中高海况下的探测能力。就耦合机理和融合机制而言,散射计与GNSS-R更为适配。二者的基本观测量分别来自前后向散射信号,对地表粗糙度的响应彼此相反但相关(Chen等, 1992),使得关系建立成为可能(Nashashibi和Ulab等, 2007),GNSS-R采用的前向散射模型也是传统后向散射理论模型的延伸(刘经南等, 2007)。此外,二者观测的空间尺度相近(Guo等, 2023),主要工作频段具备融合基础(Huang等, 2018; Das等, 2019; Mao等, 2019; Meyer等, 2022; Bozdag等, 2023; Zhang等, 2024),可进一步充分挖掘两者联合的潜力与优势。

散射计是星载有源微波传感器之一,可测量归一化雷达截面以研究地球表面的各种地球物理特性(Wang等, 2020)。与同为主动微波传感器的SAR相比,散射计具备更大的幅宽,可实现每日全球90%以上范围覆盖以弥补GNSS-R的随机线条状观测,空间分辨率约为10—25 km(Singh等, 2022)。此外,多角度扫描方式较GNSS-R单次观测更具稳定性(Said等, 2022; Li等, 2023a)。然而,后向散射观测在高粗糙度下易饱和(Nie和Long, 2008; Duan等, 2017; Carreno-Luengo等, 2020)。

目前探究GNSS-R与散射计联合应用的相关研究尚少,已有研究初步证明了GNSS-R与散射计在海洋联合应用中的可行性。Yi等(2019)采用GNSS-R和散射计仿真数据证明了二者联合观测日间风信息的能力。Guo等(2023)首次提出了GNSS-R与散射计联合的海面风场反演算法,较单

一载荷实现了37%的精度提升。Zhang等(2024)利用飓风全球卫星导航系统CyGNSS(Cyclone Global Navigation Satellite System)数据与海洋二号(HaiYang-2, HY-2)B星散射计数据,基于机器学习回归模型实现了海面风场高精度反演。

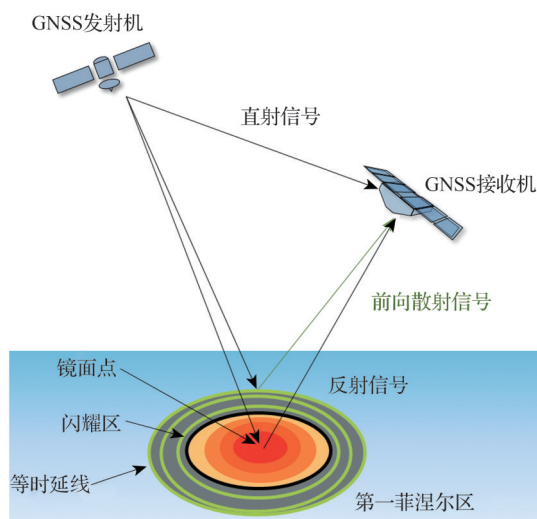
鉴于此,为寻求星载GNSS-R应用突破,本研究将从理论和应用两个层面,基于星载GNSS-R和散射计的工作特点,深入分析二者的联合探测优势及能力,并结合典型海陆应用场景进行试验验证,以期拓宽海陆参量反演方法及应用模式提供新思路。

2 GNSS-R与散射计工作特点

自2003年首颗GNSS-R卫星UK-DMC(United Kingdom-Disaster Monitoring Constellation)(Gleason等, 2005)发射以来,已有多颗GNSS-R卫星在轨运行。美国国家航空航天局NASA(National Aeronautics and Space Administration)发射的CyGNSS星座初步实现了星载GNSS-R业务化运行(Mayers等, 2023)。同时,中国也开展了一系列实验星载GNSS-R任务,如捕风一号(BuFeng-1, BF-1)A/B星(Wan等, 2022),风云三号(FengYun-3, FY-3)E/F/G星搭载的全球导航卫星掩星探测仪-II型GNOS-II(GNSS Occultation Sounder II)(Sun等, 2023)等。此外,商业卫星也在蓬勃发展,例如美国Spire公司(Jales等, 2023)和GeoOptics公司(Chang等, 2022)的GNSS-R系列星座,以及国内云遥宇航公司的GNSS掩星探测星座(王峰等, 2024)、航天天目公司的天目一号(Tianmu-1, TM-1)系列星座等(Bu等, 2024)。散射计则起步较早,自1978年起已历经多次技术迭代。目前在役的有欧洲航天局ESA(European Space Agency)的气象业务卫星Metop(Meteorological Operational satellite)C波段固定扇形高级散射计ASCAT(Advanced SCATterometer)(Schroeder等, 2016),中国的HY-2系列Ku波段笔形散射计(Zheng等, 2019),中法海洋卫星CFOSCAT(China French Oceanography Satellite)双频旋转扇形散射计(Rotating Fan-beam Scatterometer CSCAT/CFOSAT)(Zhao等, 2021),以及中国FY-3E搭载的旋转扇形扫描散射计——风场测量雷达(Wind Radar, WindRAD)等(Li等, 2023a)。

2.1 工作模式

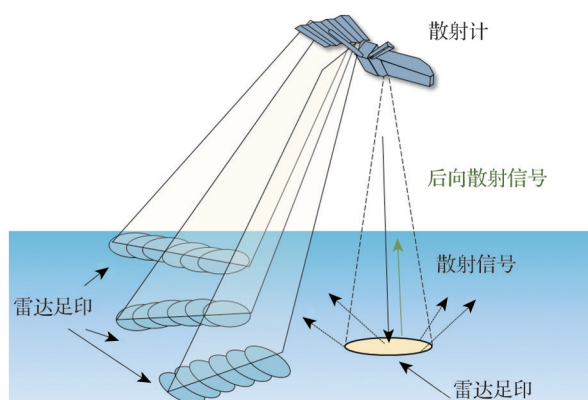
GNSS-R工作原理如图1(a)所示。可见其属于一种双/多基地雷达技术,接收机同时接收GNSS卫星直射信号和地面散射信号(主要贡献区为第一菲涅尔区,接收镜面点附近的反射信号),利用两者的时间或相位延迟,然后根据GNSS卫星、接



(a) 星载 GNSS-R

(a) Spaceborne GNSS-R

收机和镜面点之间的几何位置关系,可获取地表粗糙特征和地球物理参数(Carreno-Luengo等, 2020)。散射计工作原理见图1(b),则属于斜视观测的有源非成像卫星雷达传感器,通过向地表发射微波脉冲信号并接收其后向散射回波信号以探测目标信息(Nie和Long, 2008)。



(b) 星载散射计

(b) Spaceborne scatterometer

图1 星载GNSS-R与散射计工作模式

Fig. 1 Working modes of spaceborne GNSS-R and scatterometer

星载GNSS-R和散射计均属于非成像雷达,前者具有独特的前向散射模式,较后向散射不易饱和,可突破后者在高粗糙度下的观测极限(Carreno-Luengo等, 2017, 2020)。散射计主要工作频段为C、Ku波段(Singh等, 2022),在不同程度上受降雨、植被和其他地面干扰物等影响(Zhao等, 2023),Ku波段更为严重(Zhang等, 2014)。GNSS-R的工作频段为L波段,受此类干扰较小(Al-Khalidi等, 2020)。散射计的多角度观测模式使观测量在统计平均后实现稳定精度(Li等, 2023b),较GNSS-R的单次随机观测具有明显优势。综上可知,二者就工作模式而言较为互补。

2.2 数据形式

时延—多普勒图DDM(Delay-Doppler Map)是星载GNSS-R数据输出的基本形式,通过计算本地载波信号与散射区域内不同时间延迟和多普勒频率的接收信号的相关功率值生成(McKague, 2022)。利用Z-V模型(Zavorotny和Voronovich,

2000)计算得到归一化双基雷达截面积 $\sigma_{0x,y}$:

$$P_{g,i,\hat{f}} = \frac{P^T \lambda^2}{(4\pi)^3} \iint_A \frac{G_{x,y}^T \sigma_{0x,y} G_{x,y}^R}{(R_{x,y}^R)^2 (R_{x,y}^T)^2 L_\alpha L_{a2}} \Lambda_{\hat{f}; x,y}^2 S_{\hat{f}; x,y}^2 dx dy \quad (1)$$

式中, $\hat{i}$ 和 $\hat{f}$ 为DDM窗格编号, $P_{g,i,\hat{f}}$ 为接收到的相干信号功率, P^T 为GNSS卫星发射功率, λ 为GNSS卫星信号波长, $G_{x,y}^T$ 和 $G_{x,y}^R$ 分别为GNSS卫星发射天线和GNSS-R接收机天线的增益, $R_{x,y}^R$ 和 $R_{x,y}^T$ 分别为镜面点到GNSS-R接收机和GNSS卫星的距离, L_α 和 L_{a2} 分别为到达和离开表面大气的损失, $\Lambda_{\hat{f}; x,y}^2$ 是GNSS信号的扩散函数, $S_{\hat{f}; x,y}^2$ 是GNSS信号的频响,GNSS-R各个DDM窗格的有效散射面积 A 可通过计算物理散射面积和扩散函数而得。

归一化雷达截面 σ^0 是星载散射计数据输出的基本形式。目标的有效散射截面 σ 描述了单一目标向雷达二次辐射的能力,单位面积的 σ 定义为 σ^0 (Tao等, 2023)。根据雷达方程(Desbiolles等, 2017),可确定 σ^0 和雷达接收功率 P_r 之间的关系为

$$P_r = \frac{\lambda^2}{(4\pi)^3} \int \frac{P_t G_t G_r \sigma^0}{R_t^2 R_r^2} dA_r \quad (2)$$

式中， λ 为波束波长， G 为天线增益， R 为天线与目标之间的距离， A 为有效散射面积，下标 t 和 r 分别代表发射器和接收器。

GNSS-R的 σ_{0xy} 和散射计 σ^0 的计算方式相似，更利于厘清多源雷达不同频谱区间、不同电磁特性观测与观测环境之间的耦合机理。图2展示了GNSS-R的最终观测量DDM映射过程。GNSS-R使用DDM中围绕镜面点 $m \times n$ （CyGNSS为 3×5 ）的区

域中的观测值及计算得到的特征值作为观测量（McKague, 2022）。图3展示了散射计的最终观测量 σ^0 的映射流程。散射计L1产品中提供的 σ^0 则是通过将指定空间格网，即风矢量单元WVC（Wind Vector Cell），内多个雷达足印中的 σ^0 聚合而成的（EUMETSAT, 2017）。就数据形式而言，二者均通过“聚合”处理将基本观测量映射到最终观测量，形式较为一致。

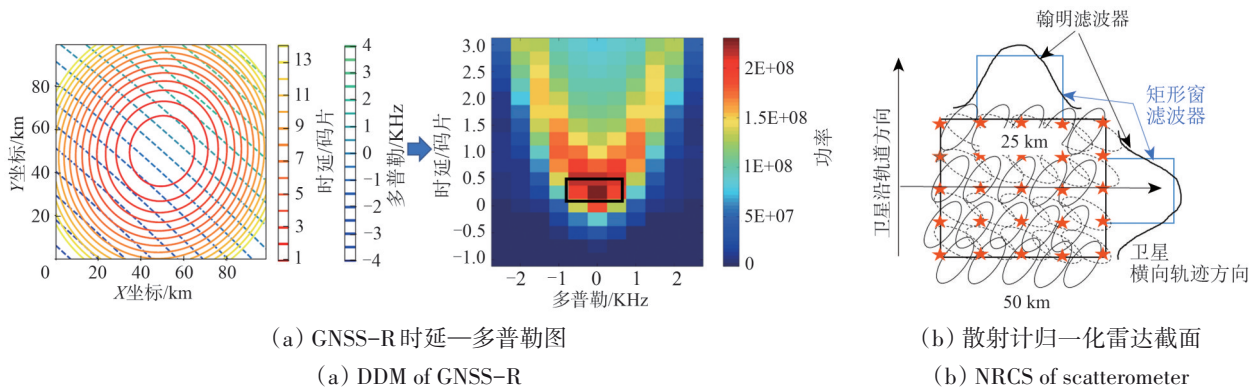


图2 GNSS-R时延—多普勒图与散射计归一化雷达截面的映射过程

Fig. 2 Mapping processes of DDM of GNSS-R and NRCS of scatterometer

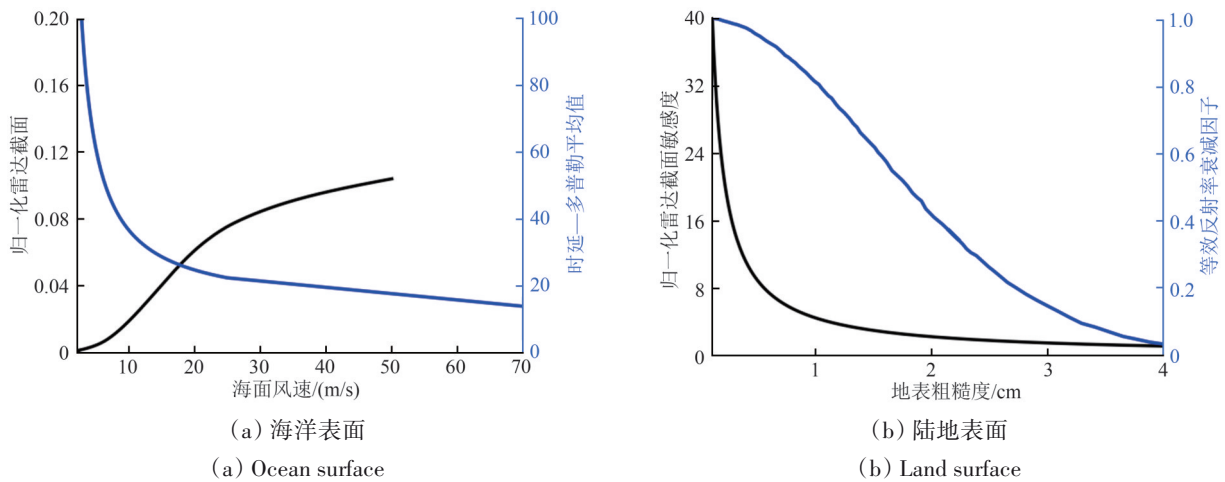


图3 在海洋（Stoffelen等，2017；Huang等，2022）和陆地（Egido，2013；Zribi等，2014）表面前向散射信号和后向散射信号在不同粗糙度下的灵敏度

Fig. 3 The sensitivity of forward-scattered and back-scattered signals at different roughness levels on ocean（Stoffelen et al., 2017；Huang et al., 2022） and land（Egido, 2013；Zribi et al., 2014） surfaces

2.3 极化方式

表1总结了现有星载GNSS-R和散射计的极化方式。星载GNSS-R主要采用圆极化接收微波信号，近年来也发展了多极化星载GNSS-R，星载散射计则只采用线极化发射和接收微波信号。

圆极化方程定义如下（杨晟，2018）：

$$(\mathbf{E}_h(\vec{r}, t))^2 + (\mathbf{E}_v(\vec{r}, t))^2 = a^2 \quad (3)$$

式中， $\mathbf{E}_h$ 和 $\mathbf{E}_v$ 分别表示电磁波在水平和垂直方向上的电场分量， a 为电场振幅的最大值， $\vec{r}$ 为位置， t 为时间。

当两个垂直电场分量的相对相位差 $\delta = \pi/2$ 时，为左旋圆极化，当 $\delta = -\pi/2$ 时，为右旋圆极化。

表1 现有星载GNSS-R和散射计的极化方式

Table 1 Polarization modes of existing spaceborne GNSS-Rs and scatterometers

类别	传感器	极化方式	
		直射(发射)信号	接收信号
GNSS-R	CYGNSS星座 (Clarizia 和 Ruf, 2016)、BF-1 A/B(Wan 等, 2022)、FY-3 E/F/G 的 GNSS-R 载荷(Sun 等, 2023)	右旋 R	左旋 L
	“Jilin-1” Kuanfu-01B 的 GNSS-R 载荷(王峰 等, 2024)	右旋 R	双极化 (右旋 R/左旋 L)
	TM-1 星座的 GNSS-R 载荷(Bu 等, 2024)	右旋 R	双极化 (右旋 R/左旋 L、水平 H/垂直 V)
散射计	MetOp- A/B/C ASCAT(Schroeder等, 2016)	垂直 V	垂直 V
	HY-2/ HY2-SCAT(Zheng 等, 2019)、FY-3E/WindRAD (Li 等, 2023a)、CSCAT/CFOSAT(Zhao 等, 2021)	水平 H/垂直 V	水平 H/垂直 V

当 $\delta=0$ 或 $\delta=\pi$ 时，则为线极化。线极化方程定义如下（杨晟，2018）：

$$\frac{E_h(\vec{r},t)}{a_h} = \pm \frac{E_v(\vec{r},t)}{a_v}$$

(4)

星载GNSS-R和散射计在不同极化方式下对于同一观测的响应存在差异，因此需要针对不同场景考虑不同的极化组合。例如，在海洋应用中，散射计共极化Ku波段和C波段分别在低风速和中低风速下表现较优；对于极端风，使用极化比模型相较单极化占优（Liu等，2019）。在陆地应用中，已有研究（Greifeneder等，2018）证明极化比与植被或地表粗糙度之间存在较强的相关性，且对于观测方向和入射角的敏感度较低，有利于监测作物和土壤状况。已有仿真实验表明，不同GNSS-R极化获取的植被信息不同，有望根据极化信号组合去除地表覆盖干扰（Wu等，2022）。GNSS-R的LH和RH极化信号比值被证实与土壤湿度有着良好的相关性，与地表粗糙度无关（Wu等，2022）。

对散射计而言，交叉极化或极化比信息相较于共极化的优势在于其在高粗糙度场景的适用性，这也是GNSS-R的优势所在。对GNSS-R而言，极化信号组合可进一步去除地表覆盖干扰。因此，当GNSS-R与共极化散射计联合可视作“优势互补”，与多极化散射计联合可视作“强强联合”。

3 GNSS-R与散射计联合优势

基于信号散射方式和观测模式，将星载GNSS-R和散射计的联合优势概括为前后向散射联合优势、主被动观测联合优势以及多角度观测与长波观测联合优势。

3.1 前后向散射联合优势

作为电磁波射入一般表面后并存的散射信号，前向和后向散射信号本身存在着相对、互补的关系（Chen等，1992）。基于积分方程模型（Liang等，2005）的电磁散射仿真表明，前后向散射系数均对表面粗糙度敏感。在相同的设备条件下，接收前向散射信号的信噪比更高（Nashashibi和Ulaby，2007）。在低粗糙度下，前向散射空间半球区域对粗糙度更为敏感，随着表面粗糙度的增大，后向散射空间半球区域对其敏感度增加（陈佳杰等，2023）。此外，后向散射在植被上以体散射为主，导致其对下方土壤的地球物理参数变化不敏感（Grippa和Woodhouse，2003）。相反，前向散射由于体散射产生的去极化，接收波会衰减（陈佳杰等，2023）。已有的双基地SAR技术和理论实验进一步验证了上述仿真结果（Li等，2018；Guerriero等，2013）。因此，类似于一种主动双基地雷达的“散射计+GNSS-R”联合结构可以充分发挥前后向散射的互补优势。

图3分别展示了在海洋和陆地场景下，散射计后向散射信号和GNSS-R前向散射信号对于不同粗糙度的响应。由图3（a）可见在高风速对应的海面高粗糙度场景下，后向散射信号达到饱和，前向散射信号灵敏度虽有所下降，但仍具备探测能力（Pierdicca等，2022）。在中等粗糙度情况下，随着粗糙度增加，GNSS-R的DDM特征值信噪比递减，而散射计的后向散射系数递增，观测更为可靠（Hoseini和Nahavandchi，2022）。对于粗糙度更低的场景，散射计后向散射系数较小，灵敏度降低，而GNSS-R的DDM特征值信噪比更高，

观测更为可靠 (Ribal 等, 2021)。由图 3 (a) 可见针对裸土而言, 在低粗糙度下, 后向散射信号较前向散射信号灵敏度更高, 观测更为可靠, 当地面粗糙度增加, 尽管前后向散射信号的灵敏度均递减, 但 GNSS-R 在地表粗糙度 3 cm 处依然保持探测能力, 而散射计在当地表粗糙度超过 2 cm 时已趋于信号饱和。综上, 前后向观测联合实际上是针对不同的适用场景, 灵活选择多传感器的观测或对其进行加权、聚合的过程, 从而提升共同观测区域下的单源反演精度。

3.2 主被动观测联合优势

由于收发不同源, 星载 GNSS-R 可理解为一种机会型信号被动遥感手段, 其主要特点为在多星组网的前提下实现短时间重访, 全球随机线条状观测 (Camps, 2020)。散射计则是收发同源的主动雷达装置, 可提供稳定重访周期下刈幅场景全覆盖的条带观测 (Santoro 等, 2022)。有别于传统微波辐射计被动接收地表辐射信息, GNSS-R 的“被动”体现在其被动接收地表散射的 GNSS 发射信号所致的观测随机性 (Rodriguez-Alvarez 等, 2023)。

图 4 展示了 FY-3E/F/G 系列 GNOS-II 与 FY-3E/WindRAD 单日覆盖情况。可见: 单颗散射计在单日内两轨之间必然存在无法观测的区域, 现有业务化 GNSS-R 卫星, 如 FY-3E/F/G 系列组网后, 虽无法提供全面覆盖, 但 GNOS-II 随机观测可对于散射计 (FY-3E/WindRAD) 观测空隙进行有效填补。图 5 展示了在 9 km 格网下 TM-1 星座 GNOS-II 单次重访所需时间。在卫星数量较多时, 商业卫星 TM-1 的 22 颗星组网后的单日覆盖率大幅提升, 在 9 km 空间分辨率下可几乎完全覆盖散射计单日观测空隙。

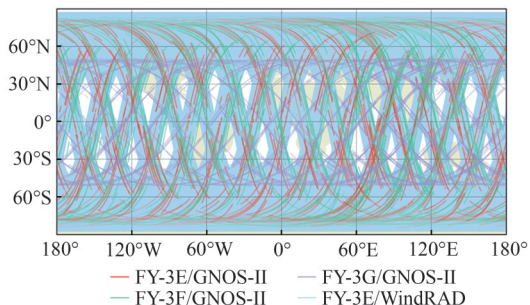


图 4 FY-3E/F/G 系列 GNOS-II 与 FY-3E/WindRAD 单日覆盖情况

Fig. 4 Daily coverage of the GNOS-II onboard FY-3E/F/G series satellites and WindRAD

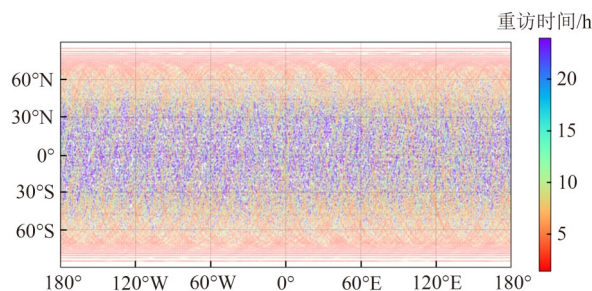


图 5 TM-1 星座 GNOS-II 单次重访所需时间 (根据 2024 年 4 月 TM-1 星座实测数据统计得到)

Fig. 5 Revisit time of the GNOS-II onboard TM-1 constellation (Based on the statistics from the actual observations of the TM-1 constellation in April 2024)

在海洋观测下, GNOS-II 和 WindRAD 的联合优势与传统主被动微波联合特点相似, 主动微波提供高空间分辨率的稳定观测, 而被动微波提供低分辨率的高精度观测, 二者联合可实现高精度、高分辨率观测。在陆地观测下, GNOS-II 的平均空间分辨率与 WindRAD 近似, 联合优势则体现在: WindRAD 的大范围覆盖为 GNOS-II 提供辅助观测, GNOS-II 的高粗糙度探测结果为 WindRAD 精度校正提供有效参考。因此, 星载 GNSS-R 联合散射计的观测模式, 不仅可以提升单日全球观测覆盖, 还可在共同覆盖区域内实现联合高精度反演并进一步实现散射计全域高精度反演。

3.3 多角度观测与长波观测联合优势

理论而言, 星载 GNSS-R 的 L 波段信号穿透能力较强且受降雨和植被影响相对较小, 使其具备高精度探测能力 (Mayers 等, 2023)。然而, 单次观测特性导致 GNSS-R 观测并不稳定 (Maheshwari 等, 2023), 格网平均在牺牲空间分辨率的前提下提高了观测稳定性, 但丢失了部分有效信息, 在高粗糙度应用场景下精度有所下降 (Said 等, 2022)。

散射计具备多角度观测优势, 统计平均后可提高观测精度 (Li 等, 2023a)。在中低粗糙度背景下, 当雨衰和植被衰减影响较小时, 散射计可提供精度稳定的观测 (Santoro 等, 2022; Zhao 等, 2023)。在高粗糙度背景或在信号衰减情况下, 散射计仍具备一定的趋势捕捉能力, 但观测精度降低 (Soisuvarn 等, 2013; Santoro 等, 2022)。

图 6 展示了台风过境时星载 GNSS-R 和散射计反演的海面风速剖面, 以及反演风速与参考真值

的相关性。与散射计相比, GNSS-R受降雨干扰较小且具备高风速(对应海面高粗糙度)探测能力,但由于未格网平均,存在明显的观测抖动。散射计在高粗糙度下饱和且存在信号衰减,明显低估风速,但反演风速与参考真值的相关性优于GNSS-R,具备趋势捕捉能力。为此,可考虑将

GNSS-R的长波观测和散射计的多角度观测联合。散射计的趋势捕捉能力可辅助GNSS-R在保证空间分辨率的前提下缓解观测抖动,同时GNSS-R的优势工作频段有助于提升散射计反演精度,二者优势互补,可提供高精度的稳定探测。

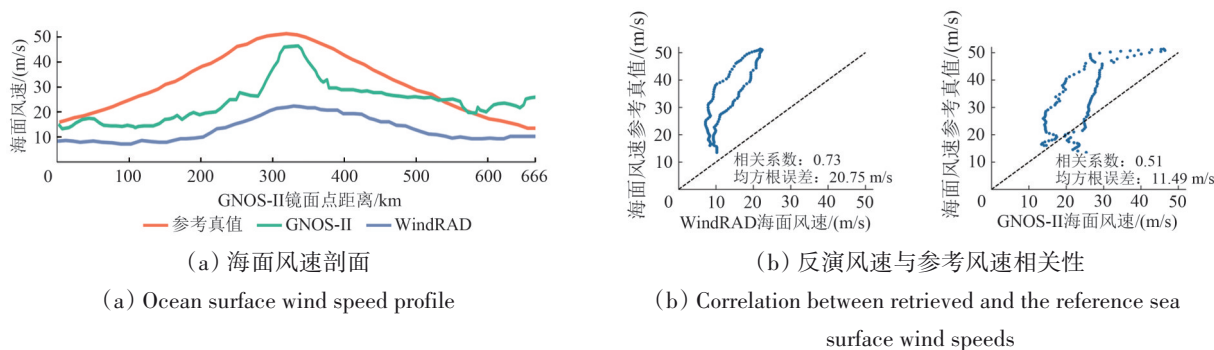


图6 台风过境时GNOS-II和WindRAD反演的海面风速剖面以及反演风速与参考风速相关性

Fig. 6 The ocean surface wind speed profile of spaceborne GNSS-R and scatterometer during the typhoon, as well as the correlation between the corresponding retrieved sea surface wind speeds and the reference sea surface wind speeds

4 GNSS-R与散射计联合反演应用

GNSS-R和散射计的联合优势在具体应用中体现如下:针对近实时应用场景,共同观测区域下对于单源反演精度以及GNSS-R空间分辨率的提升;针对大尺度应用场景,共同观测区域下对于单源反演精度以及散射计全域反演精度的提升。本文以台风灾害应急响应中所需的海面风速和大范围干旱灾害监测所需的土壤湿度为例,利用FY-3E同步搭载的GNOS-II和WindRAD数据,分别就近实时和大尺度应用场景进行联合反演验证。

采用均方根误差RMSE(Root Mean Square Error)(Al-Khaldi等, 2019, 2020)和绝对误差AE(Absolute Error)(Cui等, 2019)对海面风速和土壤湿度反演结果进行精度评定,具体公式如下:

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (f(x_i) - y_i)^2} \quad (5)$$

$$\text{AE} = f(x_i) - y_i \quad (6)$$

式中, x_i 为观测量, i 为观测的下标, $f(\cdot)$ 为反演算法, $f(x_i)$ 为反演结果, N 为观测数量, y_i 为参考真值;对于海面风速,采用时间间隔半小时内、

同一10 km格网内的ERA5风速,利用双线性插值法将其插值到与GNSS-R观测相同的时空位置,作为参考真值;对于土壤湿度,采用当日同为晨昏轨道的SMAP 9 km L3土壤湿度产品,利用双线性插值法将其插值到与GNSS-R观测相同的时空位置,作为参考真值。

4.1 GNSS-R与散射计联合反演海面风速

星载GNSS-R和散射计的观测量对海面风速变化响应一致,风致海面波改变海面粗糙度而引起 σ^0 或时延—多普勒平均值DDMA(DDM Average)的变化(Guo等, 2023),进而获取海面10 m高度处的等效中性稳定层结风。C波段散射计在降雨率小于8 mm/h时受雨衰影响较小,可稳定观测25 m/s以下风速,当风速超过该值观测趋于饱和(Zhao等, 2023)。GNSS-R可准确获取海面风速,且具备高风速(<70 m/s)探测能力,但单次观测稳定性较差(Maheshwari等, 2023; Mayers等, 2023)。已有研究(Guo等, 2023; Zhang等, 2024)利用不同卫星上的GNSS-R和散射计证明了联合海面风速反演的可行性,但过境时间的差异会给风速反演引入误差,本研究利用时空同步的GNOS-II和WindRAD数据进一步试验以评估联

合反演的精度提升。借鉴 Guo 等 (2023)，利用地球物理模式函数 GMF (Geophysical Model Function)，设计了针对 GNOS-II 和 WindRAD 数据的损失函数 $J(|U|)$ (式 (7))，进而利用极大似然估计器，最小化损失函数，进行共同区域联合风速反演。算法框架如图 7 所示。

$$J(|U|) = \sum_{i=1}^N \left| \frac{(\widehat{\text{DDM}}_i(|U_i|, \theta_i) - \text{DDM}_i)}{\delta_{\text{DDM}_i}} \right|^2 + \sum_{j=1}^M \sum_{k=1}^S \left| \frac{(\hat{\sigma}_{0jk}(|U_{jk}|, \theta_{jk}, \phi_{jk}) - \sigma_{0jk})}{\text{Kpc}_{jk} \cdot \sigma_{0jk}} \right|^2 \quad (7)$$

式中， DDM_i 和 $\widehat{\text{DDM}}_i$ 分别为实测 DDM (即 DDMA) 和模拟 DDM； δ_{DDM_i} 为 GNSS-R 的测量标准差，等于 $C \times \delta_{\text{DDM}_i}$ ， C 在本文中为常数 0.1； N 和 M 分别为 GNOS-II 和 WindRAD 的观测数量； S 为 WVC 的视数； i 和 j 为观测的下标， k 为视数的下标； σ_{0jk} 和 $\hat{\sigma}_{0jk}$ 分别为实测 σ^0 和模拟 σ^0 ， Kpc 为测量标准差，由仪器本身决定； $|U|$ ， θ 和 ϕ 分别为 u_{10} 风矢量、入射角和方位角； $\widehat{\text{DDM}}_i$ 和 $\hat{\sigma}_{0jk}$ 分别由 GNOS-II

GMF 和 CMOD7 GMF 模拟而得。

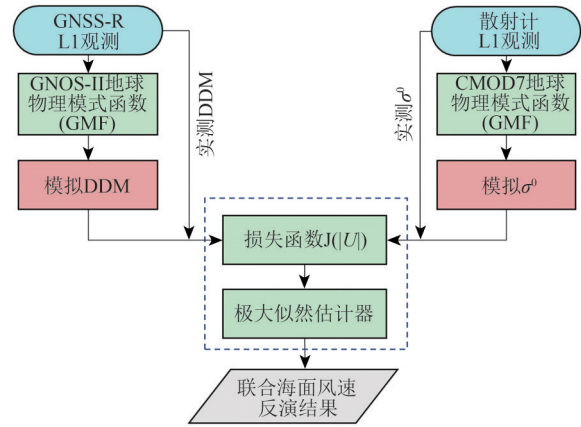


图 7 星载 GNSS-R 和散射计联合海面风速反演算法
Fig. 7 Flow of the spaceborne GNSS-R and scatterometer combined ocean surface wind speed retrieval algorithm

图 8 展示了 2022 年 4 月 2 日 GNOS-II、WindRAD 以及联合后的风速反演结果与 ERA-5 参考风速的绝对误差。总体而言，GNSS-R 倾向于高估风速，散射计倾向于低估风速，与已有研究的结论较为一致，而联合反演有效缓解了单源传感器的风速偏差。

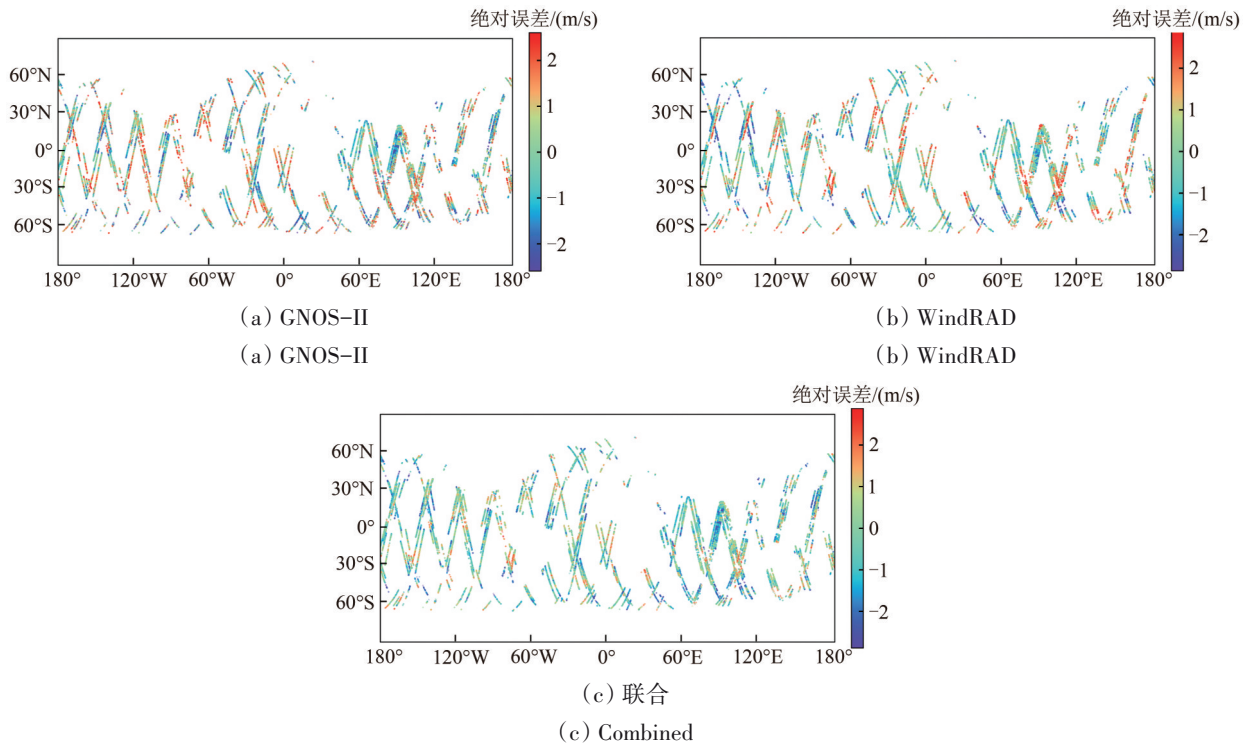


图 8 2022 年 4 月 2 日 GNOS-II、WindRAD 以及联合后共同观测区域海面风速反演结果

Fig. 8 Ocean surface wind speeds of the collocation area retrieved by GNOS-II, WindRAD and combination on April 2, 2022

进一步,统计了2022年4月1日—12月31日中当日具备高风速($>15\text{ m/s}$)的有效观测数 >2000 的73 d数据,共计8052220个共同观测(GNOS-II的1个镜面点为一个观测)的反演结果。图9展示了各方法在0—20 m/s下的风速概率密度分布以及不同风速段的RMSE,在此风速范围内ERA-5可作为一个相对可靠的参考真值(Gandoin和Garza, 2024)。WindRAD和GNOS-II的总体RMSE分别为1.31 m/s和1.29 m/s,联合后的海面风速反演误差相比单源分别降低了15%和13%。在低风速下,GNSS-R的误差较低,而随着风速增大,散射计的精度有所提升;在风速超过8 m/s的中高风速段,GNSS-R的精度逐渐优于散射计,与前述理论分析较为一致。在14—16 m/s中高风速段,GNSS-R对于散射计的优势并不突出,可能原因在于此时前

向散射系数较小,GNSS-R的灵敏度有所降低且单次观测稳定性不足;而散射计后向散射系数在较高粗糙度海面下的灵敏度也有所降低,倾向低估风速,导致两者整体总体精度相当。总体而言,除0—1 m/s极低风速段,联合反演精度均优于各单源传感器。在较低风速下,联合优势尚不明显,RMSE降低幅度较小,可能原因在于低风速下还存在其他影响海面粗糙度的因素且不可忽略。随着风速增大,在各传感器的不同优势风速段下,联合优势凸显。当风速超过18 m/s联合反演风速存在一个明显的误差低值,可能原因在于此风速段下GNSS-R仍倾向于高估风速,而散射计观测可能伴随雨衰问题低估风速,从而补偿了GNSS-R的高估,使得联合反演误差明显降低。

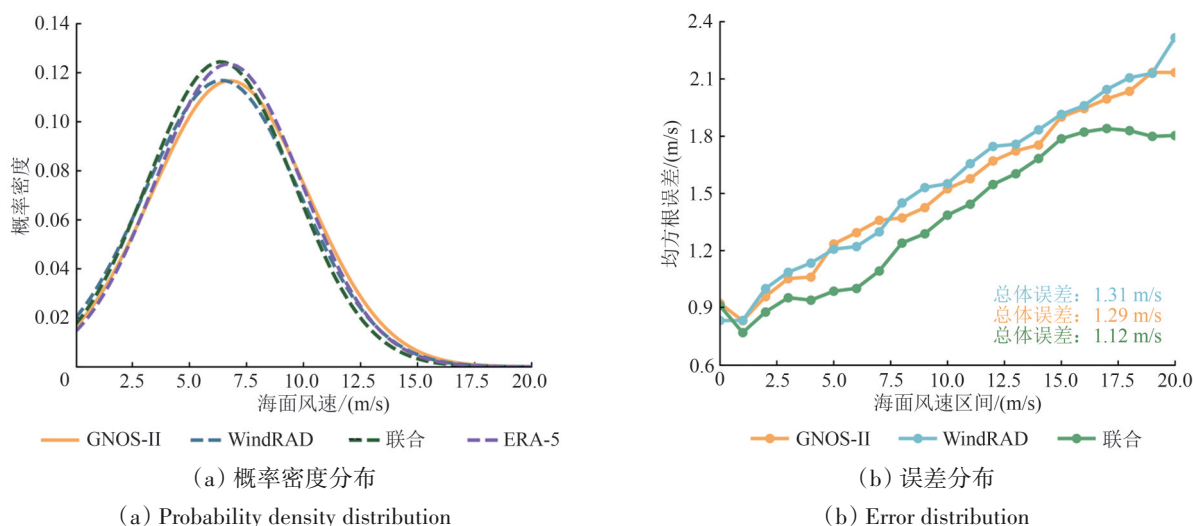


图9 GNOS-II、WindRAD以及联合后共同观测区域海面风速反演结果的概率密度分布及误差分布

Fig. 9 Probability density distribution and error distribution of the ocean surface wind speeds of the collocation area retrieved by GNOS-II, WindRAD and combination

4.2 GNSS-R与散射计联合反演土壤湿度

微波遥感主要利用微波的介电特性对近地表土壤湿度($\leq 5\text{ cm}$)的高敏感性进行反演(Ferrazzoli和Guerriero, 1996; 施建成等, 2012; Chan, 2018)。散射计和星载GNSS-R观测量,即 σ^0 和等效反射率 Γ ,对土壤湿度变化响应以及误差处理模式大致相当(Naeimi等, 2009; Wan等, 2022)。散射计受地表粗糙度影响较小,在裸土的反演精度较为稳定(Grippa和Woodhouse, 2003)。

当有植被覆盖时,后向散射以体散射为主,加之C波段信号受植被影响衰减,对土壤湿度并不敏感(Wagner等, 2013; Oveisgharan等, 2018)。相较而言,GNSS-R前向散射和L波段优势使其表现更为出色(Clarizia等, 2019),但散射计在陆地表面提供连续观测的能力更有利于实际数据的应用。

本研究作为GNSS-R和散射计联合土壤湿度反演的初探,基于WindRAD和GNOS-II数据,设计

了改进的 TU-WIEN 算法 (Wagner 等, 2013) 和 GNOS-II 聚类土壤湿度反演算法 (Guo 等, 2022), 并基于不同地物类型进行联合土壤湿度反演; 进而利用 LightGBM 算法 (Ke 等, 2017) 在共同观测区域建立转换关系, 将联合精度扩展至散射计全域。算法框架如图 10 所示。

图 11 展示了 2023 年随机抽取 55 d 共同观测区域下共 2158219 个观测的 WindRAD、GNOS-II、以及联合后的土壤湿度概率密度分布及误差分布。

由图 11 可见与 SMAP 土壤湿度相比, WindRAD 倾向低估土壤湿度, GNOS-II 则反之, 联合后有所缓解。当土壤湿度 $<0.25 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$, 处于散射计的优势区间, 反之为 GNSS-R 的优势区间。总体而言, 联合后两者优势互补, 较单源传感器土壤湿度反演结果的 RMSE 分别降低了 10% (vs. 散射计) 和 24% (vs. GNSS-R)。值得注意的是, 当土壤湿度超过 $0.35 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$, 联合的精度有所下降, 虽仍优于 WindRAD 但劣于 GNSS-R 反演结果, 主要原因

在于此区间内散射计的土壤湿度反演精度下降较为明显。

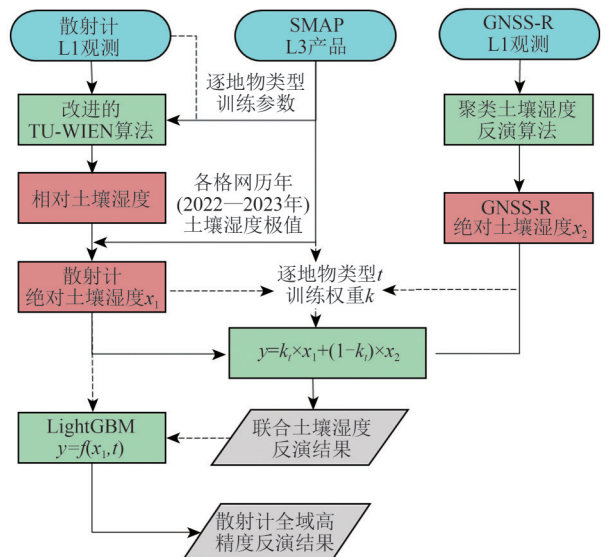


图 10 星载 GNSS-R 和散射计联合土壤湿度反演算法
Fig. 10 Flow of the spaceborne GNSS-R and scatterometer combined soil moisture retrieval algorithm

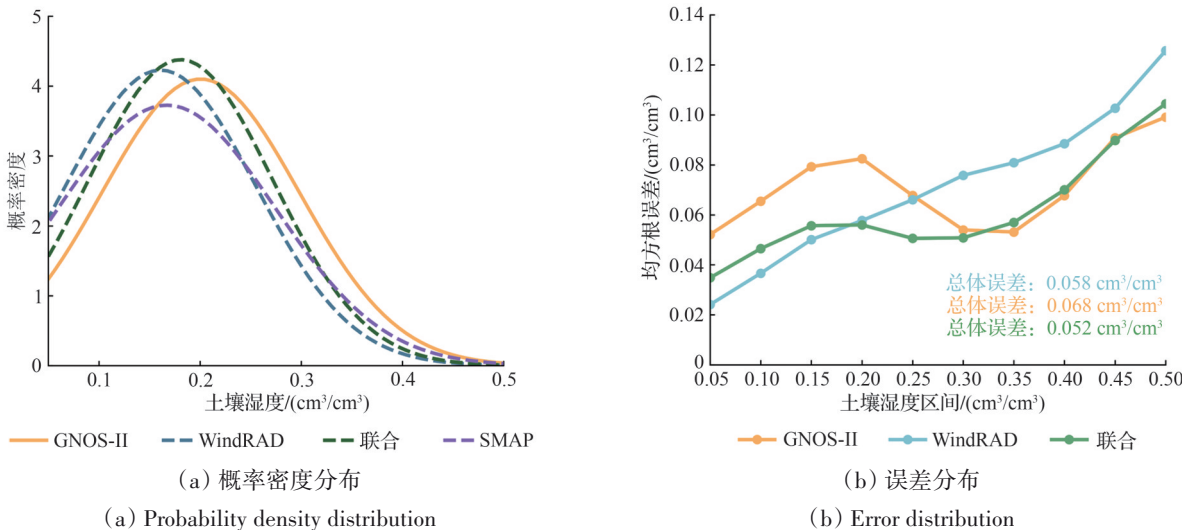


图 11 GNOS-II、WindRAD 以及联合后的共同区域土壤湿度反演结果的概率密度分布及误差分布
Fig. 11 Probability density distribution and error distribution of the soil moisture of the collocation area retrieved by GNOS-II, WindRAD and combination

图 12 展示了 2022 年随机抽取的 60 d WindRAD 数据在利用 LightGBM 算法校正前后的全域土壤湿度反演结果的 RMSE 及校正后的 RMSE 降低百分比。总体而言, 校正后缓解了散射计土壤湿度低估问题, 各天土壤湿度反演结果的 RMSE 降低了

6%—11%, RMSE 降低百分比在 8% 以上的占 55%。考虑到本算法较为简单, 仅为联合精度拓展到散射计全域提供一个初步思路并简单证明其可行性, 未来可以联合其他外源数据进一步设计更严密的拓展算法。

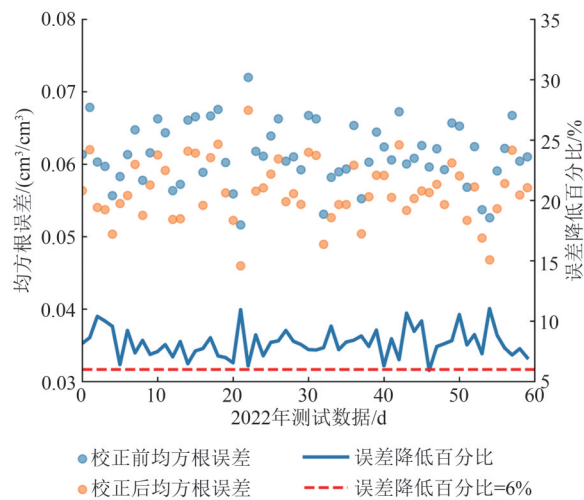


图 12 校正前后 WindRAD 全域土壤湿度反演结果的均方根误差及校正后的误差降低百分比

Fig. 12 Comparison of RMSE of WindRAD global soil moisture retrieval before and after correction, as well as the percentage of RMSE reduction after correction

5 结 论

为寻求星载 GNSS-R 应用突破, 本文从理论和应用两个层面, 基于星载 GNSS-R 和散射计的工作特点, 深入分析星载 GNSS-R 与散射计的联合探测能力, 并结合海面风、土壤湿度两个典型海陆应用场景分别进行试验, 主要结论如下:

(1) 星载 GNSS-R 和散射计探测能力互补。前向散射互补, 灵活运用可突破后向散射反演量级, 提升单源反演精度; 主被动观测互补, 可联合实现高精度、高分辨率观测, 并有望拓宽反演范围; 多角度观测与长波观测互补, 可联合实现高精度稳定观测。

(2) 二者在近实时和大尺度应用场景下联合优势明显。针对近实时应用场景, 二者联合较单源传感器在共同观测区域海面风速反演的均方根误差至少降低了 13%; 针对大尺度应用场景, 具备将联合高精度优势拓展至散射计全域的可行性, 将单源散射计全域土壤湿度反演的均方根误差至少降低了 6%。

(3) 未来可从信号源出发, 针对两者的观测几何、极化组合、波段组合等在具体场景深入研究从而拓宽海陆参量反演方法及应用模式。此外, 鉴于 GNSS-R 的轻量化、低成本优势, 建议与散射计同步搭载, 结合云边信息处理技术, 为近实时应用场景提供决策支持。

志 谢 感谢航天天目 (重庆) 卫星科技有限公司提供 TM-1/GNOS-II L1 数据。

参考文献 (References)

- Al-Khaldi M M, Johnson J T, Kang Y, Katzberg S J, Bringer A, Kubatko E and Wood D. 2020. Track-based cyclone maximum wind retrievals using the Cyclone Global Navigation Satellite System (CYGNSS) mission full DDMs. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 13: 21-29 [DOI: 10.1109/JSTARS.2019.2946970]
- Al-Khaldi M M, Johnson J T, O'Brien A J, Balenzano A and Mattia F. 2019. Time-series retrieval of soil moisture using CYGNSS. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 57(7): 4322-4331 [DOI: 10.1109/TGRS.2018.2890646]
- Bozdag E, Senyurek V, Nabi M M, Kurum M and Gurbuz A C. 2023. Fusing Sentinel-1 with CYGNSS to account for vegetation effects in soil moisture retrievals//2023 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Pasadena: IEEE: 2693-2696 [DOI: 10.1109/IGARSS52108.2023.10281528]
- Bu J W, Wang Q L, Wang Z Y, Fan S Q, Liu X Y and Zuo X Q. 2024. Land remote sensing applications using spaceborne GNSS reflectometry: a comprehensive overview. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 17: 12811-12841 [DOI: 10.1109/JSTARS.2024.3415754]
- Bussy-Virat C D, Ruf C S and Ridley A J. 2019. Relationship between temporal and spatial resolution for a constellation of GNSS-R satellites. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 12(1): 16-25 [DOI: 10.1109/JSTARS.2018.2833426]
- Camps A. 2020. Spatial resolution in GNSS-R under coherent scattering. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 17(1): 32-36 [DOI: 10.1109/LGRS.2019.2916164]
- Carreno-Luengo H, Lowe S, Zuffada C, Esterhuizen S and Oveisgharan S. 2017. Spaceborne GNSS-R from the SMAP mission: first assessment of polarimetric scatterometry over land and cryosphere. *Remote Sensing*, 9(4): 362 [DOI: 10.3390/rs9040362]
- Carreno-Luengo H, Luzi G and Crosetto M. 2019. Sensitivity of CyGNSS bistatic reflectivity and SMAP microwave radiometry brightness temperature to geophysical parameters over land surfaces. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 12(1): 107-122 [DOI: 10.1109/JSTARS.2018.2856588]
- Carreno-Luengo H, Luzi G and Crosetto M. 2020. Above-ground biomass retrieval over tropical forests: a novel GNSS-R approach with CYGNSS. *Remote Sensing*, 12(9): 1368 [DOI: 10.3390/RS12091368]
- Chan S. 2018. Soil Moisture Active Passive (SMAP): Mission Enhanced Level 2 Passive Soil Moisture Product Specification Document Prime Mission Release. Pasadena: Jet Propulsion Laboratory: 1-55
- Chang H, Lee J, Yoon H, Morton Y J and Saltman A. 2022. Performance assessment of radio occultation data from GeoOptics by

- comparing with COSMIC data. *Earth, Planets and Space*, 74(1): 108 [DOI: 10.1186/s40623-022-01667-6]
- Chen J J, Miao H L, Liu X C, Yang Z H and Miao X Y. 2023. Study on the influence of bistatic scattering of fully polarimetric radar from sea surface modulated by current field. *Periodical of Ocean University of China*, 53(S1): 30-42 (陈佳杰, 苗洪利, 刘训超, 杨忠昊, 苗翔鹰. 2023. 流场调制下的海面对全极化雷达双站散射的影响研究. *中国海洋大学学报(自然科学版)*, 53(S1): 30-42) [DOI: 10.16441/j.cnki.hdxh.20220493]
- Chen K S, Fung A K and Weissman D A. 1992. A backscattering model for ocean surface. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 30(4): 811-817 [DOI: 10.1109/36.158877]
- Chen R Z, Wang L, Li D R, Chen L and Fu W J. 2019. A survey on the fusion of the navigation and the remote sensing techniques. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 48(12): 1507-1522 (陈锐志, 王磊, 李德仁, 陈亮, 付文举. 2019. 导航与遥感技术融合综述. *测绘学报*, 48(12): 1507-1522) [DOI: 10.11947/j. AGCS. 2019. 20190446]
- Chew C and Small E. 2020. Estimating inundation extent using CYGNSS data: a conceptual modeling study. *Remote Sensing of Environment*, 246: 111869 [DOI: 10.1016/j.rse.2020.111869]
- Clarizia M P, Pierdicca N, Costantini F and Floury N. 2019. Analysis of CYGNSS data for soil moisture retrieval. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 12(7): 2227-2235 [DOI: 10.1109/JSTARS.2019.2895510]
- Clarizia M P and Ruf C S. 2016. Wind speed retrieval algorithm for the Cyclone Global Navigation Satellite System (CYGNSS) mission. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 54(8): 4419-4432 [DOI: 10.1109/TGRS.2016.2541343]
- Clarizia M P and Ruf C S. 2017. Bayesian wind speed estimation conditioned on significant wave height for GNSS-R ocean observations. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 34(6): 1193-1202 [DOI: 10.1175/JTECH-D-16-0196.1]
- Cui Z Q, Pu Z X, Tallapragada V, Atlas R and Ruf C S. 2019. A preliminary impact study of CYGNSS ocean surface wind speeds on numerical simulations of hurricanes. *Geophysical Research Letters*, 46(5): 2984-2992 [DOI: 10.1029/2019GL082236]
- Das N N, Entekhabi D, Dunbar R S, Chaubell M J, Colliander A, Yuch S, Jagdhuber T, Chen F, Crow W, O'Neill P E, Walker J P, Berg A, Bosch D D, Caldwell T, Cosh M H, Collins C H, Lopez-Baeza E and Thibeault M. 2019. The SMAP and Copernicus Sentinel 1A/B microwave active-passive high resolution surface soil moisture product. *Remote Sensing of Environment*, 233: 111380 [DOI: 10.1016/j.rse.2019.111380]
- Desbiolles F, Bentamy A, Blanke B, Roy C, Mestas-Núñez A M, Grodsky S A, Herbert S, Cambon G and Maes C. 2017. Two decades [1992-2012] of surface wind analyses based on satellite scatterometer observations. *Journal of Marine Systems*, 168: 38-56 [DOI: 10.1016/j.jmarsys.2017.01.003]
- Duan B H, Zhang W M, Yang X F, Dai H J and Yu Y. 2017. Assimilation of typhoon wind field retrieved from scatterometer and SAR based on the huber norm quality control. *Remote Sensing*, 9(10): 987 [DOI: 10.3390/rs9100987]
- Egido A. 2013. GNSS Reflectometry for Land Remote Sensing Applications. Catalonia: Universitat Politècnica de Catalunya
- EUMETSAT. 2017. ASCAT user guide[EB/OL]. EUMETSAT. <https://www-cdn.eumetsat.int/files/2020-07/ASCAT%20User%20Guide.pdf>
- Ferrazzoli P and Guerriero L. 1996. Passive microwave remote sensing of forests: a model investigation. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 34(2): 433-443 [DOI: 10.1109/36.485121]
- Gandoin R and Garza J. 2024. Underestimation of strong wind speeds offshore in ERA5: evidence, discussion and correction. *Wind Energy Science*, 9(8): 1727-1745 [DOI: 10.5194/wes-9-1727-2024]
- Gleason S, Hodgart S, Sun Y P, Gommenginger C, Mackin S, Adjrad M and Unwin M. 2005. Detection and processing of bistatically reflected GPS signals from low earth orbit for the purpose of ocean remote sensing. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 43(6): 1229-1241 [DOI: 10.1109/TGRS.2005.845643]
- Greifeneder F, Notarnicola C, Hahn S, Vreugdenhil M, Reimer C, Santi E, Paloscia S and Wagner W. 2018. The added value of the VH/VV polarization-ratio for global soil moisture estimations from scatterometer data. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 11(10): 3668-3679 [DOI: 10.1109/JSTARS.2018.2865185]
- Grippa M and Woodhouse I H. 2003. Retrieval of bare soil and vegetation parameters from wind scatterometer measurements over three different climatic regions. *Remote Sensing of Environment*, 84(1): 16-24 [DOI: 10.1016/S0034-4257(02)00067-6]
- Guerriero L, Pierdicca N, Pulvirenti L and Ferrazzoli P. 2013. Use of satellite radar bistatic measurements for crop monitoring: a simulation study on corn fields. *Remote Sensing*, 5(2): 864-890 [DOI: 10.3390/rs5020864]
- Guo Z, Liu B J, Wan X, Xia Z, Zhang T and Wan W. 2023. CSCARY: a new algorithm combining observables of ASCAT and CyGNSS for more accurate ocean surface wind speed retrieval. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 20: 1500705 [DOI: 10.1109/LGRS.2023.3243231]
- Guo Z Z, Liu B J, Wan W, Lu F, Niu X L, Ji R, Jing C, Li W Q, Chen X W, Yang J and Bai Z G. 2022. Soil moisture retrieval using BuFeng-1 A/B based on land surface clustering algorithm. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 15: 4680-4689 [DOI: 10.1109/JSTARS.2022.3179325]
- Hoseini M and Nahavandchi H. 2022. The potential of spaceborne GNSS reflectometry for detecting ocean surface currents. *Remote Sensing of Environment*, 282: 113256 [DOI: 10.1016/j.rse.2022.113256]
- Huang F X, Xia J M, Yin C, Zhai X C, Xu N, Yang G L, Bai W H, Sun Y Q, Du Q F, Liao M, Hu X Q, Zhang P, Duan L C and Liu Y. 2022. Assessment of FY-3E GNOS-II GNSS-R global wind product. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 15: 7899-7912 [DOI: 10.1109/JSTARS.2022.3205331]
- Huang X D, Ziniti B, Torbick N and Ducey M J. 2018. Assessment of forest above ground biomass estimation using multi-temporal C-band Sentinel-1 and polarimetric L-band PALSAR-2 data. *Remote Sensing*, 10(9): 1424 [DOI: 10.3390/rs10091424]

- Jales P, Cartwright J, Talpe M, Mashburn J, Yuasa T, Nogues-Correig O, Nguyen V and Freeman V. 2023. Spire global's operational GNSS-reflectometry constellation for earth surface observations// International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS). Pasadena: IEEE: 884-887 [DOI: 10.1109/IGARSS52108.2023.10282940]
- Jia Y, Jin S G, Xiao Z Y, Yan Q Y and Pei Y K. 2023. Soil moisture remote sensing using global navigation satellite system-reflectometry: current status and opportunity. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 48(11): 1784-1799 (贾燕, 金双根, 肖智宇, 严清赞, 裴悦琨. 2023. 全球导航卫星系统反射测量土壤水分遥感: 现状与机遇. *武汉大学学报(信息科学版)*, 48(11): 1784-1799) [DOI: 10.13203/j.whugis20230253]
- Jin S G, Zhang Q Y and Qian X D. 2017. New progress and application prospects of global navigation satellite system reflectometry (GNSS+R). *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 46(10): 1389-1398 (金双根, 张勤耘, 钱晓东. 2017. 全球导航卫星系统反射测量(GNSS+R)最新进展与应用前景. *测绘学报*, 46(10): 1389-1398) [DOI: 10.11947/j.AGCS.2017.20170282]
- Ke G L, Meng Q, Finley T, Wang T F, Chen W, Ma W D, Ye Q W and Liu T Y. 2017. LightGBM: a highly efficient gradient boosting decision tree//Proceedings of the 31st International Conference on Neural Information Processing Systems. Long Beach: Curran Associates Inc.: 3149-3157
- Li T T, Chen K S and Jin M. 2018. Analysis and simulation on imaging performance of backward and forward bistatic synthetic aperture radar. *Remote Sensing*, 10(11): 1676 [DOI: 10.3390/rs10111676]
- Li Z, Stoffelen A, Verhoef A, Wang Z X, Shang J and Yin H G. 2023a. Higher-order calibration on WindRAD (Wind Radar) scatterometer winds. *Atmospheric Measurement Techniques*, 16(20): 4769-4783 [DOI: 10.5194/amt-16-4769-2023]
- Li Z, Verhoef A, Stoffelen A, Shang J and Dou F L. 2023b. First results from the WindRAD scatterometer on board FY-3E: data Analysis, calibration and wind retrieval evaluation. *Remote Sensing*, 15(8): 2087 [DOI: 10.3390/rs15082087]
- Liang P, Pierce L E and Moghaddam M. 2005. Radiative transfer model for microwave bistatic scattering from forest canopies. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 43(11): 2470-2483 [DOI: 10.1109/TGRS.2005.853926]
- Liu B J, Wan W, Guo Z Z, Ji R, Wang T, Tang G Q, Cui Y K and Hong Y. 2021. First assessment of CyGNSS-incorporated SMAP sea surface salinity retrieval over pan-tropical ocean. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 14: 12163-12173 [DOI: 10.1109/JSTARS.2021.3128553]
- Liu J N, Shao L J and Zhang X X. 2007. Advances in GNSS-R studies and key technologies. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 32(11): 955-960 (刘经南, 邵连军, 张训械. 2007. GNSS-R研究进展及其关键技术. *武汉大学学报(信息科学版)*, 32(11): 955-960) [DOI: 10.3969/j.issn.1671-8860.2007.11.004]
- Liu S B, Wei E B, Jin X, Lv A L and Dang H X. 2019. The performance of dual-frequency polarimetric scatterometer in sea surface wind retrieval. *Journal of Ocean University of China*, 18(5): 1051-1060 [DOI: 10.1007/s11802-019-4018-z]
- Llaveria D, Munoz-Martin J F, Herbert C, Pablos M, Park H and Camps A. 2021. Sea ice concentration and sea ice extent mapping with L-band microwave radiometry and GNSS-R data from the FFSCat mission using neural networks. *Remote Sensing*, 13(6): 1139 [DOI: 10.3390/rs13061139]
- Maheshwari M, Chakraborty A, Kumar A and Nirmala S. 2023. Uncertainty assessment and an improved CYGNSS cyclonic wind speed retrieval model for cyclones over North Indian Ocean. *Journal of Earth System Science*, 132(1): 18 [DOI: 10.1007/s12040-022-02026-5]
- Mao H Z, Kathuria D, Duffield N and Mohanty B P. 2019. Gap filling of high-resolution soil moisture for SMAP/Sentinel-1: a two-layer machine learning-based framework. *Water Resources Research*, 55(8): 6986-7009 [DOI: 10.1029/2019WR024902]
- Mayers D R, Ruf C S and Warnock A M. 2023. CYGNSS storm-centric tropical cyclone gridded wind speed product. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 62(3): 329-339 [DOI: 10.1175/jamc-d-22-0054.1]
- Ruf C S, McKague D, Posselt D, Gleason S, Clarizia M P, Zavorotny V, Butler T, Redfern J, Wells W, Morris M, Crespo J, Chew C, Small E, Pasqual D, and Wang T. 2022. CYGNSS Handbook. Michigan Publishing Services [DOI: 10.3998/mpub.12741920]
- Meyer R, Zhang W M, Kragh S J, Andreasen M, Jensen K H, Fensholt R, Stisen S and Looms M C. 2022. Exploring the combined use of SMAP and Sentinel-1 data for downscaling soil moisture beyond the 1 km scale. *Hydrology and Earth System Sciences*, 26(13): 3337-3357 [DOI: 10.5194/hess-26-3337-2022]
- Naeimi V, Bartalis Z and 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 [DOI: 10.1175/2008JHM1051.1]
- Nashashibi A Y and Ulaby F T. 2007. MMW polarimetric radar bistatic scattering from a random surface. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 45(6): 1743-1755 [DOI: 10.1109/TGRS.2007.894439]
- Nie C L and Long D G. 2008. A C-band scatterometer simultaneous wind/rain retrieval method. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 46(11): 3618-3631 [DOI: 10.1109/TGRS.2008.922146]
- Oveisgharan S, Haddad Z, Turk J, Rodriguez E and Li L. 2018. Soil moisture and vegetation water content retrieval using QuikSCAT data. *Remote Sensing*, 10(4): 636 [DOI: 10.3390/rs10040636]
- Pierdicca N, Comite D, Camps A, Carreno-Luengo H, Cenci L, Clarizia M P, Costantini F, Dente L, Guerriero L, Mollfulleda A, Paloscia S, Park H, Santi E, Zribi M and Floury N. 2022. The potential of spaceborne GNSS reflectometry for soil moisture, biomass, and freeze-thaw monitoring: summary of a European Space Agency-funded study. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine*, 10(2): 8-38 [DOI: 10.1109/MGRS.2021.3115448]
- Ribal A, Tamizi A and Young I R. 2021. Calibration of scatterometer wind speed under hurricane conditions. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 38(10): 1859-1870 [DOI: 10.1175/JTECH-D-21-0055.1]
- Rodriguez-Alvarez N, Holt B, Jaruwatanadilok S, Podest E and Cavanaugh K C. 2019. An Arctic sea ice multi-step classification based on GNSS-R data from the TDS-1 mission. *Remote Sensing of*

- Environment, 230: 111202 [DOI: 10.1016/j.rse.2019.05.021]
- Rodriguez-Alvarez N, Munoz-Martin J F and Morris M. 2023. Latest advances in the global navigation satellite system—reflectometry (GNSS-R) field. *Remote Sensing*, 15(8): 2157 [DOI: 10.3390/rs15082157]
- Said F, Jelenak Z, Park J and Chang P S. 2022. The NOAA track-wise wind retrieval algorithm and product assessment for CyGNSS. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 60: 4202524 [DOI: 10.1109/TGRS.2021.3087426]
- Santoro M, Cartus O, Wegmüller U, Besnard S, Carvalhais N, Araza A, Herold M, Liang J J, Cavlovic J and Engdahl M E. 2022. Global estimation of above-ground biomass from spaceborne C-band scatterometer observations aided by LiDAR metrics of vegetation structure. *Remote Sensing of Environment*, 279: 113114 [DOI: 10.1016/j.rse.2022.113114]
- Schroeder R, McDonald K C, Azarderakhsh M and Zimmermann R. 2016. ASCAT MetOp-A diurnal backscatter observations of recent vegetation drought patterns over the contiguous U.S.: an assessment of spatial extent and relationship with precipitation and crop yield. *Remote Sensing of Environment*, 177: 153-159 [DOI: 10.1016/j.rse.2016.01.008]
- Shi J C, Du Y, Du J Y, Jiang L M, Chai L N, Mao K B, Xu P, Ni W J, Xiong C, Liu Q, Liu C Z, Guo P, Cui Q, Li Y Q, Chen J, Wang A Q, Luo H J and Wang Y H. 2012. Progresses on microwave remote sensing of land surface parameters. *Science China Earth Sciences*, 55(7): 1052-1078 (施建成, 杜阳, 杜今阳, 蒋玲梅, 柴琳娜, 毛克彪, 徐鹏, 倪文俭, 熊川, 刘强, 刘晨洲, 郭鹏, 崔倩, 李云青, 陈晶, 王安琪, 罗禾佳, 王殷辉. 2012. 微波遥感地表参数反演进展. *中国科学:地球科学*, 42(6): 814-842) [DOI: 10.1360/zd-2012-42-6-814]
- Singh S, Tiwari R K, Sood V, Kaur R and Prashar S. 2022. The legacy of scatterometers: review of applications and perspective. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine*, 10(2): 39-65 [DOI: 10.1109/MGRS.2022.3145500]
- Soisuvarn S, Jelenak Z, Chang P S, Alsweiss S O and Zhu Q. 2013. CMOD5.H—a high wind geophysical model function for C-band vertically polarized satellite scatterometer measurements. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 51(6): 3744-3760 [DOI: 10.1109/TGRS.2012.2219871]
- Stoffelen A, Verspeek J A, Vogelzang J and Verhoef A. 2017. The CMOD7 geophysical model function for ASCAT and ERS wind retrievals. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 10(5): 2123-2134 [DOI: 10.1109/JSTARS.2017.2681806]
- Sun Y Q, Huang F X, Xia J M, Yin C, Bai W H, Du Q F, Wang X Y, Cai Y R, Li W, Yang G L, Zhai X C, Xu N, Hu X Q, Liu Y, Liu C, Wang D W, Qiu T S, Tian Y S, Duan L C, Li F, Meng X G, Liu C L, Tan G Y, Hu P, Wu R H and Song D M. 2023. GNOS-II on Fengyun-3 satellite series: exploration of multi-GNSS reflection signals for operational applications. *Remote Sensing*, 15(24): 5756 [DOI: 10.3390/rs15245756]
- Tao S L, Ao Z R, Wigneron J P, Saatchi S, Ciais P, Chave J, Le Toan T, Frison P L, Hu X M, Chen C, Fan L, Wang M J, Zhu J L, Zhao X, Li X J, Liu X Z, Su Y J, Hu T Y, Guo Q H, Wang Z H, Tang Z Y, Liu Y Y and Fang J Y. 2023. A global long-term, high-resolution satellite radar backscatter data record (1992 – 2022+): merging C-band ERS/ASCAT and Ku-band QSCAT. *Earth System Science Data*, 15(4): 1577-1596 [DOI: 10.5194/essd-15-1577-2023]
- Wagner W, Hahn S, Kidd R, Melzer T, Bartalis Z, Hasenauer S, Figa-Saldaña J, De Rosnay P, Jann A, Schneider S, Komma J, Kubu G, Brugger K, Aubrecht C, Züger J, Gangkofner U, Kienberger S, Brocca L, Wang Y, Blöschl G, Eitzinger J, Steinnocher K, Zeil P and Rubel F. 2013. The ASCAT soil moisture product: a review of its specifications, validation results, and emerging applications. *Meteorologische Zeitschrift*, 22(1): 5-33 [DOI: 10.1127/0941-2948/2013/0399]
- Wan W, Chen X W, Peng X F, Bai W H, Xia J M, Liang H, Zhang X M, Xiong P, Yang T, Cao Y C, Yin C, Zhao L M and Hong Y. 2016. Overview and outlook of GNSS remote sensing technology and applications. *Journal of Remote Sensing (in Chinese)*, 20(5): 858-874 (万玮, 陈秀万, 彭学峰, 白伟华, 夏俊明, 梁宏, 张学民, 熊攀, 杨婷, 曹云昌, 尹聪, 赵利民, 洪阳. 2016. GNSS遥感研究与应用进展和展望. *遥感学报*, 20(5): 858-874) [DOI: 10.11834/jrs.20166228]
- Wan W, Liu B J, Guo Z Z, Lu F, Niu X, Li H, Ji R, Cheng J, Li W, Chen X, Yang J and Bai Z. 2022. Initial evaluation of the first Chinese GNSS-R mission BuFeng-1 A/B for soil moisture estimation. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 19: 8017305 [DOI: 10.1109/LGRS.2021.3097003]
- Wang F, Li J Q, Yang D K, Zheng Q and Li F H. 2024. Wind speed retrieval using GNSS-R data from “Jilin-1” Kuanfu-01B satellite. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 49(1): 56-67 (王峰, 李建强, 杨东凯, 郑琦, 李峰辉. 2024. “吉林一号”宽幅01B卫星GNSS-R数据风速反演研究. *武汉大学学报(信息科学版)*, 49(1): 56-67) [DOI: 10.13203/j.whugis.20220720]
- Wang Z X, Stoffelen A, Zou J H, Lin W M, Verhoef A, Zhang Y, He Y J and Lin M S. 2020. Validation of new sea surface wind products from scatterometers onboard the HY-2B and MetOp-C satellites. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 58(6): 4387-4394 [DOI: 10.1109/TGRS.2019.2963690]
- Wernicke L J, Chew C C, Small E E and Das N N. 2022. Downscaling SMAP brightness temperatures to 3 km using CYGNSS reflectivity observations: factors that affect spatial heterogeneity. *Remote Sensing*, 14(20): 5262 [DOI: 10.3390/rs14205262]
- Wu X R, Du X Y, Yan F, Bai W H and Song S H. 2022. Investigation of potential of GNSS-R polarization: theoretical simulations. *Remote Sensing*, 14(15): 3700 [DOI: 10.3390/rs14153700]
- Yang S. 2018. System Simulation and Wind Field Retrieval Analysis for Spaceborne Full-Polarimetry Scatterometer. Beijing: National Marine Environmental Forecasting Center (杨晟. 2018. 星载全极化微波散射计系统仿真与风场反演分析. 北京: 国家海洋环境预报中心) [https://cdmd.cnki.com.cn/Article/CDMD-85304-1018160693.htm]
- Yang Y X, Xu T H and Xue S Q. 2017. Progresses and prospects in developing marine geodetic datum and marine navigation of China. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 46(1): 1-8 (杨元喜, 徐天河, 薛树强. 2017. 我国海洋大地测量基准与海洋导航技术研究进展与展望. *测绘学报*, 46(1): 1-8) [DOI: 10.11947/j.AGCS.

- 2017.20160519]
- Yi Y C, Johnson J T and Wang X C. 2019. On the estimation of wind speed diurnal cycles using simulated measurements of CYGNSS and ASCAT. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 16 (2): 168-172 [DOI: 10.1109/LGRS.2018.2872354]
- Zavorotny V U and Voronovich A G. 2000. Scattering of GPS signals from the ocean with wind remote sensing application. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 38(2): 951-964 [DOI: 10.1109/36.841977]
- Zhang B, Perrie W, Zhang J A, Uhlhorn E W and He Y J. 2014. High-resolution hurricane vector winds from C-band dual-polarization SAR observations. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 31(2): 272-286 [DOI: 10.1175/JTECH-D-13-00006.1]
- Zhang X H and Ma F J. 2019. Review of the development of LEO navigation-augmented GNSS. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 48(9): 1073-1087 (张小红, 马福建. 2019. 低轨导航增强GNSS发展综述. *测绘学报*, 48(9): 1073-1087) [DOI: 10.11947/j. AGCS.2019.20190176]
- Zhang Y, Zhao X Y, Yang S H, Han Y L, Hong Z H, Meng W, Chen Z S and Liu W L. 2024. Research on sea surface wind speed FM based on CYGNSS and HY-2B microwave scatterometer. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 62: 5800415 [DOI: 10.1109/TGRS.2024.3363705]
- Zhao K, Stoffelen A, Verspeek J, Verhoef A and Zhao C F. 2023. A conceptual rain effect model for Ku-band scatterometers. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 61: 4203609 [DOI: 10.1109/TGRS.2023.3264246]
- Zhao K, Zhao C F and Chen G. 2021. Evaluation of Chinese scatterometer ocean surface wind data: preliminary analysis. *Earth and Space Science*, 8(7): e2020EA001482 [DOI: 10.1029/2020EA001482]
- Zhao Z, Xia Z, Xu Z, Zhang T, Liu D, Shi H, Yue F and Peng T. 2020. A novel method of ship detection by combining space-borne SAR and GNSS-R//IET International Radar Conference (IET IRC 2020). [s.l.]: IET: 1045-1051 [DOI: 10.1049/icp.2021.0695]
- Zheng M W, Li X M and Sha J. 2019. Comparison of sea surface wind field measured by HY-2A scatterometer and WindSat in global oceans. *Journal of Oceanology and Limnology*, 37(1): 38-46 [DOI: 10.1007/s00343-019-7347-2]
- Zribi M, Gorraeb A and Baghdadi N. 2014. A new soil roughness parameter for the modelling of radar backscattering over bare soil. *Remote Sensing of Environment*, 152: 62-73 [DOI: 10.1016/j.rse.2014.05.009]

Spaceborne GNSS-R and scatterometers and their typical applications in ocean and land surfaces

WAN Xianci¹, WAN Wei¹, GUO Zhizhou¹, HU Xiuqing^{2,3,4}

1. Institute of Remote Sensing and GIS, School of Earth and Space Sciences, Peking University, Beijing 100871, China;

2. National Satellite Meteorological Center (National Center for Space Weather), China Meteorological Administration, Beijing 100081, China;

3. Innovation Center for FengYun Meteorological Satellite, Beijing 100081, China;

4. Key Laboratory of Radiometric Calibration and Validation for Environmental Satellites, China Meteorological Administration, Beijing 100081, China

Abstract: This study aims to explore the combined detection capabilities of spaceborne GNSS-R (Global Navigation Satellite System Reflectometry) and scatterometers for remote sensing applications. Specifically, we focus on the enhancement effect of integrating the two technologies, which differ in their scattering mechanisms and observation modes, on the accuracy of ocean and land surface parameter retrieval. Two experiments were conducted in two typical scenarios: ocean surface wind speed and soil moisture retrieval. GNSS-R, which provides unique forward-scattered signals with high temporal and spatial resolution, and scatterometer, which is an active microwave sensor that receives backward-scattered signals, were compared individually and in combination. The evaluation was based on their operational characteristics, particularly their complementary features, including forward versus backward scattering and active versus passive observation modes. The results show significant improvements when combining the two technologies. In near-real-time applications, the combination reduced the Root Mean Square Error (RMSE) of sea surface wind speed retrieval by at least 13% compared with single-source sensors. In large-scale applications, the high-precision benefits of the combination extended to a broader coverage area, which reduced the RMSE for soil moisture retrieval by at least 6%. This study demonstrates that integrating spaceborne GNSS-R and scatterometer data can substantially improve the accuracy of remote sensing measurements, specifically in near-real-time and large-scale scenarios. Future research should further optimize observation geometry, polarization combinations, and band selections to enhance retrieval methods for ocean and land surface parameters.

Key words: spaceborne GNSS-R, scatterometer, forward scattering, backward scattering, combined retrieval, ocean surface wind speed, soil moisture, DDM, reflectivity, NRCS

Supported by National Natural Science Foundation of China (No. 42471511); Beijing Nova Program (No. 20230484327, 20240484540); Fundamental Research Funds for the Central Universities, Peking University