



引文格式:吴学睿,宋少辉,马文晓,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),2024,49(1):1-14.DOI:10.13203/j.whugis20220685

Citation: 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, 2024, 49(1): 1-14. DOI: 10.13203/j.whugis20220685

典型水循环参数星载GNSS-R/SoOP-R遥感探测的研究现状

吴学睿¹ 宋少辉² 马文晓¹ 郭鹏¹ 胡小工¹ 严哲³

1 中国科学院上海天文台天文地球动力学研究中心,上海,200030

2 南京信息工程大学遥感与测绘工程学院,江苏 南京,210044

3 南京大学学科服务部,江苏 南京,210093

摘要:全球导航卫星系统反射测量(global navigation satellite system-reflectometry,GNSS-R)技术是利用导航卫星的反射信号进行遥感的一种新兴的对地观测方式,其在海洋领域的研究相对较早和成熟,但是近年来随着星载探测计划的发展,如英国的TechDemoSat-1、美国的旋风全球导航卫星系统(cyclone GNSS,CYGNSS)以及中国的风云三号E星,其在陆地领域遥感研究的优势和潜质已经逐步显现。首先,总结了目前机理模型的研究现状;然后,回顾了星载GNSS-R及其他机会卫星反射信号遥感(signal of opportunity reflection remote sensing,SoOP-R)的典型陆面水循环参数的研究现状,以及GNSS-R技术在土壤水分、植被、地表冻融监测上的应用,并梳理了最新SoOP-R技术在根区土壤水分和雪水当量的研究现状;最后,总结了目前在向前机理模型研究和后续反演算法开发中存在的潜在问题,以期在一定程度上推动该项技术在水循环主要气候气象参数探测的发展。

关键词:GNSS-R;SoOP-R;土壤水分;植被;地表冻融;根区土壤水分;雪水当量

中图分类号:P237

文献标识码:A

收稿日期:2023-02-10

DOI:10.13203/j.whugis20220685

文章编号:1671-8860(2024)01-0001-14

A Review of GNSS-R/SoOP-R for Essential Hydrological Climate Variables Detection

WU Xuerui¹ SONG Shaohui² MA Wenxiao¹ GUO Peng¹ HU Xiaogong¹ YAN Zhe³

1 Center for Astro-geodynamics Research, Shanghai Astronomical Observatory, CAS, Shanghai 200030, China

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

3 Discipline Services Department, Nanjing University, Nanjing 210093, China

Abstract: Global navigation satellite system-reflectometry (GNSS-R) is a kind of promising remote sensing technique, which utilizes the reflected signals of GNSS for geophysical parameters detection. Its applications on ocean surface are earlier and more mature. However, in recent years, with the development of spaceborne satellite exploration programs such as TechDemoSat-1, cyclone GNSS (CYGNSS) and Fengyun 3E, its advantages and potential in land remote sensing research have gradually emerged. The research work of the existing mechanism model is summarized. Meanwhile, this paper reviews the research status of spaceborne GNSS-R and other signal of opportunity reflection remote sensing (SoOP-R). GNSS-R's applications on soil moisture, vegetation, soil freeze-thaw monitoring are focused on, while the research status of the latest SoOP-R technology in root zone soil moisture and snow water equivalent is also summarized. In this way, we hope to promote the development of this technology in the detection of major climatic

基金项目:国家自然科学基金(42061057)。

第一作者:吴学睿,博士,副研究员,主要从事GNSS-R/SoOP-R遥感原理及应用研究。xrwu@shao.ac.cn

and meteorological parameters for the hydrological cycle to a certain extent.

Key words: GNSS-R; SoOP-R; soil moisture; vegetation; soil freeze-thaw detection; root zone soil moisture; snow water equivalent

陆地水循环参数是人类赖以生存和发展的生命支撑系统,因此亟待展开典型地物关键要素时空分布及相关物理参数的有效监测,深入探索其内在机理和存在规律。然而这些关键参数具有强烈的时空变化非均一性,传统地基站点的监测方法消耗大量的时间成本和人力资源,卫星遥感技术的发展为监测提供了新方法。光学和热红外遥感受天气条件限制,无法全天时、全天候进行工作。由于波长较长,对云层具有一定的穿透性,因此微波遥感可以全天时、全天候进行工作。

全球导航卫星系统(global navigation satellite system, GNSS)主要包括美国全球定位系统(global positioning system, GPS)、伽利略(Galileo)系统、格洛纳斯(GLONASS)、中国的北斗卫星导航系统(BeiDou satellite navigation system, BDS)以及一些区域性的导航定位系统,如日本的准天顶卫星系统(quasi-zenith satellite system, QZSS)和印度的区域导航卫星系统(Indian regional navigation satellite system, IRNSS)。导航卫星的传统应用是利用其直射信号进行定位、导航和授时,但其源源不断的直射信号经地表反射后,可以被专门的反射信号接收机接收,形成一种新的微波遥感方式,即GNSS反射测量(GNSS-reflectometry, GNSS-R)技术^[1-3]。其显著特点是体积小、重量轻、功耗低,同时具有自定时和自定位功能,因此比较容易进入地理信息系统网络。与传统的极轨卫星相比,该遥感方式可以在更高时空分辨率内对地球表面上大多数区域进行连续观测,已成为当前国际上的热点研究方向。

由于海洋表面相对均一,极化特性不明显,因此GNSS-R在海洋领域的研究相对较早也较为成熟^[4-5]。2004年发射的UK-DMC(united kingdom-disaster monitoring constellation)卫星上搭载了首个星载GPS-R(GPS-reflectometry)接收机,最初用于研究海洋表面粗糙度,反演海面风速、有效波高等海态参数,后期发现陆地表面的反射信号也可被有效接收^[6]。TechDemoSat-1(TDS-1)卫星于2014-07-08发射成功,卫星上搭载了8颗试验载荷,其中包含空间GNSS反射信号接收机(space GNSS receiver remote sensing instrument,

SGR-ReSI),TDS-1提供了大量陆面的GNSS反射数据,可进行土壤水分(soil moisture, SM)、地表冻融的探索性研究^[7-8]。虽然旋风全球导航卫星系统(cyclone GNSS, CYGNSS)的主要科学目标是进行飓风及海面参数的遥感研究,但是已有学者利用该数据在土壤水分、植被生物量、地表冻融、洪水和湿地等领域展开了众多研究^[9-14]。顶尖全球公司(Spire Global)在2019-12利用印度极轨卫星运载器(polar satellite launch vehicle, PSLV)火箭发射了两颗GNSS反射测量立方星用于技术验证,而后期新研制的两颗GNSS反射测量立方星则主要用于开展土壤墒情和海风的持续监测研究^[15-16]。2021-07-05搭载GNSS掩星和反射信号探测仪的中国风云3号气象卫星成功发射,该卫星可以实现全球覆盖,为全球遥感探测陆地表面参数提供了有效观测数据^[17]。FSS-Cat(federated satellite system cat mission)是首个哥白尼立方星计划,已经于2020年成功发射,卫星搭载L1/E1 GNSS-R联合L波段微波辐射计载荷,土壤水分观测是其重要的科学目标之一^[18]。HydroGNSS计划于2024年底发射,该卫星的主要目标是探测水循环中的土壤水分、湿地/洪水、地表冻融和植被生物4个主要参数^[19]。

随着星载观测计划的发展,未来可以用来陆地典型水循环参数观测的GNSS-R载荷将不断增加,丰富多样的数据源有利于持续有效开展相关地物参数的研究工作,并为相关参数的工程化应用提供重要保障。基于GNSS-R遥感探测的思想,近年来研究学者开始关注利用其他机会卫星信号作为信号源接收其反射信号,进而对地物参数进行探测研究,即机会反射遥感信号(signal of opportunity reflection remote sensing, SoOP-R)技术。

由于地表参数的复杂多样性,针对GNSS-R/SoOP-R的典型水循环参数的机理模型的建立是传感器设计和分析解释后期卫星观测数据的关键机理工具。本文首先回顾了现有机理模型的研究现状;然后梳理了星载GNSS-R技术在土壤水分反演、植被生物量以及冻融状态监测的应用,并综述了SoOP-R技术在雪水当量和根区土壤水分方面的研究现状;最后分析指出了前向机理模型和后向反演算法中存在的潜在研究方向

和研究价值。

1 机理模型研究

机理模型的发展是推动 GNSS-R 技术发展的重要理论工具,首先针对 GNSS-R/SoOP-R 的典型陆面参数模型研究现状进行梳理和总结。

反射信号在传统 GNSS 的精确定位和授时的应用中都被看作有害信号而被剔除,因此大多数前向物理模型侧重码的调制采用任意值或利用半经验的确切值来定义反射能量、相位和延迟。针对 GNSS 干涉反射(GNSS interferometric reflectometry, GNSS-IR)遥感,文献[20-21]发展建立了前向 GPS 全极化多路径模型,该模型基于文献[22]的物理模型,考虑了直射信号和反射信号的相干,同时充分考虑了接收机天线和反射表面响应,模型假定接收到能量来自于第一菲涅尔区的镜像反射,通过变换介电常数得到对应地物的左旋圆极化(left hand circular polarization, LHCP)-右旋圆极化(right hand circular polarization, RHCP)(LR)或 RHCP-RHCP (RR)的反射率,圆极化反射率利用水平(horizontal, H)极化和垂直(vertical, V)极化菲涅尔反射系数的线性组合得到。基于该模型和实测数据的研究指出裸土、植被和积雪参数的变化会导致 GPS 干涉图度量标准(有效反射计高度、相位和幅度)的变化^[23],该研究利用板块边界观测站(plate boundary observation station, PBO)网络中的 GPS 站点数据进行了相关参数监测和研究工作。文献[24]基于 Nievinski-Larson 前向 GPS 多路径模型,利用实测数据测试了信噪比(signal-to-noise ratio, SNR)数据与近地表土壤水分的关系,指出 5 cm 地表以上的土壤水分对 SNR 数据影响明显,而土壤质地对 GPS 干涉图度量标准的影响可以忽略。文献[25]在理论上分析了冠层参数对 GPS SNR 数据的影响,该模型也根据实测植被数据得到了成功验证。

Ferrazzoli 等^[26]采用了 Tor Vergata 模型的高散植被模型,该模型将随机粗糙表面上看作由很多介电物质组成(圆柱、圆盘及针状体)。将树干和树枝模拟成圆柱体,阔叶模拟成圆盘,针叶模拟成针状体。该研究模拟分析了 GNSS-R 森林生物量监测的可行性,指出与单站雷达监测时容易出现生物量饱和现象不同,利用 GNSS-R 技术进行监测时不容易出现饱和。该模型模拟发现相干能量比非相干能量大很多,认为接收机得到

的能量主要来自第一菲涅尔区的镜像反射,因此重点分析了镜像散射特性,模型精度采用夏威夷的落叶林实测数据进行验证,并利用镜像上的模拟结果进行分析。最后利用双站雷达公式分析了接收机 LR 极化能量随生物量的变化关系,发现随生物量增加,接收机 LR 极化能量降低。其研究结果也指出对于 LR 极化,低入射角的镜像测量值更适用于森林冠层研究。

基于 KA-GO 模型(Kirchhoff approach-geometrical optics model)的 Z-V(Zavorotny-Voronovich)散射模型是 GNSS-R 领域广泛应用的 GNSS 反射信号模型,该模型将观测几何参数、环境参数与接收机的输出观测量之间建立物理联系,其本质是双站雷达积分形式,双尺度模型下的基尔霍夫近似被用来计算海洋表面双站散射特性^[27]。利用该模型,Zavorotny 等^[27]进行了波形的详细数值模拟,结果显示,对于陡峭和中等仰角, RHCP 的散射信号很低,但 RHCP 和 LHCP 上的信号开始收敛于较低仰角。文献[28]指出地表的前向散射与海洋表面的非常接近,认为海洋表面的理论模拟同样适用于陆地表面。海洋表面和陆地表面的主要区别就是介电常数的差异,对于陆地表面,表面粗糙度和植被覆盖是影响散射特性的主要因素。将该模型拓展到土壤水分的应用上,采用 GO 模型计算地表反射特性,模拟结果表明,平滑表面和裸土表面的相关波宽度比粗糙海面的狭窄很多。同时进行了 3 次机载实验对其理论结果进行验证,但效果较差,该研究认为可能是模型适用范围有限制。

Pierdicca 等^[29]发展建立了基本 Z-V 模型框架的 SAVERS (the soil and vegetation reflection simulator)模型,信号相关输出能量是时间延迟和多普勒频移的函数,即时间延迟多普勒图(delay-Doppler map, DDM),模型整体分为观测几何计算模块和地表反射特性计算模块两个部分。对双站散射系数进行修改,采用相干散射系数和高级积分方程模型分别计算裸土的相干和非相干散射特性^[30-31],利用 Tor Vergata 模型计算植被散射^[32]。确定了发射机和接收机位置及速度信息后,将其放入模型的几何模块获取镜像反射点,同时获取天线样图和多普勒范围,与获取反射面散射特性的散射系数模块进行耦合,获取最终的 DDM。利用该模拟器可以获取 DDM 参数并提取波形峰值和反射面特性等信息,即该模型可以获取中间变量(诸如几何参数和双站散射系数)

和最终的DDM图。同时Pierdicca等^[29]利用导航信号陆地监测(land monitoring with navigation signal, LEiMON)实验数据对模型结果进行验证,模拟了地表参数、观测几何对GNSS-R接收能量的影响,通过极化合成的方法考虑了天线极化不匹配、交叉极化隔离等因素。理论模拟表明SAVERS模型可以很好地再现不同情况下LR极化低入射角下的DDM波形,但是RR极化的结果较差,而仪器在RR极化时存在饱和是导致该现象的主要原因。

SCoBi-Veg (signals of opportunity coherent bistatic scattering model for vegetated terrains)是一个面向于SoOP-R植被遥感应用的双站模型,其框架为Monte Carlo,可以模拟平坦地表上的植被冠层极化反射特性^[33]。该模型假定信号入射源为导航卫星或者数字通讯卫星信号,频率涵盖P波段和S波段。模型中采用解析波理论和离散波近似,详细解释了发射和接收天线影响(即极化串扰/失配、朝向和高度)。接收到的复电场由三部分表示:(1)直射项,即天线间最短距离;(2)镜像散射项;(3)漫散射项,通过该项可以获取天线和地面模拟场景特性。该模型适用于P波段SoOP-R和L波段GNSS-R遥感,为验证模型的适用性,文献[33]对P波段3种冠层镜像极化和漫散射特性进行了研究。

文献[34]在传统的随机粗糙面散射模型的基础上,利用极化合成的方法,通过坐标变换,在缪勒矩阵的基础上,针对SoOP的圆极化特性,发展建立了适用于SoOP遥感的双站圆极化散射模型。以此模型为工具,模拟分析了观测频率、土壤水分、散射天顶角和散射方位角在5种不同圆极化时(RL、RH、RV、 $R+45^\circ/R-45^\circ$)的双站散射特性。利用其发展建立的模型对极化信息和观测角度的最优观测组合进行了信息挖掘,是研究SoOP-R/GNSS-R极化特性的重要工具。

文献[35-37]在单站雷达利用植被一阶辐射传输方程模型的基础上,基于双站形式,结合SoOP遥感圆极化的特性,利用极化合成方法将模型发展成为可以计算各种极化组合的全极化双站散射模型。以此为工具,模拟分析了观测极化变化时对应的双站雷达散射系数,对比分析了各种散射机制对总能量的贡献,揭示了不同频率各种极化时散射特性差异的原因。同时模拟分析不同冠层参数变化对总散射能量的影响,对比分析了当散射体半径变化、植株密度变化和散射体含水量变化时对应的双站散射特性差异。文

献[35-37]涉及的多种频率、多种极化、不同观测几何和冠层参数的模拟分析结果在一定程度上可以对SoOP-R遥感的发展提供理论支撑。

2 星载GNSS-R典型水循环参数遥感

本章介绍星载GNSS-R在土壤水分、植被生物量和地表冻融状态监测上的研究现状,并梳理了现有研究算法中存在的主要问题。

2.1 土壤水分

土壤水分直接影响大气湿度,在地表与大气能量交换中扮演重要角色,是控制陆地和大气间水热能量交换的重要关键参数之一。同时土壤水分也是联系地表水与地下水的纽带,是陆地生态系统和水循环系统的重要组成部分。GNSS-R遥感工作在穿透性较强的L波段,不同含水量的土壤在该波段的介电常数差异明显,因此GNSS-R遥感适宜进行土壤水分监测。随着星载GNSS-R计划的发射,研究人员可以获取的有效数据增多,因此重点介绍了星载土壤水分反演算法。

2.1.1 地基土壤水分反演

GNSS-IR利用地基测绘或地球物理中GPS接收机的直射和反射信号的相干信号对土壤水分进行监测。在仰角低于 30° 时,直射信号和反射信号的干涉图信息最为明显,利用该多路径信息可有效对土壤水分进行反演。文献[38-39]以Zavorotny模型为研究工具,在其基础上发展建立了裸土反演算法;Vey等^[40]利用该算法建立了南非土壤水分长时间时间序列分析结果,研究发现实测数据和GPS干涉反射(GPS interferometric reflectometry, GPS-IR)反演的土壤水分之间的均方根误差(root mean square error, RMSE)为 $0.05 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ 。

干涉样图技术(interference pattern technique, IPT)利用直射信号和反射信号的相干信号进行地物参数土壤水分及植被覆盖区土壤水分的反演^[41],接收机在同一个GPS码片间隔内记录下直射信号和反射信号的相干叠加干涉信号,接收到的相干信号是仰角的直接函数。其基本原理是V极化在布鲁斯诺角时会存在反射率为空值的情况,而当接收机采用LHCP极化天线时,H极化会掩盖掉角度信息^[42]。该方法采用测绘GPS接收机基础上改进的专门接收机进行研究,即采用SMIGOL(soil moisture interference-pattern GNSS observations at L-band)反射计,或者PSMIGOL(dual-polarization SMIGOL)接收机^[43]。

2.1.2 机载土壤水分监测

土壤水分实验 (soil moisture field experiment, SMEX) 机载 GPS-R 实验的科学目的是理解地气相互作用,验证评估 GPS-R 进行土壤水分遥感技术的可行性^[44]。

Egido 等^[45]展开了 3 次机载极化测量实验,该实验同时接收到了 RL 和 RR 极化反射信息,分析表明,在低高度角情况下,土壤水分和地表粗糙度对 RL 和 RR 极化反射率影响比较大。在极化比的研究中发现其对粗糙度(中等粗糙度)不敏感,有利于进行土壤水分反演,当地表粗糙度大于 3 cm 时,非相干散射占主导。文献[46]的机载实验采用四通道样机继续对 RHCP 和 LHCP 的双极化反射特性进行分析,极化数据处理时尽量除去非相干反射能量的影响,研究表明极化比适用于土壤水分反演。

通过机载实验可以看出,学者更关注对双极化特性的挖掘,并期待利用极化比去除地表粗糙度的影响,进而提高土壤水分反演的精度。

2.1.3 星载 GNSS-R 土壤水分反演

本节梳理了 TDS-1 的相关研究,重点介绍 CYGNSS 的土壤水分研究现状和存在的问题。

1) TDS-1 土壤水分反演

星载 GNSS-R 的输出量为 DDM,目前较多

研究使用其峰值进行土壤水分算法开发。DDM 的峰值能量不仅受到反射面性质的影响,还受到天线增益、距离、入射角的影响,计算如下:

$$P_{r,\text{eff}} \propto P_r - N + (R_{sr} + R_{ts})^2 - G_r + \cos^2 \theta \quad (1)$$

式中, $P_{r,\text{eff}}$ 为 TDS-1 的有效反射能量,实际是 DDM 的 SNR; P_r 为 DDM 的最大反射能量; N 为接收机噪声; R_{sr} 为镜像点到接收机的距离; R_{ts} 为发射机到镜像点的位置; θ 为入射角; G_r 为天线增益。文献[47]利用星载 GNSS-R 进行土壤水分研究,发现反射信号对土壤水分变化的灵敏度为 7 dB。

TDS-1 的 GNSS-R 数据与 CYGNSS 的数据形式接近,但是 TDS-1 收集到的数据比 CYGNSS 收集的数据少几个数量级,TDS-1 的重访时间大于 6 个月,CYGNSS 的重访时间大约为 1 d。因此,TDS-1 仅在单个时刻评估 GNSS 反射信号和土壤水分之间的空间对应关系,不能获取时间序列分析结果^[47-49]。

2) CYGNSS 土壤水分反演

表 1 列举了目前利用 CYGNSS 反演土壤水分的典型工作。分别从使用的数据、参照的土壤水分数值和反演精度,对相干项和非相干项的考虑以及对角度的处理等方面总结了现在研究中的主要状况。

表 1 CYGNSS 土壤水分研究现状总结

Tab. 1 Summary of CYGNSS Soil Moisture Retrieval

参考文献	时间范围	空间范围	土壤水分真值	RMSE/($\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$)	r	相干项/非相干项	角度
文献[50]	2017-03—2018-02	南北纬 37°	SMAP	0.045		未考虑	未考虑
文献[51]	2017-04—2018-04	美国区域	SMAP		0.68/0.77	相干	归一化处理
文献[52]	2017-04—2017-08	南北纬 38°	SMAP	0.07		非相干	未考虑
文献[53]	2017-12—2018-05	南北纬 38°	SMAP	0.04	0.82	非相干	归一化处理
文献[54]	2018-01-01—2018-12-31	南北纬 37°	SMAP	0.07	0.80	相干	未考虑

值得注意的是,利用 CYGNSS 数据进行土壤水分反演时,相干项和非相干项的计算仍是开放性的问题^[55],相干项的计算如下:

$$P_R^{\text{coh}} = \frac{P_T \lambda^2 G_R G_T}{(4\pi)^2 (r_R + r_T)^2} \cdot |R|^2 \cdot Z_f \cdot e^{-4k_0^2 h^2 \cos^2 \theta} \quad (2)$$

式中, P_T 为发射机的能量; λ 为波长; G_R 和 G_T 分别为接收机和发射机相对于镜像点方向的天线增益; r_R 和 r_T 分别为接收机和发射机相对于镜像反射点的距离; R 为菲尼尔反射系数; Z_f 是光滑表面的面积/形状相对于菲尼尔区的影响;指数项为相干反射损耗(coherent reflection loss, CRL),计算如下:

$$C_{\text{CRL}} = -10 \cdot \lg(e^{-4k_0^2 h^2 \cos^2 \theta}) \quad (3)$$

式中, k_0 为自由空间波数; h 为表面均方根高度。

接收到的相干反射能量主要来自于镜像反射点周围的第一菲尼尔区,由非相干散射导致的相干积分 DDM 能量可以表示为:

$$P_R^{\text{inc}}(\tau, f) = \frac{P_T \lambda^2}{(4\pi)^3} \int_A \frac{G_R G_T \sigma^0 \Lambda^2 S^2}{|\mathbf{R}_r - \bar{\mathbf{r}}|^2 |\mathbf{R}_t - \bar{\mathbf{r}}|^2} d\bar{\mathbf{r}} \quad (4)$$

式中, P_R^{inc} 为接收能量的非相干部分; τ 为时间延迟; f 为多普勒频移; σ^0 为双站散射系数; Λ 和 S 为模糊度函数; $\bar{\mathbf{r}}$ 为距离矢量; \mathbf{R}_r 、 \mathbf{R}_t 分别为发射机到镜像点和接收机到镜像点的距离矢量。而镜像点 $\tau=0$ 、 $f=0$ 处的 DDM 可以近似表达为:

$$P_R^{\text{inc}}(0,0) \approx \frac{P_T \lambda^2 G_R G_T}{(4\pi)^3 r_R^2 r_T^2} \cdot \sigma^0 \cdot A_{\text{eff}} \quad (5)$$

式中, A_{eff} 为有效面积。

相干能量的相对贡献可以表示如下:

$$K = \frac{P_R^{\text{coh}}}{P_R^{\text{inc}}} \approx 3S^2 \cdot \left(\frac{B}{C}\right) \cdot h_R \cdot Z_j \cdot e^{-4k_0^2 h^2 \cos^2 \theta} \quad (6)$$

式中, K 表示相干能量中表面粗糙度、频率、接收机带宽和散射几何的影响; B 、 C 为校正因子; h_R 为距离。Balakhder 等^[55]详细叙述了二者的计算方式和差别,因此在后续的土壤水分反演中,有效利用不同观测几何下的数据,区分不同积分区域内的角度信息获取不同散射特性,是研究中亟待突破的关键技术。

文献[23]利用 CYGNSS 相干散射的能量进行土壤水分反演,未对角度进行特殊化处理,即利用 2017-03—2018-02 CYGNSS 的 SNR 数据与 SMAP (soil moisture active and passive mission) 的土壤水分数据进行对比,发现二者之间存在很强的正线性相关,并建立了线性回归关系。研究表明, CYGNSS 在中等植被覆盖的情况下,可以

$$S_{\text{SNR,normalized}}(x_i, y_i, \theta_i) = \frac{\left(S_{\text{SNR}}(x_i, y_i, \theta_i) - \mu \left(S_{\text{SNR}}(x_i, y_i, [\theta_i \pm 5^\circ]) \right) \right) \times \sigma \left(S_{\text{SNR,ref}}(x_i, y_i) \right)}{\sigma \left(S_{\text{SNR}}(x_i, y_i) \right)} + \mu \left(S_{\text{SNR,ref}}(x_i, y_i) \right) \quad (7)$$

式中, μ 为平均时间; σ 为 SNR 的标准偏差。

本文利用 2017-04—2018-04 美国地区的 CYGNSS rSNR 数据进行土壤水分反演^[51],假定 rSNR 和 SMAP 土壤水分之间存在线性相关性 ($r=0.68/0.77$),将 rSNR 和 SMAP 土壤水分数据耦合可以获取土壤水分日变化。虽然对角度进行了考虑,但实际只进行了归一化处理,尚未具体分析入射角、散射天顶角和方位角等信息的散射特性,没有挖掘土壤水分在不同观测几何下的散射特性差异,尚未建立起基于观测几何中角度信息的反演算法^[51]。

Clarizia 等^[52]认为 CYGNSS 的反射信号主要来自相干散射的能量,利用 SMAP 的植被和土壤粗糙度信息作为辅助数据,利用 CYGNSS 反演了其覆盖范围内的土壤水分数据。该研究采用三元线性回归的方法估计土壤水分,所用回归方法是 CYGNSS 反射率、SMAP 植被光学厚度和 SMAP 地表粗糙度系数的函数。通过 SMAP 的植被光学厚度和土壤粗糙度数据可剔除二者对反演结果的影响。线性回归方程如下:

$$M_{\text{CYGNSS}} = a \cdot R_{\text{dB}} + b \cdot \tau' + c \cdot \sigma' + d \quad (8)$$

进行土壤水分监测,但是在干旱和浓密植被覆盖时土壤水分反演的结果较差。文献[50]利用 CYGNSS 获取的日平均土壤水分和 SMAP 土壤水分之间的无偏差均方根 (unbiased root mean square, uRMS) 为 $0.045 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$,同时与 4 个地表实测土壤水分站点之间的精度相比,反演精度也可达到该水平。研究表明,利用 CYGNSS 和 GNSS 反射计可以用来获取全球土壤水分观测值。当 CYGNSS 的相对 SNR (relative SNR, rSNR) 和 SMAP 的土壤水分数据耦合在一起时,可以获取每日土壤水分数据。

文献[51]认为 CYGNSS 接收到的地表反射信号主要是相干散射,忽略了非相干部分的散射能量的计算,反演的时候考虑了角度因素的影响,即对角度进行了归一化处理。 (x_i, y_i) 像元处各个角度 θ_i 的 SNR 可以表示为 $S_{\text{SNR}}(x_i, y_i, \theta_i)$,而 $S_{\text{SNR}}(x_i, y_i, \theta_i)$ 可以通过在同一像元内 $[35^\circ \pm 5^\circ]$ 范围内的 SNR 数据 $S_{\text{SNR,ref}}(x_i, y_i)$ 进行归一化处理,即:

式中, M_{CYGNSS} 为 CYGNSS 反演土壤水分的结果; R_{dB} 为 CYGNSS 反射率; τ' 和 σ' 分别为归一化的植被光学厚度和地表粗糙度系数; a 、 b 、 c 、 d 是回归方程的回归系数。其中, a 为 CYGNSS 反射率的权重,是正数且最大,土壤水分增加导致反射率增加,进而导致菲尼尔系数增加; b 为植被光学厚度,权重为正,相对也较大,由于植被会降低相干反射,因此算法中需要对该效应进行补偿; c 为粗糙度,权重相对较小,但也会影响回归结果。该方法在土壤水分较大的情况下,偏差和均方根误差较大,因为土壤水分含量较高时,观测的反射率出现饱和,而且训练数据存在缺失现象,其最终反演精度 RMSE 为 $0.07 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ ^[52]。

Al-Khalidi 等^[53]认为在星载 GNSS-R 轨迹范围内,相干能量主要来自于内陆水的镜面反射,这样会导致 DDM 峰值增大,即相干部分的峰值能量明显高于非相干能量。因此,在反演的时候只考虑相干反射对土壤水分反演非常不利,该研究利用非相干能量进行土壤水分反演。相干反射的模糊度函数 (woodward ambiguity function, WAF) 和非相干反射的 WAF 之间有很强的相关

性,去除相干项的方法就是将归一化的 BRCS(bi-static radar cross section)与 WAF 之间建立相关性,利用相关性阈值大小进行判断^[53]。由于陆面的低 SNR 主要是由于镜像点位于 CYGNSS 天线样图或者是低散射导致,因此设定 SNR 的最小阈值^[53],当低于这个阈值以后,去除该 SNR 项。

陆面非相干 NRCS(normalized radar cross section)的计算如下:

$$\sigma_0 = \frac{\Gamma(\theta_i, \epsilon)}{O} e^{-\tau_v \sec \theta_i} \quad (9)$$

式中, $\Gamma(\theta_i, \epsilon)$ 是表面菲尼尔反射系数; O 是表面粗糙度的均方根坡度; τ_v 是植被光学厚度,计算如下:

$$\tau_v = b \cdot W_c \quad (10)$$

式中, W_c 是植被含水量,植被光学厚度和植被含水量之间的关系与植被类型的物理和介电特性有关。

CYGNSS 的入射角为 $0^\circ \sim 70^\circ$, 标准偏差为 16.7° , 受数据质量的影响, 大于 60° 的 CYGNSS 测量值都去除。Al-Khaldi 等^[53] 在角度分析时, 利用天底角方向的反射率进行归一化处理。针对于植被的衰减, 则假定在连续的测量中植被衰减在不同角度的影响保持不变。在土壤水分反演时, 该研究假定表面粗糙度与植被光学厚度、土壤水分的变化相比变化缓慢。但上述反演中一般以 SMAP 的土壤水分产品作为真值, 导致 CYGNSS 的实际反演精度无法优于 SMAP, 如何降低对 SMAP 土壤水分数据的依赖性是一个重要方面。

文献[54]利用 2018 年的 CYGNSS 反射率进行土壤水分反演, 该研究认为接收的能量主要是相干散射能量。其在 CYGNSS 数据中获取反射率的最大值 Γ_{\max} 、平均值 Γ_{mean} 、标准偏差 Γ_v 、偏度 Γ_s 和峰度数据 Γ_k , 利用 SMAP 得到植被光学厚度数据 τ , 采用线性回归方程获取土壤水分信息, 计算如下:

$$M_{\text{CYGNSS}} = a \cdot \Gamma_{\max} + b \cdot \Gamma_{\text{mean}} + c \cdot \Gamma_v + d \cdot \Gamma_s + e \cdot \Gamma_k + f \cdot \tau + g \quad (11)$$

式中, $a \sim g$ 为统计回归得到的系数。文献[54]减少了对辅助数据的依赖, 只是利用 SMAP 的 τ 数据, 将 CYGNSS 的土壤水分数据和 SMAP 的土壤水分数据相对比, 二者之间相关系数 $r=0.80$, RMSE 为 $0.07 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ 。

综上, 利用星载 GNSS-R, 尤其是利用 CYGNSS 数据进行土壤水分反演时取得了较好的反演效果, 但降低对辅助数据的依赖获得地基 GNSS-R 反演精度较高的结果是未来亟需突破的

技术难点。

2.2 植被

植被是陆地生态系统的重要组成部分, 在全球碳循环中扮演重要角色。传统遥感手段在植被监测中存在一定的局限性, GNSS-R 技术的发展为植被监测提供了一种新的手段。随着 CYGNSS 的发射及数据获取的增加, 利用星载 GNSS-R 进行植被监测成为一个研究热点。但由于植被的复杂特性, 导致其在该领域的应用尚处于探索研究阶段。本节按照不同的遥感观测平台对现有的研究现状进行总结, 在介绍地基和机载 GNSS-R 基础上回顾了星载相关实验和取得的成果, 重点介绍了星载 GNSS-R 的发展现状。

2.2.1 地基 GNSS-R 植被遥感研究

采用地基遥感平台对植被参数的研究最具代表性的是 GPS-SNR 方法以及 IPT (interference pattern technique) 研究方法。其中, 文献[56-57]直接采用现有的地球测绘或地球物理的 GPS 接收机, 利用 PBO 站点接收到的多路径信息获取 SNR 数据, 从中提取有效反射计高度、相位和幅度信息, 再进行相关植被含水量和归一化微波反射指数 (normalized microwave reflection index, NMRI) 的反演。文献[58-60]则利用改进的 GPS 接收机, 即在现有测绘接收机的基础上重点对天线极化改进, 采用水平极化和垂直极化的天线接收地表反射信号, 利用接收机的干涉波形的凹槽位置和个数信息获取植被高度信息。

2.2.2 机载 GNSS-R 植被遥感实验

Egido 等^[61]进行了两次机载实验, 发现当生物量高达约 300 t/ha 时, 双站反射率和生物量之间仍然存在相关性。文献[62]在瑞典北部森林开展了 BEXUS 17 (balloon experiments for university students 17) 25 km 平流层气球实验。实验表明接收到的反射信号能量在高相干积分时间 (20 ms) 基本与平台高度无关, 信号存在很大的相干反射部分, 其中土壤水分、植被以及土壤和植被的相互作用都会导致该部分的强相干散射。

LEiMON 于 2009-03—2009-09 在意大利佛罗伦萨进行了为期 6 个月的地基农作物 GNSS-R 实验^[63], 采用巴塞罗那 Starlab 公司开发的接收机, 将其安装在 25 m 高的液压吊杆上。该实验比较分析了地表粗糙度、土壤水分含量和植被含水量与 GNSS-R 反射信号之间的关系, 研究表明 LR 信号和 RR 信号与植被含水量之间的相关性较好 (相关系数为 0.8, 敏感性为 $0.3 \text{ db}/(\text{kg}/\text{m}^2)$)。

文献[64]分别于2011-07和2011-11在意大利托斯卡纳进行了两次机载实验,第一次是农作物实验,第二次是生物量变化较大的森林生物量实验。实验证实交叉极化和极化比对植被生物量敏感,存在单调递减关系,而且与单站雷达在150 t/ha时容易出现生物量饱和不同,该研究从实验角度证明GNSS-R遥感在生物量监测时不会出现饱和现象。然后,文献[65]发现在高仰角($70^{\circ}\sim 90^{\circ}$),接收机信号在 5×10^{-2} dB/(t/ha)时仍然存在很好的敏感性,再次证明GNSS-R信号确实不会像L波段单站雷达一样容易出现生物量饱和现象(100~150 t/ha)^[65]。

综上,机载实验证明,与单站雷达森林生物量容易出现饱和不同,GNSS-R独有的前向观测模式导致其生物量不饱和和机制使其成为一种植被监测的有效方式。

2.2.3 星载GNSS-R观测实验

Camps等^[66]利用TDS-1定性分析了土壤水分、粗糙度、地形和体散射对GNSS-R数据的影响,同时分析了全球范围不同地表的土壤水分和大范围的归一化植被指数(normalized difference vegetation index, NDVI)对GNSS-R散射能量的敏感性,指出利用星载GNSS-R进行植被监测存在可行性。

文献[67]首次利用SMAP的反射计模式SMAP-R(SMAP-reflectometry)进行生物量和土壤水分的研究。GPS的L2(1 227.6 MHz)载波频率的散射信号被SMAP双极化(H极化和V极化)雷达接收机接收,通过信号处理得到相应观测区的DDM波形,利用SNR、极化比、前沿斜率(leading edge slope, LES)和后沿斜率(trailing edge slope, TES)对亚马逊和北部森林的地形和生物量敏感性进行分析。SMAP-R反演的土壤水分和SMAP辐射计得到的土壤水分之间的皮尔逊线性相关系数 $r\approx 0.6$;H极化的SNR在不同地表类型时平均值不同;波形的相关参数对季节性变化的地物参数(NDVI和土壤水分指数(soil water index, SWI)敏感;随着生物量增加(100~350 t/ha),LES和TES降低;与NDVI相比,生物量对GNSS-R信号(SNR、极化比、LES和TES)更为敏感,在地表较为粗糙或者高生物量地区,GNSS信号会出现去极化现象。

Hugo等^[68]利用CYGNSS L1数据模拟分析了GNSS-R观测量与森林生物量之间的关系,对比分析的数据分别为AGB(above ground biomass)图和ICESat-1(ice, cloud, and land eleva-

tion satellite)/GLAS(geoscience laser altimeter system)数据的森林冠层高度数据。在刚果和亚马逊地区利用多项式回归的结果表明,当森林生物量低于250 t/ha和350 t/ha时,随着生物量增加,TES和反射率均降低。文献[68]考虑了仰角对生物量反演的影响,以 10° 为间隔分析了反射率和TES与生物量之间的关系,指出由于不同散射机制的作用,生物量受仰角的影响,并从观测角度指出在不同生物量时,面散射和体散射对TES和有效反射率的影响。但上述研究缺乏机理上的支持,只是从大量的观测数据进行分析,对角度简单的采用 10° 间隔分析,没有考虑散射天顶角和方位角的影响

Santi等^[69]利用TDS-1和CYGNSS数据对森林生物量进行研究,采用校正的DDM峰值确定等效反射率,利用该数据分析了局部和全球的森林参数敏感性,认为该参数既包括了相干散射又包含了非相干散射。研究分析表明,随着森林生物量增加,等效反射率降低,反演方法基于人工神经网络利用入射角和SNR数据有助于提高反演精度,局部和全球的反演结果表明,该反演方法对生物量和树高的反演结果较好,相关系数 $r\approx 0.8$ 。

综上,利用地基、机载和星载GNSS-R相关研究已经证明,利用该方法进行植被生物量和植被高度的研究是可行且有良好反演结果的。另外由于GNSS-R双站雷达不容易出现生物量饱和,因此该遥感方式会成为有别于传统雷达观测方式的有效监测手段,而明确其潜在物理机制,开发出高效、便捷的反演算法,将是后续研究中的重点研究内容。

2.3 地表冻融

土壤冻融过程是指土壤中液态水和固态水交替相变,同时伴随大量的潜热交换,在陆面水过程中起重要作用,是气候变化的重要指示器。图1给出了利用GNSS-R/IR方法进行地表冻融监测的理论基础,即当地表发生冻融转换时,介电常数实部和虚部之间会有明显的跃变。

利用GNSS-R技术进行地表冻融状态监测是相对崭新的应用领域^[70-72]。在冻融地表机理模型方面,文献[72-73]发展建立了星载DDM模拟器和适用于复杂寒区地表的前向GNSS多路径模型,在模型中加入不同地表参数的介电常数模型,增加积雪层衰减的计算,在一阶辐射传输方程模型的基础上,使用极化合成方法获取圆极化和线极化的植被镜像圆极化散射特性,耦合了地

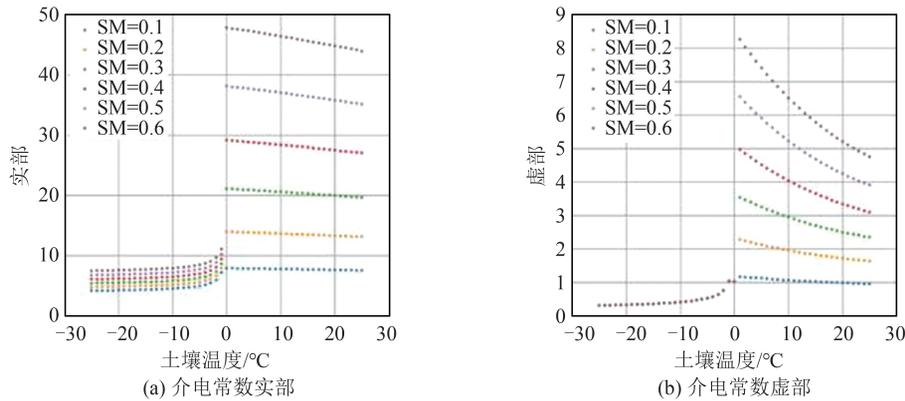


图 1 当地表发生冻融转换时,介电常数实部和虚部的变化情况

Fig. 1 Change of Real Part and Imaginary Part of Permittivity when Freeze-Thaw Conversion Occurs on the Surface

表特性和天线模型,建立了复杂地表条件下冻融土较为详细的星载 DDM 波形和前向 GNSS 多路径模型。利用该模型模拟分析了复杂地表条件(土壤盐度、积雪和植被覆盖)下冻融土的 DDM 波形和前向 GNSS 多路径(SNR、相位和伪距)的响应。研究表明当土壤由冻结转换为融化状态时,由于土壤中水的相态变化导致介电常数和双站散射系数增加,从而引起 DDM 波形和多路径观测量振幅的增加。而盐度含量越高时,多路径观测量振幅越大,积雪和植被层的衰减作用都会导致多路径观测量振幅的降低。文献[72-73]发展建立的模型首次较为详细地揭示了复杂地表条件下冻融土的 GNSS 多路径观测量响应,为后续实验设计、数据分析等可以提供一定的理论支撑。

文献[74]通过理论分析指出利用 GNSS-R/IR 数据进行地表冻融状态监测存在可行性。基于虚拟双站雷达的思想,利用 PBO 站点数据进行了初步验证,建立了地表冻融状态和多路径观测量之间的相关性。Chew 等^[75]则利用 SMAP 数据转换的 GNSS-R 模式(接收机频率带宽调整等),对地表冻融状态监测进行了初步分析。文献[12]利用 CYGNSS 数据对青藏高原的地表冻融特性可行性监测进行研究,当地表发生冻融转换时,地表反射率的变化会导致 DDM 峰值波形的变化。

青藏高原被称为“世界屋脊”,最显著的物理特征之一是土壤的冻融过程。文献[12]在理论分析部分给出利用 GNSS-R 进行地表冻融监测的理论原理,利用 2018-01—2020-01 两年的 CYGNSS 反射率数据与 SMAP 的冻融特性进行比较分析,同时对比分析了该时间序列内的 CYGNSS 反射率与 SMAP 的土壤水分之间的关系,研究表明土壤水分对反射率的影响很小可以忽略,冻融转换是影响 CYGNSS 反射率的主要因

素,证明了利用 CYGNSS 进行青藏高原地表冻融监测是可行的。值得注意的是,CYGNSS 的数据由于在高海拔地区镜像点捕获确定性降低,因此其在青藏高原地区的数据质量相对较差。

3 机会卫星反射信号遥感

SoOP-R 是利用除导航卫星信号以外的数字通讯卫星等进行地物参数遥感的新方式。文献[76]利用 L 波段的 Orbcomm、P 波段的美国海军移动用户目标系统,L 波段的 GPS 以及 S 波段的 XM 卫星无线电发射机等作为信号源,利用相应的反射信号对地表参数进行测量。目前利用 SoOP-R 进行的地物探测主要集中在根区土壤水分(root zone soil moisture, RZSM)和雪水当量(snow water equivalent, SWE)的测量上。

3.1 根区土壤水分

当前 L 波段的主动和被动微波遥感方法对土壤水分的探测深度小于 10 cm,因此获取根区土壤湿度需要较低频率的 P 波段。文献[77]发现 P 波段 SoOP-R 技术可以为 RZSM 提供经济高效的全球采样,为天气和气候预报、径流预报和水资源管理以及洪水预报提供关键数据集,该方式可实现的空间分辨率约为 1~3 km,因此可以在全球和区域陆面模型中对 RZSM 的空间表征进行诊断。

文献[78]在美国俄克拉荷马州首次进行了 P 波段 SoOP-R 根区土壤水分研究,使用机载实验将空转向应用于数据,同时在此过程中会出现误差,因此该研究定义了一种解决信号干扰的检索方法,以及在具有已知反射率的平整表面(例如湖泊)偏转时对天线增益进行替代校准的程序。利用固定在农田上的 30 m 高塔收集反射信号,其目的是证明在此宽带信号上使用互相关方法来隔离直射和反射射线路径,使用小而宽的波束天

线进行测量的可行性。对本实验结果的初步分析(2016-10-22和2016-10-25)证实了镜面反射的基本假设以及相关器阵列的正常功能,经过后处理的空转向后的反射率与预期趋势相符。

3.2 雪水当量

雪水当量是指当积雪完全融化后,所得到的水形成水层的垂直深度。雪水当量储存是水循环的关键参数,也是气候变化的重要指标,但其会表现出较大的时空变异性。文献[79]利用SoOP-R技术进行相关测量,其基本原理是无线电信号经过积雪层会产生传播延迟(或相位变化),即积雪的折射率或介电常数与雪密度密切相关,相对于无雪状况,由于积雪造成的反射信号时间延迟与SWE成正比。通过建模分析了湿雪对SoOP-R测量值的影响,发现对于湿雪,SoOP-R测量相位与雪深相关,此时湿雪介电常数实部更接近于冻结地面介电常数实部,因此相位与降雪深度成线性关系。而对于干雪,相位与SWE相关,由地面和雪表面的反射占主导,干雪介电常数实部更接近于空气介电常数实部。因此,对于干雪,相位与SWE成正比。实验在塔端安装了SoOP-R接收器用于观察MUOS(mobile user objective system)的相干反射,将原始的直射和反射数据记录下来,并应用于后处理中的数据分析和算法开发。反射信号的相位变化与干雪的SWE和湿雪的雪深有关,相位变化率与观测频率直接相关,并通过两个塔基实验(一个无植被覆盖,另外一个被高达3 m的小树包围)对植被影响进行评估,发现两个地点的相位测量值与SWE之间具有良好的相关性,相关系数为0.99。在积雪期,SWE与相位测量的相关系数为0.95~0.98。在融雪期,积雪深度与相位测量值呈负相关,相关系数为0.68~0.80。

文献[78]提出了一种SoOP-R相干检测SWE的模型,通过分层介质对积雪进行建模,并计算积雪的镜面反射信号的相位,同时研究了积雪颗粒、积雪密度、积雪分层、地表散射以及积雪堆中嵌入的冰粒的非相干散射的影响,认为这些因素对相位和SWE关系没有实质性影响。同时,该研究还介绍了利用S、L、P和VHF(very high frequency)频率对地面积雪进行SoOP-R遥感的理论模拟研究。采用分层模型模拟积雪相干反射的振幅和相位。对于干雪和湿雪,相干反射的相位随雪深的变化近似线性变化。频率越高,相位与SWE灵敏度越高。然而,更高频率的

通道将更容易受到积雪深度的空间变异性或足迹中的SWE的影响,从而产生边缘清洗效应。

理论敏感性分析表明,雪粒径、土壤表面粗糙度、积雪分层和土壤湿度对利用相位反演SWE敏感性没有显著影响。这一结果使得相干SoOP-R相位变化检测技术适用于空间变化较小的区域,但是对于具有复杂地形的山区地形,积雪深度可能变化很大,预计相关比例尺为100 m或以下,SoOP-R技术的适用性较差。对SMAP-R的分析将为SoOP技术的适用范围提供指导。实验同时还分析了电离层对低频、VHF和P波段频率的影响。电离层延迟可以通过双频方法在一定程度上进行消减,双频方法已成功用于星载雷达高度计和全球导航卫星系统观测,因此在SWE的反演中必须考虑双频方法,以便使用SoOP-R准确检索SWE。

4 结 语

根据机理模型的散射特性差异的模拟可以看出,典型地物参数在不同极化和不同观测几何下,散射特性有明显差异,如何在接收机信号中将地物参数有效提取并进行相关参数反演是未来发展的挑战之一。其中极化是电磁波的重要特性,针对极化GNSS-R/SoOP-R接收机发展,极化特性的挖掘是完善丰富独立反演算法开发的有利保障。完全针对GNSS-R/IR散射特性的研究关注较少,大部分是集中在一个平面内。虽然近期有研究指出,散射方位角会影响裸土极化特性,但模型中只关注线极化特性,对GNSS-R圆极化特性的研究相对较少,而充分利用其极化特性是GNSS-R/IR亟待解决的问题。关注机理模型的开发和验证,对指导后期反演及实用化和产业化GNSS-R/SoOP-R典型地物参数的反演具有重要的理论指导价值。同时开展相应的地基或机载实验对现有机理模型的验证是后期将现有机理模型应用并开发相应的基于物理模型的反演算法的关键步骤。

GNSS-R/SoOP-R遥感技术在典型陆面参数的监测上存在可行性,但是目前距离具有实际使用价值的定量化参数反演还存在一定的差距,利用机器学习(machine learning, ML)诸如神经网络等进行地物参数的反演是相对比较容易的一种反演方法,因为ML可以很好地对非线性关系进行建模,取得了相对较好的反演精度,其研究成果很好地证明了利用星载GNSS-R遥感技术

在高时空分辨率条件下进行主要水循环观测参数监测的潜能。但目前反演算法中大多是利用 DDM 峰值数据进行相应的研究,这会降低有效信息的捕获效率,DDM 波形是地表若干网格点积分后获取的能量,如何有效区分网格点的角度信息,获取除相干部分散射的能量或者提取非相干部分的散射能量值进行地物参数的反演,以提高 DDM 波形的利用效率将会有助于提高地物参数反演效率。同时,后期反演算法中开发出具有明确物理意义的反演算法,降低对 SMAP 等辅助数据的依赖,开发该遥感方式高效、便捷的反演算法,使该技术在陆地表面典型水循环参数遥感研究中真正走向实用化是未来的必然发展趋势。

GNSS-R 的工作频率主要在穿透性较强的 L 波段,而 SoOP-R 遥感方式则是将频率范围拓展,正是由于这种不同波长的穿透性差异,导致其在根区土壤水分和雪水当量方面的研究提供了新的观测方法。目前虽然相关学者已经进行了机理模型方面的模拟和实验数据的实施和分析,但该种方法距离最终的反演应用还具有非常大的拓展空间。

参 考 文 献

- [1] Hall C D, Cordey R A. Multistatic Scatterometry [C]//International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Remote Sensing: Moving Toward the 21st Century, Edinburgh, UK, 1988.
- [2] Martín-Neira M. A Passive Reflectometry and Interferometry System (PARIS): Application to Ocean Altimetry[J]. *ESA Journal*, 1993, 17(4): 331-355.
- [3] Liu Jingnan, Shao Lianjun, Zhang Xunxie. Advances in GNSS-R Studies and Key Technologies[J]. *Geomatics and Information Science of Wunan University*, 2007, 32(11): 955-960. (刘经南, 邵连军, 张训械. GNSS-R 研究进展及其关键技术[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2007, 32(11): 955-960.)
- [4] Li W Q, Cardellach E, Fabra F, et al. First Spaceborne Phase Altimetry over Sea Ice Using TechDemoSat-1 GNSS-R Signals [J]. *Geophysical Research Letters*, 2017, 44(16): 8369-8376.
- [5] Lu Yong, Yang Dongkai, Xiong Huagang, et al. Study of Ocean Wind-Field Monitoring System Based on GNSS-R[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2009, 34(4): 470-473. (路勇, 杨东凯, 熊华钢, 等. 基于 GNSS-R 的海面风场监测系统研究[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2009, 34(4): 470-473.)
- [6] Gleason S, Adjrad M, Unwin M. Sensing Ocean, Ice and Land Reflected Signals from Space: Results from the UK-DMC GPS Reflectometry Experiment [C]//The 18th International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation, Long Beach, California, USA, 2005.
- [7] Mashburn J, Axelrad P, Lowe S T, et al. Global Ocean Altimetry with GNSS Reflections from TechDemoSat-1[J]. *IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing*, 2018, 56(7): 4088-4097.
- [8] Rodriguez-Alvarez N, Holt B, Jaruwatanadilok S. An Arctic Sea Ice Multi-step Classification Based on GNSS-R Data from the TDS-1 Mission [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2019, 230: 111202.
- [9] Ruf C. Response to Variations in River Flowrate by a Spaceborne GNSS-R River Width Estimator[J]. *Remote Sensing*, 2019, 11(20): 2450.
- [10] Mm A, Cc B, Jtr A, et al. A Novel Approach to Monitoring Wetland Dynamics Using CYGNSS: Everglades Case Study[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2019, 233: 111417.
- [11] Liu Qi, Zhang Shuangcheng, Nan Yang, et al. Flood Detection of South Asia Using Spaceborne GNSS-R Coherent Signals [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2021, 46(11): 1641-1648. (刘奇, 张双成, 南阳, 等. 利用星载 GNSS-R 相干信号探测南亚洪水[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2021, 46(11): 1641-1648.)
- [12] Wu X R, Dong Z N, Jin S G, et al. First Measurement of Soil Freeze/Thaw Cycles in the Tibetan Plateau Using CYGNSS GNSS-R Data [J]. *Remote Sensing*, 2020, 12(15): 2361.
- [13] Chew C, Small E. Description of the UCAR/CU Soil Moisture Product [J]. *Remote Sensing*, 2020, 12(10): 1558.
- [14] Peng Xuefeng, Wan Wei, Li Fei, et al. The Suitability Analysis of Soil Moisture Retrieval Using GNSS-R Technology [J]. *Journal of Remote Sensing*, 2017, 21(3): 341-350. (彭学峰, 万玮, 李飞, 等. GNSS-R 土壤水分遥感的适宜性分析[J]. 遥感学报, 2017, 21(3): 341-350.)
- [15] Freeman V, Esterhuizen S, Jales P, et al. Spire's New GNSS-R Soil Moisture Products Collected from Small and Innovative Earth Observing Satellites [C]//Remote Sensing for Agriculture, Ecosystems, and Hydrology XXII, Berlin, Germany, 2020.
- [16] Al-Khaldi M M, Gleason S, Linnabary R, et al. Level-1 Calibration Assessment of Spire's LEMUR-2 GNSS-R Ocean Normalized Bistatic Radar Cross Section Estimates [J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2023, 20: 1-5.
- [17] Sun Y, Liu C, Du Q, et al. Global Navigation Satellite

- System Occultation Sounder II (GNOS II) [C]// Geoscience & Remote Sensing Symposium, Fort Worth, Texas, USA, 2017.
- [18] Munoz-Martin J F, Llaviera D, Herbert C, et al. Soil Moisture Estimation Synergy Using GNSS-R and L-Band Microwave Radiometry Data from FSS-Cat/FMPL-2[J]. *Remote Sensing*, 2021, 13(5): 994.
- [19] Unwin M J, Pierdicca N, Cardellach E, et al. An Introduction to the HydroGNSS GNSS Reflectometry Remote Sensing Mission[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2021, 14: 6987-6999.
- [20] Nievinski F G, Larson K M. Forward Modeling of GPS Multipath for Near-Surface Reflectometry and Positioning Applications[J]. *GPS Solutions*, 2014, 18(2): 309-322.
- [21] McCreight J L, Small E E, Larson K M. Snow Depth, Density, and SWE Estimates Derived from GPS Reflection Data: Validation in the Western US [J]. *Water Resources Research*, 2015, 50 (8) : 6892-6909.
- [22] Zavorotny V U, Member S, IEEE, 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 & Remote Sensing*, 2011, 3 (1) : 100-110.
- [23] Garrison J L, Nold B, Lin Y C, et al. Recent Results on Soil Moisture Remote Sensing Using P-band Signals of Opportunity[C]//International Conference on Electromagnetics in Advanced Applications (ICEAA), Verona, Italy, 2017.
- [24] Larson K M. GPS Interferometric Reflectometry: Applications to Surface Soil Moisture, Snow Depth, and Vegetation Watercontent in the Western United States [J]. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Water*, 2016, 3(6): 775-787.
- [25] Chew C, Small E E, Larson K M. An Algorithm for Soil Moisture Estimation Using GPS-Interferometric Reflectometry for Bare and Vegetated Soil [J]. *GPS Solutions*, 2016, 20(3): 525-537.
- [26] 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.
- [27] Zavorotny V U, Voronovich A G. Scattering of GPS Signals from the Ocean with Wind Remote Sensing Application[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2000, 38(2): 951-964.
- [28] Masters D S. Surface Remote Sensing Applications of GNSS Bistatic Radar: Soil Moisture and Aircraft Altimetry [D]. Colorado: University of Colorado, 2004.
- [29] 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.
- [30] Fung A, Eom H. Coherent Scattering of a Spherical Wave from an Irregular Surface[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 1983, 31(1): 68-72.
- [31] Chen K S, Wu T D, Tsang L, et al. Emission of Rough Surfaces Calculated by the Integral Equation Method with Comparison to Three-Dimensional Moment Method Simulations [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2003, 41(1): 90-101.
- [32] Bracaglia M, Ferrazzoli P, Guerriero L. A Fully Polarimetric Multiple Scattering Model for Crops [J]. *Remote Sensing of Environment*, 1995, 54(3): 170-179.
- [33] Kurum M, Deshpande M, Joseph A, et al. SCoBi-Veg: A Generalized Bistatic Scattering Model of Reflectometry from Vegetation for Signals of Opportunity Applications[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2019, 57 (2) : 1049-1068.
- [34] Wu X, Jin S. Models and Theoretical Analysis of SoOp Circular Polarization Bistatic Scattering for Random Rough Surface[J]. *Remote Sensing*, 2020, 12(9): 1506.
- [35] Wu X, Song Y, Xu J, et al. Bistatic Scattering Simulations of Circular and Linear Polarizations over Land Surface for Signals of Opportunity Reflectometry[J]. *Geoscience Letters*, 2021, 8(1): 1 - 13.
- [36] Wu X, Jin S. GNSS-Reflectometry: Forest Canopies Polarization Scattering Properties and Modeling [J]. *Advances in Space Research*, 2014, 54 (5) : 863-870.
- [37] Wu X, Andrés C, Xu J, et al. Forest Canopy Scattering Properties with Signal of Opportunity Reflectometry: Theoretical Simulations [J]. *Geoscience Letters*, 2021, 8(1): 23-32.
- [38] Chew C C, Small E E, Larson K M, et al. Effects of Near-Surface Soil Moisture on GPS SNR Data: Development of a Retrieval Algorithm for Soil Moisture[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2013, 52(1): 537-543.
- [39] Reinhart K G. The Problem of Stones in Soil-Mois-

- ture Measurement1 [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1961, 25(4): 268-270.
- [40] 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.
- [41] 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(2): RS0C03.
- [42] Rodriguez-Alvarez N, Moneris A, Bosch-Lluis X, et al. Soil Moisture and Vegetation Height Retrieval Using GNSS-R Techniques[C]//International Geoscience & Remote Sensing Symposium, Boston, Massachusetts, USA, 2008.
- [43] 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.
- [44] 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*, 2006, 100(1): 17-28.
- [45] Egido 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*, 2017, 7(5): 1522-1532.
- [46] Jia Y, Savi P. Sensing Soil Moisture and Vegetation Using GNSS-R Polarimetric Measurement[J]. *Advances in Space Research*, 2016, 59(3): 143-149.
- [47] Chew C, Shah R, Zuffada C, et al. Demonstrating Soil Moisture Remote Sensing with Observations from the UK TechDemoSat-1 Satellite Mission[J]. *Geophysical Research Letters*, 2016, DOI: 10.1002/2016gl068189.
- [48] Munoz-Martin J F, Onrubia R, Pascual D, et al. Single-Pass Soil Moisture Retrieval Using GNSS-R at L1 and L5 Bands: Results from Airborne Experiment[J]. *Remote Sensing*, 2021, 13: 797.
- [49] Camps A, Vall L, 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, DOI: 10.3390/rs10111856.
- [50] Chew C C, Small E E. Soil Moisture Sensing Using Spaceborne GNSS Reflections: Comparison of CYGNSS Reflectivity to SMAP Soil Moisture [J]. *Geophysical Research Letters*, 2018, DOI: 10.1029/2018GL077905.
- [51] Hyunglok K, 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.
- [52] 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: 2227 - 2235.
- [53] 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, DOI: 10.1109/TGRS.2018.2890646.
- [54] 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.
- [55] Balakhder A M, Al-Khaldi M M, Johnson J T. On the Coherency of Ocean and Land Surface Specular Scattering for GNSS-R and Signals of Opportunity Systems [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2019, 57(12): 10426-10436.
- [56] Larson K M, Small E E. Normalized Microwave Reflection Index: A Vegetation Measurement Derived from GPS Networks [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2014, 7(5): 1501-1511.
- [57] Chew C. Vegetation Sensing Using GPS-Interferometric Reflectometry: Theoretical Effects of Canopy Parameters on Signal-to-Noise Ratio Data [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2015, 53: 2755 - 2764.
- [58] Rodriguez-Alvarez N. Study of Maize Plants Effects in the Retrieval of Soil Moisture Using the Interference Pattern GNSS-R Technique [C]//Geoscience and Remote Sensing Symposium, Honolulu, HI, USA, 2010.
- [59] Rodriguez-Alvarez N, Camps A, Vall-Llossera M, et al. Land Geophysical Parameters Retrieval Using the Interference Pattern GNSS-R Technique [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2010, 49(1): 71-84.
- [60] Rodriguez-Alvarez N, Bosch-Lluis X, Camps A,

- et al. Vegetation Water Content Estimation Using GNSS Measurements[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2012, 9(2): 282-286.
- [61] Egido A E. GNSS Reflectometry for Land Remote Sensing Applications [D]. Barcelona: Universitat Politècnica de Catalunya, 2014.
- [62] Hugo C L. First Results of a GNSS-R Experiment from a Stratospheric Balloon Over Boreal Forests [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2016, 54: 2652-2663.
- [63] Alejandro E , Marco C , Giulio R, et al. Global Navigation Satellite Systems Reflectometry as a Remote Sensing Tool for Agriculture[J]. *Remote Sensing*, 2012, 4(8): 2356-2372.
- [64] Paloscia S, Santi E, Fontanelli G, et al. Grass: An Experiment on the Capability of Airborne GNSS-R Sensors in Sensing Soil Moisture and Vegetation Biomass [C]// IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Quebec, Canada, 2014.
- [65] Zribi M, Guyon D, Motte E. Performance of GNSS-R GLORI Data for Biomass Estimation over the Landes Forest [J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2019, 74: 150-158.
- [66] Camps A, Park H, Pablos M, et al. Sensitivity of GNSS-R Spaceborne Observations to Soil Moisture and Vegetation [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2016, 9(10): 4730-4742.
- [67] Hugo C L , Stephen L , Cinzia Z, et al. Spaceborne GNSS-R from the SMAP Mission: First Assessment of Polarimetric Scatterometry over Land and Cryosphere [J]. *Remote Sensing*, 2017, 9(4): 362.
- [68] Hugo C, Luzi G, Crosetto M. Above-Ground Biomass Retrieval over Tropical Forests: A Novel GNSS-R Approach with CYGNSS [J]. *Remote Sensing*, 2020, 12(9): 1368.
- [69] Santi E, Paloscia S, Pettinato S, et al. Remote Sensing of Forest Biomass Using GNSS Reflectometry [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2020, 13: 2351-2368.
- [70] Wu X, Jin S. Can We Monitor the Bare Soil Freeze-Thaw Process Using GNSS-R: A Simulation Study [C]// SPIE Asia Pacific Remote Sensing, Beijing, China, 2014.
- [71] Wu Xuerui, Jin Shuanggen, Tao Xuelin. The Invention Relates to a Monitoring Method and Device of Surface Freeze-Thaw State: CN104155652A [P]. [2023-11-27]. (吴学睿, 金双根, 陶学林. 一种地表冻融状态的监测方法及装置: CN104155652A [P]. [2023-11-27].)
- [72] Wu Xuerui. A Forward GPS Multipath Model for Freezing-Thawing Surface in Complex Cold Regions: CN2018100788874 [P]. [2018-10-07]. (吴学睿, 适用于复杂寒区冻融地表的前向GPS多路径模型的建立方法: CN2018100788874 [P]. [2018-10-07])
- [73] Wu Xuerui, Xia Junming, Bai Weihua, et al. Theoretical Analysis of Soil Freeze/Thaw Process on DDM Waveform and Multipath in Order for GNSS-R/IR Applications [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2019, 48(8): 1059-1066. (吴学睿, 夏俊明, 白伟华, 等. GNSS-R/IR监测地表冻融状态对延迟多普勒波形和多路径数据影响分析 [J]. 测绘学报, 2019, 48(8): 1059-1066.)
- [74] Wu X, Jin S, Chang L. Monitoring Bare Soil Freeze-Thaw Process Using GPS-Interferometric Reflectometry: Simulation and Validation [J]. *Remote Sensing*, 2017, 10(1): 14.
- [75] Chew C E. SMAP Radar Receiver Measures Land Surface Freeze/Thaw State Through Capture of Forward-Scattered L-band Signals [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2017, 198: 333-344.
- [76] Boyd D R, Vega M S , Bindlish R, et al. Inversion Study of Simulated and Physical Soil Moisture Profiles Using Multifrequency Soop-Sources [C]// IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Yokohama, Japan, 2019.
- [77] Yueh S, Shah R, Xu X, et al. HydroCube Mission Concept: P-Band Signals of Opportunity for Remote Sensing of Snow and Root Zone Soil Moisture [C]// Sensors, Systems and Next-generation Satellites, Warsaw, Poland, 2017.
- [78] Shah R, Yueh S, Xu X, et al. Remote Sensing of Terrestrial Snow Using Signals of Opportunity [C]// Geoscience & Remote Sensing Symposium, Fort Worth, Texas, USA, 2017.
- [79] Yueh S H, Xu X, Shah R, et al. Remote Sensing of Snow Water Equivalent Using Coherent Reflection from Satellite Signals of Opportunity: Theoretical Modeling [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2017, 10(12): 5529-5540.