

# GNSS-R/IR 土壤水分遥感研究现状

吴学睿<sup>1,2,3</sup> 金双根<sup>2,3</sup> 宋叶志<sup>2,3</sup> 杨磊<sup>4</sup> 李轩然<sup>1</sup> 莎茹拉<sup>1</sup>

1 赤峰学院资源环境与建筑工程学院,内蒙古自治区赤峰市迎宾路 1 号,024000

2 中国科学院上海天文台,上海市南丹路 80 号,200030

3 上海市空间导航与定位技术重点实验室,上海市南丹路 80 号,200030

4 山东农业大学信息科学与工程学院,山东省泰安市岱宗大街 61 号,271018

**摘要:** 根据不同遥感平台,详细叙述地基、塔基、机载和星载 GNSS-R 技术土壤水分监测的发展现状,综述辐射计联合 GNSS-R 技术进行土壤水分监测的发展现状及 GNSS-R 地基和星载接收机的发展现状,探讨 GNSS-R/IR 进行土壤水分反演的重难点。

**关键词:** GNSS-R/IR;多路径;反射/干涉;土壤水分

**中图分类号:** P228;P237

**文献标识码:** A

土壤水分是联系地表水与地下水的纽带,也是陆面生态系统和水循环的重要组成部分。土壤水分信息对改善区域乃至全球气候模式预报、水循环规律、水资源管理、流域水文模型、农作物生长监测、农作物估产、环境灾害监测及其他自然和生态环境问题起着重要作用<sup>[1]</sup>。

传统的土壤水分监测方法主要采用离散站点或相应气象站点观测,无法满足大范围、高效率的土壤水分观测需求,不能有效地研究土壤水分对环境变化的影响。遥感手段可以高效率、大范围地获取土壤水分信息,光学、红外和微波遥感是对地观测的主要遥感手段。

水的介电常数实部为 80,而干土的为 3.5,土壤水分的增加会使介电常数增加,进而导致发射率降低或反射率增加。微波遥感土壤水分探测的基本原理就是探测水和干土之间较大的介电常数差异<sup>[2]</sup>。双站雷达因其独有的观测几何模式,成为目前土壤水分和植被遥感监测的新兴方法和技术。但一般意义上的双站雷达需要研制专门的发射机和接收机,存在造价昂贵、载荷沉重和功耗低等局限性。新兴的 GNSS-R 技术利用现有的导航卫星群为信号发射源,只需研制专门的反射信号接收机,即可实现对土壤水分双站雷达模式下的有效监测<sup>[3]</sup>。

GNSS-R 技术在 1988 年由 Hall 等<sup>[4]</sup>提出,随后 Martin-Neira<sup>[5]</sup>将其应用于海面高度的研究。

GNSS-R 技术的分类方式有多种,按照其工作模式可以分为散射计模式和高度计模式。由于海洋表面均一及极化特性不明显,可利用该技术进行海面风场、风速和有效波高的研究<sup>[6-8]</sup>,还可以监测海面溢油及悬浮物<sup>[9-10]</sup>,或进行海面移动目标物的探测研究<sup>[11]</sup>。目前,GNSS-R 技术在陆地表面最早和较为广泛的研究是土壤水分遥感,而且现有研究多从实验角度展开,本文根据不同遥感平台(地基、机载和星载)对其研究现状进行总结。

## 1 地基/机载/星载 GNSS-R 实验

### 1.1 BAO 塔基实验

BAO 塔基(boulder atmospheric observatory tower)实验是将改进的 GPS 反射信号接收机放在 300 m 高塔上(40°03'00.1"N,105°00'13.8"W)进行季节性土壤水分 GNSS-R 实验<sup>[12]</sup>。接收机由 NASA 兰利研究中心提供,利用低增益指向天顶的 RHCP(right hand circular polarization)天线接收直射信号,针对地表反射信号采用的接收机天线包含多种天线类型:低增益半球 LHCP 天线,4 个高增益(~12 dB)V、H、LHCP(left hand circular polarization)和 RHCP 天线,其中高增益天线增加了接收机动态范围,降低了表面多路径电磁波干涉信息,天线的入射角设置为 35°(从天底处开始),方位角为 245°。该实验排除了地表粗糙度和植被的影响,信号变化只受土壤水分变

收稿日期:2018-12-20

项目来源:国家自然科学基金(41501384);赤峰学院院士专家工作站项目(cfxyys201710)。

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

化影响。实验表明,当土壤水分含量较高时,其与反射信号之间存在较好的相关性;但由于受L波段穿透性的影响,当土壤比较干燥时,表层土壤水分与反射能量之间的相关性较小。

为分析极化特性对反射信号反演的影响,采用一阶SSA(small slope approximation)模型计算RHCP发射各种极化接收下的反射率信息。其中入射角固定( $60^\circ, 70^\circ$ ),在散射角变化或土壤水分变化的情况下,利用LR/RR比、HR/VR信息进行模拟计算。该理论研究指出,接收机接收到的信号能量主要与2个因素有关:1)与土壤介电特性相关的极化敏感因子;2)与地表粗糙度相关的极化不敏感因子。而正交极化比可以有效去除地表粗糙度的影响,只保留土壤水分信息,但BAO塔基实验的实测数据却无法验证该理论,可能是由于土壤水分均一的初始假设过于简单。BAO塔基实验中角度和极化信息为后续发展提供了重要方向。

## 1.2 机载实验

SMEX(soil moisture field experiment)实测实验是2002年和2003年夏天在美国中西部的爱荷华州进行的地基、机载、星载观测实验<sup>[12]</sup>。SMEX02实验的目的是理解地气相互作用,验证AMSR亮温、土壤水分反演及在植被覆盖情况下的仪器观测和算法,同时SMEX02也用来评估新型仪器(如GPS-R)用于土壤水分遥感技术的可行性([https://nsidc.org/data/amr\\_validation/soil\\_moisture/index.html](https://nsidc.org/data/amr_validation/soil_moisture/index.html))。

在以往的海洋表面GNSS-R反射研究中,天线为半球形指向天底,在SMEX02实验中,天线仍然指向天底,但增加了接收机天线增益,以期获得更好的SNR数据。关于该实验更多的数据可登录网站<http://ccar.colorado.edu>查看。

利用校正的GPS反射信号估测土壤反射率和介电常数的实验验证了GPS反射信号和土壤介电常数及土壤体积含水量之间的关系,获取的介电常数和Wang-Schmugge理论模型吻合较好,但两者均低于实测土壤水分数据<sup>[13]</sup>。毛克彪等<sup>[14]</sup>基于AIEM模型模拟分析土壤水分、地表粗糙度和单频率下前向散射系数的变化关系,并利用SMEX02机载GPS-R实验数据分析该实验中8个站点土壤水分和SNR之间的关系。Egido等<sup>[15]</sup>开展3次机载极化测量实验,获得RL和RR极化反射信息。分析表明,在低高度情况下,RL和RR极化反射率都对土壤水分和地表粗糙度敏感,当极化比在中等地表粗糙度时,对粗糙度

不敏感,有利于进行土壤水分反演,但当地表粗糙度大于3cm时,非相干散射占主导。

2014-05-30国内首次开展机载GNSS-R实验,其目的是验证空间中心研制的GNSS-R接收机性能及研究土壤水分和高度计反演的算法,研究采用LR信息来反演土壤水分信息,同时接收和测试RR极化信息<sup>[16]</sup>。

2016年Jia等<sup>[17]</sup>采用4通道样机接收直射信号和LHCP、RHCP反射信号,利用双极化天线同时接收直射信号和反射信号,数据处理时尽量除去非相干反射能量的影响,反射信号采用直射信号进行归一化处理。研究结果表明,极化比适用于土壤水分反演。

## 1.3 地基GPS-IR(GPS-inteferometric reflectometry)

地基GPS-IR方法不需要研制专门的接收机,直接采用地球物理或地球测绘类接收机。对于典型的测绘类GPS接收机天线的增益,在仰角低于 $30^\circ$ 时,直射信号和反射信号的干涉图信息最为明显,可利用其多路径信息(直射信号和反射信号的相干信号)对地物参数进行遥感监测,其空间分辨率约为 $1\text{ km}^2$ ,介于传统站点式传感器(小于 $1\text{ m}^2$ )和星载观测(大于 $100\text{ km}^2$ )之间。这意味着数以千计的GPS台站数据可用来进行近实时土壤水分观测,为环境科学水文遥感研究提供数据,而土壤水分观测网的建立对于水文研究、天气预报和气候变化监测等具有重要意义。同时,该方法可与L波段星载数据形成良好补充,进而可利用现有的全球GPS网数据建立全球土壤水分观测网,有助于校验其他土壤水分星载卫星数据<sup>[18]</sup>。

Larson等<sup>[19-21]</sup>利用科罗拉多某站点的观测数据进行研究分析,指出相位与近地表土壤水分之间呈线性相关。Zavorotny等<sup>[22]</sup>利用发展建立的GPS反射信息模型指出其存在的物理机制。Chew等<sup>[23]</sup>在Zavorotny模型基础上建立了裸土反演算法,Vey等<sup>[24]</sup>利用该算法建立了南非土壤水分多年的时间序列,研究发现,实测数据和GPS-IR反演的土壤水分之间的RMSE为 $0.05\text{ cm}^3/\text{cm}^3$ ,反演误差较大,限制了其在某些领域的应用。

Chew等<sup>[18,25]</sup>研究指出,植被对相位的影响在土壤水分反演时不能忽视,因此采用SNR的幅度信息来去除植被的影响,并利用SNR的相位信息来反演土壤水分,而植被的信息亦可通过SNR干涉图的频率信息进行校正。影响土壤水分反演的因素有地表粗糙度、植被覆盖、地形和季节的变化。当土壤很干燥时,植被的影响很大;当地表很湿润时,地形坡度的影响较大。

#### 1.4 IPT(interference pattern technique)方法

IPT 方法是利用直射信号和反射信号的相干信号进行地物参数(表面地形坡度、土壤水分及植被覆盖区土壤水分、植被高度等)的反演<sup>[26]</sup>。研究表明,当接收机采用 LHCP 极化天线时,V 极化的布鲁斯角存在空反射率,H 极化会掩盖掉角度信息<sup>[27]</sup>。该研究方法采用的接收机是 2008 年研制的地基 SMIGOL 反射计(soil moisture interference-pattern GNSS observations at L-band reflectometer),工作频率为 GPS L1 (1.575 42 GHz),SMIGOL 反射接收机指向水平,利用天线图表定义 footprint。同时,该研究方法采用 H 极化、V 极化相位差来提高反演精度,双极化 IPT 方法中的接收机为 PSMIGOL(2 个天线,H 极化,V 极化)<sup>[28]</sup>。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,每个采样点数据对应不同的 GPS 卫星仰角信息,因此接收的干涉能量是仰角的直接函数,接收的能量信号的凹槽位置、振幅(notch position and amplitude)及个数与地物参数有关。

对于每颗卫星的原始数据,SMIGOL 反演(表面坡度、植被高度、土壤水分(植被覆盖区土壤水分))基本流程为:1)反演表面坡度信息  $h_{\text{surf}}(\text{sat}, \theta, \varphi)$ , 其是卫星过境时仰角  $\theta$  和方位角函数  $\varphi$  的函数;2)在 1)的基础上获取植被高度信息  $h_{\text{veg}}(\text{sat}, \text{notch})$ , 该信息与凹槽位置和数目有关,可独立于土壤水分、表面粗糙度的反演获取;3)在获取植被高度、实测地表粗糙度的情况下,利用干涉能量幅度信息获取相应的土壤水分  $\text{SM}(\text{sat}, \theta, \varphi)$ 。

#### 1.5 星载 GNSS-R 土壤湿度监测

UK-DMC (UK disaster monitoring constellation)是发射于 2003 年的首个星载 GNSS-R 观测计划,并成功接收到地表的反射信号<sup>[29]</sup>。

UK-DMC 发射成功后,2014-07-08 英国萨利卫星科技公司建立了增强型 GNSS-R 星载传感器,搭载于 Tech-DemoSat-1 卫星上<sup>[30]</sup>。该仪器也搭载在 CYGNSS 上,除了追踪 L1C/A 码星载反射信号并产生相应的 DDM 外,还将首次探测和记录 GPS L2 的星载反射信号。该计划和仪器标志着 GNSS 星载计划走向成熟。

已有的研究证明,可用机载或地基和塔基 GNSS-R 反射信号进行土壤水分的研究,但利用星载数据对土壤水分进行研究尚处于初始阶段。Camps 等<sup>[31]</sup>分析了土壤水分和植被对 TDS-1 (TechDemoSat-1)数据的影响,由于没有测量直

射信号,即没有参考信号,TDS-1 数据没有经过校准,因此数据处理时采用 1 ms 相干积分时间和 1 000 ms 非相干积分时间平均计算得到 DDM 的 SNR,并对变化进行分析,建立 TDS-1 数据和不同地表覆盖类型下(常绿针叶林、草地、常绿阔叶林区)SMOS 土壤水分数据之间很好的相关性。

Chew 等<sup>[32]</sup>采用 TDS-1 的 19 d 数据进行土壤水分研究,结果表明,反射信号和土壤水分之间存在 7 dB 敏感度。但该研究没有考虑地表土壤水分和植被对反射信号的影响,数据分析时只考虑镜像天线增益大于 5 dB,即入射角在  $0^\circ \sim 35^\circ$  时的数据。另外,由于星上镜像点预报软件是面向海洋反射的,在陆面应用时不考虑海拔高于 3 000 m 的反射点。在实际应用时,重新计算镜像点位置,分析时只采用 DDM 峰值能量,而地表粗糙度的增加会导致峰值能量降低,介电常数的增加则会导致峰值能量的增加。

影响 DDM 峰值能量的因素除了反射表面特性以外,还包括天线增益、距离、入射角等,因此,为得到有效峰值能量,采用基于双站雷达方程的方法进行校正<sup>[32]</sup>:

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

式中, $P_{r,\text{eff}}$ 为 TDS-1 上的有效反射能量,已经利用噪音对其进行归一化处理,因此即为 DDM 的 SNR 值; $P_r$ 为每个 DDM 的最高反射能量; $N$ 为噪音项; $R_{\text{sr}}$ 和  $R_{\text{ts}}$ 分别为接收机或发射机到地表镜像点的距离; $\theta$ 为入射角; $G$ 为天线增益。

## 2 GNSS-R 和微波辐射计

微波辐射计可测量物体的微波辐射,即利用亮温数据进行遥感。微波辐射计对物体表面粗糙度不敏感,天线越大,其空间分辨率越高。GNSS-R 属于被动双站雷达,其空间分辨率与地表的相干或非相干散射有关,当相干占主导时,空间分辨率为第一菲涅尔区;当非相干占主导时,空间分辨率对应闪烁区的位置,即形成 GNSS-R 散射计模式,得到 DDM 图。因此,在非相干模式下,GNSS-R 的反演精度次于微波辐射计。

Zavorotny 等<sup>[33]</sup>定性比较了微波辐射计和 GNSS-R 数据的关系;Alonso-Arroyo 等<sup>[34]</sup>从定性和定量的角度比较了 GNSS-R 和微波辐射计之间的关系。2013-09~11,有学者在 LARGO (light airborne reflectometer for GNSS observations)散射计和 PLMR (polarimetric L-band microwave radiometer)辐射计联飞实验中比较和分析了



GNSS-R 和 L 波段微波辐射计观测量之间的关系。LARGO 是一个双通道低能量的被动 GNSS-R 接收机,其中一个通道采用指向天顶的 RHCP 天线来获取直射信号,另一个通道为指向天底的 LHCP 天线接收地表反射信号。PLMR 是工作在 L 波段(1 400~1 426 MHz)的微波辐射计。

3 次机载实验结果表明,对于大入射角(大于  $30^\circ$ ),根据瑞利判别准则,主要散射机制为相干散射,农作物区的相关性为 0.74~0.8,草场区的相关系数为 0.51~0.61;对于小入射角(小于  $30^\circ$ ),由于非相干散射部分增加,相干性降低,农作物区的相关系数为 0.64~0.69,草场区的相关系数为 0.6。

### 3 接收机的发展

地基接收机的发展主要包括以下 3 种:1)直接使用地球测绘或地球物理的地基 GPS 接收机,利用其在低仰角时的多路径数据反演地区参数;2)IPT 方法中使用的 SMIGOL 接收机,该接收机使用 V 极化天线的布鲁斯诺角信息监测地物参数;3)为提高反演精度,PSMIGOL 接收机增加了 H 极化天线。

最早的星载接收机是 UK-DMC 卫星上搭载的 GPS-R 接收机,该接收机由两副指向天顶的接收直射信号的天线和一副指向天底的接收地表反射信号的 LHCP 天线组成。2014 年成功发射的 UK-TDS-1 卫星上搭载新一代 GNSS-R 接收机 SGR-ReSI(space GNSS receiver remote sensing instrument),该接收机与 UK-DMC 卫星一样,星载接收机支持原始数据采集和实时星上处理两种模式。UK-TDS-1 的成功发射标志着 GNSS-R 技术走向成熟。GEROS 搭载于国际空间站上,体积、质量和功耗均较大,其首要使命是利用 GNSS 反射信号反演海面高度和均方根坡度,其次是利用 GNSS 掩星技术监测大气温度、压强等参数,同时 GEROS 亦用于验证 GNSS-R 陆地应用的可行性。PAU/GNSS-R 是基于 FPGA 的 GPS 反射计,该研究旨在提高海水盐度的反演精度,接收机通过使辐射计工作在 GPS L1 载波波段,进而与 GNSS-R 接收机射频前端组合的方式来降低接收机质量和功耗。PYCARO 接收机搭载在  $3 \times 2U$  的立方体卫星上,并实施地面和大气遥感,该接收机与其他典型的星载 GNSS-R 接收机不同,采用无半码技术对 P(Y)码进行处理,且通过双频观测校正电离层测高误差。

### 4 结 语

GNSS-R 技术是近年来兴起的对地观测技

术,在国内外引起广泛关注。由于海面均一、极化特性不明显,GNSS-R 最早应用于海洋领域,且技术较为成熟,而 NASA 发射的 CYGNSS 标志着利用该技术进行海面风场研究走向实用化。但针对陆地表面,由于地物参数复杂,极化特性不明显,GNSS-R 的研究相对滞后。针对土壤水分的研究,目前多采用观测的方法或建立区域性的反演算法。最早的机载实验是 SMEX02 中的机载 GPS-R 实验,该实验建立了土壤水分和 GPS 反射信号的相关性。BAO 塔基实验利用 4 个天线(RHCP、LHCP、H 和 V 极化)研究分析其与土壤水分的关系,并试图去除地表粗糙度的影响。利用直射信号和反射信号的相干信号进行地物参数遥感的 IPT 方法,利用 V 极化时存在的布鲁斯诺角信息进行土壤水分反演,在有限的实验中取得了较好的土壤水分反演精度。与需要研制特定的反射信号接收机不同,其直接利用地球测绘或者地球物理 GPS 接收机多路径信息进行地物参数的监测和反演,取得了良好的结果,并将反演结果应用于 SMAP 的校验。星载的 GNSS-R 土壤水分研究目前相对较少,但已有学者建立了 TDS-1 和 SMOS 卫星与 GNSS 反射信号的相关性,验证了星载 GNSS-R 土壤水分观测的可行性和良好的应用前景。同时,本文还给出了微波辐射计和 GNSS-R 之间土壤水分观测研究现状对比,并综述了 GNSS-R 接收机的发展现状。利用 GNSS-R/IR 技术进行土壤水分反演时,重点需要挖掘其角度和极化信息。

另外,GNSS 卫星群和相应的反射信号接收机之间构成双站雷达工作模式,由于地物反射的空间异质性,其在不同的散射天顶角和方位角之间的散射特性具有差异性。如何有效利用不同角度(散射天顶角和方位角)的散射特性,是今后土壤水分反演的重点和难点。极化是电磁波的重要特性,地表反射信号的极化信息携带了地表的重要信息。BAO 塔基实验采用线极化和圆极化 4 种天线接收地表反射信号,以期利用极化信息反演土壤水分,后续的机载实验也证明极化比是去除地表粗糙度对反演土壤水分影响的有效方式。因此,如何有效利用圆极化和线极化反射信息反演土壤水分是提高土壤水分反演精度的研究重点。

### 参考文献

- [1] Wood E F. Global Scale Hydrology: Advances in Land Surface Modeling[J]. Reviews of Geophysics, 1991, 29 (S1): 193-201
- [2] Kraus J. Microwave Remote Sensing: Active and Passive,

- Vol. 1: Microwave Remote Sensing, Fundamentals and Radiometry[M]. Massachusetts: Addison-Wesley Publishing Company, 1983
- [3] 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
- [4] Hall C D, Cordey R A. Multistatic Scatterometry[C]. *International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, Edinburgh, 1988
- [5] Martin-Neira M. A Passive Reflectometry and Interferometry System (PARIS): Application to Ocean Altimetry[J]. *ESA Journal*, 1993, 17(4):331-355
- [6] 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
- [7] Shah R, Garrison J L. Application of the ICF Coherence Time Method for Ocean Remote Sensing Using Digital Communication Satellite Signals[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2014, 7(5):1 584-1 591
- [8] Alonso-Arroyo A, Camps A, Park H, et al. Retrieval of Significant Wave Height and Mean Sea Surface Level Using the GNSS-R Interference Pattern Technique: Results from a Three-Month Field Campaign[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2015, 53(6):3 198-3 209
- [9] Valencia E, Camps A, Park H, et al. Oil Slicks Detection Using GNSS-R[C]. *2011 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, Vancouver, 2011
- [10] Valencia E, Camps A, Rodriguez-Alvarez N, et al. Using GNSS-R Imaging of the Ocean Surface for Oil Slick Detection[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2012, 6(1):217-223
- [11] Liu L F, Zhang Q S, Gu J K. The Detection of Marine Ship Target Based on GNSS-R of Stratosphere[J]. *Applied Mechanics and Materials*, 2014, 643:258-262
- [12] 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
- [12] 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
- [14] 毛克彪, 王建明, 张孟阳, 等. 基于 AIEM 和实地观测数据对 GNSS-R 反演土壤水分的研究[J]. *高技术通讯*, 2009, 19(3):295-301(Mao Kebiao, Wang Jianming, Zhang Mengyang, et al. The Study of Soil Moisture Retrieval from GNSS-R Signals Based on AIEM Model and Experiment Data[J]. *Chinese High Technology Letters*, 2009, 19(3):295-301)
- [15] 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*, 2014, 7(5): 1 522-1 532
- [16] Wan W, Bai W H, Zhao L M, et al. Initial Results of China's GNSS-R Airborne Campaign: Soil Moisture Retrievals [J]. *Science Bulletin*, 2015, 60(10): 964-971
- [17] Jia Y, Savi P. Sensing Soil Moisture and Vegetation Using GNSS-R Polarimetric Measurement[J]. *Advances in Space Research*, 2017, 59(3): 858-869
- [18] Chew C 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
- [19] 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
- [20] Larson K M, Small E E, Gutmann E D, et al. Use of GPS Receivers as a Soil Moisture Network for Water Cycle Studies[J]. *Geophysical Research Letters*, 2008, 35(24):851-854
- [21] 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
- [22] 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
- [23] 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
- [24] 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
- [25] Chew C C, Small E E, Larson K M, et al. 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*, 2014, 53(5): 2 755-2 764
- [26] 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
- [27] Rodriguez-Alvarez N, Monerris A, Bosch-Lluis X, et al. Soil Moisture and Vegetation Height Retrieval Using GNSS-R Techniques[C]. *2009 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, Cape Town, 2009
- [28] Alonso-Arroyo A, Camps A, Aguias 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): 2 090-2 094
- [29] Scott G. *Remote Sensing of Ocean, Ice and Land Surfaces Using Bistatically Scattered GNSS Signals from Low Earth Orbit*[D]. Guildford: University of Surrey, 2006

- [30] Unwin M, Duncan S, Jales P, et al. Implementing GNSS Reflectometry in Space on the TechDemoSat-1 Mission[C]. ION GNSS, Florida, 2014
- [31] Camps A, Park H, Pablos M, et al. Soil Moisture and Vegetation Impact in GNSS-R TechDemoSat-1 Observations[C]. 2016 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Beijing, 2016
- [32] 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, 45(9): 4 049-4 057
- [33] Zavorotny V U, Gasiewski A J, Zamora R J, et al. Stationary L-Band Radiometry for Seasonal Measurements of Soil Moisture[C]. 2006 IEEE International Symposium on Geoscience and Remote Sensing, Denver, 2006
- [34] Alonso-Arroyo A, Camps A, Monerris A, et al. On the Correlation between GNSS-R Reflectivity and L-Band Microwave Radiometry[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 2016, 9(12): 5 862-5 879

## Progress on Soil Moisture Monitoring with GNSS-R/IR Technique

WU Xuerui<sup>1, 2, 3</sup> JIN Shuanggen<sup>2, 3</sup> SONG Yezhi<sup>2, 3</sup> YANG Lei<sup>4</sup> LI Xuanran<sup>1</sup> SHA Rula<sup>1</sup>

<sup>1</sup> School of Resource and Environmental Sciences, Chifeng University, 1 Yingbin Road, Chifeng 024000, China

<sup>2</sup> Shanghai Astronomical Observatory, CAS, 80 Nandan Road, Shanghai 200030, China

<sup>3</sup> Shanghai Key Laboratory of Space Navigation and Positioning Technique, 80 Nandan Road, Shanghai 200030, China

<sup>4</sup> College of Information Science and Engineering, Shandong Agricultural University, 61 Daizong Street, Tai'an 271018, China

**Abstract:** According to different remote sensing platforms, the progress of soil moisture monitoring using GNSS-R technique with ground-based, tower-based, airborne and space borne platforms are presented in this paper. A detailed review of GNSS-R joint with microwave radiometer is also given in this paper. And we discuss the key and difficult points of GNSS-R/IR in soil moisture inversion.

**Key words:** GNSS-R/IR; multipath; reflection/ interference; soil moisture

**Foundation support:** National Natural Science Foundation of China, No. 41501384; Academician Workstation Foundation of Chifeng University, No. cfxys201710.

**About the first author:** WU Xuerui, PhD, associate researcher, majors in GNSS-R theory and applications, E-mail: xrwu@shao. ac. cn.

(上接第 1227 页)

## Coulomb Stress Change on the Xiaojiang and the Red River Faults, Southeastern Tibetan Plateau, from the 1970 Tonghai M<sub>s</sub>7.7 Earthquake

ZHU Xiaojie<sup>1,2</sup> HE Jiankun<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Key Laboratory of Continent Collision and Plateau Uplift, Institute of Tibetan Plateau Research, CAS,

16 Lincui Road, Beijing 100101, China

<sup>2</sup> University of Chinese Academy of Sciences, A19 Yuquan Road, Beijing 100049, China

**Abstract:** Based on previous studies, the rupture parameters of the 1970 Tonghai M<sub>s</sub>7.7 earthquake are obtained. Using the model, we study the changes of Coulomb rupture stress under different lithospheric rheological properties. We discuss the effects of static co-seismic deformation and short-term post-earthquake deformation on potential seismic activity in the Xiaojiang fault and the Red River fault. Results show that on some segments of the two faults, the coseismic change of Coulomb failure stress( $\Delta$ CFS) attains 0.12—0.50 bar at 7.5 km depth. Relaxation of the lower crust and the upper mantle adds the postseismic  $\Delta$ CFS on the two faults up to 0.22—0.90 bar after 48 years. This means that the 1970 event is increasing the potential of seismic activity along the two active faults. In this case, we should pay more attention to these two active faults in future research by increasing field observations to monitor the seismic activity and the crustal motion pattern.

**Key words:** strike-slip faults; coseismic deformation; postseismic deformation; seismic rupture parameters; Coulomb failure stress

**Foundation support:** National Natural Science Foundation of China, No. 41674104.

**About the first author:** ZHU Xiaojie, postgraduate, majors in geodynamics and numerical simulation, E-mail: zhuxiaojie@itpcas. ac. cn.