

北斗信号 GNSS-R 土壤湿度反演研究进展^①

杨昌智^{②*} 毛克彪^{③***} 孙一丹* 王一帆* 王平* 郭中华*

(* 宁夏大学物理与电子电气工程学院 银川 750021)

(** 中国农业科学院农业资源与农业区划研究所 北京 100081)

(*** 中国科学院空天信息创新研究院遥感科学国家重点实验室 北京 100101)

摘要 全球卫星导航系统搭载的 L 波段信号对土壤水分特别敏感,非常适合土壤湿度变化监测。以信号功率或是延迟为属性,土壤湿度实际值为标签,结合介电常数经验模型、支持向量机、随机森林算法以及 BP 神经网络、深度置信神经网络等方法进行模型训练便可以建立基于导航信号的土壤湿度反演模型。随着北斗导航系统的建成,利用其三频载波信号和地球静止轨道卫星(GEO)的独特优势进行土壤湿度反演,可以达到在原有技术基础上进一步提升土壤水分监测效果的目的。为了进一步推广北斗系统在土壤湿度监测方面的应用潜力,本文对全球导航系统反射(GNSS-R)反演土壤湿度的现状和反演土壤湿度的原理进行了介绍和分析,并阐述了利用北斗导航信号作为信号源反演土壤湿度的优点。

关键词 土壤湿度;机器学习;神经网络;北斗导航系统;三频载波信号;地球静止轨道卫星(GEO)

0 引言

土壤水分是水循环中一个必不可少的环节,也是农业干旱监测的重要参数^[1]。准确获取土壤水分含量信息、衡量水资源系统影响农业可持续发展的能力对于农业水资源管理至关重要^[2]。传统的土壤湿度监测方法包括烘干称重法和传感器监测法等,但这些方法都存在一定局限和不足。引入导航信号进行土壤湿度反演在很大程度上克服了传统土壤湿度测量方法单次测量有效区域小且不具代表性的缺点,可以满足全天候自主监测的需求。

在机器学习和神经网络技术还未兴盛之前,全球导航系统反射(global navigation satellite system reflectometry, GNSS-R)土壤湿度监测方法主要通过物

理模型推算和统计方法拟合 2 个途径实现。2002 年,科罗拉多大学等在美国国家航空航天总局的带领下开展了系列土壤湿度反演实验,并通过实验数据验证了监测结果的正确性^[3]。西班牙 Starlab 研究所设计了基于 L 波段 GNSS 信号观测值的土壤水分探测装置,通过分析发生干涉作用之后的 GNSS 信号来获得土壤水分的相关信息^[4]。文献[5]利用高级积分方程模型(advanced integrated equation model, AIEM)对土壤湿度监测方法进行了推导并根据已有的实验数据验证了 GNSS-R 土壤湿度监测模型的准确性。为了进一步消除非目标参数的影响,文献[6]在有效考虑裸土粗糙度和植被光学深度的情况下对土壤湿度反演进行建模。文献[7,8]利用多卫星观测值建立了多星融合的土壤湿度反演

① 宁夏自治区科技创新团队柔性引进人才项目(2021RXTDLX14),中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金(1610132020014)和遥感科学国家重点实验室开放基金(OFSLRSS202201)资助项目。

② 男,1997 年生,硕士生;研究方向:定量遥感;E-mail: changzhiyang2020@163.com。

③ 通信作者,E-mail: maokebiao@126.com。

(收稿日期:2021-11-08)

方法进一步提高了监测结果的准确度。

以物理模型和统计拟合为手段建立监测模型不可避免地会造成一定误差,引入机器学习和神经网络方法能够弥补这一缺陷。文献[9]和[10]分别在单天线 GNSS-R 土壤湿度反演的研究中引入了支持向量回归机(support vector regression machine, SVRM)和基于遗传算法优化的支持向量机(genetic algorithm support vector machine, GA-SVM)方法来构建土壤湿度监测模型。另外文献[11]和[12]分别利用 GNSS 数据观测值开展了 BP 神经网络和深度置信神经网络的相关实验,验证了引入神经网络技术的反演优势。

随着我国北斗导航系统的建成,将北斗信号作为信源进一步推动了 GNSS-R 土壤湿度反演技术的发展。文献[13]曾对利用北斗信号信噪比(signal-noise ratio, SNR)观测值进行土壤湿度反演的方式进行了详细的说明,该方法通过菲涅尔方程建立土壤湿度与信噪比之间的关系,结合 Hallikainen 经验模型最终实现了利用信噪比进行土壤湿度监测的期望。文献[14]开展了基于 SVRM 所构建的北斗地球静止轨道卫星(geosynchronous earth orbit, GEO)信号反演土壤湿度模型的相关实验,证明了将 SVRM 模型引入反演过程能够取得良好的反演精度。文献[15]利用三频载波信号获得的多径误差分析了直射、反射信号之间的传输延迟,并通过相位延迟现象进行了土壤湿度反演的相关研究,分析发现利用北斗三频载波信号能够获得更准确的多路径误差,有助于降低反演误差。

北斗导航系统的建成为 GNSS-R 土壤湿度反演技术注入了新的动力,但当前多系统融合进行输入变量扩维的方法还有所缺乏。为了进一步推动北斗信号反演技术的发展,本文通过对现有的北斗信号土壤湿度反演研究概况和基于 GNSS 信号的土壤湿度监测方法进行介绍,分析了利用北斗导航信号作为信号源的特点和优势,展望了未来 GNSS 信号反演土壤湿度研究的发展方向。

1 监测原理

GNSS-R 土壤湿度测量的实现方法是通过捕获

卫星直射信号与反射信号,分析地表反射信号的时间延迟或功率变化,结合 GNSS 卫星、地面接收机以及反射点之间的几何关系和反射信号特征变化与地表土壤性质之间的相关关系,推演获取反映地表特征的相关参数,GNSS 信号传播及接收模型如图 1 所示。

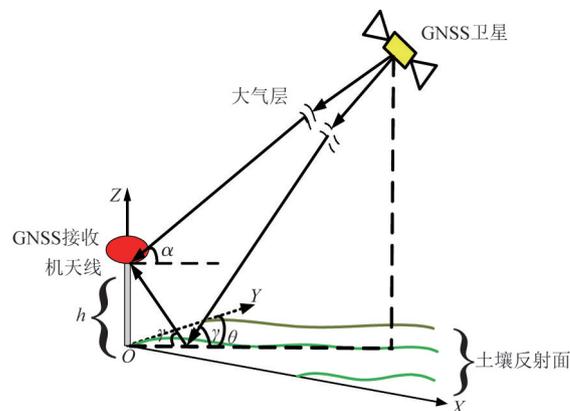


图 1 GNSS 卫星信号传播示意图

其中 h 为接收机天线高度; γ 为卫星信号到达土壤表面的入射高度角; α 为直射信号到天线的入射高度角,因为信号传播路径较长所以 α 近似为 γ ; θ 为卫星方位角; Y 轴方向表示正北方向; Z 轴表示天顶方向。

根据接收信号方式的不同,可以将监测模式分为单天线接收信号和多天线接收信号 2 种方式,它们都是通过构建 SNR 观测值与土壤湿度之间的相互关系来实现数据反演,不同的地方主要表现在直射与反射信号的分离方式和模型构建上。

单天线接收监测是一种全球定位系统干涉反射(GNSS interferometric reflection, GNSS-IR)测量方法,此时所捕获的是发生干涉作用后的信号,借助于低阶多项式拟合等方法获取多路径反射信号的 SNR 观测值,并且根据已有的研究建立信号 SNR 观测值与相位延迟的关系如式(1)所示。

$$SNR_r = A_r \cos\left(\frac{4\pi h}{\lambda} \sin\gamma + \varphi_r\right) \quad (1)$$

其中, SNR_r 为多路径反射信号的信噪比观测值, A_r 为该分量的相对幅度, h 为天线高度, λ 为载波波长, γ 为信号入射高度角大小, φ_r 为信号相位延迟, SNR_r 可以通过软件算法分离获得。

在已知多路径反射信号分量 SNR 观测值的情

况下由式(1)可以求得反射信号的相位延迟。又因为反射信号相位延迟和土壤湿度之间存在显著的线性关系^[16],所以将相位延迟作为自变量,土壤湿度作为因变量可以通过回归方程建立多项式土壤湿度监测模型。

基于多天线接收机的信号功率 GNSS-R 反演机制是以土壤反射系数为媒介建立直射、反射信号功率比与土壤湿度之间的关系。通过已有的研究可知,当反射点到接收机水平距离较近的情况下可以认为地球曲率所造成的误差为 0,同时由于卫星信号到达地面传播距离较长,可以认为接收机天线的人射信号与反射点处的人射信号的特征属性和所受的大气影响均相同。所以根据直射信号和反射信号的功率便可以求得土壤反射率信息,借助于菲涅尔方程又可建立土壤反射率和土壤介电常数的关系,即在获得直射信号和反射信号相关功率的条件下便可借助于土壤介电常数来反演获得反射面地表的土壤湿度。

反射信号功率变化是由土壤湿度增加导致土壤对电磁波反射率发生相应变化这一关系所造成的,可以建立土壤反射系数和信号信噪比的关系为^[13]

$$\Gamma = 10^{(SNR_r - SNR_d)/20} \quad (2)$$

SNR_d 和 SNR_r 分别表示直射、反射信号的信噪比观测值。当卫星仰角取较大值时,反射信号以左旋极化分量为主。根据菲涅尔方程可以将反射系数表示为^[17]

$$\Gamma_{rl} = \frac{1}{2} \left(\frac{\varepsilon \sin \gamma - \sqrt{\varepsilon - \cos^2 \gamma}}{\varepsilon \sin \gamma + \sqrt{\varepsilon - \cos^2 \gamma}} - \frac{\sin \gamma - \sqrt{\varepsilon - \cos^2 \gamma}}{\sin \gamma + \sqrt{\varepsilon - \cos^2 \gamma}} \right) \quad (3)$$

式中 ε 为土壤介电常数,联立式(2)、(3),再根据经验模型或半经验模型即可求得土壤湿度与 SNR 观测值之间的关系。常见的经验模型包括 Hallikainen 模型、Topp 模型以及改进的 Topp 模型等,以 Topp 经验模型为例,代入经验值可以建立土壤湿度 ω_v 和土壤介电常数之间的关系为

$$\omega_v = -5.3 \times 10^{-2} + 2.92 \times 10^{-2} \varepsilon - 5.5 \times 10^{-4} \varepsilon^2 + 4.3 \times 10^{-6} \varepsilon^3 \quad (4)$$

从上述物理模型中可以直观发现,不论是 GNSS-IR 土壤湿度反演方法还是信号功率 GNSS-R

土壤湿度反演方法的反演模型中都包含着卫星与反射点之间几何关系的影响,获得稳定的卫星高度角和相对位置关系对于降低反演模型的复杂程度和提高准确度具有重要意义,以北斗 GEO 卫星信号为信源有效地契合了这一需求。

另外机器学习和神经网络的发展也为反演模型的建立注入了新鲜的血液,弥补了物理模型和经验模型引入较多近似的不足。以北斗信号相位延迟或直射、反射信号的信噪比作为属性,土壤湿度实际测量值作为标签,取大量数据作为训练集,借助于支持向量机、随机森林算法、深度置信神经网络、BP 神经网络等机器学习方法能够获得更好的拟合效果,提高运算速度的同时还能够进一步提高监测的准确度。

2 监测方法

随着北斗导航系统的建成,北斗信号作为信号源进行土壤湿度反演的研究已经得到了研究人员的关注,利用其独有的优势在一定程度上降低了研究的复杂度并提高了监测结果的准确程度,弥补了原有方法的缺陷,促进了 GNSS 土壤湿度反演技术的发展。但本质上来说,基于北斗信号的 GNSS 土壤湿度反演方法与 GPS 作为信号源的监测方法并没有什么不同,仍然是围绕理论模型如 IEM 模型、AI-EM 模型,经验模型、半经验模型如 Dobson 半经验模型、Topp 经验模型、Hallikainen 经验模型和 Wang 经验模型等,以及机器学习和神经网络这几个主要的方向所开展。

基于信号功率的 GNSS-R 方法通常利用左旋极化天线和右旋极化天线分别捕获反射信号和直射信号,结合信号功率与土壤反射率以及土壤介电常数之间的关系反演土壤湿度的相关信息。经不含磁性的土壤表面反射后理想情况下的土壤反射率可以表示为^[18]

$$R = \frac{(\varepsilon - 1)^2 \sin^2 \gamma (\varepsilon - \cos^2 \gamma)}{(\varepsilon \sin \gamma + \sqrt{\varepsilon - \cos^2 \gamma})^2 (\sin \gamma + \sqrt{\varepsilon - \cos^2 \gamma})^2} \quad (5)$$

其中, γ 是 GEO 卫星高度角, ε 是土壤介电常数。

因为北斗 GEO 卫星高度角相对固定,所以由式(5)可以将土壤介电常数 ε 用反射率关于信号功率的函数表示为式(6)所示。

$$\varepsilon = R^{-1}\left(\frac{P_r}{P_d}\right) \quad (6)$$

其中, R 为对应于土壤介电常数 ε 的反射率, P_r 为反射信号的功率, P_d 为直射信号的功率。结合经验模型即可建立关于信号功率的土壤湿度反演模型。由该方法可知,使用北斗 GEO 卫星信号进行土壤湿度反演研究,省去了菲涅尔方程中卫星高度角变量,降低了算法复杂度。

李培昊^[19]通过数据分析发现多路径的 3 个特征值即多路径分量幅度、多路径最小值和多路径最大值均和土壤湿度呈明显线性相关关系。结合光滑样条拟合方法分别进行了线性拟合分析,最终发现幅度分量的拟合效果最好,确定系数可达 0.9363。另外由于降水等因素会对 GNSS 信号的强度和土壤湿度骤变带来较大的影响,为了防止反演模型无法在该状况下及时响应,实验过程中分别就正常时段和土壤湿度骤变时段进行了 GEO 卫星信号和土壤湿度信息采集,确保了系统对环境因素影响的条件下能够做出正确响应,提高了监测系统工作的稳定性。

GNSS-IR 土壤湿度反演技术是一种基于信号干涉反射测量的方法,使用单天线接收同频干涉信号分离后获取相位延迟等特征差异。由于观测信号中直射信号分量远大于反射信号分量并且多路径分量主要表现在信噪比稳定时的周期震荡变化规律上,所以数据处理的过程中需要对直射信号分量进行剔除,其中最为常见的方式是利用低阶多项式拟合多路径的变化趋势进行分离。

多路径误差是反映土壤表面特性的重要参量,获取受干扰较小的多路径误差对于降低反演模型的误差至关重要。利用北斗卫星的三频载波信号可以构建出无几何无电离层延迟的多路径误差模型,为实验研究提供高质量的多路径误差数据支持。根据信号的特征量以及天线的相关参数多路径误差可以近似表示为^[15]

$$\beta(t) = \left(\frac{A_r}{A_d}\right)\sin\delta\varphi(t) = k\sin\delta\varphi(t) \quad (7)$$

其中, $\beta(t)$ 为多路径误差; A_d 和 A_r 分别是直射信号

和反射信号的幅度; k 表示幅度衰减因子,是反射系数和天线增益的函数; $\delta\varphi(t)$ 为相位延迟。

为了获取表征土壤湿度变化趋势的参量,将多路径误差作为系统输入变量,幅度衰减因子和延迟相位作为待估参数,对式(7)进行线性化进而采用最小二乘平差方法解算可获得对应时段的幅度衰减因子和延迟相位,延迟相位初始值可以表示为

$$\delta\varphi(t) = \frac{\Delta S}{\lambda} \cdot 2\pi = \frac{4\pi h}{\lambda} \sin\gamma(t) \quad (8)$$

其中, ΔS 为反射信号相对直射信号路径传播上多出来的部分, λ 为载波信号波长, t 为卫星观测历元, h 为接收机天线高度, γ 为卫星高度角。确定延迟相位初值是选取第 1 个土壤湿度信息样本所对应的卫星高度角作为 γ 的取值。

聂士海等人^[15]以土壤湿度为因变量,以信号延迟为自变量构建一元回归模型,研究发现该模型在回归直线 $y = 15.1025x + 0.1631$ 上下波动。通过数据分析发现相位延迟和土壤湿度之间呈显著相关关系,相关系数可以达到 0.97,充分说明了该方法的可行性。

由于土壤表面起伏和粗糙程度的影响,单星土壤湿度反演方法缺乏不同信号差异性和互补性的不足会对监测结果的稳定性和准确性带来较大影响。利用北斗 B1、B2 的 SNR 振荡频率干涉量建立熵值融合方法下的土壤湿度反演模型可以在一定程度上克服这一缺陷^[20]。将北斗 B1、B2 频段用 $k = 1, 2$ 分别表示,第 i 颗卫星的第 j 天振荡频率观测量设为 $x_{i,j}^{(k)}$ ($i = 1, 2, \dots, M; j = 1, 2, \dots, N$), 其中 N 为实验总天数, N 天的振荡频率观测量用 $X_i^{(k)}$ 表示。通过熵值融合处理,确定 $X_i^{(k)}$ 与土壤湿度的正负相关性和第 i 颗卫星第 j 天的振荡频率观测量的标准值评价得分 $s_{i,j}^{(k)}$, 可将融合的频率观测量建立为

$$X_{ij} = s_{i,j}^{(1)} \times x_{i,j}^{(1)} - s_{i,j}^{(2)} \times x_{i,j}^{(2)} \quad (9)$$

其中 X_{ij} 为融合后的频率观测量,最终利用融合观测量建立土壤湿度的回归模型即可通过振荡频率观测量反演获得土壤湿度信息。北斗 B1、B2 双频熵值融合反演结果同 B1 卫星单频信号反演结果相比相关系数提高了 24.42%, 均方根误差降低了 3.4%; 同北斗 B2 卫星单频信号反演结果相比相关系数提

高了 37.11%,均方根误差降低了 8.48%,数据对比充分说明了通过双频信号消除无关影响对于提高检测结果的有效性。

机器学习和神经网络技术的发展为土壤湿度监测技术注入了新鲜血液。随机森林法是一种新兴的基于决策树的机器学习算法,该方法通过随机选取子样本和输入参数有效地降低了决策树之间的相关性,可以获得具有良好鲁棒性和预测精度的监测模型。以北斗 B1、B2 振荡频率观测值和土壤湿度真值构建训练集,结合粒子群优化算法寻找随机森林最优超参数 $n_estimators$, max_depth 以及 max_leaf_nodes 进行训练可以获得基于卫星振荡频率观测值的土壤湿度预测模型。孙波等人^[21]以北斗 PRN9、PRN10、PRN13 卫星信号为实验源进行实验发现土壤湿度反演值和实测值之间的相关系数分别可达 0.8769、0.8815、0.8314,数据有力地证明了基于粒子群算法和随机森林算法融合的机器学习方法可以建立较好的 GNSS-R 土壤湿度反演模型。

另外为了满足野外地区土壤湿度监测时间长、数据采集量大的需要,构建能够将数据远距离无线传输的监测系统十分必要。使用射频基带处理模块将北斗卫星信号进行处理并以 NMEA(national marine electronics association)协议形式打包,输出的数据通过 RS-232 接口传输至 GPRS DTU 模块后上传到网络后台进行存储,最终根据多天线土壤湿度反演原理对数据进行计算处理获得土壤湿度相关信息,这一方法有效地达到了现场和监测分离的目的^[22]。此方法在信号传输过程中引入了互联网远程无线传输的技术,实现了远距离数据传输的效果,满足了对偏远现场进行监测的需求,可以为实际监测应用提供更多的便利。

3 结 论

土壤水分是农情监测和农业灾害监测的重要参数,准确及时地获得土壤湿度信息对于资源勘测和环境评估具有重要意义。随着全球卫星导航系统技术的发展,利用卫星信号全天候、动态对比性强的优点,使连续及时获取土壤湿度观测值的需求得到满

足,具有较强的实用意义。

目前基于 GNSS 信号反演土壤湿度的方法已经得到了较为广泛的研究,针对不同的卫星系统研发了不同的反演模型。北斗导航系统的建成和机器学习神经网络技术的发展促进了 GNSS 土壤湿度反演技术的进步,但一些反演模型受到诸如反演过程中直射信号与反射信号通道不一、土壤反射面粗糙导致微波散射以及植被微波散射等因素的影响而使监测受到约束,仍然需要进一步改进。另外,虽然在对于如何使用多星融合方法消除土壤粗糙度所带来影响方面也开展了一些研究,但多导航系统结合进行土壤湿度反演模型输入参数维度扩充的研究仍然缺乏,需要进一步深入研究。随着深度学习技术的发展与信号处理技术的提高,在相关领域科研工作者的共同努力下目前所存在的问题不久将会解决,我国的北斗定位系统在将来也会发挥越来越广泛而又重要的作用。

参考文献

- [1] 张有智,解文欢,吴黎,等. 农业干旱灾害研究进展[J]. 中国农业资源与区划, 2020, 41(9): 182-188
- [2] 于水,陈迪桃,黄法融,等. 中亚农业水资源脆弱性空间格局及分区研究[J]. 中国农业资源与区划, 2020, 41(4): 11-20
- [3] MASTERS D, AXELRAD P, KATZBERGS. Initial results of land-reflected GPS bistatic radar measurements in SMEX02[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2004, 92(4): 507-520
- [4] EGIDO A, RUFFINI G, CAPARRINI M, et al. Soil moisture monitorization using GNSS reflected signals[C] // The 1st Colloquium Scientific and Fundamental Aspects of the Galileo Programme, Barcelona, Spain, 2008: 1-7
- [5] MAO K B, ZHANG M Y, WANG J M, et al. The study of soil moisture retrieval algorithm from GNSS-R[C] // International Workshop on Education Technology and Training, Shanghai, China, 2008: 438-442
- [6] ANDRES C, IÑIGO M, JIN S G. Soil moisture content from GNSS reflectometry using dielectric permittivity from Fresnel reflection coefficients [J]. *Remote Sensing*, 2020, 12(1): 122-143
- [7] 张志刚,梁月吉,任超,等. 小波多尺度和多星融合的 GPS-IR 土壤湿度反演[J]. 测绘科学技术学报, 2020, 2(37): 133-137

- [8] 朱小灵, 王剑辉, 谢荣安. 基于 GPS-IR 的地表土壤湿度估算方法[J]. 测绘通报, 2020, 66(6): 128-133
- [9] 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
- [10] 孙波, 梁勇, 汉牟田, 等. 基于 GA-SVM 的 GNSS-IR 土壤湿度反演方法[J]. 北京航空航天大学学报, 2019, 45(3): 486-492
- [11] 王丽霞, 王涛, 张双成, 等. 基于长时间序列 SNR 数据的土壤湿度反演[C]//第十一届中国卫星导航年会论文集——S01 卫星导航行业应用, 北京, 中国, 2020: 94-99
- [12] 陈堃, 沈飞, 曹新运, 等. 基于深度置信网络的 GNSS-IR 土壤湿度反演[J]. 测绘通报, 2020, 66(9): 100-105
- [13] 张楠, 严颂华, 王文伟. 北斗 GEO 卫星微动条件下的 GNSS-R 土壤湿度反演[J]. 科学技术与工程, 2019, 9(19): 154-160
- [14] 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, 6(42): 1134-1140
- [15] 聂士海, 张显云, 付婷, 等. 基于 BDS 三频相位多路径误差的土壤湿度反演[J]. 大地测量与地球动力学, 2021, 41(4): 374-377
- [16] 吴继忠, 王天, 吴玮. 利用 GPS-IR 检测土壤含水量的反演模型[J]. 武汉大学学报, 2018, 43(6): 887-892
- [17] 张玉华. 基于机器学习的 GNSS-IR 土壤湿度反演方法研究[D]. 济南: 山东农业大学信息科学与工程学院, 2021: 16-17
- [18] 邹文博, 张波, 洪学宝, 等. 利用北斗 GEO 卫星反射信号反演土地土壤湿度[J]. 测绘学报, 2016, 45(2): 199-204
- [19] 李培昊. 基于北斗 GEO 卫星信噪比的土壤湿度反演[D]. 成都: 西南交通大学地球科学与环境工程学院, 2019: 35-43
- [20] 孙波. 基于 GNSS 单天线技术的农田土壤湿度反演方法研究[D]. 济南: 山东农业大学机械与电子工程学院, 2020: 54-71
- [21] 孙波, 张弛, 尹世超, 等. 基于 PSO-RF 的 GNSS-IR 土壤湿度反演方法研究[J]. 无线电工程, 2021, 51(10): 1080-1085
- [22] 赵芬, 严颂华, 陈能成, 等. 利用无线传输的 BDS-R 土壤湿度反演系统[J]. 传感器与微系统, 2015, 34(10): 79-82

Current status of GNSS-R soil moisture retrieval based on Beidou signal

YANG Changzhi*, MAO Kebiao***, SUN Yidan*, WANG Yifan*, WANG Ping*, GUO Zhonghua*

(* School of Physics and Electronic-Engineering, Ningxia University, Yinchuan 750021)

(** Institute of Agricultural Resources and Regional Planning, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081)

(*** State Key Laboratory of Remote Sensing Science, Aerospace Information Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101)

Abstract

The L-band signal carried by the global satellite navigation system is particularly sensitive to soil moisture and very suitable for soil moisture change monitoring. Taking the signal power or delay as the attribute, the actual value of soil moisture as the label, combined with dielectric constant empirical model, support vector machine, random forest algorithm, BP neural network and depth confidence neural network, the soil moisture inversion model based on navigation signal can be established. With the completion of BeiDou navigation system, using its three frequency carrier signal and the unique advantages of geosynchronous earth orbit (GEO) can further improve the effect of soil moisture monitoring based on the original technology. In order to further promote the application potential of BeiDou system in soil moisture monitoring, this paper introduces and analyzes the current situation of GNSS-R inversion of soil moisture and the principle of inversion of soil moisture, and expounds the advantages of using BeiDou navigation signal as signal source for soil moisture retrieval.

Key words: soil moisture, machine learning, neural network, BeiDou navigation system, three frequency carrier signal, geosynchronous earth orbit satellite(GEO)