

利用 SNR 观测值进行 GPS 土壤湿度监测

敖敏思¹ 朱建军¹ 胡友健² 曾 云² 刘亚东²

1 中南大学地球科学与信息物理学院,湖南 长沙,410083
2 中国地质大学信息工程学院,湖北 武汉,430074

摘 要:利用 GPS 信噪比(SNR)观测值监测土壤湿度变化可克服传统手段破坏观测对象、数据难以同化、时空分辨率受限等缺点,但同时也存在测量区域不明确、卫星与波段选择缺少相应依据、多径延迟相位与土壤湿度之间相关性的定量数值描述函数与模型亟待建立等问题。本文通过引入菲涅尔反射区域,结合仿真和实测土壤湿度数据、GPS 观测值开展对比实验对上述问题进行研究。实验过程及结果表明,采用 SNR 观测值能有效跟踪土壤湿度的变化趋势,最大有效测量范围约 45 m,利用指数函数能较好地描述 SNR 多径延迟相位与土壤湿度之间的关系。同时,选择高级卫星和记录 L2C 观测值,有利于获得更准确的结果。

关键词:全球定位系统;信噪比;土壤湿度;多径反射
中图法分类号:P228 **文献标志码:**A

土壤湿度是衡量水资源循环状况的重要标准,其准确和长期监测是环境科学研究的基础^[1]。为克服传统测量手段(如湿度计测量、烘培法、遥感以及 GNSS 反射信号反演^[2]等)对被观测对象的破坏、仪器类型之间数据同化困难、时空分辨率受限或高成本等缺点,文献[3]提出利用 GPS 信噪比(signal-to-noise ratio, SNR)观测值反演土壤湿度变化,利用 SNR 的多路径反射分量在一定截止高度角内幅度、频率和相位的变化来反演土壤湿度的变化。文献[4-5]较早地对 SNR 观测值中直射与反射分量的分离、反射分量与反射环境之间的关系进行了研究,并以此修正相位观测值。借助 IGS 和 PBO 的测站观测数据,文献[6-7]的实验结果表明幅度参数与土壤湿度之间存在相似性。文献[8-9]利用延迟相位参数反演土壤湿度,其相关性较幅度参数更稳定。利用 SNR 观测值反演土壤湿度以大地测量型 GPS 为基础,能有效节约成本和扩展 CORS 网络的功能。同时,也存在问题亟待研究:① 该方法的测量区域与卫星-接收机几何位置相关,其有效测量区域值得研究;② 反演过程中,卫星、波段等参数的选择缺乏相应依据;③ 由 SNR 观测值提取的多径延迟相位与土壤湿度间的相似性以定性分析为主,定量的

数值描述函数和模型有待研究和建立。本文在介绍该方法的基础上,结合 GPS 观测值、仿真和实测的土壤湿度数据开展对比实验,对实验过程和结果进行分析,研究和讨论上述问题。

1 原理与方法

SNR 是表征 GPS 天线信号质量的指标,主要受天线增益、多径效应和接收机噪声影响。GPS 天线增益模式一般设计为入射高度角越高,增益越大。因接收机噪声功率小,低卫星高度角时,多径效应成为主导因素。利用 SNR 反演土壤湿度包括 3 个主要步骤:① 多径直、反射分量分离。由天线增益引起的分量可认作直射分量,幅度远大于反射分量。因 SNR 随高度角变化呈近似抛物线形态,常采用二阶多项式分离。② 重采样 SNR 反射分量。分离所得反射分量为其随历元的变化值,通过重采样得到其与卫星高度角正弦值间的变化值。③ 估计重采样后的多径反射分量特征参数(幅度、频率和相位),与土壤湿度数据进行对比和分析,研究相关性和两者之间的关系模型。

为讨论该方法的有效测量区域,引入惠根斯-

菲涅耳原理^[10]。GPS 信号的非涅耳区域是一组与卫星高度角、方位角和天线高相关的椭圆。因 CORS 网络中的卫星截止高度角一般为 5°或 10°，模拟约 5°高度角的有效区域如图 1 所示。

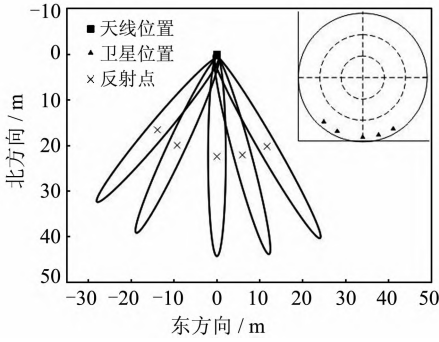


图 1 菲涅耳区域模拟图
Fig. 1 Simulated Fresnel Regions

图 1 右上角为卫星-接收机位置图，左侧椭圆区为菲涅耳区域。由图 1 可知，有效距离理论最大值距天线中心约 45 m。其为利用该方法监测土壤湿度变化的选点提供了依据；在该区域内应尽可能避免非地表土壤的反射源，同时，保持区内土壤类型的单一有利于提高监测的可靠性。

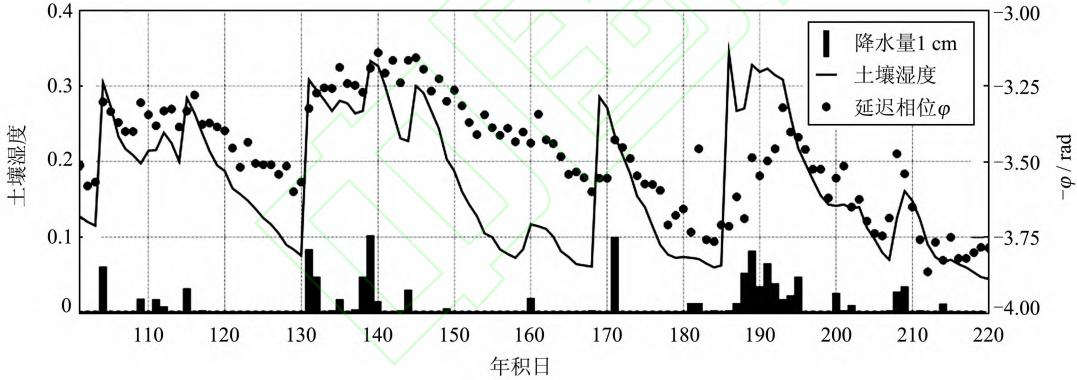


图 2 P041 的相位、土壤含水率与降水量
Fig. 2 Soil Moisture, Precipitation and Relative Delay Phase at P041

图 2 所示时段内显著降水 6 次，分别为第 104、131、138~139、171、187~193、208~209 天。对应于降水，土壤湿度均明显上升，说明土壤湿度变化的主因为降水。结合延迟相位来看，每当土壤湿度上升时，延迟相位 φ 均做出响应。对应于第 104 天的降水，土壤湿度由 0.115 上升至 0.304， $-\varphi$ 值由 -3.569 上升至 -3.304；对应于第 131 天的降水，土壤湿度由 0.075 上升至 0.308， $-\varphi$ 值则由 -3.569 上升至 -3.324。此后的降水事件中， $-\varphi$ 与土壤湿度间也存在显著相关性。值得注意的是，第 170、189 天前， $-\varphi$ 与土壤湿度吻合稍差。经分析气象文件可知，该时段内天气急剧变化，土壤湿度在短时间内发生

2 实验与分析

2.1 仿真对比实验

仿真对比实验的 GPS 数据来自 PBO 的测站 P041，该站较早开展土壤湿度研究，其在提供 GPS 和气象数据的同时，率先记录 L2C 观测值，提高 L2 波段的 SNR。仿真土壤湿度采用 Noah-LSM 模型计算，其根据至少 7 种地上气象数据（温度、湿度、气压、降水量、平均风速和长、短波辐射）估计地表土壤湿度。因数据缺失，降水数据由附近的 NOAA/NWS 气象站提供。长、短波辐射由全球陆面数据同化系统（GLDAS）进行插值获得。其他数据来自 GPS 气象文件。除降水量采用叠加求和与平均分配外，其他参数均采用样条插值转换至 30 min 间隔。选取年积日第 101~220 天（共 120 d）PRN12 卫星 1 Hz 采样 S2 观测值，截止高度角设为 7°~30°，二阶多项式分离直、反射分量，非线性最小二乘法估算延迟相位 φ 。测站 P041 的 $-\varphi$ 、降水量与土壤湿度关系如图 2 所示。

了剧烈波动。同时，仿真结果为日均土壤湿度，而 φ 仅反映观测时段内的湿度，从而造成测量时段不一致的问题。总的来说，当降水事件发生时，土壤湿度上升， $-\varphi$ 相应地反向变化；降水事件结束后，土壤湿度逐渐回落， $-\varphi$ 则相应增加。考虑到时段不对应的问题，本文进一步结合实测土壤湿度进行对比实验。

2.2 实测对比实验

实测对比实验于中国地质大学（武汉）北区外某地进行。观测时段为 2012 年年积日第 70~91 天。测站 9228 配置 Trimble R6 型 GPS 接收机，配合使用不可伸缩的脚架。通过钉桩结合钢钉建立控制点，保证天线高（1 601.0 mm）不变以确保

在同一个位置观测相应的卫星。卫星截止高度角设为 3° , 记录间隔 1 s。与国内大部分 CORS 站保持一致, 未记录 L2C 观测值。测站附近土质为黄棕壤, 40 m 内无遮挡和反射源, 南侧约 750 m 外为某山, 最高海拔约 120 m, 其遮挡高度角小于 6.8° , 土壤湿度数据采用烘焙法采集。在观测时段内, 于测站东南采集 5 处深度 0~5 cm 的土壤样本, 以铝盒密封保存并带回实验室。使用电子天平分别对烘烤前后的样品和铝盒重量进行称量。土壤湿度公式为:

$$\text{土壤湿度} = \frac{\text{烤前} - \text{烤后}}{\text{烤后} - \text{铝盒重}} \quad (1)$$

式中, 土壤湿度为 5 处样品的均值。降水量数据来自湖北省气象与生态自动监测网。数据处理选取年积日 PRN18 卫星 S1 观测值数据, 高度角区间为 $7^{\circ} \sim 30^{\circ}$ 。9228 测站 SNR 反射信号延迟相位 φ 、降水量与土壤湿度关系如图 3 所示。

图 3 所示的时段内有 3 次明显降水, 为第 74~75、81~82 及 89~90 天。第 74~75 天的降水

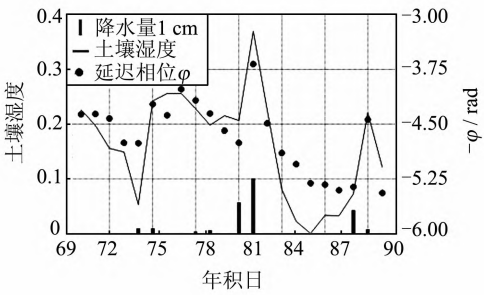


图 3 9228 的延迟相位、土壤湿度与降水量
Fig. 3 Relative Delay Phase, Soil moisture and Precipitation at 9228

中, 土壤湿度由 0.05 升至 0.256, $-\varphi$ 值由 -4.763 升至 -4.382 ; 第 81~82 天内, 土壤湿度由 0.207 升至 0.369, $-\varphi$ 值由 -4.753 升至 -3.683 ; 第 89~90 天, 土壤湿度由 0.073 升至 0.221 又回落至 0.121, $-\varphi$ 也相应由 -5.356 升至 -4.441 并回落至 -5.439 。延迟相位与土壤湿度散点图见图 4。

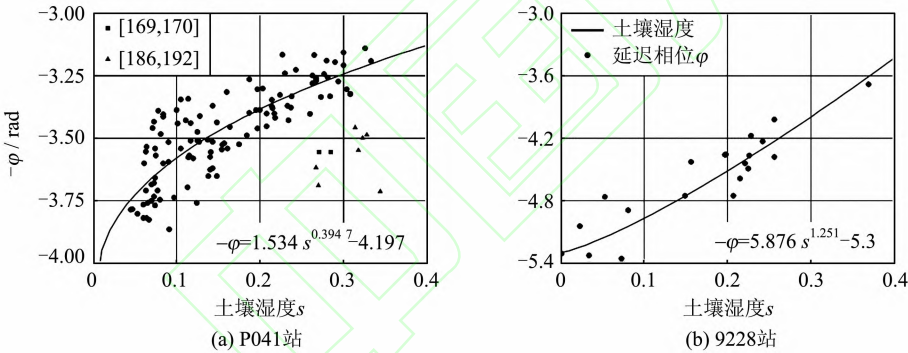


图 4 延迟相位 φ 与土壤湿度散点分布
Fig. 4 Scatter Diagram of Relative Delay Ophase φ and Soil Moisture

图 4 中, $-\varphi$ 与土壤湿度的相关系数为 0.603 3 和 0.888 4, 统计学上为强和显著相关。P041 站相关系数的计算包括了观测时间不一致影响的时段, 实际相关应更显著。采用指数函数拟合的结果分别如图 4(a) 和 (b) 右下所示。测站 P041 的拟合对第 169~170、186~192 天进行了剔除, 其拟合决定系数 R^2 为 0.684 8; 测站 9228 的拟合, R^2 为 0.796 1。总的来说, 指数函数能够较好地反应出 φ 与土壤湿度间的对应关系。

从仿真和实测对比实验可知, 后者相关性更显著, 主要得益于测量时间的一致。从监测过程来看, SNR 观测值的质量影响较大, 高质量的 SNR 有利于分离直、反射分量, 从而提高相位 φ 的精度。从地面因素看, 记录 L2C 观测值能提高 L2 波段的信噪比, 是否装置抑径板和天线罩对于

反射信号有一定影响, 但前者可以通过调整卫星的截止高度角来调节。从空中因素看, 高级的卫星 (如 PRN18 为 BLOCK IIR 型、PRN12 为 BLOCK IIR M 型) 信号功率大且稳定, 监测结果也更可靠。总体上, 记录 L2C 时, 选择 L2 波段上的高级卫星; 未记录 L2C 时, 选择 L1 波段上的高级卫星, 监测结果更理想。同时, 从测站 P041 和 9228 的情况来看, $-\varphi$ 在降水结束后的回落速度均小于地表土壤湿度 (如 P041 的第 116~103 天、140~168 天和 9228 的第 82~89 天)。考虑到地表深处土壤水分蒸发较慢, 是否说明存在更有效的监测深度有待研究。

3 结 语

土壤湿度及其变化的准确和长期监测对环境

科学研究具有重要意义。本文在系统讨论利用 GPS 信噪比观测值 SNR 监测土壤湿度方法的基础上,分别结合仿真和实测实验,对其有效测量区域、重要参数设置进行了研究和分析。主要结论为:① 测量区域为一系列椭圆区域,最大范围距天线中心约 45 m;② 延迟相位 φ 与土壤湿度显著相关,指数函数能够较好地描述两者之间的关系;③ 选择高级卫星和开启观测 L2C 观测值有利于获取更准确的监测结果。同时,结合不同类型、深度的对比土壤湿度数据,引入其他气象参数联合延迟相位 φ 反演土壤湿度以及扩展该方法至其他领域(如冰雪厚度、潮汐和植被生长等)值得进一步研究。

参 考 文 献

- [1] Liu Jingnan, Shao Lianjun, Zhang Xunxie, et al. Advances in GNSS-R Studies and Key Technologies[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2007, 32(11): 955-960 (刘经南, 邵连军, 张训械, 等. 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)
- [2] Yan Songhua, Gong Jianya, Zhang Xunxie, et al. Ground Based GNSS-R Observations for Soil Moisture [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2011, 54(11): 2 735-2 744 (严颂华, 龚健雅, 张训械, 等. GNSS-R 测量地表土壤湿度的地基试验[J]. 地球物理学报, 2011, 54(4): 2 735-2 744)
- [3] Larson K M, Small E E, Guntmann E, et al. Using Existing GPS Receivers as a Soil Moisture Network for Water Cycle Studies [J]. *Geophysics Research Letter*, 2008, 35: 405-410
- [4] Bilich A, Larson K M. Mapping the GPS Multipath Environment Using the Signal to Noise Ratio (SNR) [J]. *Radio Science*, 2007, 42: 3-13
- [5] Wu Yuhang, Chen Xiuwan, Wu Caicong, et al. Mitigation of Multi-Path Using SNR Values [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2008, 33(8): 842-845 (吴雨航, 陈秀万, 吴才聪. 利用信噪比削弱多路径误差的方法研究[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2008, 33(8): 842-845)
- [6] Larson K M, Small E E, Guntmann E, et al. Using GPS Multipath to Measure Soil Moisture Fluctuations; Initial Results [J]. *GPS Solut*, 2008, 12(8): 173-177
- [7] Ao Minsi, Hu Youjian, Liu Yadong, et al. Inversion of Soil Moisture Fluctuation Based on Signal-to-Noise Ratio of Global Positioning System[J]. *Journal of Geomatics Science and Technology*, 2012, 29(2): 66-69 (敖敏思, 胡友健, 刘亚东, 等. GPS 信噪比观测值的土壤湿度变化趋势反演[J]. 测绘科学技术学报, 2012, 29(2): 66-69)
- [8] 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
- [9] 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
- [10] Cao Qingyuan. The Calculating Formulas of the Fresnel Integral and Its Application [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 1986, 11(2): 57-63 (曹庆源. 菲涅耳积分计算公式及其应用[J]. 武汉测绘科技大学学报, 1986, 11(2): 57-63)

Comparative Experiments on Soil Moisture Monitoring with GPS SNR Observations

AO Minsi¹ ZHU Jianjun¹ HU Youjian² ZENG Yun² LIU Yadong²

¹ School of Geosciences and Info-physics, Central South University, Changsha 410083, China

² School of Information and Engineering, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

Abstract: Using the SNR observations from geodetic GPS receiver to monitoring the soil moisture is a new method, which does not suffer from destruction of observed soils, difficult data assimilation and time-spatial resolution limits. However, there are issues need to be solved such as uncertain measuring area, selection rules of parameter as wavelength and satellites, and construction of relationship

Xianshuihe Anninghe Fault. ② Between the Ms 8.0 earthquake in Wenchuan and Ms 7.0 earthquake in Lushan, there was about a 5 mm/a dextral strike-slip activity in the middle and northern sections of the Longmenshan fault zone, with no 3D deformation distinguished in and near the seismic source region. Meanwhile the sinistral deformation increased on the Xianshuihe Anninghe fault and east of the zone. ③ The co-seismic deformation field of the Lushan earthquake was basically distributed for 10 kilometers around the seismic source region, with an epicenter bounded ,on the east side as a dextral deformation, on the west side with a sinistral deformation. ④ LS05 was about 12 km to the epicenter; the permanent vertical displacement momentum was around 7 cm, with a horizontal thrust momentum of about 4 cm, the horizontal strike-slip was about 5 cm from the station.

Key words: Lushan Earthquake; co-seismic deformation; pre-seismic activity field; co-seismic displacement; GNSS

First author: YANG Guohua, professor, specializes in GPS data process and activity analyze of Earth. E-mail: ygh5710@163.com
Foundation support: Special Earthquake Project Granted by the China Earthquake Administration, Nos. 201308009, 201208006; the National Science and Technology Support Program, No. 2012BAK19B01-02; Lushan Earthquake Research Project.

(上接第 120 页)

model between the relative delay phase and soil water content. To solve these problems, the Fresnel zone theory is introduced, and two comparative experiments based on simulated and measured soil moisture are carried out. The process and results of experiments show that the remarkable correlation, which can be described well by exponential function, does exist between the relative delay phase and soil moisture. The maximal effective monitoring distance is within about 45 meters. Meanwhile, selection of an advanced satellites and recording of L2C can increasingly improve the quality of SNR and lead to more reliable results.

Key words: global positioning system; signal-to-noise ratio; soil moisture; multipath reflection

First author: AO Minsi, PhD, specializes in GNSS and InSAR technology and applications on geosciences. E-mail: aominsi@csu.edu.cn
Corresponding author: ZHU Jianjun, PhD, professor. E-mail: zjj@csu.edu.cn
Foundation support: The National High Technology Research and Development Program of China (863 Program) , No. 2012AA121301; the National Basic Research Program of China (973 Program), No. 2013CB73303; the National Natural Science Foundation of China, No. 41371335.