

引文格式: 汉牟田, 杨毅, 张波. GNSS 信号土壤衰减模型的试验验证方法[J]. 测绘学报, 2020, 49(9): 1202-1212. DOI: 10.11947/j. AGCS. 2020.20200259.

HAN Mutian, YANG Yi, ZHANG Bo. An experimental validation method on GNSS signal attenuation model in soil[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2020, 49(9): 1202-1212. DOI: 10.11947/j. AGCS. 2020.20200259.

GNSS 信号土壤衰减模型的试验验证方法

汉牟田^{1,2}, 杨毅³, 张波²

1. 地理信息工程国家重点实验室, 陕西 西安 710054; 2. 北京航空航天大学电子信息工程学院, 北京 100191; 3. 中交星宇科技有限公司, 北京 100088

An experimental validation method on GNSS signal attenuation model in soil

HAN Mutian^{1,2}, YANG Yi³, ZHANG Bo²

1. State Key Laboratory of Geo-Information Engineering, Xi'an 710054, China; 2. School of Electronic and Information Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China; 3. China Communications Xing Yu Technology Co., Ltd., Beijing 100088, China

Abstract: The attenuation of GNSS signals in soil is of great significance for the related research of using GNSS signals to measure soil moisture. In this paper, for the first time, the attenuation of BDS (BeiDou navigation satellite system) and GPS (global positioning system) signals in the soil was studied through experiments. In the experimental design, the GNSS antenna was placed into the soil, then the soil thickness and moisture above the antenna were continuously changed to collect the power attenuation data of the GNSS signal. Finally, these data were used to retrieve soil moisture in order to validate the GNSS signal attenuation model. Experimental results show that soil can significantly attenuate GNSS signals. The greater the soil moisture value and thickness value is, the more severe the attenuation is. In the case of clay type soil and soil moisture of $0.15 \sim 0.30 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$, the GNSS signal power has been attenuated to be undetectable by the GNSS receiver when the soil thickness reaches 21 cm. Further retrieval of soil moisture based on the GNSS signal attenuation model was carried out, the results show that the attenuation model is more accurate when the soil thickness is larger than or equal to 10 cm and when the satellite elevation angle is larger than 50° . And under this situation, the root mean square error of soil moisture retrieval using BeiDou B1 signal and GPS L1 signal is less than $0.04 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ and $0.09 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$, respectively.

Key words: soil moisture measurement; BDS; signal attenuation; carrier-to-noise ratio; effective remote sensing depth

Foundation support: The Open Fund of State Key Laboratory of Geo-Information Engineering (No. SKLGIE2018-M-2-2)

摘 要: GNSS(global navigation satellite system)信号在土壤中的衰减情况对于研究 GNSS 反射信号的有效遥感深度具有重要意义。本文通过试验研究了北斗信号与 GPS(global positioning system)信号在土壤中的衰减情况。在试验设计上将 GNSS 天线置入土壤中并不断改变天线上方的土壤厚度与湿度以采集 GNSS 信号的功率衰减数据,最后利用这些数据反演土壤湿度以对 GNSS 信号土壤衰减模型进行验证。试验结果表明,土壤能够使 GNSS 信号发生明显的衰减。土壤的湿度值与厚度值越大,GNSS 信号功率衰减越严重。在黏土土质,土壤湿度为 $0.15 \sim 0.30 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ 的情况下,当土壤厚度达到 21 cm 时,GNSS 信号功率已衰减至无法被 GNSS 接收机测出。进一步根据 GNSS 信号衰减模型反演土壤湿度,结果显示,模型在土壤厚度大于等于 10 cm、卫星仰角高于 50° 的情况下较为精确,此时利用北斗 B1 信号与 GPS L1 信号反演土壤湿度的均方根误差分别小于 $0.04 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ 与 $0.09 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ 。

关键词: 土壤湿度测量;北斗导航系统(BDS);信号衰减;载噪比;有效遥感深度

中图分类号:P237

文献标识码:A

文章编号:1001-1595(2020)09-1202-11

基金项目:地理信息工程国家重点实验室基金资助项目(SKLGIE2018-M-2-2)

在全球范围内,除了海洋以外,土壤是第 2 大水分涵养体。土壤,尤其是表层土壤中的水分易受降水和太阳辐射的影响而快速变化,因此表层数厘米厚度的土壤在全球水循环中起着十分重要的调控作用^[1-2]。因此更好地监测土壤湿度能够帮助减少气象预测、极端天气预测中的不确定性,从而为农业生产保驾护航。

在过去的几十年中,各种主被动微波遥感技术已经成功地在不同的尺度上实现了对土壤湿度的观测^[3-9]。在微波遥感所使用的微波波段中,L 波段的微波信号穿透能力强且对土壤湿度敏感^[4,10]。2009 年由欧空局发射的 SMOS 计划卫星以及 2015 年由 NASA 发射的 SMAP 任务卫星,均工作于该波段^[11-12]。

到了 20 世纪 90 年代,随着全球卫星导航系统(GNSS)的发展,衍生出了利用 GNSS 反射信号进行土壤湿度遥感的技术,简称 GNSS-R 技术^[13-22]。由于 GNSS 系统也工作于 L 波段,因此 GNSS-R 技术不但继承了 L 波段微波遥感的特点,并且与其他遥感技术相比,具备时空分辨率高,接收处理装置功耗低、研制成本低、搭载平台灵活等优点,所以是目前研究的热点。

GNSS 反射信号遥感得到的土壤湿度数据产品需经过地面验证。在大多数情况下,验证过程是与探针式土壤湿度传感器或者烘干称重法等实地测量手段的测量结果进行对比。在此过程中涉及如何选择传感器置入土壤的深度或者土壤的取样深度。不同深度处的土壤湿度数值及其相对变化将影响验证的有效性。取样深度的选择取决于 GNSS 反射信号的有效遥感深度,但目前对于有效遥感深度的数值尚无定论。实际上有效遥感深度与 GNSS 信号进入土壤传播过程中的衰减情况密切相关。虽然存在理论模型对 GNSS 信号的衰减情况进行描述,但由于实际土壤成分十分复杂,理论模型可能与实际情况有较大出入。在这种情况下,试验研究便成为重要的研究手段。2016 年,文献[23]尝试将 GPS 天线置入土壤中开展试验,通过测量 GPS 信号在土壤中的功率衰减来测量土壤湿度,但是将 GPS 天线置于土壤中的固定深度处,不足以研究 GNSS 信号在土壤中的衰减情况。2017 年,文献[24—25]研究 GPS

信号在水中的衰减情况,采用改变水深的方法来改变 GNSS 天线上方的水体厚度,并在后续研究中开展了类似试验以利用 GNSS 信号衰减测量雪水当量。

针对目前对 GNSS 信号在土壤中衰减情况研究的不足,本文在试验过程中改变 GNSS 天线上方的土壤厚度与湿度,以研究北斗与 GPS 信号在土壤中的衰减情况,进而验证信号衰减模型在不同土壤厚度下的准确性。这些研究对于估计 GNSS 反射信号的有效遥感深度具有重要意义。

1 GNSS 信号土壤衰减模型

GNSS 信号土壤衰减模型是描述 GNSS 信号从空气进入土壤传播过程中其功率衰减情况的模型,它的应用场景如图 1 所示。

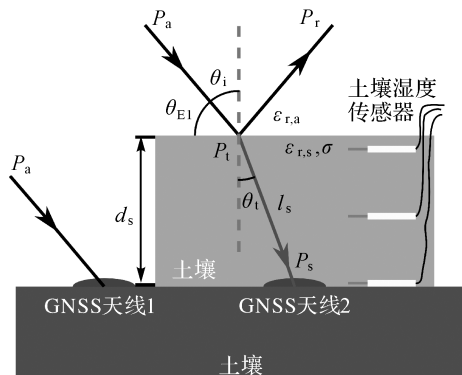


图 1 GNSS 信号土壤衰减模型的应用场景
Fig.1 Scenario of GNSS signal attenuation model for soil

图 1 中有两个 GNSS 天线。其中 GNSS 天线 1 置于土壤表面,它接收的是 GNSS 直射信号,假设 GNSS 天线 1 处的信号功率为 P_a 。设空气的相对介电常数为 $\epsilon_{r,a}$,则空气的复相对介电常数 $\hat{\epsilon}_{r,a} = \epsilon_{r,a}$,空气的复相对折射率 $\hat{n}_{r,a} = \sqrt{\hat{\epsilon}_{r,a}}$ 。GNSS 天线 2 置于厚度为 d_s 的土壤底部。由于土壤中含有水分和无机盐,所以土壤是一种有耗介质,设土壤的相对介电常数为 $\epsilon_{r,s}$,电导率为 σ ,则土壤的复相对介电常数可以表示为 $\hat{\epsilon}_{r,s} = \epsilon_{r,s} - j \frac{\sigma}{\omega \epsilon_0} = \epsilon'_{r,s} - j \epsilon''_{r,s}$,其中 ϵ_0 真空介电常数, ω 为入射波的角频率, $\epsilon'_{r,s}$ 为土壤复相对介电常数的实部, $\epsilon''_{r,s}$ 为土壤复相对介电常数的虚部,则土壤的

复相对折射率 $\hat{n}_{r,s} = \sqrt{\hat{\epsilon}_{r,s}}$ 。GNSS 信号从空气入射到土壤中时首先会发生折射,假设 GNSS 信号的入射角为 θ_i ,则折射角 θ_t 与 θ_i 的关系可由 Snell 定律描述

$$\theta_t = \arcsin \frac{\hat{n}'_{r,a} \sin \theta_i}{\hat{n}'_{r,s}} \quad (1)$$

式中, $\hat{n}'_{r,a}$ 与 $\hat{n}'_{r,s}$ 分别为空气与土壤的复相对介电常数的实部。通常情况下,GNSS 接收机定位解算输出的是卫星仰角(也称为高度角) θ_{Ei} 而非入射角 θ_i ,如果假设土壤表面水平且忽略大气对 GNSS 信号的折射效应,则入射角为卫星仰角的余角,也即 $\theta_i = 90^\circ - \theta_{Ei}$,如图 1 所示。

GNSS 信号经过折射后便进入到土壤中传播,最终被 GNSS 天线 2 所接收,则 GNSS 信号在土壤中的传播路径长度 l_s 可表示为

$$l_s = \frac{d_s}{\cos \theta_t} \quad (2)$$

以上是对土壤衰减模型应用场景中的几何关系的描述。

GNSS 信号经过折射后不仅传播方向发生了改变,并且信号的功率也发生了衰减,因为入射波的一部分能量被土壤与空气的分界面反射回了空气中。设经过折射后 GNSS 信号的功率为 P_t , P_t 与 P_a 的关系可以用下式表示

$$P_t = P_a(1-R) \quad (3)$$

式中, R 为 GNSS 信号的反射率,则 $1-R$ 表示折射率。GNSS 信号的极化方式为右旋圆极化,可以被分解为垂直极化和平行极化两个线极化分量,因此 GNSS 信号的反射率可以用两个线极化分量的反射系数表示^[23],如式(4)所示

$$R = \frac{r_{\perp}^2 + r_{\parallel}^2}{2} \quad (4)$$

式中, r_{\perp} 与 r_{\parallel} 分别为垂直极化分量与平行极化分量的反射系数,可用下式表示

$$r_{\parallel} = \frac{\hat{\epsilon}_{r,s} \cos \theta_i - \sqrt{\hat{\epsilon}_{r,s} - \sin^2 \theta_i}}{\hat{\epsilon}_{r,s} \cos \theta_i + \sqrt{\hat{\epsilon}_{r,s} - \sin^2 \theta_i}} \quad (5)$$

$$r_{\perp} = \frac{\cos \theta_i - \sqrt{\hat{\epsilon}_{r,s} - \sin^2 \theta_i}}{\cos \theta_i + \sqrt{\hat{\epsilon}_{r,s} - \sin^2 \theta_i}} \quad (6)$$

经过折射后的信号在土壤中传播时,其功率衰减是以折射后的信号功率为基准。根据 Beer-Lambert 定律,在没有散射的情况下,信号功率在传播过程中呈指数衰减^[23],则 GNSS 天线 2 处的信号功率可以由式(7)描述

$$P_s = P_t e^{-\alpha l_s} \quad (7)$$

式中, α 为衰减系数,它是土壤复相对介电常数与信号频率 f 的函数,可以用式(8)表示^[23]

$$\alpha = \epsilon''_{r,s} \epsilon_0 2\pi f \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon'_{r,s} \epsilon_0}} \quad (8)$$

联立式(3)与式(7)可以得到场景中 GNSS 天线 1 与 GNSS 天线 2 处的信号功率关系为

$$P_s = P_a(1-R)e^{-\alpha l_s} \quad (9)$$

式(9)中反射率和衰减系数都是土壤复相对介电常数的函数。土壤复相对介电常数主要受土壤湿度的影响,二者之间的关系可以由土壤介电模型进行描述,在微波波段有一些常用的模型可供使用,如 Hallikainen 模型。以黏土土质为例,土壤的复相对介电常数可用下式表示

$$\hat{\epsilon}_{r,s} = (2.8575 + 3.8526 \text{SMC} + 119.0605 \text{SMC}^2) + (0.3515 + 5.5242 \text{SMC} + 17.7091 \text{SMC}^2)j \quad (10)$$

式中, SMC 为体积土壤湿度,单位为 cm^3/cm^3 。

在 GNSS 接收机中对信号功率的度量是载噪比(C/N_0)。载噪比是 GNSS 信号载波功率与噪声功率谱密度的比值,常用对数刻度表示,单位为 dB-Hz。将式(9)用载噪比表示如下

$$(C/N_0)_s = (C/N_0)_a + 10 \lg(1-R) - 10\alpha l_s \lg(e) \quad (11)$$

图 2 是 GNSS 信号功率在不同土壤湿度与不同土壤厚度下的衰减情况,即 $(C/N_0)_s - (C/N_0)_a$ 。

从图 2 中可以看出土壤湿度越高、土壤厚度越厚,则 GNSS 信号功率衰减越严重,且在一定的土壤湿度条件下,GNSS 信号功率衰减是土壤厚度的线性函数,与式(11)相符。

以上构成了 GNSS 信号土壤衰减模型的理论基础。然而实际上由于土壤的成分十分复杂,理论模型可能与实际情况存在出入,为此需要通过试验,进行验证。

2 试验数据采集

GNSS 信号衰减试验选择在北京市通州区的一处农田进行(图 3),试验周期为 2019-03-23—2019-06-26。试验中使用两套相同硬件配置的 GNSS 接收机组成测量 GNSS 信号衰减的测量系统,包括两台相同型号的 GNSS 接收机,两支型号相同的 GNSS 碟形天线,两根型号相同长度相同的天线馈线。采用相同硬件配置的目的是尽可

能地减少测量系统本身引入的系统误差。

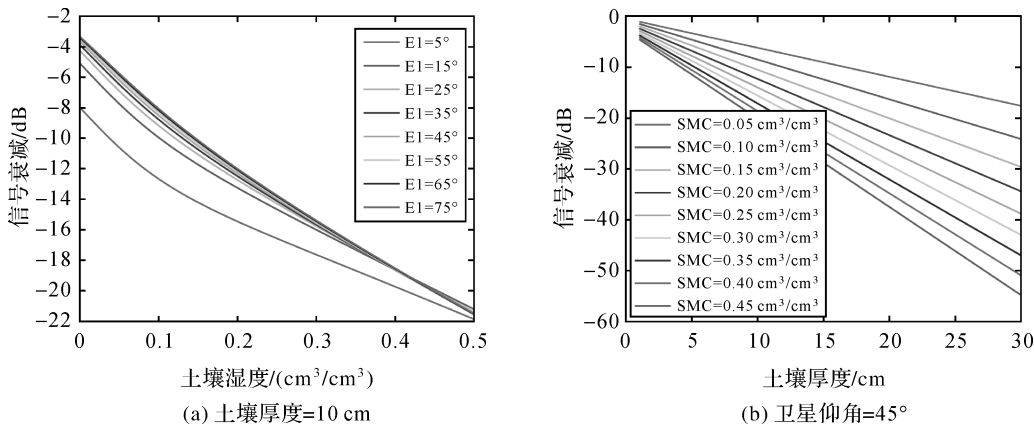
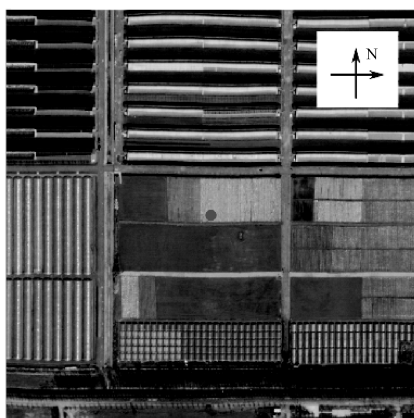


图 2 GNSS 信号功率衰减随土壤湿度与土壤厚度变化

Fig.2 The attenuation of GNSS signal power with respect to soil moisture and soil thickness

为了方便改变土壤厚度,试验中使用对 GNSS 信号影响较小的塑料编织袋盛放土壤,塑料编织袋直径约 150 cm。按照图 1 所示的场景布置 GNSS 天线,即将一只 GNSS 天线(设为 GNSS 天线 1)固定在编织袋外部的土壤表面,一只 GNSS 天线(设为 GNSS 天线 2)固定在塑料编织袋的底部中间位置。两只天线的距离应足够远以保证两只天线都落在对方的远场区域,从而减少 GNSS 天线之间的互扰。两只 GNSS 天线分别独立连接至两台 GNSS 接收机,并设置两台接收机的测量频率为 1 Hz,测量结果以 Rinex 标准文件的形式存储在接收机中。

试验过程中,以 3~4 cm 厚度为单位向塑料编织袋中增加土壤,每次改变土壤厚度都人为将土壤湿度增加到 0.3 cm³/cm³ 以上,然后让土壤湿度自由回落。为了测量真实土壤湿度,将 3 个土壤湿度传感器(测量精度小于 0.03 cm³/cm³)水平插入到塑料编织袋里土壤中,其中一个传感器放置在土壤底部,并保持不动。其他两个传感器在竖直方向上的位置根据土壤厚度增加的情况进行调整,以尽可能地使 3 个传感器在竖直方向上等间隔分布,即从下到上依次为传感器 1、传感器 2、传感器 3,如图 1 所示。



(a) 试验地点卫星地图



(b) 现场照片

图 3 试验现场

Fig.3 The conduction of the experiment

根据土壤厚度的不同,将整个试验周期分为 6 个阶段,各阶段总结如表 1 所示。

表 1 中的平均土壤湿度是 3 个土壤湿度传感

器测得土壤湿度的算术平均值,由于第一阶段与第二阶段土壤厚度较薄,所以只有传感器 1 和传感器 2 被用于测量土壤湿度。

表 1 各试验阶段详细信息

Tab.1 Detail information of all the experiment stages

试验阶段	起止时间	土壤厚度 /cm	传感器 1 深度/cm	传感器 2 深度/cm	传感器 3 深度/cm	平均土壤湿度 /(cm^3/cm^3)
1	2019-03-23—2019-03-30	3	3	1	—	0.090 0~0.324 5
2	2019-04-04—2019-04-19	6.5	6.5	3.5	—	0.113 4~0.379 0
3	2019-04-19—2019-05-06	10	10	6	2	0.133 8~0.343 9
4	2019-05-06—2019-05-22	14	14	8	2	0.108 8~0.343 7
5	2019-05-22—2019-06-02	18	18	10	3	0.138 4~0.358 4
6	2019-06-02—2019-06-26	21	21	12	3	0.145 0~0.306 9

3 试验数据处理

试验数据处理步骤如下：

(1) 读取两台接收机输出的所有 Rinex 标准格式数据包括观测值数据、广播星历数据以计算每个观测历元的卫星仰角。计算时需利用 GNSS 天线的位置信息，在本试验中选择 GNSS 天线 1 的位置参与计算，并假设 GNSS 天线 2 的位置与 GNSS 天线 1 的位置相同。由于两只 GNSS 天线间的距离不超过 1.5 m，因此两只天线处观测到的同一颗卫星的仰角差别可以忽略。

(2) 将两台接收机测得的载噪比数据从对数刻度(dB)转换为线性刻度(W)，即 $W = 10^{\text{dB}/10}$ 。

(3) 设定需处理的仰角范围，该仰角范围的上下限之差以小于等于 5° 为宜，以下以 $55^\circ \sim 60^\circ$ 仰角范围为例。

(4) 筛选出两台接收机在上述仰角范围内测得的同一颗卫星的载噪比数据，然后分别取平均以减小测量的噪声，如此得到 GNSS 天线 1 与

GNSS 天线 2 处的实测信号功率分别为 P_a 与 P_s 。

(5) 计算得到实测功率衰减，即 $\frac{P_s}{P_a}$ 。

(6) 使用查表法反演土壤湿度，即在设定的卫星仰角与土壤厚度条件下，利用式(1)一式(10)仿真产生各土壤湿度条件下($0 \sim 1 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$)的功率衰减形成数据表，然后在表中查找与实测功率衰减最接近的仿真功率衰减，则其所对应的土壤湿度即为反演得到的土壤湿度。在生成数据表时所使用的土壤湿度分辨率应尽可能高，在本试验中分辨率为 $0.000 1 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ ，所使用的卫星仰角为上述仰角范围的中间值，即 $(55^\circ + 60^\circ)/2 = 57.5^\circ$ 。

4 试验结果与分析

4.1 试验期间观测北斗卫星数量变化

如图 4 所示为试验期间每天观测到的北斗与 GPS 卫星数量变化。

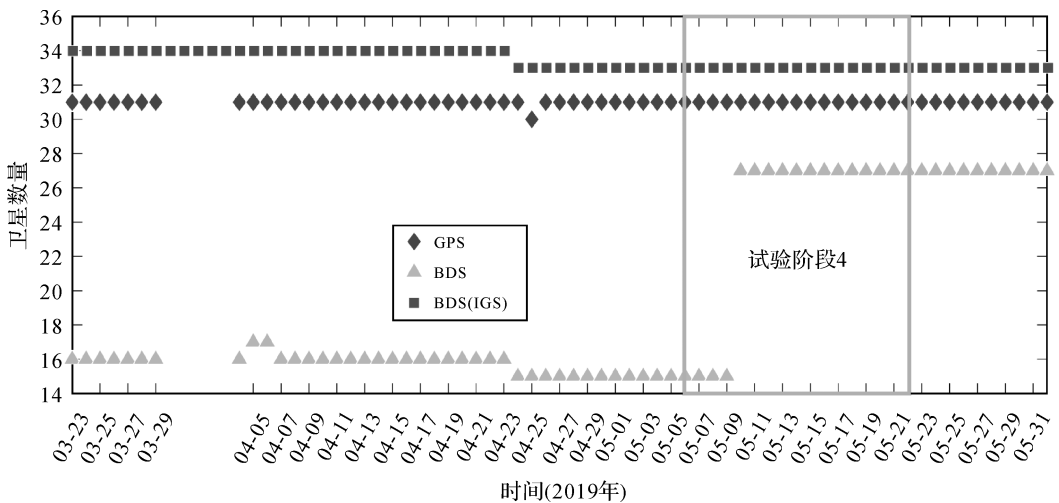


图 4 试验期间北斗与 GPS 卫星数量变化

Fig.4 The variation of the number of observed satellites in BDS and GPS during the experiment

为便于对比,图 4 中也绘制了相同时段内 IGS 观测网对北斗系统卫星数量的观测结果。从图 4 中可以看出本试验中所使用的接收机观测到的北斗卫星数量普遍较低,而在试验阶段 4 中接收机观测到的北斗卫星数量出现大幅度增加,导致这一现象的原因是本试验中所使用的接收机硬件版本较早(2015 年),因此其对近年来新发射的北斗卫星的观测能力不足,跟踪性能不稳定。

4.2 测量系统功率测量一致性测试

虽然在搭建测量系统时使用了相同的硬件配置,以尽可能地减小系统中两套接收机对信号功率测量的偏差,但仍需要对系统的一致性进行实际测试,为此试验开始前将两套 GNSS 接收机的天线同时暴露在空气中,进行了约 5 个小时数据采集,以北斗 8 号星为例,两套接收机测得的 B1 波段信号功率对比如图 5 所示。

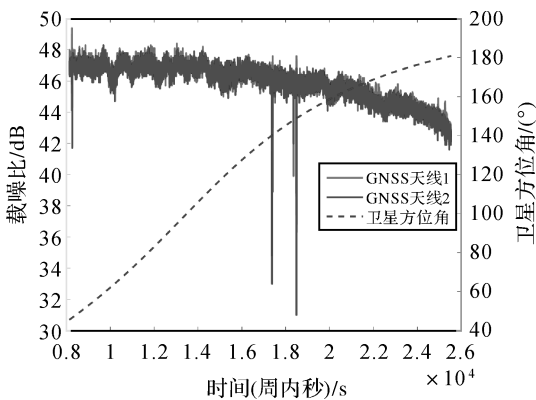


图 5 系统功率测量一致性测试

Fig.5 The test of the consistency of signal power measurement

经计算得到两套接收机测量北斗 8 号星功率平均偏差为 0.112 8 dB,根据本文的理论模型,由这一功率测量偏差所导致的土壤湿度反演误差在 $0.0018 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ (土壤厚度为 21 cm 的情况下)与 $0.0079 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ (土壤厚度为 3 cm 的情况下)之间。进一步统计该时段内测得的所有卫星的信号功率,得到最大的平均测量偏差为 0.673 5 dB,由此导致的土壤湿度反演误差在 $0.011 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ (土壤厚度为 21 cm 的情况下)与 $0.0479 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ (土壤厚度为 3 cm 的情况下)之间。

4.3 试验期间 GNSS 信号衰减情况

为了直观地显示 GNSS 信号受土壤衰减的情况,本文在前 4 个试验阶段中每个阶段各选择一天的数据用于绘制两套接收机测得的北斗

13 号星 B1 信号功率在一天中的变化情况,如图 6 所示。

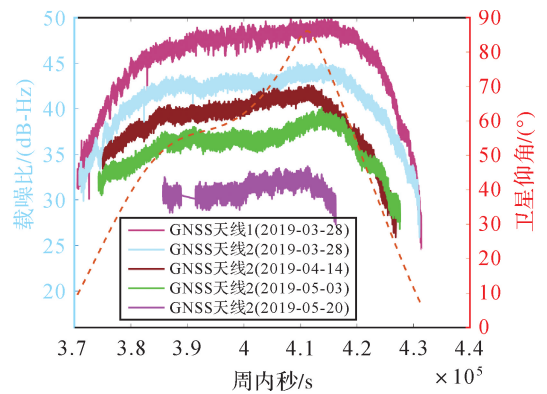


图 6 试验期间 GNSS 信号原始载噪比变化情况

Fig.6 The raw C/N₀ variation of the GNSS signal during the experiment

由于 GNSS 天线 1 在整个试验过程中均暴露于空气中,所以它在各阶段中测得的信号功率差别可以忽略,因此图 6 中仅绘制了第 1 个试验阶段中 GNSS 天线 1 测得的信号功率,其他各阶段中 GNSS 天线 2 测得的信号功率均以 GNSS 天线 1 测得的信号功率为参考,并将对应的曲线进行了时间搬移,以便于对比。从图 6 中可以看出,土壤能够使 GNSS 信号发生明显的衰减,并且随土壤厚度的增加,一天中可观测到 13 号星的时长也在减少,这是因为当卫星的仰角较低时,GNSS 信号在土壤中的传播路径较长,从而导致 GNSS 信号功率衰减严重,以至于接收机无法继续对该卫星进行观测。

图 7 进一步显示了土壤湿度与土壤厚度对 GNSS 信号功率衰减的影响。

图 7 是北斗(不包含 GEO 卫星)与 GPS 系统中所有仰角在 $50^\circ \sim 55^\circ$ 范围内卫星的信号功率(B1、L1 波段,下同)的平均衰减情况。图 7 中总的土壤湿度变化范围设置为 $0.15 \sim 0.30 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$,这一土壤湿度变化范围是 6 个试验阶段均覆盖到的土壤湿度变化范围。可以看出北斗与 GPS 信号功率基本上随土壤厚度的增加呈现线性衰减,与式(11)相符。

4.4 GNSS 信号土壤衰减模型验证

为了验证本文理论模型的准确性,本文利用以上试验数据进行土壤湿度反演。图 8 是北斗(不包含 GEO 卫星)与 GPS 所有卫星在 $50^\circ \sim 55^\circ$ 仰角下土壤湿度反演的平均结果。由于卫星的运

行周期接近 12 h,因此单颗星相邻两次经过 50°~55°仰角的时间间隔可能达到 12 h,这一时间间隔不足以捕捉到一天当中土壤湿度的变化情况。因此需要利用分布在不同轨道上的卫星组成多星接力观测以缩短测量的时间间隔,即将所有卫星在该仰角范围下的测量结果按照时间顺序排列形成时间序列,如图 8 中的浅蓝色散点所示。由于不同的卫星位于不同的方位向,即使同一个卫星其上升段与下降段也位于不同的方位向,加之实际土壤的非匀质性,导致不同卫星的测量结果以及

同一颗卫星上升段与下降段的测量结果存在差别,从而使得原始测量结果的散点图呈现出较大噪声。为此需要对原始测量结果进行平滑,本文采用了 10 点滑动平均对原始测量结果时间序列进行平滑。若换算为时间窗的宽度,则对于北斗系统而言该时间窗宽度约为 1~2 h,而对于 GPS 系统而言相当于约 30 min 的时间窗宽度,北斗系统的时间窗较 GPS 系统时间窗宽的原因是试验期间北斗卫星数量较少。平滑后结果如图 8 中的红色散点所示。

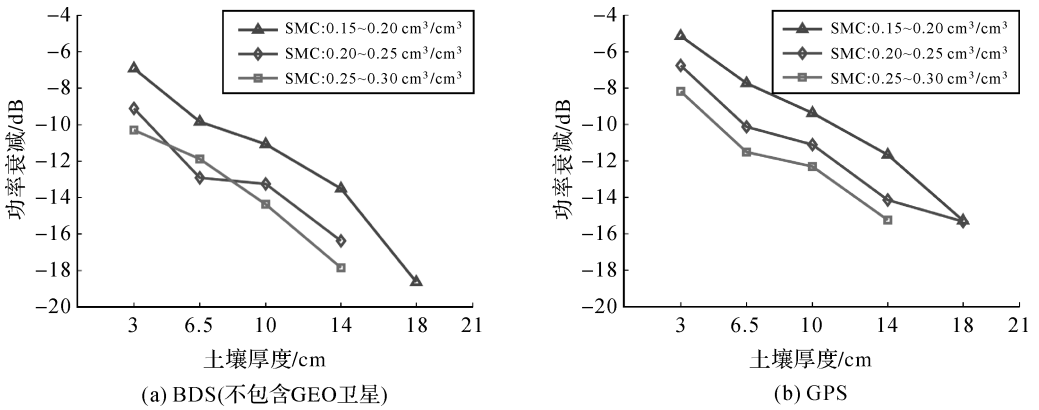


图 7 GNSS 信号功率衰减随土壤厚度与土壤湿度的变化

Fig.7 The variation of GNSS signal power with respect to soil moisture and soil thickness

从图 8 中可以看出,当土壤厚度达到 18 cm 时,GNSS 信号已经被衰减的相当严重。因此在 18 cm 厚度时,只有在土壤湿度较小也即土壤较干燥时,GNSS 信号才能够穿透土壤而被 GNSS 天线 2 接收,从而可以反演出土壤湿度,而当土壤

厚度达到 21 cm 时,接收机已无法测出信号功率。

表 2 是对图 8 所示结果的定量描述,它列出了各试验阶段所观测到的数据点数、反演得到的土壤湿度与实测土壤湿度间的相关系数以及反演的均方根误差。

表 2 北斗、GPS 系统土壤湿度反演统计结果

Tab.2 The statistical results of soil moisture retrieval from BDS and GPS

试验阶段	土壤厚度 /cm	BDS(不包含 GEO 卫星)			GPS		
		数据点数	相关系数	均方根误差 /(cm^3/cm^3)	数据点数	相关系数	均方根误差 /(cm^3/cm^3)
1	3	78	0.865 5	0.154 8	362	0.913 6	0.092 5
2	6.5	133	0.924 3	0.109 3	788	0.919 6	0.048 5
3	10	146	0.927 8	0.018 6	871	0.924 9	0.054 4
4	14	301	0.921 5	0.027 8	810	0.886 0	0.070 6
5	18	1	—	0.030 3	55	0.220 2	0.085 4
6	21	—	—	—	—	—	—

从表 2 中可以看出,在试验阶段 1 与阶段 2 中,利用北斗信号测量土壤湿度的误差大于 GPS 信号,而在实验阶段 3—阶段 5 中,北斗信号测量土壤湿度的误差小于 GPS 信号。

以上仅是在某一特定仰角范围下的土壤湿度

测量结果,图 9 给出了各个仰角范围下的土壤湿度反演的均方根误差。

在图 9 中,将起始仰角设置为 15°是为了避免 GNSS 信号从塑料编织袋侧面进入土壤中。由于试验过程中土壤厚度最大为 21 cm,塑料编织袋

的半径为 75 cm,可以计算得到最低的仰角应大于 $\arctan(21/75) \approx 15^\circ$,同时该起始仰角也可保证 GNSS 信号不受远处的树木或者建筑物遮挡。从图 9 中可以看出反演的误差随土壤厚度和仰角变化呈现出一定的收敛特性,对于北斗系统来说当

土壤厚度在 10 cm 及以上时,反演误差开始表现出收敛特性,即随着卫星仰角升高,土壤湿度反演误差逐渐减小;而对于 GPS 系统,土壤湿度反演误差是在土壤厚达到 6.5 cm 及以上时开始表现出收敛特性。

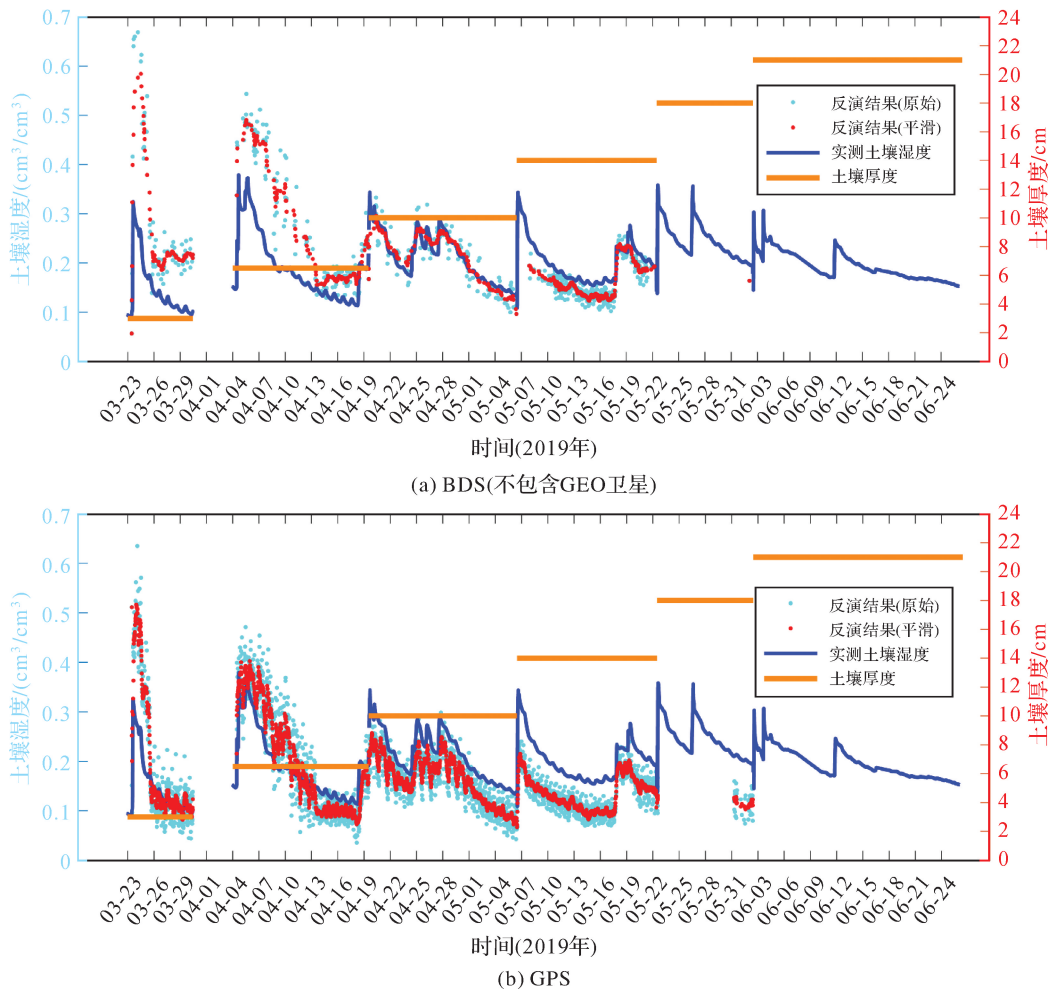


图 8 北斗、GPS 土壤湿度反演结果

Fig.8 Soil moisture retrieval from BDS and GPS

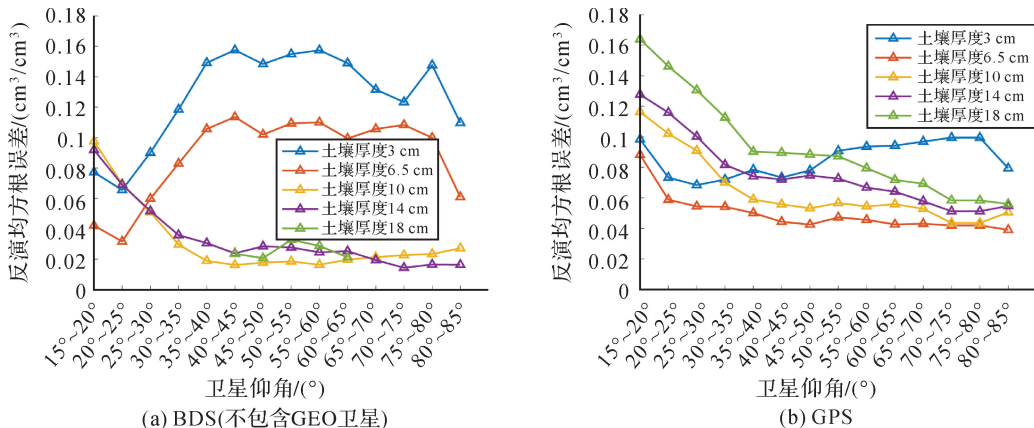


图 9 不同仰角下土壤湿度反演结果

Fig.9 Soil moisture retrieval under different satellite elevation angle

图9中,部分情况下土壤湿度反演存在较大误差的主要原因是本文理论模型假设土壤是半无界的理想均匀介质,而实际的试验场景在以下两个方面偏离理想情况:

一方面,在本试验中GNSS天线2被放置在塑料编织袋底部,而编织袋底部的透水性较差,这导致了GNSS天线2上方与下方的土壤湿度存在较大差别,因此编织袋底部成为第2反射面,此时GNSS信号除了被土壤与空气分界面反射之外,也会被编织袋底部反射。当土壤厚度较小、卫星仰角较高时,GNSS信号在土壤中被衰减的程度较轻,信号在到达编织袋底部时仍具有一定强度,因而可以再次从编织袋底部反射回空气中,这相当于总反射率 R 大于理想情况下的反射率。根据式(9),在这种情况下土壤的总衰减系数将小于理想情况,从而导致土壤湿度反演结果存在较大误差,如北斗系统在土壤厚度为3 cm、6.5 cm,卫星仰角在 35° 以上时的反演结果,以及GPS系统在土壤厚度为3 cm,卫星仰角在 50° 以上时的反演结果。

另一方面,试验过程中采用的是人为向塑料编织袋中填充土壤的方式,因此当土壤较薄时,土壤重量较小,易出现不均匀的情况,此时利用上述理论模型反演土壤湿度将导致较大误差。随着土壤厚度的增加,土壤在自身重力以及水的弥合作用下变得紧实从而质地趋向于均匀,并且当卫星仰角较高时,GNSS信号在土壤中的传播路径较短,而信号经过路径越短,则土壤的非匀质性对信号的影响越小,此时的反演结果较为准确,如北斗与GPS系统在土壤厚度大于等于10 cm,卫星仰角高于 50° 以上时的反演结果。

总之,土壤越厚、卫星仰角越高,土壤就越可被视为一种均匀介质,则衰减模型就越准确。对于北斗系统来说,由于试验期间观测到的卫星数量较少,导致数据量点数较少,加之土壤较薄时其非匀质性的影响,最终导致北斗系统的测量结果在土壤厚度达到10 cm时才开始收敛。

4.5 北斗 GEO 卫星土壤湿度反演结果

北斗 GEO 卫星相对于地球表面静止^[26],因此信号稳定,理论上 GEO 卫星更加适用于反演土壤湿度。但由于 GEO 卫星轨道位于地球赤道上方,轨道高度高于 MEO 卫星,而试验地点位于北京,因此信号在星地之间传播距离较远,这将导

致入射到土壤表面的信号功率较低并且试验地点观测到 GEO 卫星的仰角也较低(16° 到 38° 之间),这些都导致 GEO 卫星信号很容易被土壤衰减到无法被接收机所接收。图10为所有 GEO 卫星的土壤湿度反演结果。

从图10中可以看出试验进行到第4阶段时置入土壤中的天线已经接收不到北斗 GEO 卫星信号。

4.6 GNSS 反射信号有效遥感深度估计

在利用 GNSS 反射信号进行土壤湿度遥感的研究中,人们通过接收处理土壤反射的 GNSS 信号来反演土壤湿度。在反射的 GNSS 信号中,不仅包含了被土壤表面反射的 GNSS 信号也包含从土壤表面下方反射的 GNSS 信号,而从土壤表面下方反射的 GNSS 信号决定了 GNSS 信号的有效遥感深度。利用试验的结果可以对 GNSS 信号的有效遥感深度做一个粗略估计。在试验中,当土壤厚度增加到21 cm时,即使土壤较干燥,接收机也已无法接收 GNSS 信号。这意味着到达该深度处的信号将无法再从土壤中反射回空气中,或者即使能够从土壤中返回到空气中其强度也不足以被接收机捕获。因此21 cm可以作为对 GNSS 信号透射深度的估计,但不可作为 GNSS 反射信号的有效遥感深度。假设 GNSS 入射信号与出射信号在土壤中的衰减相同,则能被接收机捕获的最弱的信号来自于土壤表面下方约 $21/2=10.5$ cm处的反射面,即图11中的 d_2 深度处,所以 d_2 是 GNSS 反射信号的有效遥感深度。从 d_2 处反射面上方土壤中出射的所有信号构成了接收机接到的反射信号,于是接收机接收到的反射信号是一个综合信号,该综合信号(图11中红色箭头)相当于是从土壤表面下方 d_1 深度处的反射面反射回空气中。假设 GNSS 入射信号与出射信号的强度从土壤表面下方到 d_2 深度处是梯度衰减的,则 $d_1 \approx d_2/2 \approx 5$ cm。因此 d_1 处的反射面为 GNSS 信号的有效反射面。

2010年,文献[27]研究利用 GNSS 直射信号与反射信号间的干涉效应来测量土壤湿度,将一个金属网放置在土壤表面,用于阻挡反射信号进入土壤中,从而测量有效反射面深度(effective reflector depth)。测量结果表明,在土壤湿度为 $0.1 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ 情况下,有效反射面深度在5 cm左右,与本文通过信号衰减试验估计的结果相近。

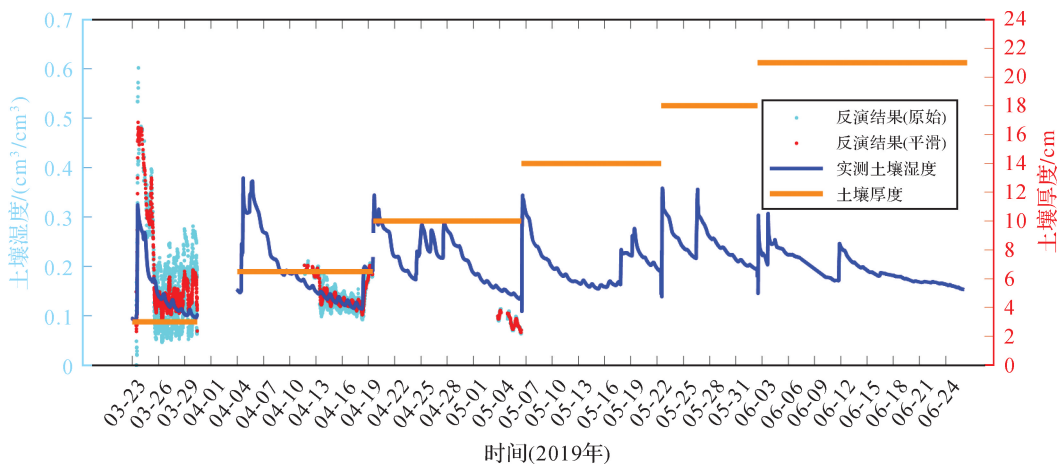


图 10 北斗 GEO 卫星土壤湿度反演结果

Fig.10 Soil moisture retrieval from GEO satellites of BDS

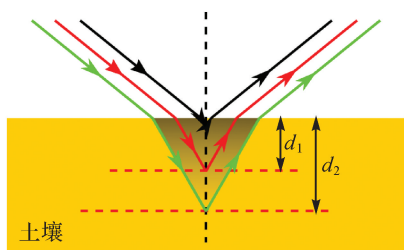


图 11 GNSS 反射信号有效遥感深度示意图

Fig. 11 Schematic diagram of effective remote sensing depth of GNSS reflected signal

5 总结

本文研究了 GNSS 信号在土壤中的衰减模型,并设计、开展试验研究北斗与 GPS 信号在土壤中的衰减情况。试验过程中不断改变天线上方的土壤厚度与土壤湿度以收集 GNSS 信号衰减数据,最后通过利用这些数据进行土壤湿度反演以对 GNSS 信号在土壤中的衰减模型进行验证。主要结论如下:

(1) 土壤湿度值与土壤厚度值越大,GNSS 信号在土壤中的衰减越严重。以黏土土质为例,在体积土壤湿度为 $0.15 \sim 0.30 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$,卫星仰角在 50° 与 55° 之间的情况下,GNSS 信号功率衰减超过 16 dB。

(2) GNSS 信号衰减模型在卫星仰角越高、土壤厚度值越大的情况下越准确。在卫星仰角为 50° 以上,土壤厚度为 10 cm 及以上时,利用北斗 B1 衰减信号反演土壤湿度的均方根误差小于 $0.04 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$,利用 GPS L1 衰减信号反演土壤湿度的均方根误差小于 $0.09 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ 。

(3) 根据试验结果可推算出在 $0.15 \sim 0.30 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ 这一中等土壤湿度条件下,GNSS L1/B1 波段信号的透射深度约为 21 cm,其反射信号的有效遥感深度约为 10 cm。

本研究所针对的土壤类型主要是黏土,然而中国是一个幅员辽阔的国家,土壤类型十分丰富。土壤类型不同,则其密度、孔隙率等物理性质不同,进而导致其对 GNSS 信号的衰减不同。其次,在本研究中,土壤被看作均匀介质,没有考虑土壤湿度在垂直方向上的梯度变化。同时,由于试验条件限制,本文未研究土壤厚度在 21 cm 以上且土壤极为干燥(土壤湿度小于 $0.05 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$)的情况下 GNSS 信号的衰减情况。这些均是未来的研究方向。

致谢:感谢北京航空航天大学杨东凯教授对本文写作的建议,以及对本文的支持与推荐;感谢北京市农林科学院蔬菜研究中心宋曙辉研究员为本研究协调试验场地。

参考文献:

[1] DIRMEYER P A. Using a global soil wetness dataset to improve seasonal climate simulation [J]. Journal of Climate, 2000, 13(16): 2900-2922.

[2] JUNG M, REICHSTEIN M, CIAIS P, et al. Recent decline in the global land evapotranspiration trend due to limited moisture supply[J]. Nature, 2010, 467(7318): 951-954.

[3] ULABY F T, LONG D G. Microwave radar and radiometric remote sensing[M]. Ann Arbor: The University of Michigan Press, 2014.

[4] ULABY F T, DUBOIS P C, VAN ZYL J. Radar mapping of surface soil moisture[J]. Journal of Hydrology, 1996, 184(1-2): 57-84.

[5] DOBSON M C, ULABY F T. Active microwave soil moisture

- research [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1986, GE-24(1): 23-36.
- [6] LOEW A, LUDWIG R, MAUSER W. Derivation of surface soil moisture from Envisat ASAR wide swath and image mode data in agricultural areas[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2006, 44(4): 889-899.
- [7] WAGNER W, BLOSCHL G, PAMPALONI P, et al. Operational readiness of microwave remote sensing of soil moisture for hydrologic applications [J]. *Hydrology Research*, 2007, 38(1): 1-20.
- [8] NJOKU E G, JACKSON T J, LAKSHMI V, et al. Soil moisture retrieval from AMSR-E[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2003, 41(2): 215-229.
- [9] MAUSER W, ROMBACH M, BACH H, et al. Determination of spatial and temporal soil-moisture development using multitemporal ERS-1 data[C]//*Proceedings of SPIE 2314, Multispectral and Microwave Sensing of Forestry, Hydrology, and Natural Resources*. Rome, Italy: SPIE, 1995.
- [10] KERR Y H, WALDTEUFEL P, WIGNERON J P, et al. Soil moisture retrieval from space: the soil moisture and ocean salinity (SMOS) mission[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2001, 39(8): 1729-1735.
- [11] BARRE H M J P, DUESMANN B, KERR Y H. SMOS: the mission and the system[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2008, 46(3): 587-593.
- [12] 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.
- [13] 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] 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.
- [15] MUNOZ-MARTIN J F, ONRUBIA R, PASCUAL D, et al. Untangling the incoherent and coherent scattering components in GNSS-R and novel applications[J]. *Remote Sensing*, 2020, 12(7): 1208.
- [16] EDOKOSSI K, CALABIA A, JIN Shuanggen, et al. GNSS-reflectometry and remote sensing of soil moisture: a review of measurement techniques, methods, and applications [J]. *Remote Sensing*, 2020, 12(4): 614.
- [17] 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): 405-418.
- [18] LI Weiqiang, CARDELLACH E, FABRA F, et al. Measuring greenland ice sheet melt using spaceborne GNSS reflectometry from TechDemoSat-1 [J]. *Geophysical Research Letters*, 2020, 47(2): 864-877.
- [19] 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*, 2010, 3(1): 100-110.
- [20] 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(6): 103-112.
- [21] 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. DOI: 10.11947/j.AGCS.2020.20190095.
- 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. DOI: 10.11947/j.AGCS.2020.20190095.
- [22] PRIVETTE III C V, KHALILIAN A, BRIDGES W, et al. Relationship of soil moisture and reflected GPS signal strength[J]. *Advances in Remote Sensing*, 2016, 5(1): 18-27.
- [23] KOCH F, SCHLENZ F, PRASCH M, et al. Soil moisture retrieval based on GPS signal strength attenuation [J]. *Water*, 2016, 8(7): 276.
- [24] STEINER L, MEINDL M, GEIGER A. Characteristics and limitations of GPS L1 observations from submerged antennas[J]. *Journal of Geodesy*, 2019, 93(2): 267-280.
- [25] STEINER L, MEINDL M, FIERZ C, et al. An assessment of sub-snow GPS for quantification of snow water equivalent[J]. *The Cryosphere*, 2018, 12(10): 3161-3175.
- [26] CHEN Qiuli, YANG Hui, CHEN Zhonggui, et al. Solar radiation pressure modeling and application of BDS satellites[J]. *Journal of Geodesy and Geoinformation Science*, 2020, 3(2): 45-52. DOI: 10.11947/jJGGS.2020.0205.
- [27] 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.

(责任编辑:丛树平)

收稿日期: 2020-06-19

修回日期: 2020-07-22

第一作者简介: 汉牟田(1992—),男,博士生,研究方向为卫星导航及其应用。

First author: HAN Mutian(1992—), male, PhD candidate, majors in GNSS and its applications.

E-mail: hanmutian@buaa.edu.cn