



引文格式:贾燕,金双根,肖智宇,等.全球导航卫星系统反射测量土壤水分遥感:现状与机遇[J].武汉大学学报(信息科学版), 2023,48(11):1784-1799.DOI:10.13203/j.whugis.20230253

Citation: JIA Yan, JIN Shuanggen, XIAO Zhiyu, et al. Soil Moisture Remote Sensing Using Global Navigation Satellite System-Reflectometry: Current Status and Opportunity[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2023, 48(11): 1784-1799. DOI: 10.13203/j.whugis.20230253

全球导航卫星系统反射测量土壤水分遥感: 现状与机遇

贾 燕¹ 金双根^{2,3,4} 肖智宇¹ 严清贇³ 裴悦琨⁵

¹ 南京邮电大学地理与生物信息学院, 江苏 南京, 210023

² 河南理工大学测绘与国土信息工程学院, 河南 焦作, 454003

³ 南京信息工程大学遥感与测绘工程学院, 江苏 南京, 210044

⁴ 中国科学院上海天文台, 上海, 200030

⁵ 大连大学辽宁省北斗高精度位置服务技术工程实验室, 辽宁 大连, 116622

摘 要: 土壤水分作为全球水循环和能量循环的重要组成部分, 在地球水循环、能量平衡以及气候变化中具有不可或缺的作用。传统的土壤水分实地测量方法难以获得大尺度、长时序的土壤湿度空间分布, 且具有较高的测量成本。微波遥感信号源穿透能力强, 具有全天时、全天候的特点, 是获取长时序、大尺度土壤水分最有效的手段之一, 特别是L波段的全球导航卫星系统反射测量(global navigation satellite system-reflectometry, GNSS-R)技术, 其同时具有主动和被动微波遥感的优势, 在土壤水分的测量中备受关注。分析了国内外基于GNSS-R技术的土壤水分遥感研究的现状和进展, 系统地介绍了GNSS-R技术获取土壤水分的原理与特征, 分别从正演与反演两个角度详细说明了土壤水分测量的具体方法步骤, 给出了主要困难与亟待解决的关键问题。以最新的基于旋风全球导航卫星系统(cyclone GNSS, CYGNSS)星载反演为主要介绍对象, 深入阐述了基于CYGNSS数据反演土壤水分的理论模型与方法, 并简要分析GNSS-R土壤水分遥感发展面临的机遇与挑战, 以期为中国今后地基、空基和星载GNSS-R土壤水分遥感观测和应用提供参考和建议。

关键词: 全球导航卫星系统反射测量法(GNSS-R); 土壤水分; 旋风全球导航卫星系统(CYGNSS)

中图分类号: P237; TP7

文献标识码: A

收稿日期: 2023-07-14

DOI: 10.13203/j.whugis.20230253

文章编号: 1671-8860(2023)11-1784-16

Soil Moisture Remote Sensing Using Global Navigation Satellite System-Reflectometry: Current Status and Opportunity

JIA Yan¹ JIN Shuanggen^{2,3,4} XIAO Zhiyu¹ YAN Qingyun³ PEI Yuekun⁵

¹ School of Geographic and Biologic Information, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210023, China

² School of Surveying and Land Information Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454003, China

³ School of Remote Sensing and Geomatics Engineering, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China

⁴ Shanghai Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200030, China

⁵ Dalian University Liaoning BeiDou High Precision Location Service Technology Engineering Laboratory, Dalian 116622, China

Abstract: Soil moisture (SM), as an important component of global water and energy cycles, plays an essential role in the Earth's water cycle, energy balance, and climate change. Traditional field measurement methods for SM are difficult to obtain the spatial distribution of large-scale and long-term SM and have high measurement costs. Microwave remote sensing, with its all-weather and penetrating capabilities, is one of the most effective means of obtaining soil moisture at a large scale and long-term manner, particularly the L-band global navigation satellite system-reflectometry (GNSS-R) technology with advantages of both active and passive microwave remote sensing, which has been paying a lot of attention in SM measure-

基金项目: 国家自然科学基金(42001375, 42001362)。

第一作者: 贾燕, 博士, 副教授, 研究方向为GNSS-R遥感技术与应用。jiayan@njupt.edu.cn

通讯作者: 金双根, 博士, 教授。sgjin@hpu.edu.cn

ments. Based on the investigation and analysis of domestic and international progress, this paper systematically introduces the principle and characteristics of GNSS-R technology for obtaining SM, and gives the specific steps of SM measurement from both forward and backward retrieval aspects, the main faced difficulties, and key issues to be solved. Taking the latest cyclone GNSS (CYGNSS) satellite estimation as the main part, the theoretical model and method based on CYGNSS SM estimation are deeply expounded. In addition, the opportunities and challenges in the development of GNSS-R SM remote sensing are briefly analyzed, aiming to provide a reference for future ground-based, airborne, and satellite-based GNSS-R SM remote sensing observation and application in China.

Key words: global navigation satellite system-reflectometry(GNSS-R); soil moisture; cyclone global navigation satellite system(CYGNSS)

土壤湿度是水循环的关键组成成分,它直接影响水蒸发、浸润、流失的多少以及植物水分的吸收,对农业、生态、野生动植物和公众健康都具有非常重要的意义^[1]。对土壤湿度的精确测量有助于研究陆地与大气间的能量平衡,有助于洪水、滑坡等灾害的预报与处理,有助于精细农业的发展,并因此关系着国计民生。但是,通过实地测量获取较大尺度下的土壤水分通常是不切实际的。微波遥感具有全天时、全天候和穿透能力强的特点,是在大尺度长时间序列上获取土壤水分最有效的手段之一。现有的微波遥感系统,如散射计和高度计等都能够有效地穿透大气,并在各种天气条件下进行较大尺度的测量^[2]。但由于设备的成本高、时空分辨率不高、数据共享等因素在科学研究中还有着一些困扰。

伴随着全球导航卫星系统(global navigation satellite system, GNSS)的蓬勃发展,GNSS 信号已经不单单被用于导航定位。利用卫星导航系统的反射信号进行遥感测量已经获得了广泛关注。卫星导航系统的反射测量(global navigation satellite system -reflectometry, GNSS-R)技术概念最初于 20 世纪 80 年代被提出并被认为是可应用于海态监测^[3]。该技术可被看作一个收发分置的双/多基地 L 波段雷达系统,兼具主动与被动遥感技术的优点,被随后众多的科研机构重视并加以研究。1993 年,欧洲航天局 Martin-Neira^[4]和 Garrison 等^[5]科学家将此技术应用于海面高度测量和海面粗糙度测量中。进入 21 世纪以来,对 GNSS-R 各应用的研究可谓多点开花。既有各种软硬件接收机的开发设计^[6-7],又有众多科研机构进行的理论与实验研究。实验平台有陆面、气球^[8]、飞机^[9]、低轨卫星^[10-12]等,涵盖的应用研究包括海风场及海面粗糙度、海面高度、海水盐度、雪深、冰层结构以及土壤湿度和植被高度等等。

相较其他测量手段,GNSS-R 技术具有低成

本、低功耗的特点,并享有众多免费且不间断的信号源(GNSS 卫星)。其接收机本身可以利用直接信号实现定位定时,而且信号所在的 L 波段具有在大气层中穿透力强、衰减小等优点,且对土壤湿度信息非常敏感,使得 GNSS-R 在陆地表面的应用集中在土壤水分估计方面的研究上^[13]。除此以外,该技术能提供很强的时空分辨率,并能接收多角度、多极化的反射信号,为信号处理与计算方法研究提供了多种可能。目前,全球有超过 100 颗导航卫星可以免费提供持续、稳定的高质量 GNSS-R 测量信号,为土壤湿度的密集测量提供了前所未有的机遇。

本文分析了国内外基于 GNSS-R 技术的土壤水分遥感研究的现状和进展,系统性地介绍了 GNSS-R 技术获取土壤水分的原理与特征,以及从正演与反演两个角度详细介绍了土壤水分测量的具体方法步骤,并给出了最新的旋风卫星导航系统(cyclone GNSS, CYGNSS)星载 GNSS-R 数据反演土壤水分的理论模型、方法和进展,讨论了 GNSS-R 土壤水分遥感发展面临的机遇与挑战。

1 GNSS-R 正演土壤水分方法

1.1 GNSS-R 土壤水分基本观测模式

地表观测对象具有不同的相对介电常数,会使反射信号呈现出不同的波形,进而影响反射信号的振幅、相位和频率等信息。土壤含水量与土壤的介电常数呈正相关,即土壤含水量高,其介电常数值也较高^[13]。介电常数的变化导致接收的地表反射信号反射率的变化。另外,地表的植被覆盖和粗糙度的变化会影响或者使土壤水分的正演过程变得较为复杂^[14-17],因此,最简单的地基实验往往采取较为平整和开阔的裸地展开。从这一思路出发,基于 GNSS-R 技术的土壤水分

正演观测模式大致分为以下三种策略:

1)第一种利用全球定位系统(global positioning system, GPS)信号的多径反射效应,也称为GNSS-IR (GNSS-interferometric-reflectometry) 技术。代表性的研究成果主要来自科罗拉多大学的Larson教授团队。此方法利用指向天顶的地基右旋圆极化(right hand circular polarization, RHCP)天线同时接收来自GPS的直接信号和造成多径效应的陆面反射信号(见图1(a))。反射信号相对直接信号相位的延迟使总的接收信号的幅度会随卫星仰角 θ 的正弦($\sin\theta$)呈现有规律的变化,而土壤湿度信息会反映在接收信号的信噪比中^[18-23]。

2016年,Larson^[24]在新墨西哥州东部大范围区域架设GNSS接收机,组建PBO (plate boundary observatory)土壤水分监测网络,获取了大尺度空间下的土壤水分时间变化序列。结果显示土壤水分的变化与降水变化呈强相关性。通过两年间超过10个站点的持续实地监测验证了其土壤水分产品的精确性,获取的土壤水分测量结果均方根误差(root mean squared error, RMSE)为 $0.039 \text{ m}^3/\text{m}^3$ 。目前,来自PBO土壤水分网络的土壤水分数据主要用于验证SMAP(soil moisture active and passive)卫星数据。

Zavorotny等^[25]从理论角度模拟仿真并解释了GNSS反射信号的形成机理以及其中存在的数学模型。Vey等^[26]在南非萨瑟兰站附近获取GPS反射信号信噪比数据并计算得到2008—2014年期间当地土壤水分的变化值。基于GNSS-R反射测量得到的土壤含水量与时域反射传感器的现场观测值呈高度相关性,皮尔逊相关系数 R 为0.8, RMSE为 $0.05 \text{ m}^3/\text{m}^3$,误差较为明显。对于较长时序的土壤水分观测,其计算的误差多来自于GNSS设备的更换,例如GNSS天线的更换会导致偏差大于 $0.1 \text{ m}^3/\text{m}^3$ 。Han等^[27]提出了一种信噪比(signal to noise ratio, SNR)半经验模型,该模型旨在从SNR数据中提取其频率和相位信息,并重建直接和反射信号。与其他模型^[18, 28]相比,该模型可以在几乎不需要先验知识的情况下提高拟合质量,并且可以从重建信号中获取土壤介电常数。

上述研究多是利用GPS信号的多路径效应来估计土壤湿度。Yang等^[28]利用北斗导航卫星系统(BeiDou navigation satellite system, BDS)信号进行土壤水分的计算。结果显示BDS B1和

B2波段都能够很好地反映土壤湿度的波动情况。Zhang等^[29]在北京张西庄一个小麦农场架设GNSS信号接收设备,收集了包括BDS B1/B2/B3和GPS L1/L2多种SNR数据,并观测和计算了小麦生长和土壤水分变化情况。与实地测量数据结果对比,GPS L1/L2和BDS B1/B2/B3不同波段获得的RMSE分别为0.039、0.035、0.027、0.022、 $0.021 \text{ m}^3/\text{m}^3$,反映出GNSS-IR技术在监测农田土壤水分和植被生长方面具有较大的优势。另外,BDS有望提供和协助生产全球高时空分辨率土壤湿度产品,在GNSS-R遥感监测的其他相关应用中,尚有巨大的潜力。

2)第二种为干涉模式技术(interference pattern technique, IPT),此技术的主要创造与研究者是西班牙加泰罗尼亚理工大学Camps教授团队。此方式通常采用一个水平朝向的垂直极化(vertical polarization, VP)天线(见图1(b)),直接信号与反射信号产生的干涉会造成总的接收功率的波动,而幅度波动最小的点就对应着布鲁斯特极化角的位置,并以此通过建立模型进行地表参数获取^[30]。基于此IPT极化干涉理论,Camps团队设计了一种新的L波段反射计仪器(SMIGOL反射计),可利用GNSS干涉模式获取地形、土壤湿度和植被高度等参数^[30]。理论情况下,IPT技术可以同时应用于VP分量和水平极化(horizontal polarization, HP)分量。于是,该团队在2014年又增加了HP极化天线,提出了一种基于跟踪VP和HP干涉图间相位差的测量技术^[31],并更新计算模型以提高布鲁斯特角确定的精度,进一步提高土壤水分测量精度。通过与最小Notch检测算法相比,其计算结果的变化更加平滑,验证了该方法的有效性。但由于IPT技术依赖于反射信号的相干散射,因此待测反射地表必须满足光滑表面的瑞利准则。

除了上述提到的VP和HP线性极化方式,Mironov等^[32]提出用RHCP方式接收GNSS信号(见图1(b)),分别记录GNSS接收机在耕地上方、草地和树冠下方不同位置接收的信号变化。结果表明,RHCP的GNSS测量干涉模式下接收的GNSS反射信号与土壤湿度和地表粗糙度弱相关,因此被用于树木冠层电磁波衰减度理论模型的计算,这是GNSS-IPT干涉测量技术中RHCP的微弱相关性首次被用于测量森林冠层的衰减系数,为GNSS-IPT干涉测量技术的应用提供了新的思路。

3)第三种双基雷达法也是最为常用的方法。该方法常用于飞机、卫星等平台来实现对地表的移动遥感。通常使用两个不同的天线分别接收 GNSS 的直射信号和地表反射信号,并测量信号功率。由于反射率是土壤介电常数、仰角和地表粗糙度的函数,通过正确选择特定地表散射模型^[33],可以计算介电常数。之后,从微波波段(尤其是 L 波段)介电常数来计算土壤水分已经被广泛研究并建立了若干公认的理论 and 经验模型^[34-37]。不过,此类模型的输入大都需提供土壤的质地信息,例如粘土和沙子的百分比含量。在获取了目标观测点的介电常数后配合土壤质地信息,可计算出土壤含水量。

根据天线的不同配置策略,基于双基雷达法获取土壤介电常数又可分为 3 种观测方式:

(1)接收直射信号的 RHCP 天线+接收反射信号的左旋圆极化(left hand circular polarization, LHCP)天线的观测模式(见图 1(c)),即一个指向天顶的 RHCP 天线和一个朝向地面的 LHCP 天线。从双基雷达模式的建模理论和观测量来看,该模式计算土壤水分时侧重于接收高于一定仰角的 GNSS 反射信号^[38]。此方法通过分析伪随机码产生的延迟多普勒图(delay Doppler map, DDM),计算 GNSS 直射信号和地面反射信号的功率,进而结合电磁波散射理论,得到地表参数信息。2000 年,美国国家航天局率先展开了一系列经典的、基于双基雷达模式下的土壤水分遥感飞行实验(SMEX02-03)。整个系统有效地测量到了地表土壤水分含量的变化,会引起接收信号功率的改变^[38],验证了反射信号强度与土壤水分含量的强相关性。为了提高土壤水分估计的精度,后续的土壤水分遥感实验中利用水体镜面反射率为 0.63 来校正反演数据。实验结果表明,接收到的地面反射率可以推断出预期的介电常数与土壤含水量^[9]。许多国内学者利用 SMEX02 数据进行了土壤水分计算^[39-40],进一步证实了 GNSS-R 土壤水分测量在双基模式下的可行性^[17,41-43]。因此,利用双基模式下接收的信号功率等信息,结合双基雷达方程,推导土壤反射率并求解介电常数。由于直达波的信号相对比较稳定,双基雷达模式中反射率的变化主要由反射波决定。因此,通过双基雷达模式下的单个反射天线,即单基模式,结合传感器相关参数,也可获得土壤介电常数信息^[44]。

(2)接收直射信号的 RHCP 天线+两个接收

反射信号的(LHCP 和 RHCP)天线的观测模式^[45-47]。通过这种配置(见图 1(d)),可以获取反射信号中 RHCP 极化和 LHCP 交叉极化分量。而反射信号中的左旋(left hand, LH)和右旋(right hand, RH)这两个反射率的比值被证实与土壤水分有很好的相关性,与地表粗糙度无关^[45,47]。

(3)类似于(1)中描述的模式配置,但是所采用天线的极化方式不同,具体为接收直射和反射信号的天线均为 HP 和 VP(见图 1(e))。这种接收策略尚未有规模性的实地试验,仅有一些模拟研究^[48-49]。研究成果表明,HP 的反射与直射信号功率之比和 VP 的相同比值取决于水平偏振和垂直偏振的土壤反射率以及地表粗糙度。如果考虑垂直和水平两个正交极化间的功率比,地表粗糙度的影响被抵消。这一结论验证了反射率极化比的最终表达式在不同的散射模型下是成立的,这也意味着这一观测方法可以适用于更大范围的地表。

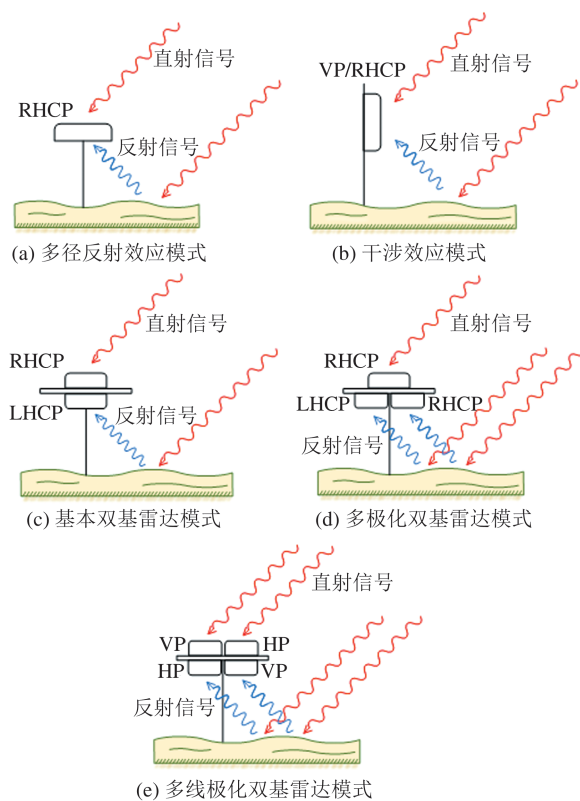


图 1 几种 GNSS-R 基本观测模式

Fig. 1 GNSS-R Basic Observation Models

1.2 顾及植被和地表粗糙度的土壤水分正演

在土壤水分的相关研究中,实际地表粗糙度和植被覆盖情况一直是阻碍高精度土壤水分发展的主要因素,计算自然地表的微波散射与辐射特性的理论模型主要包括两个方面:一是针对裸

露地表的理论模型,研究多是基于多波段、多时相、多极化雷达数据的一些传统理论模型^[34,50-51];另一个是针对植被覆盖地表的一些理论模型^[34,52]。由于植被生长情况非常复杂,单独一个模型难以很好地模拟各种不同的植被类型,并且一个模型也难以模拟同一种植被在不同生长阶段的微波散射^[39]。

针对这一固有问题,结合 GNSS-R 遥感的特点,学者们对如何消除植被和粗糙度影响方面进行了大量研究。Zavorotny 和 Voronovich^[45]提出在粗糙度的斜率与入射角和散射角相比较小的情况下,反射波中两个反射分量(LH 和 RH)的极化功率比对土壤水分是敏感的,且与表面粗糙度因子无关。Egido 等^[47]在意大利开展了多极化 GNSS-R 地基与空基试验,在中低粗糙度(≤ 3 cm)的地表情况下,双极化反射信号极化比值对地表粗糙度并不敏感,适合用于土壤水分的反演;但当粗糙度大于 3 cm 时,非相干散射这一不利因素对土壤水分的反演有较大影响。因此,利用多极化方法计算土壤水分在对地表粗糙度的抑制上具有一定的局限性。在地表植被研究方面,2016 年,Carreno-Luengo 等^[53]利用热气球开展了对大规模森林地表土壤水分测量实验,调查了反射极化分量对土壤水分和植被生物量的敏感度,并获得了目标区域的极化比功率图。此研究结果中的极化比功率值在 Jia 和 Savi^[54]采用四通道样机进行多极化空基遥感实验中得到了进一步验证(见图 2),并利用时间序列统计特性去除散射信号中非相干分量的影响,结果表明反射信号中的 RHCP 分量对植被生物量敏感。但是,利用单站雷达对森林生物量测量时很容易出现饱和^[15, 47, 55],也存在一定的局限性。由此可见,克服实际地表植被和粗糙度的影响,一方面理论模型适用性有限,另一方面,对于抑制地表粗糙度的影响和测量植被量也较为困难。对于顾及实际地表因素的土壤水分获取方法的建立与推导有待于加强。

2 GNSS-R 反演土壤水分方法

GNSS-R 接收机可以搭载在不同的平台上,例如之前介绍的地面站点^[56]、图 2 中介绍的机载^[9]甚至无人机^[57]。近年来,由于大尺度空间和持续观测的需求,使得利用搭载有 GNSS-R 接收机的卫星星座接收数据,再通过参考土壤水分建模来反演土壤水分估计值的方法受到广泛认可。

最初,星载 GNSS-R 任务都是为监测和观测海洋而设计的,但是接收到的来自陆地的散射信号引起了学者们对陆表应用的关注,如土壤湿度估计^[58]。本节主要介绍技术演示卫星(TechDemo-Sat, TDS)和 CYGNSS 这两个重要的星载 GNSS-R 星座任务的研究发展情况及其技术特征。



图 2 多极化 GNSS-R 接收机进行飞行遥感实验^[54]

Fig. 2 Polarimetric GNSS-R Prototype for Airborne Experiment^[54]

2.1 基于 TDS 星座数据反演土壤水分

2014 年 7 月, Surrey Satellite 技术有限公司将 TDS-1 卫星送入高度 825 km 的 98.8° 倾斜轨道^[59]。TDS 卫星可接收 GPS L1 频带(频率为 1.574 2 GHz)的反射信号。然而,数据采集是一项艰巨的任务,因为这个卫星星座在 8 天中,只有 2 天的运行状态是正常的。因此,从 TDS-1 数据的时间序列分析中获得的结果在某种程度上是不太可靠的。最终,这个卫星星座在 2018 年 12 月后便被停止了。尽管如此,对于 TDS 卫星星座获取的地表反射信号数据,也有一些研究成果。

Chew 等^[14]使用 TDS-1 反射信号中的 DDM 信息计算出反射信号的有效功率,并与地表粗糙度等地表参数以及海洋盐度卫星(soil moisture and ocean salinity, SMOS)提供的土壤水分等数据进行对比。结果表明 TDS-1 卫星接收到的反射信号可以探测地表土壤湿度的变化,并得到了南美、印度和巴基斯坦等地区的反射率时空变化情况。结果显示,除了介电常数或土壤湿度很高的内陆水体之外,有效反射功率随着介电常数和土壤湿度的增大而增大,体现了利用 TDS-1 数据观测土壤湿度的可行性。然而,随着植被高度和地表高程的增加, TDS-1 有效反射功率会下降,地形变化所带来的负面影响大于植被高度。植被、地形和内陆水体都会对土壤水分的测量引入误差,对这些影响因素

进行校正是获得准确的土壤水分的有效措施。

之后, Camps 等^[59]使用 TDS-1 卫星 2014—2017 年全球的 DDM 观测数据, 对地形等影响因子进行质量控制, 并对天线方向图、距离因子、植被不透明度和入射角进行补偿。通过拟合 TDS-1 的反射率和 SMOS 的参考土壤水分来评估反射率对土壤水分的灵敏度。研究发现, 地面实测数据和卫星数据由于空间尺度不同会产生差异, 反射率对土壤的敏感度的最高值在入射角 30° 时达到约 0.09 dB/%。TDS-1 信噪比与 SMOS 土壤水分变化具有良好的一致性。

TDS-1 星座停止运行之后, 新 GNSS-R 星座任务 (CYGNSS) 的启动使学者们研究的重点有了新的变化。

2.2 基于 CYGNSS 星座数据反演土壤水分

CYGNSS 星座由 8 颗微小卫星组成, 于 2016

年 12 月由美国国家航空航天局发射到 580 km、35° 倾斜的赤道轨道。该星座任务最初是为监测热带气旋而设计的, 覆盖了从北纬 38° 到南纬 38° 的所有地区 (见图 3)^[60-61]。该任务的每颗卫星最多可同时接收 4 个信号, 作为一种多接收双站雷达工作。通过这种方式, 可以在单个时间点获取 8 颗卫星的数据, 来对地球表面进行 32 个不同点位的观测, 进而得到 DDM 和双基雷达散射截面 (bistatic radar cross-section, BRCS) 等元数据, 如图 4 所示。从这一点可以反映出 CYGNSS 星座任务的设计具有较高的时间分辨率 (海洋平均 7.2 h, 陆地平均 1~2 d)^[12]。对于镜面反射 (菲涅耳区) 和漫反射区域 (闪耀区), 该星座的空间分辨率理论上分别从 0.5 km 到 25 km 不等^[62]。自 2019 年以来, CYGNSS 的采样时间从 1 s 变为 0.5 s, 常用的最小空间分辨率为 3.5 km×0.5 km^[63]。

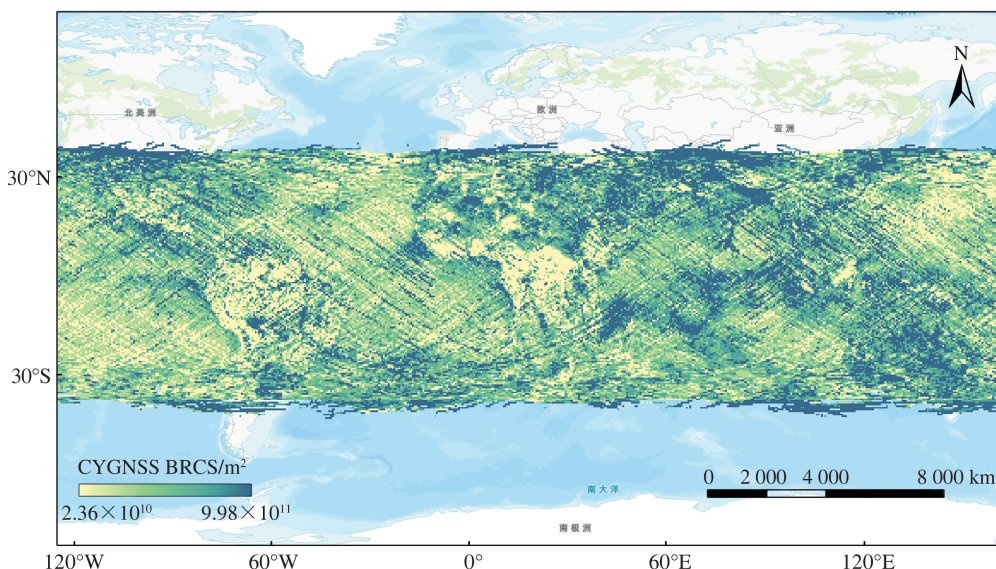


图 3 2018 年 1 月 1 日—3 日 CYGNSS 卫星系统的轨道数据中 BRCS 值

Fig. 3 BRCS Values of CYGNSS Satellites from Jan. 1 to Jan. 3, 2018

DDM 是覆盖镜面反射点 (specular point, SP) 及其周围区域的一个二维图像, 是将反射信号与直接信号进行相关运算后获得的相对于 SP 的不同延迟和多普勒频移对的结果 (如图 4 所示)。

2.2.1 回归分析法

利用 CYGNSS 数据反演土壤水分的相关研究中, 大多以 SMAP 星座任务发布的土壤水分作为参考以及建模依据。在建模方法方面, Chew 和 Small^[64]通过线性回归方法发现并解释了 CYGNSS 反射率与 SMAP 的土壤水分变化的相关性, 无偏均方根误差 (unbiased root mean square error, ubRMSE) 为 0.045 cm³/cm³。2019

年, Zribi 等^[65]采用 ASCAT (advanced scatterometer, C 波段微波散射计) 现场测量土壤水分, 并对其提出的土壤水分反演算法进行了评估, 证实了该反演算法的有效性。Chew 和 Small^[63]提出了一个基于 CYGNSS 数据的每日土壤水分产品 (UCAR/CU), 该产品的空间分辨率为 36 km。利用 SMAP 土壤水分对其进行验证, 得到的 ubRMSE 为 0.049 cm³/cm³, 相关系数为 0.4。

此外, Yang 等^[66]基于辐射传输物理模型, 耦合 CYGNSS 地表反射率和 SMAP 亮温估计值, 推导出植被光学深度 (τ) 和表面粗糙度参数 (h) 的组合参数。土壤水分反演精度结果 RMSE 为

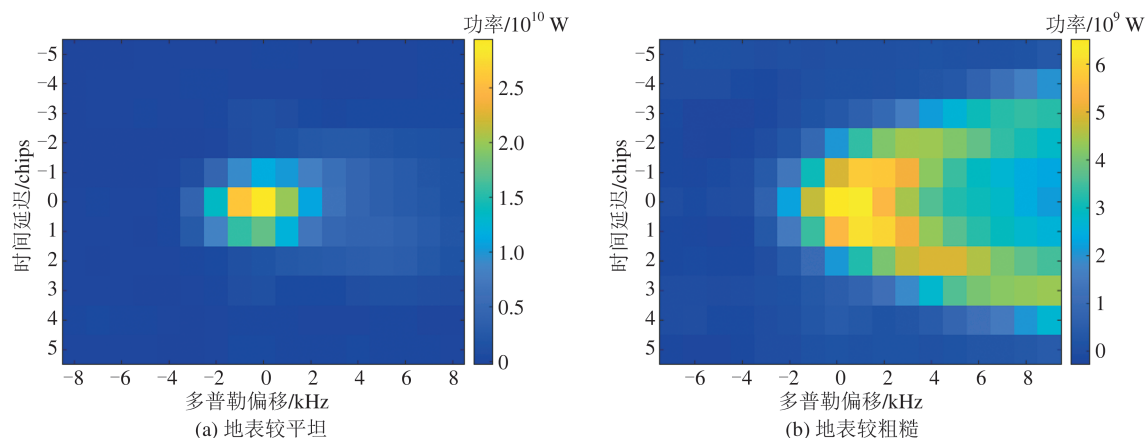


图4 不同地表条件下的DDM图像

Fig. 4 DDM Figures from Different Land Surfaces

0.051 cm³/cm³。Al-Khaldi等^[67]借助SMAP土壤水分的最大值和最小值来限制CYGNSS反演结果的范围,得到的总RMSE为0.04 cm³/cm³。然而,CYGNSS相对于SMAP的时间分辨率较高,对于缺乏对应参考SMAP数据的时间点,采用相邻时间点的SMAP土壤水分进行近似计算,极大地损失了CYGNSS反演的精确度。

Kim等^[68]使用CYGNSS和SMAP土壤湿度观测数据,将地表土壤水分同化到Noah-MP(Noah-multi-parameterization)陆表模型中。通过多种验证方式表明,可以通过以往的观测值填补每日土壤湿度观测结果的空白。通过CYGNSS数据与SMAP土壤水分观测数据的协同与同化过程,土壤水分估计结果均方误差改善了61.3%。同时,茂密的植被区域会向陆表模型传递错误的土壤水分信息,在这些区域进行同化和反演土壤水分会降低陆表模型的性能。

2.2.2 人工智能方法

机器学习(machine learning, ML)和深度学习是对线性或非线性的输入和输出特征之间的关系进行研究和建模的有效方法。因此,学者们通过人工智能方法寻找并建立GNSS-R反演的土壤水分与影响因素(如入射角、植被和粗糙度)之间的模型关系。例如,最流行的监督回归ML(如支持向量机(support vector machine, SVM)、决策树、随机森林(random forest, RF))和神经网络已被用于提高GNSS-R土壤湿度反演精度^[69-70],以及使用极限梯度提升(extreme gradient boosting, XGBoost)法对单基雷达法中部分输入变量与土壤水分的关系进行了相关性分析^[71]。其中,Eroglu等^[62]提出了一种基于人工神经网络(artificial neural networks, ANN)的土壤水分反演

方法,ANN的输入特征包括CYGNSS反射率以及其他几个辅助数据,辅助数据数量较多,反演效果较好。Yang等^[72]使用反向传播(back propagation, BP)人工神经网络构建模型来检索目标位置的月度土壤水分估计值,并同时评估了CYGNSS和TDS卫星星座的土壤水分反演性能。同年,Santi等^[73]通过多层感知器人工神经网络算法来确定土壤水分和植被光学厚度(vegetation optical depth, VOD)。使用ANN算法得到的VOD和土壤水分估计值与SMAP提供的参考值具有良好的一致性($R_{VOD}=0.924$; $R_{\text{土壤水分}}=0.85$),证明了该算法在确定VOD和土壤水分参数方面的潜力。后续的工作中,Senyurek等^[74]采用多种ML方法,如ANN、SVM和RF来进行对比实验。从实验结果来看,利用RF算法估计土壤水分效果最好,平均ubRMSE达到0.047 cm³/cm³。其他方法受数据质量的影响很大。2020年,Yan等^[75]提出了增长回归树(boosted regression trees, BRT)模型方法来反演土壤水分,以CYGNSS数据产品、地理位置数据和相关气候类型信息为输入参数,反演结果的RMSE为0.05 cm³/cm³。

在全球范围的大尺度空间研究方面,Jia等^[76]把ML方法与预分类策略相结合用于反演土壤湿度,按照全球地表不同种类来构建估算子模型。结果表明,在预分类策略下,不同的ML反演算法精度都有了显著提高,预分类策略对土壤水分反演具有积极的作用。之后,Jia等^[77]把地表分类当作输入参数,采用地表参数数字化的策略并结合XGBoost算法来估计全球土壤水分,该模型所需要的输入变量较少,预测精度也较好,反演全球土壤水分的平均ubRMSE为0.041 cm³/cm³。相似的,Lei等^[78]基于CYGNSS数据提供的反射率

等辅助数据集,以 SMAP 发布的土壤水分作为参考值,使用 RF 方法实现了 9 km 空间分辨率下的全球土壤水分估计,反演结果 ubRMSE 达到 $0.054\ 3\ \text{cm}^3/\text{cm}^3$ 。结果表明,基于分类回归树的机器学习方法较为适合 CYGNSS 土壤水分的反演。

目前,CYGNSS 土壤水分建模的参考数据通常采用的是 SMAP 土壤水分最邻近时间点的近似值。另外,在反演算法的改进上,虽出现了利用卷积神经网络(convolutional neural network, CNN)的深度学习方法进行土壤水分回归的应用^[79],但由于其输入辅助数据较多,使得反演模型变得非常复杂。

2.3 星载反演地表土壤水分的影响因子

如之前所述,植被和地表粗糙度是影响 GNSS-R 土壤水分估算性能和精度的主要因素。本节将从星载 CYGNSS 反演研究的角度来展示这些因素是如何影响土壤水分反演的结果,以及为了消除这些影响提出的新理论算法。

Kim 和 Venkat^[80]提出用 CYGNSS 的相对信噪比(relative signal to noise ratio, rSNR)反演土壤水分,通过组合 CYGNSS 的 rSNR 与 SMAP 的土壤水分来推导出逐日土壤水分估计量。在中密度植被区,CYGNSS 反演值与 SMAP 参考土壤水分的相关系数大于 0.7,但在较高密度植被区,相关系数降至 0.68。Carreno-Luengo 等^[81]研究了不同粗糙度和土壤湿度条件下 CYGNSS 反射率对卫星仰角的依赖性。研究结果表明,仰角从 55° 变化至 25° 时反射率增加,从 85° 变化至 55° 时反射率降低。前一种情况下,反射信号中相干散射占主导地位,而对于后一种情况则是相反的。此外,反射率随着土壤水分的增加而增加;然而,随着地表粗糙度的增大,这种灵敏度会降低。反射率对土壤水分的敏感性与卫星仰角和地表粗糙度有着紧密的关系。

Clarizia 等^[82]提出了一种基于反射率-植被-粗糙度的算法模型,利用处理 CYGNSS 数据得到的地表反射率、SMAP 数据中发布的粗糙度系数和植被不透明度进行线性回归,得出每日土壤水分估算值的 RMSE 为 $0.07\ \text{cm}^3/\text{cm}^3$ 。Yan 等^[83]采用了类似的方法,但特别之处是利用了 CYGNSS 反射率的统计特性来分析地表粗糙度的影响,土壤水分反演结果 RMSE 为 $0.07\ \text{cm}^3/\text{cm}^3$,土壤水分相关系数 R 为 0.80。Wan 等^[84]采取两步法计算土壤水分,使用落在平静且足够大的水体表面的

镜面反射点的反射率来对陆地表面的反射率进行校正。其次,使用 SMAP 植被含水量(vegetation water content, VWC)参数来削弱植被覆盖度对地表反射率的影响。通过与 SMAP 产品和现场测量数据相比较,其方法显著提高了 CYGNSS 反射率与 SMAP 以及实测土壤水分间的相关性。

Calabia 等^[85]通过菲涅耳反射系数估计介电常数的正演方式获取土壤含水量,并通过使用冰、云和陆地高程卫星(ICESat-2)以及 SMAP 产品数据,有效考虑了实际裸露土壤粗糙度和植被光学厚度在土壤水分反演中的影响。通过 SMAP 土壤水分产品对结果进行验证,在中国东部地区共 4 568 个测试点中相关系数 R 为 0.6, RMSE 为 0.05。Yueh 等^[86]提出了一个半经验模型,通过分析 GNSS-R 菲涅耳反射系数等地表观测值和参考土壤水分和 VWC 的相关性,建立经验模型并确定模型系数。结果表明,CYGNSS 有效反射率对土壤水分变化的敏感性与 Mironov 等^[35]提出的土壤介电常数模型提供的菲涅耳反射率变化一致。Tang 和 Yan^[87]利用其他多种辅助数据,采用 SVM 对固定站点的土壤水分进行反演,并评估了不同地形和不同质量的 DDM 对反演结果的影响。表 1 总结了利用星载 CYGNSS 数据反演土壤水分的相关研究,以上反演方法均需要依赖获取土壤水分的先验知识或一定量的辅助数据。

如本节所述,一些学者试图通过使用半经验方法或提出新的模型算法来解释干扰因素的影响。同时,其他一些学者致力于使用机器学习和深度学习方法来研究和建模干扰因素(如植被和粗糙度)、GNSS-R 观测值和土壤湿度之间可能的(非线性)关系,都取得了较为显著的研究成果。

3 GNSS-R 双基雷达土壤水分测量理论算法

GNSS-R 接收机接收到的总反射功率(P_r^s)是不同比例的相干反射(P_{rl}^{coh})和非相干散射(P_{rl}^{incoh})的总和,这个值取决于信号到达散射表面的介电常数、几何特性以及入射和出射电磁辐射的方向^[86]。计算式如下:

$$P_r^s = P_{rl}^{\text{coh}} + P_{rl}^{\text{incoh}} \quad (1)$$

其中,双基雷达接收信号的相干分量的计算可以写成:

表1 基于CYGNSS数据反演土壤水分

Tab. 1 Soil Moisture Estimation Based on CYGNSS Data

来源	时间跨度	空间覆盖	参考土壤水分	所用算法	需要辅助数据数量
Eroglu等 ^[62]	2年	区域性	土壤水分网络	ANN	5
Chew和Small ^[63]	3年	全球*	SMAP	回归	2
Chew和Small ^[64]	1年	全球*	SMAP	回归	2
Zribi等 ^[65]	20个月	区域性	土壤水分网络	半经验模型	2
Yang等 ^[66]	2年	全球*	SMAP和土壤水分网络	物理模型	4
Al-Khalidi等 ^[67]	6个月	全球*	SMAP	物理模型	1
Kim等 ^[68]	4年	全球*	SMAP	物理模型	1
Yang等 ^[72]	1年	区域性	SMAP	BP-ANN	6
Santi等 ^[73]	8个月	全球*	SMAP	ANN	4
Senyurek等 ^[74]	3年	全球*	土壤水分网络	RF	5~8
Yan等 ^[75]	1年	区域性	土壤水分网络	BRT	4
Jia等 ^[76]	2年	全球*	SMAP和土壤水分网络	XGBoost	2
Jia等 ^[77]	1年	全球*	SMAP	XGBoost	1
Lei等 ^[78]	2年	全球*	SMAP	RF	3
Nabi等 ^[79]	4年	区域性	土壤水分网络	CNN	8
Kim和Venkat ^[80]	1年	区域性	SMAP	回归	1
Clarizia等 ^[82]	5个月	全球*	SMAP	物理模型,回归	2
Yan等 ^[83]	1年	全球*	SMAP	回归	1
Wan等 ^[84]	3年	区域性	SMAP和土壤水分网络	回归	2
Calabia等 ^[85]	1个月	区域性	SMAP	物理模型	2
Yueh等 ^[86]	4年	全球*	SMAP	半经验模型	1
Tang和Yan ^[87]	8个月	区域性	土壤水分网络	SVM	6
Senyurek等 ^[88]	3年	区域性	土壤水分网络	ANN, RF, SVM	5~8

注:*表示不包括海拔超过600 m的地区。

$$P_{RL}^{coh} = \left(\frac{\lambda}{4\pi}\right)^2 \frac{P_t G_t G_r}{(R_r + R_t)^2} \Gamma_{RL}(\theta) \tag{2}$$

式中,λ是波长;P_t是发射的GNSS信号的峰值功率;G_t是发射天线的增益;G_r是接收天线的增益;R_r为镜面反射点与GNSS-R接收机之间的距离;R_t为镜面反射点与GNSS发射机之间的距离;Γ_{RL}(θ)为镜面反射点的反射率。

式(2)可以改写为分贝的格式:

$$\begin{aligned} 10\log P_{rl}^{coh} = & 10\log P_r^t + 10\log G^t + 10\log G^r + \\ & 20\log \lambda + 10\log \Gamma_{rl} - 20\log (R_b + R_r) - 20\log 4\pi \end{aligned} \tag{3}$$

求解式(3)可得到地表反射率(surface reflectance,SR):

$$\begin{aligned} SR = 10\log \Gamma_{rl} = & 10\log P_{rl}^{coh} - 10\log P_r^t - \\ & 10\log G^t - 10\log G^r - 20\log \lambda + \\ & 20\log (R_b + R_r) + 20\log 4\pi \end{aligned} \tag{4}$$

尽管总反射功率是相干和非相干分量的组合,但在实际过程中,将二者完全分开是不现实的。因此,单独求解式(4)中P_{rl}^{coh}值是很难实现的,通常使用其他参数和标量来代替P_{rl}^{coh}。例如,使用每个DDM的SNR或峰值来代替P_{rl}^{coh}^[63,83]。

很明显,SNR或每个DDM的峰值并不完全等于P_{rl}^{coh}。因此,根据式(4)估计的反射率被称为等效反射率。此外,式(4)表明,存在一些潜在和未知的因素会影响反射率估计值,进而导致其准确性降低^[62]。

式(2)通常在较为平坦的、由相干反射主导的地表反射条件下使用。在一些地形变化和粗糙度较大,或植被茂密的地区,反射信号中含有的非相干分量变得比相干分量更强^[58,64,82,88-89]。反射信号中的非相干或漫散射分量可以通过以下方程来表示^[45],非相干分量的计算如下:

$$P_{RL}^{inc} = \frac{\lambda^2 P_t G_t G_r R_{PL}}{(4\pi)^3 (R_r R_t)} \sigma_{RL} \tag{5}$$

式中,σ_{RL}是以m²为单位的双基雷达截面;R_{PL}是非涅耳反射系数。其中,

$$\sigma_{RL} = A_s \sigma_{RL}^0 \tag{6}$$

σ_{RL}⁰是归一化双基雷达截面;A_s是反射表面积(通常称为闪耀区)。

此时,假设地表反射屏幕相对平坦光滑,可以认为GNSS接收机接收到的信号主要是相干分量,即P_{RL}^{coh}=P_{RL}^{inc}。那么反射率可以表示为:

$$\Gamma_{RL}(\theta) = \frac{\sigma_{RL}(R_r + R_t)^2}{4\pi R_i^2 R_r^2} \quad (7)$$

另外,根据基尔霍夫近似模型,镜面方向附近的相干分量和非相干分量可以写成菲涅耳反射率、菲涅耳反射系数平方(R_{RL}^2)的函数^[90]。

菲涅耳系数 $R_{RL}(\theta)$ 可以由反射点的镜面反射率 $\Gamma_{RL}(\theta)$ 求解出:

$$\Gamma_{RL}(\theta) = R_{RL}(\theta)^2 \gamma^2 \exp(-h \cos^2 \theta) \quad (8)$$

式中,参数 h 可以直接从 SMAP 数据中获得; γ 是植被的不透明度系数, $\gamma = \exp(-\tau \sec(\theta))$, 植被的光学厚度 τ 由 VWC 和该土地覆盖类型下的经验系数计算。VWC 可以通过 SMAP 数据从归一化植被指数的经验值中获得, τ 由 SMAP 数据直接提供。

而非涅耳反射系数与介电常数(ϵ_r)有关,在获得菲涅耳系数 $R_{RL}(\theta)$ 后,反射率与菲涅耳系数之间的关系可以写成:

$$R_{RL}(\theta) = \frac{1}{2}(R_{VV}(\theta) - R_{HH}(\theta)) \quad (9)$$

进一步,介电常数与土壤含水量有关^[91]:

$$R_{HH}(\theta) = \frac{\cos \theta - \sqrt{\epsilon_r - \sin^2 \theta}}{\cos \theta + \sqrt{\epsilon_r - \sin^2 \theta}} \quad (10)$$

$$R_{VV}(\theta) = \frac{\epsilon_r \cos \theta - \sqrt{\epsilon_r - \sin^2 \theta}}{\epsilon_r \cos \theta + \sqrt{\epsilon_r - \sin^2 \theta}} \quad (11)$$

式中, $R_{VV}(\theta)$ 是垂直极化分量; $R_{HH}(\theta)$ 是水平极化分量,而两者都是与入射角 θ 和土壤介电常数 ϵ 有关的函数。根据式(10)和式(11),不同极化的菲涅耳反射系数是入射角和介电常数的函数。

因此,理想的基于 GNSS-R 的土壤水分正演方法在获得地表反射率时依赖于求解双基雷达方程。通过获取的 GNSS-R 地表反射率加上植被覆盖和表面粗糙度效应修正之后,获取菲涅耳反射率(反射系数)。进一步,通过菲涅耳反射率方程模型可以求解介电常数,进而求解土壤含水量。双基雷达方程估计土壤水分的方法主要采用反射率、介电常数和土壤湿度的模型方法,这是正演土壤水分的典型方法。

4 结论与展望

GNSS-R 技术利用现有的导航卫星群为信号发射源,与相应的反射信号接收机(如星载 CYGNSS L 波段传感器)构成双站雷达工作模式^[61, 92-93]。L 波段信号对地表土壤水分较为敏感,经典的双基雷达法正演土壤水分建立在利用

双基模式下的单天线或双天线接收到的 GNSS 反射信号的功率等信息作为输入参数计算土壤水分,是 CYGNSS 星载反演建模的理论基础和主要依据。但是,目前绝大多数的国内和国外的实验研究成果都停留在考虑理想的地表光滑的情况下,取得的结果基本是处于比较接近真实值的状态。由于地表粗糙度、植被覆盖的多样性和复杂性,难以建立解析模型来表达 GNSS-R 土壤水分估算的变化规律和本质特征。

可极大程度上消除地表粗糙度影响的双极化土壤水分正演方法尚停留在对于含水量变化趋势的估计与判断。对于精确的正演模型算法的建立与推导还有待于加强。由于实际地表粗糙度和植被覆盖在土壤水分估计过程中产生的影响,对土壤水分计算的精度评价是正演方法中的难点和热点。即使也有不少国内外学者提出通过改进某一环节来提高精度,取得了一定的成果,但还是缺乏对于整体的设计性。因此,急需开展系统、深入的 GNSS-R 数据采集分析以及创新模型研究,进一步提高 GNSS-R 土壤水分正演方法的精准表达和适用性。

近年来,使用星载 CYGNSS 数据来获取土壤水分备受关注。CYGNSS 观测数据可以提供高精度的土壤水分估计值^[80],也可以用于弥补 SMAP 土壤水分产品中时间和空间分辨率较低的问题^[68]。

此外,对于利用 CYGNSS 数据反演土壤水分,目前也存在着一些困扰。第一个问题来自于地表茂密的植被和内陆水体。内陆水体的强反射会显著增加反射率,进而影响土壤水分计算的精确度。因此,在质量控制阶段去除内陆水体区域的数据是一个较为有效的措施。在植被较为茂密的地区,星载观测数据的误差较大^[33];对于地表植被含水量很大的区域(约 18 kg/m²),无法使用 CYGNSS 观测数据来反演土壤湿度^[86]。当然,通过预处理质量控制等步骤可以最大程度上减少各种不利因素的影响。不过,在预处理之后,很大一部分观测数据将被舍弃。此外,在考虑地表粗糙度和植被覆盖度的条件下反演 CYGNSS 土壤水分,往往需要大量的先验知识并将多种辅助数据加入反演模型。目前大多数的研究还不能完全实现基于 CYGNSS 的独立反演,除了参考土壤水分数据,较多来源的辅助数据虽然一定程度上可以提高土壤水分的反演精度。但是,这无疑大大增加了模型的复杂度和工

作量。另外,同一个辅助变量来源不同也可能会改变土壤水分反演的结果^[85]。因此,如何准确、高效地获取和表达地表粗糙度与植被信息,并融合到 CYGNSS 土壤水分反演模型中,是亟待解决的关键问题。

第二个问题来自于建立反演模型时需要用到的参考土壤水分。土壤水分的实地测量深度与 GNSS-R 信号可穿透地表的深度存在着差异,GNSS-R L 波段信号在不同的土壤类型下至多可以穿透 0~20 cm 的土壤^[33]。而来自不同现场实测得到的数据来源于具有不同环境的地基传感器。另外,SMAP 和 SMOS 这些常用的参考土壤水分卫星,其空间分辨率与 CYGNSS 都有差异。目前,通常将 CYGNSS 网格按照其对应的 SMAP 或者 SMOS 进行划分,并在单个网格上对多个 CYGNSS 观测点求平均,以匹配参考土壤水分分辨率,导致 CYGNSS 固有的高空间分辨率被破坏。未来,SMAP/SMOS 卫星的空间分辨率有望被缩小到与 CYGNSS 相同或接近。

基于机器/深度学习来反演 CYGNSS 土壤水分产品,因为研究区域、时间段、参考土壤水分、质量控制等标准不一,无法直观判断出最适合 CYGNSS 反演的土壤水分的方法。但总的来说,毫无疑问,基于 GNSS-R 技术的 CYGNSS 星座非常适合遥感应用,特别是土壤湿度监测。尽管有这些优点,但 CYGNSS 星座任务也存在一些局限性,例如:

1) 在众多 GNSS 系统(GPS、GLONASS、BDS 以及 Galileo)中,CYGNSS 星座只接收 GPS 反射信号。

2) 发射的 GPS 信号具有 RH 圆极化波性质,根据反射表面的性质和卫星的仰角,信号在经地表反射后可能变为 LHCP 或保持其原始偏振。然而,CYGNSS 只能接收 LHCP 的信号,而不能接收 RHCP 的信号。

3) 由于 GNSS 和 CYGNSS 卫星在不同轨道上运动产生位置变化,CYGNSS 卫星观测到的镜面反射点几乎是随机分布的^[64]。

4) 如前所述,CYGNSS 星座任务具有变化的空间和时间采样率。

5) 它无法监测北半球大多数地区的土壤湿度,包括北美和欧洲的大部分地区,如图 1(a) 所示。

综合国内外的研究发展情况来看,国外已经

制定了多项相关计划,包括机载以及星载的实验。如欧洲航天局的 pretty 计划以及 2024 年将要发射的 HydroGNSS 任务,由于他们开展研究较早,因此取得了大量宝贵的实验数据和理论成果。但是中国对于这方面的研究才刚起步,急需掌握改进接收机系统应用于 GNSS-R 技术,推动 GNSS-R 遥感迈向大范围空间测量;创新定量模型研究并开展较大规模深入的、系统的 GNSS-R 土壤水分反演科学实验,积累实验数据,以提高 GNSS-R 土壤水分反演的精度和适用性。

参 考 文 献

- [1] Shi Jiancheng, Du Yang, Du Jingyang, et al. Progresses on Microwave Remote Sensing of Land Surface Parameters[J]. *Sci China: Earth Sci*, 2012, 42(6): 814-842. (施建成, 杜阳, 杜今阳, 等. 微波遥感地表参数反演进展[J]. 中国科学: 地球科学, 2012, 42(6): 814-842.)
- [2] Entekhabi D, Njoku E G, O'Neill P E, et al. The Soil Moisture Active Passive (SMAP) Mission[J]. *Proceedings of the IEEE*, 2010, 98(5): 704-716.
- [3] Hall C, Cordey R. Multistatic Scatterometry[C]// *IEEE Int Geosci Remote Sensing Symp*, Edinburgh, Scotland, 1988.
- [4] Martin-Neira M. A Passive Reflectometry and Interferometry System (PARIS): Application to Ocean Altimetry[J]. *ESA Journal*, 1993, 17: 331-355.
- [5] Garrison J L, Katzberg S J, Hill M I. Effect of Sea Roughness on Bistatically Scattered Range Coded Signals from the Global Positioning System [J]. *Geophysical Research Letters*, 1998, 25: 2257-2260.
- [6] Motte E, Zribi M, Fanise P, et al. GLORI: A GNSS-R Dual Polarization Airborne Instrument for Land Surface Monitoring [J]. *Sensors*, 2016, 16(5): 732.
- [7] Pierdicca N, Guerriero L, Giusto R, et al. SAVERS: A Simulator of GNSS Reflections from Bare and Vegetated Soils[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2014, 52(10): 6542-6554.
- [8] Cardellach E, Ruffini G, Pino D, et al. Mediterranean Balloon Experiment: Ocean Wind Speed Sensing from the Stratosphere, Using GPS Reflections[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2003, 88(3): 351-362.
- [9] Katzberg S J, Torres O, Grant M S, et al. Utilizing Calibrated GPS Reflected Signals to Estimate Soil Reflectivity and Dielectric Constant: Results from SMEX02 [J]. *Remote Sensing of Environment*,

- 2005, 100: 17-28.
- [10] Gleason S, Hodgart S, Sun Y, et al. Detection and Processing of Bistatically Reflected GPS Signals from Low Earth Orbit for the Purpose of Ocean Remote Sensing[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2005, 43(6): 1229-1241.
- [11] Li W, Cardellach E, Fabra F, et al. Lake Level and Surface Topography Measured with Spaceborne GNSS-Reflectometry from CYGNSS Mission: Example for the Lake Qinghai[J]. *Geophysical Research Letters*, 2018, 45(24): 13-332.
- [12] Ruf C S, Atlas R, Chang P, et al. New Ocean Winds Satellite Mission to Probe Hurricanes and Tropical Convection[J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2016, 97(3): 385-395.
- [13] Njoku E G, Entekhabi D. Passive Microwave Remote Sensing of Soil Moisture[J]. *Journal of Hydrology*, 1996, 184(1-2): 101-129.
- [14] Chew C, Shahi R, Zuffada C, et al. Demonstrating Soil Moisture Remote Sensing with Observations from the UK TechDemoSat-1 Satellite Mission[J]. *Geophysical Research Letters*, 2016, 43(7): 3317 - 3324.
- [15] Wu X, Guo P, Sun Y, et al. Recent Progress on Vegetation Remote Sensing Using Spaceborne GNSS-Reflectometry [J]. *Remote Sensing*, 2021, 13(21): 4244.
- [16] Wan W, Bai W, Zhao L, et al. Initial Results of China's GNSS-R Airborne Campaign: Soil Moisture Retrievals[J]. *Science Bulletin*, 2015, 60(10): 964-971.
- [17] Yan Songhua, Mei Jie, Chen Yongqian, et al. Road Slope Deformation Monitoring Experiment and Error Analysis by Ground Based GNSS-R Method [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2023, DOI:10.13203/j.whugis20220802. (严颂华, 梅捷, 陈永谦, 等. 地基 GNSS-R 公路边坡形变监测实验及误差分析[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2023, DOI:10.13203/j.whugis20220802.)
- [18] Larson K M, Braun J J, Small E E, et al. GPS Multipath and Its Relation to Near-Surface Soil Moisture Content [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2010, 3(1): 91-99.
- [19] Ban W, Yu K, Zhang X. GEO-Satellite-based Reflectometry for Soil Moisture Estimation: Signal Modeling and Algorithm Developmentp [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2018, 56(3): 1829-1838.
- [20] Nievinski F G, Larson K M. Forward Modeling of GPS Multipath for Near-Surface Reflectometry and Positioning Applications [J]. *GPS Solutions*, 2014, 18: 309-322.
- [21] Liang Yueji, Ren Chao, Huang Yibang, et al. Multi-star Linear Regression Retrieval Model for Monitoring Soil Moisture Using GPS-IR [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2020, 49(7): 833-842. (梁月吉, 任超, 黄仪邦, 等. 利用 GPS-IR 监测土壤湿度的多星线性回归反演模型[J]. 测绘学报, 2020, 49(7): 833-842.)
- [22] Ao Minsi, Zhu Jianjun, Hu Youjian, et al. Comparative Experiments on Soil Moisture Monitoring with GPS SNR Observations [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2015, 40(1): 117-120, 127. (敖敏思, 朱建军, 胡友健, 等. 利用 SNR 观测值进行 GPS 土壤湿度监测[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2015, 40(1): 117-120, 127.)
- [23] Wu Jizhong, Wang Tian, Wu Wei. Retrieval Model for Soil Moisture Content Using GPS-Interferometric Reflectometry [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2018, 43(6): 887-892. (吴继忠, 王天, 吴玮. 利用 GPS-IR 监测土壤含水量的反演模型[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2018, 43(6): 887-892.)
- [24] Larson K M. GPS Interferometric Reflectometry: Applications to Surface Soil Moisture, Snow Depth, and Vegetation Water Content in the Western United States [J]. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Water*, 2016, 3(6): 775-787.
- [25] Zavorotny V U, Larson K M, Braun J J, et al. A Physical Model for GPS Multipath Caused by Land Reflections: Toward Bare Soil Moisture Retrievals [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2009, 3(1): 100-110.
- [26] Vey S, Güntner A, Wickert J, et al. Long-Term Soil Moisture Dynamics Derived from GNSS Interferometric Reflectometry: A Case Study for Sutherland, South Africa [J]. *GPS Solutions*, 2016, 20(4): 641-654.
- [27] Han M, Zhu Y, Yang D, et al. A Semi-Empirical SNR Model for Soil Moisture Retrieval Using GNSS SNR Data [J]. *Remote Sensing*, 2018, 10(2): 280.
- [28] Yang T, Wan W, Chen X, et al. Using BDS SNR Observations to Measure Near-Surface Soil Moisture Fluctuations: Results from Low Vegetated Surface [J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2017, 14(8): 1308-1312.
- [29] Zhang S, Wang T, Wang L, et al. Evaluation of

- GNSS-IR for Retrieving Soil Moisture and Vegetation Growth Characteristics in Wheat Farmland[J]. *Journal of Surveying Engineering*, 2021(3):147.
- [30] Rodriguez-Alvarez N, Bosch-Lluis X, Camps A, et al. Review of Crop Growth and Soil Moisture Monitoring from a Ground-based Instrument Implementing the Interference Pattern GNSS-R technique [J]. *Radio Science*, 2011, 46(5): 1-11
- [31] Alonso-Arroyo A, Camps A, Aguasca A, et al. Improving the Accuracy of Soil Moisture Retrievals Using the Phase Difference of the Dual-Polarization GNSS-R Interference Patterns[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2014, 11(12): 2090-2094.
- [32] Mironov V L, Fomin S V, Muzalevskiy K V, et al. The Use of Navigation Satellites Signals for Determination the Characteristics of the Soil and Forest Canopy[C]//IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Munich, Germany, 2012.
- [33] Ulaby F T, Moore R K, Fung A K. Microwave Remote Sensing: Active and Passive[M]. Volume 3—From Theory to Applications. Norwood, MA: Artech House Inc, 1986.
- [34] Wang J R, Schmugge T J. An Empirical Model for the Complex Dielectric Permittivity of Soils as a Function of Water Content[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1980, 18(4): 288-295.
- [35] Mironov V L, Kosolapova L G, Fomin S V. Physically and Mineralogically Based Spectroscopic Dielectric Model for Moist Soils [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2009, 47(7): 2059-2070.
- [36] Hallikainen M T, Ulaby F T, Dobson M C. Microwave Dielectric Behavior of Wet Soil-Part 1: Empirical Models and Experimental Observations [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1985, GE-23(1): 25-34.
- [37] Dobson M C, Ulaby F T. Microwave Dielectric Behavior of Wet Soil-Part 1: Dielectric Mixing Models [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1985, 23(1): 35-46.
- [38] Masters D, Axelrad P, Katzberg S. Initial Results of Land-Reflected GPS Bistatic Radar Measurements in SMEX02[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2004, 92(4): 507-520
- [39] Mao Kebiao, Wang Jianming, Zhang Mengyang, et al. Research on Soil Moisture Inversion by GNSS-R Signal [J]. *Remote Sensing Information*, 2009(3): 92-97.
- (毛克彪, 王建明, 张孟阳, 等. GNSS-R 信号反演土壤水分研究分析[J]. 遥感信息, 2009(3): 92-97.)
- [40] Wang Yingqiang, Yan Wei, Fu Yang, et al. Airborne GPS Reflection Signal Soil Moisture Measurement Technology [J]. *Journal of Remote Sensing*, 2009, 13(4): 678-685. (王迎强, 严卫, 符养, 等. 机载 GPS 反射信号土壤湿度测量技术[J]. 遥感学报, 2009, 13(4): 678-685.)
- [41] Guan Zhi, Zhao Kai, Song Dongsheng. Measuring Soil Moisture Using Reflected GPS Signals[J]. *Advances in Earth Science*, 2006, 21(7): 747-750. (关止, 赵凯, 宋冬生. 利用反射 GPS 信号遥感土壤湿度[J]. 地球科学进展, 2006, 21(7): 747-750.)
- [42] Wang Yan, Yang Dongkai, Hu Guoying, et al. Remote Sensing of the Soil Moisture Using GPS-Reflected Signals[J]. *GNSS World of China*, 2009, 34(5): 7-10. (王炎, 杨东凯, 胡国英, 等. 利用 GPS 反射信号遥感土地湿度变化趋势[J]. 全球定位系统, 2009, 34(5): 7-10.)
- [43] Zou Wenbo, Zhang Bo, Hong Xuebao, et al. Soil Moisture Retrieval Using Reflected Signals of BeiDou GEO Satellites[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2016, 45(2): 199-204. (邹文博, 张波, 洪学宝, 等. 利用北斗 GEO 卫星反射信号反演土壤湿度[J]. 测绘学报, 2016, 45(2): 199-204.)
- [44] Jia Y, Savi P, Canone D, et al. Estimation of Surface Characteristics Using GNSS LH-Reflected Signals: Land Versus Water[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2016, 9(10): 4752-4758.
- [45] Zavorotny V U, Voronovich A G. Bistatic GPS Signal Reflections at Various Polarizations from Rough Land Surface with Moisture Content [C]//IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Honolulu, HI, USA, 2000.
- [46] Pierdicca N, Guerriero L, Giusto R, et al. GNSS Reflections from Bare and Vegetated Soils: Experimental Validation of an End-to-End Simulator [C]// IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Vancouver, BC, Canada, 2011.
- [47] Egidio A, Paloscia S, Motte E, et al. Airborne GNSS-R Polarimetric Measurements for Soil Moisture and Above-Ground Biomass Estimation [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2014, 7(5): 1522-1532.
- [48] Ceraldi E, Franceschetti G, Iodice A, et al. On the

- Use of the Specular Direction Copolarised Ratio for the Retrieval of Soil Dielectric Constant[C]// IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Toulouse, France, 2003.
- [49] Ceraldi E, Franceschetti G, Riccio D. Estimating the Soil Dielectric Constant via Scattering Measurements Along the Specular Direction [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2005, 43(2): 295-305.
- [50] Fung A K, Li Z, Chen K S. Backscattering from a Randomly Rough Dielectric Surface [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1992, 30(2): 356-369.
- [51] Zeng J, Chen K S, Bi H, et al. A Comprehensive Analysis of Rough Soil Surface Scattering and Emission Predicted by AIEM with Comparison to Numerical Simulations and Experimental Measurements [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2016, 55(3):1696-1708.
- [52] De Roo R D, Du Y, Ulaby F T, et al. A Semi-Empirical Backscattering Model at L-band and C-band for a Soybean Canopy with Soil Moisture Inversion [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2001, 39(4):864-872.
- [53] Carreno-Luengo H, Amèzaga A, Vidal D, et al. First Polarimetric GNSS-R Measurements from a Stratospheric Flight over Boreal Forests[J]. *Remote Sensing*, 2015, 7(10): 13120-13138.
- [54] Jia Y, Savi P. Sensing Soil Moisture and Vegetation Using GNSS-R Polarimetric Measurement[J]. *Advances in Space Research*, 2017, 59 (3) : 858-869.
- [55] Ferrazzoli P, Guerriero L, Pierdicca N, et al. Forest Biomass Monitoring with GNSS-R: Theoretical Simulations[J]. *Advances in Space Research*, 2011, 47(10): 1823-1832.
- [56] Caparrini M, Egido A, Soulat F, et al. Oceanpal: Monitoring Sea State with a GNSS-R Coastal Instrument[C]// 2007 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Barcelona, Spain, 2007.
- [57] Ugazio S, Gamba M T, Pei Y, et al. GPS-Reflectometry Prototype for UAVs and in Flight Data Error Analysis[C]// The 28th International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation International Conference, Tampa, Florida, 2015.
- [58] Ruf C S, Chew C, Lang T, et al. A New Paradigm in Earth Environmental Monitoring with the CYGNSS Small Satellite Constellation [J]. *Scientif Reports*, 2018, 8(1): 1-13.
- [59] Camps A, Vall-llossera M, Park H, et al. Sensitivity of TDS-1 GNSS-R Reflectivity to Soil Moisture: Global and Regional Differences and Impact of Different Spatial Scales[J]. *Remote Sensing*, 2018, 10: 1856.
- [60] Jin Shuanggen, Zhang Qinyun, Qian Xiaodong. New Poggess and Application Prospects of Global Navigation Satellite System Reflectometry (GNSS + R)[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2017, 46 (10):1389-1398. (金双根, 张勤耘, 钱晓东. 全球导航卫星系统反射测量(GNSS-R)最新进展与应用前景[J]. 测绘学报, 2017, 46(10): 1389-1398.)
- [61] Li Huang, Xia Qing, Yin Cong, et al. The Current Status of Research on GNSS-R Remote Sensing Technology in China and Future Development [J]. *Journal of Radars*, 2013, 2(4): 389-399. (李黄, 夏青, 尹聪, 等. 我国 GNSS-R 遥感技术的研究现状与未来发展趋势[J]. 雷达学报, 2013, 2(4): 389-399.)
- [62] Eroglu O, Kurum M, Boyd D, et al. High Spatio-Temporal Resolution CYGNSS Soil Moisture Estimates Using Artificial Neural Networks[J]. *Remote Sensing*, 2019, 11(19): 2272.
- [63] Chew C, Small E. Description of the UCAR/CU Soil Moisture Product[J]. *Remote Sensing*, 2020, 12: 1558.
- [64] Chew C, Small E. Soil Moisture Sensing Using Spaceborne GNSS Reflections: Comparison of CYGNSS Reflectivity to SMAP Soil Moisture [J]. *Geophysical Research Letters*, 2018, 45(9): 4049 - 4057.
- [65] Zribi M, Huc M, Antkoletz S, et al. Soil Moisture Estimation Using CYGNSS Constellation [C]// IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Yokohama, Japan, 2019.
- [66] Yang T, Wan W, Wang J, et al. A Physics-Based Algorithm to Couple CyGNSS Surface Reflectivity and SMAP Brightness Temperature Estimates for Accurate Soil Moisture Retrieval[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2022, 60: 409715.
- [67] Al-Khaldi M M, Johnson J T, O'Brien A J, et al. Time-Series Retrieval of Soil Moisture Using CYGNSS [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2019, 57(7): 4322 - 4331.
- [68] Kim H, Lakshmi V, Kwon Y, et al. First Attempt of Global-Scale Assimilation of Subdaily Scale Soil Moisture Estimates from CYGNSS and SMAP into a Land Surface Model[J]. *Environmental Research*

- Letters*, 2021, 16(7): 074041.
- [69] Yang Lei, Wu Qiulan, Zhang Bo, et al. SVRM Auxiliary Soil Moisture Retrieval Method for BeiDou GEO Satellite Reflection Signals[J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2016, 42(6): 1134-1141. (杨磊, 吴秋兰, 张波, 等. SVRM 辅助的北斗 GEO 卫星反射信号土壤湿度反演方法[J]. 北京航空航天大学学报, 2016, 42(6): 1134-1141.)
- [70] Duan Rui, Zhang Bo, Han Moutian, et al. Single Antenna GNSS-R Soil Moisture Retrieval Using SVRM Method[J]. *Journal of Navigation and Positioning*, 2018, 6(1): 34-39. (段睿, 张波, 汉牟田, 等. SVRM 方法的单天线 GNSS-R 土壤湿度反演[J]. 导航定位学报, 2018, 6(1): 34-39.)
- [71] Jia Y, Jin S, Sawi P, et al. GNSS-R Soil Moisture Retrieval Based on a XGBoost Machine Learning Aided Method: Performance And validation[J]. *Remote Sensing*, 2019, 11(14): 1655.
- [72] Yang T, Wan W, Sun Z, et al. Comprehensive Evaluation of Using TechDemoSat-1 and CYGNSS Data to Estimate Soil Moisture over Mainland China [J]. *Remote Sensing*, 2020, 12: 1699.
- [73] Santi E, Pettinato S, Paloscia S, et al. Soil Moisture and Forest Biomass Retrieval on a Global Scale by Using CYGNSS Data and Artificial Neural Networks[C]//IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Waikoloa, HI, USA, 2020.
- [74] Senyurek V, Lei F, Boyd D, et al. Evaluations of a Machine Learning-Based CYGNSS Soil Moisture Estimates Against SMAP Observations[J]. *Remote Sensing*, 2020, 12(21): 3503.
- [75] Yan Q, Gong S, Jin S, et al. Near Real-Time Soil Moisture in China Retrieved from CYGNSS Reflectivity[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2022, 19: 1-5.
- [76] Jia Y, Jin S, Chen H, et al. Temporal-Spatial Soil Moisture Estimation from CYGNSS Using Machine Learning Regression with a Pre-Classification Approach[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2021, 14: 4879-4893.
- [77] Jia Y, Jin S, Yan Q, et al. An Effective Land Type Labeling Approach for Independently Exploiting High-Resolution Soil Moisture Products Based on CYGNSS Data[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2022, 15: 4234-4247.
- [78] Lei F, Senyurek V, Kurum M, et al. Quasi-Global Machine Learning-Based Soil Moisture Estimates at Highspatio-Temporal Scales Using CYGNSS and SMAP Observations[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2022, 276: 113041.
- [79] Nabi M M, Senyurek V, Gurbuz A C, et al. Deep Learning-Based Soil Moisture Retrieval in CONUS Using CYGNSS Delay - Doppler Maps[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2022, 15: 6867-6881.
- [80] Kim H, Venkat L. Use of Cyclone Global Navigation Satellite System (CYGNSS) Observations for Estimation of Soil Moisture [J]. *Geophysical Research Letters*, 2018, 45(16): 8272-8282.
- [81] Carreno-Luengo H, Luzi G, Crosetto M. Impact of the Elevation Angle on CYGNSS GNSS-R Bistatic Reflectivity as a Function of Effective Surface Roughness over Land Surfaces[J]. *Remote Sensing*, 2018, 10(11): 1749.
- [82] Clarizia M P, Pierdicca N, Costantini F, et al. Analysis of CYGNSS Data for Soil Moisture Retrieval[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2019, 12(7): 2227-2235.
- [83] Yan Q, Huang W, Jin S, et al. Pan-Tropical Soil Moisture Mapping Based on a Three-Layer Model from CYGNSS GNSS-R Data[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2020, 247: 111944.
- [84] Wan W, Ji R, Liu B, et al. A Two-Step Method to Calibrate CYGNSS-Derived Land Surface Reflectivity for Accurate Soil Moisture Estimations [J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2020, 19(99): 1-5.
- [85] Calabria A, Molina I, Jin S. Soil Moisture Content from GNSS Reflectometry Using Dielectric Permittivity from Fresnel Reflection Coefficients [J]. *Remote Sensing*, 2020, 12(1): 122.
- [86] Yueh S H, Shah R, Chaubell M J, et al. A Semiempirical Modeling of Soil Moisture, Vegetation, and Surface Roughness Impact on CYGNSS Reflectometry Data[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2020, 60(99): 1-17.
- [87] Tang F, Yan S. CYGNSS Soil Moisture Estimations Based on Quality Control [J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2022, 19: 8022105.
- [88] Senyurek V, Lei F, Boyd D, et al. Machine Learning-Based CYGNSS Soil Moisture Estimates over ISMN Sites in CONUS[J]. *Remote Sensing*, 2020, 12(7): 1168.
- [89] Zavorotny V U, Gleason S, Cardellach E, et al.

- Tutorial on Remote Sensing Using GNSS Bistatic Radar of Opportunity[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine*, 2014, 2(4): 8-45.
- [90] Tsang L, Kong J A, Shin R T. Theory of Microwave Remote Sensing[M/OL]. New York: Wiley-Interscience, 1985.
- [91] Tabbagh A, Camerlynck C, Cosenza P. Numerical Modeling for Investigating the Physical Meaning of the Relationship Between Relative Dielectric Permittivity and Water Content of Soils [J]. *Water Resources Research*, 2000, 36(9): 2771-2776.
- [92] Zhang Shuangcheng, Guo Qinyu, Ma Zhongmin, et al. Research Advances and Some Thoughts on Soil Moisture Retrieval by Space-Borne GNSS-R [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2023, DOI:10.13203/j.whugis20230100. (张双成, 郭沁雨, 马中民, 等. 星载 GNSS-R 反演土壤湿度研究进展与思考[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2023, DOI:10.13203/j.whugis20230100.)
- [93] Wu Xuerui, Song Shaohui, Ma Wenxiao, et al. A Review of GNSS-R/SoOP-R for Essential Hydrological Climate Variables Detection [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2023, DOI: 10.13203/j.whugis20220685. (吴学睿, 宋少辉, 马文骁, 等. 典型水循环参数星载 GNSS-R/SoOP-R 遥感探测的研究现状[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2023, DOI:10.13203/j.whugis20220685.)