

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2014.01.012

利用 GPS 信号信噪比反演土壤湿度变化

王一枫¹,何秀凤¹,季 君²

(1. 河海大学卫星及空间信息研究所,江苏 南京 210098; 2. 南通市海洋与渔业局海籍调查测量中心,江苏 南通 226018)

摘要:采用右旋圆极化(RHCP)天线和左旋圆极化(LHCP)天线分别接收 GPS 直接信号与反射信号,跟踪反射点并探测土壤粗糙度,并用小波分析方法对土壤干燥区域与湿润区域反射信号的信噪比进行去噪分析,验证 GPS 信号对土壤湿度变化敏感的特性。试验结果表明,利用 GPS 反射信号可精确跟踪地面反射点,并且 GPS 反射信号信噪比的大小可以反映土壤湿度变化。

关键词:反射点;土壤粗糙度;土壤湿度变化;信噪比

中图分类号:P228.1 文献标志码:A 文章编号:1000-1980(2014)01-0062-05

Remote sensing of soil moisture variation using signal to noise ratio of GPS signals

WANG Yifeng¹, HE Xiufeng¹, JI Jun^{1,2}

(1. *Institute of Satellite Navigation and Spatial Information System, Hohai University, Nanjing 210098, China;*
2. *Cadastral Survey and Measurement Center, Nantong Oceanic and Fishery Administration, Nantong 226018, China*)

Abstract: The right hand circular polarization (RHCP) antenna and left hand circular polarization (LHCP) antenna were used to receive direct GPS signals and reflected GPS signals, respectively. The reflection points were tracked and the soil roughness was detected. The GPS signals were verified to be sensitive to the variation of the soil moisture through de-noising analysis of the signal to noise ratio of the reflected GPS signals with the wavelet method in the dry region and wet region. The results show that the reflection points can be precisely tracked with the reflected GPS signals, and the signal to noise ratio of the reflected GPS signals can reflect the variation of the soil moisture.

Key words: reflection points; soil roughness; change of soil moisture; signal to noise ratio

土壤湿度是水文、农业、气候等研究中一个重要物理量,它可以预报洪水,研究地面和大气的关系^[1]。利用 GPS 反射信号遥测土壤湿度是近年来提出的一种反演土壤湿度的新方法。采用 GPS 手段观测成本低、时空分辨率高、覆盖范围广,并且卫星工作的 L 波段(L1=1.575 42 GHz, L2=1.227 60 GHz)能减轻大气衰减并具有很好的穿透植被能力,因而 GPS 是较为理想的遥感土壤湿度的全球卫星定位系统^[2-5]。由于 GPS 信号对反射表面的电磁特性十分敏感,特别是土壤介电常数对反射信号的强弱有着重要影响,所以可通过 GPS 反射信号的强弱来探测土壤湿度^[6]。

国外众多机构开展了关于 GPS 反射信号遥感土壤湿度的研究,2002 年 6—7 月,美国 NASA 与科罗拉多大学在艾奥瓦州进行第 1 次 GPS 反射信号遥感土壤湿度的实验^[6]。而在我国,中国科学院武汉物理与数学研究所、武汉大学等单位开展合作,最早开展了这项理论和试验研究工作。本文根据 GPS 信号对土壤湿度变化敏感的特性,利用斯奈尔定律研究地表面反射率与反射区域的地表粗糙程度的关系,通过设计几个试验方案,跟踪反射点轨迹、探测土壤粗糙度,采用小波分析方法对左旋圆极化(LHCP)天线接收的反射信号进行去噪处理。试验结果表明,利用 GPS 直接信号与反射信号可定位和精确跟踪反射点, GPS 反射信号信噪

收稿日期: 2013-01-08
基金项目: 国家自然科学基金(40974001),江苏省研究生科研创新计划(CXZZ11_0451)
作者简介: 王一枫(1990—),男,浙江嵊州人,硕士研究生,主要从事 GPS 测量与应用研究。E-mail: wangyiflying@163.com

比(V_{SNR})的大小变化能够反映土壤湿度变化。

1 反射轨迹跟踪

利用 GPS 接收机右旋圆极化(RHCP)天线和左旋圆极化(LHCP)天线、地面反射点、GPS 卫星及地心的空间几何关系,建立关系方程求得反射点点位坐标,如图 1 所示。

图 1 中当每个反射点距地心距离相同且近似处于同一水平面上时,反射点的 XYZ 坐标将随时间积累成投影线^[7]。由 RHCP 天线高程 H_R 和 LHCP 天线高程 H_L 给出反射面近似地面高程 H_G , 并推出反射点在直接信号上的反投影点坐标。

$$\begin{bmatrix} x_m \\ y_m \\ z_m \end{bmatrix}_i = \left(\begin{bmatrix} R_r - \frac{H_R - H_G}{\sin(E)} \end{bmatrix} \right)_i \begin{bmatrix} x_d - x_s \\ y_d - y_s \\ z_d - z_s \end{bmatrix}_i + \begin{bmatrix} x_s \\ y_s \\ z_s \end{bmatrix}_i \quad (1)$$

式中: E ——卫星高度角; (x_s, y_s, z_s) ——卫星坐标; (x_d, y_d, z_d) ——RHCP 天线坐标; R_r ——卫星到 RHCP 天线的距离; (x_m, y_m, z_m) ——反投影点坐标。利用反投影点,反射点和地心的几何关系可推出反射点坐标。

$$\begin{bmatrix} x_r \\ y_r \\ z_r \end{bmatrix}_i = \begin{bmatrix} R_0 \\ R_m \end{bmatrix}_i \begin{bmatrix} x_m \\ y_m \\ z_m \end{bmatrix}_i \quad (2)$$

式中: (x_r, y_r, z_r) ——反射点坐标; R_0 ——地心到反射点距离; R_m ——地心到反投影点距离。

2 土壤粗糙度探测

土壤反射面的粗糙程度直接影响表面反射机制的确定,表面光滑与粗糙的划分取决于与土壤表面发生作用的电磁波行为^[8]。根据瑞利判据,一个表面如果是光滑的,则

$$h_c < \frac{\lambda}{8\sin\gamma} \quad (3)$$

式中: h_c ——表面高度标准偏差; γ ——电磁波入射仰角; λ ——电磁波波长。

根据文献[7]可得到地表土壤高程标准差 σ 与轨迹长度 L ,于是得到地表土壤粗糙度 R :

$$R = \frac{\sigma}{L} \quad (4)$$

3 土壤湿度变化反演

土壤是由沙粒、黏土、水和其他有机物质组成的,土壤中各物质的组分不同会引起不同土壤的介电常数发生变化。根据文献[9]建立的 4 成分模型可获得仅适合 L 波段下土壤复介电常数的实部和虚部^[10-12]。

根据美国农业部土壤分类方法给出几种不同类型土壤含沙与含土质量分数对比。

利用 4 成分模型得到表 1 中不同类型土壤在光滑表面下的介电常数与土壤湿度曲线,如图 2 所示。由菲涅尔假设可知,当入射波到达光滑物体表面产生反射现象,平面反射波分为垂直偏极化波反射和水平偏极化波反射,反射物的相对介电常数与信号的入射角是影响反射能力的主要因素^[12]。图 3 给出了不同介电常数下反射系数绝对平均值与入射角的关系。

GPS 信噪比包含了产生反射信号界面的物理特性,而接收的土壤反射信号是被土壤介电常数调制的,它

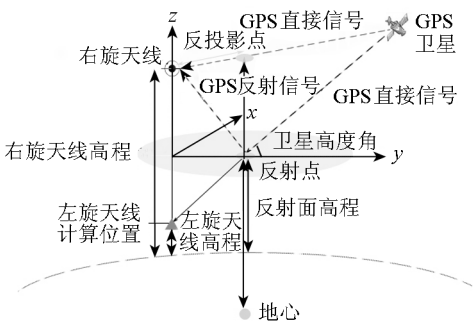


图 1 定位反射点空间几何示意图
Fig. 1 Space geometric relationship for extraction of ground reflection points

表 1 不同类型土壤含沙与含土质量分数
Table 1 Soils with different sand contents and clay contents

土壤类型	含沙量 $S/\%$	含土量 $C/\%$
沙壤土	51.5	13.5
黏沙土	42.0	8.5
粉砂壤土	30.6	13.5
粉质黏土	5.0	47.4

包含了土壤的介质特性信息。根据文献[10]中对 GPS 信号反射率的定义,反射率 R 与 GPS 信号的反射系数、反射信号 F 与直接信号 D 的信噪比的比值和反射率校正因子有关。由此,通过比较反射率 R 的变化可以得出土壤介电常数变化,继而反演土壤湿度的变化。

4 试验研究与结果分析

试验场地布设面积大致相同的两块试验区域用来铺设细沙和壤土,并架设 LHCP 天线接收试验区域的 GPS 反射信号。为探测土壤湿度变化,实验对于干燥与洒水后湿润土壤中反射信号对比分析。为减少其他噪声对信号的干扰,保证实验区域 GPS 反射信号的获取,LHCP 天线将被安置在距地面 0.5 ~ 1 m 内的区域,并对捕捉信号进行小波去噪处理。

图4显示捕捉的4颗GPS卫星(PRN-09、PRN-15、PRN-21和PRN-27)的反射轨迹。

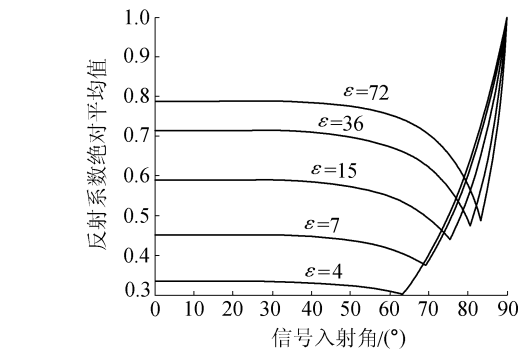


图3 反射系数绝对值的平均值随入射角的变化

Fig. 3 Average value of absolute reflection coefficient varying with incident angle

4颗卫星部分长度反射轨迹的粗糙度如表2所示。

表2 土壤粗糙度探测结果

Table 2 Results of soil roughness detection

卫星号	平均高程/m	高程标准差/m	轨迹长度/m	粗糙度
09	-1.1657	0.00104	0.05	0.00098
15	-1.1623	0.00041	0.28	0.00051
21	-1.1635	0.00077	0.20	0.00076
27	-1.1644	0.00079	0.23	0.00088

通过对比15号卫星与21号卫星探测的结果可知,实验区域壤土粗糙度大于细沙粗糙度,与实际情况相符,并且两种土壤的高程标准差均远小于根据式(3)获得的GPS信号对应的临界值(≈0.0237),据此可视实验区域反射面为光滑表面。因此本文中反演土壤湿度变化采用的反射率 R 即为GPS反射信号 F 与直接信号 D 的信噪比比值。

图5和图6分别为干燥土壤下相同观测时段和不同观测时段内卫星高度角对去噪后4颗卫星 V_{SNR} 值变化的影响。观察图5和图6发现 V_{SNR} 值的变化与卫星高度角变化有关,可见卫星高度角对反射信号有较大影响。

表3给出相同时段下干燥与湿润土壤下两颗卫星反射信号去噪后 V_{SNR} 平均值。

根据表3可知,在土壤较为干燥的情况下,21号卫星的 V_{SNR} 平均值明显小于15号卫星的 V_{SNR} 平均值,说明试验中壤土的反射性能比细沙的反射性能差。由图2与表2可以看到其原因主要包含以下两个方面,一

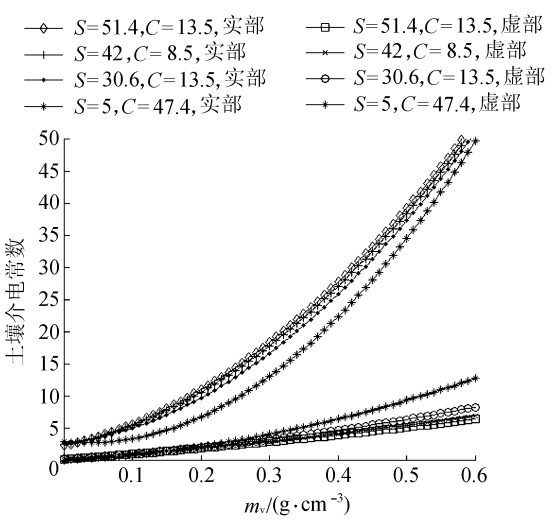


图2 土壤介电常数随土壤湿度的变化

Fig. 2 Soil's dielectric constant varying with soil moisture



图4 试验区域反射点轨迹示意图

Fig. 4 Tracks of reflection points shown in a picture taken from experimental field

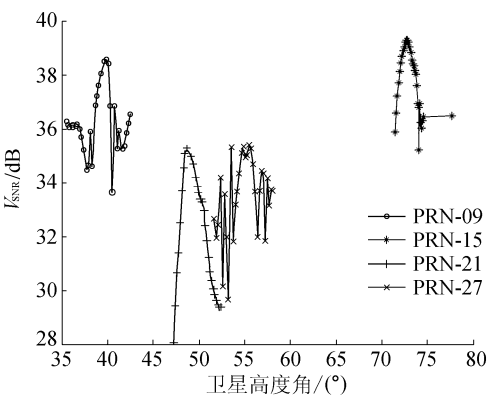


图 5 同一观测时段不同卫星高度角对 V_{SNR} 值影响

Fig. 5 Influence of different satellite elevation angles on signal to noise ratio during same observation period

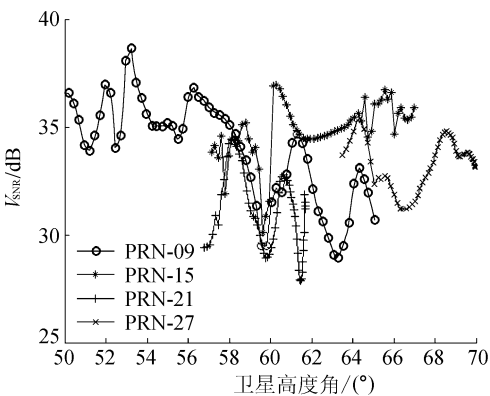


图 6 同一观测时段相近卫星高度角对 V_{SNR} 值影响

Fig. 6 Influence of proximate satellite elevation angles on signal to noise ratio during same observation period

是较低湿度下含土成分越高,土壤介电常数相对较小,使反射性能降低;二是壤土的粗糙度比细沙的粗糙度大使其反射性能减弱。

图 7 为 15 号卫星和 21 号卫星分别在干燥和湿润土壤下的反射率变化曲线。

分析图 7 发现在干燥土壤下,21 号卫星的反射率在 0.45 ~ 0.60 之间波动,平均值为 0.57,15 号卫星的反射率在 0.5 ~ 0.7 之间波动,平均值为 0.62;而在湿润土壤下,21 号卫星的反射率在 0.75 ~ 0.83 之间波动,平均值为 0.80,15 号卫星的反射率在 0.78 ~ 0.92 之间波动,平均值为 0.83。结果表明,土壤湿度变化将引起 GPS 信号反射能力较大的变化。

5 结 语

利用 GPS 信号 V_{SNR} 值反演土壤湿度变化原理,借助反射轨迹跟踪算法和土壤粗糙度探测算法,对试验区域的 GPS 信号反射点进行定位和跟踪、探测反射区域土壤粗糙度和土壤湿度变化。通过试验研究得出如下结论。

- a. 利用 GPS 直接信号和反射信号可以定位和精确跟踪反射点。
- b. 使用反射点高程值探测土壤粗糙度能够较好区分不同类型土壤的粗糙程度,但是边缘区域的反射点高程值容易使土壤粗糙度探测产生较大误差。

c. 采用小波分析方法去噪后的 GPS 反射信号 V_{SNR} 值可以反映不同类型土壤的反射性能,但是卫星高度角、土壤粗糙度和土壤类型等因素将对土壤湿度变化反演产生较大的影响。

参考文献:

[1] JACKSON T, SCHMUGGE J, ENGMAN E. Remote sensing applications to hydrology: soil moisture [J]. Hydrological Science, 1996,41(4):517-530.

[2] NJOKE E, ONEILL P. Multifrequency radiometer measurements of soil moisture [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing,1982,20:468-475.

[3] LIU Zhiming,ZHANG Bai,YANG Ming,et al. Some research advances and trends on soil moisture and drought monitoring by

表 3 干燥与湿润土壤下的去噪后 V_{SNR} 平均值

Table 3 Average value of de-noised signal to noise ratio from dry and wet soils

卫星号	干燥土壤去噪后 V_{SNR}/dB	湿润土壤去噪后 V_{SNR}/dB
15	35.68	41.60
21	31.64	40.80

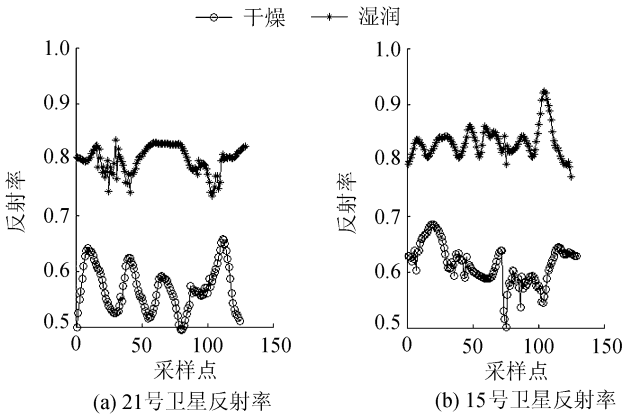


图 7 GPS 信号反射能力变化曲线

Fig. 7 Variation of reflection ability of GPS signals

remote sensing [J]. Advances on Earth Sciences,2003,18(4):576-583.

[4] 关止,赵凯,宋冬生. 利用反射 GPS 信号遥感土壤湿度[J]. 地球科学进展,2006,21(7):747-751. (GUAN Zhi,ZHANG Kai,SONG Dongsheng. Measuring soil moisture using reflected GPS signals [J]. Advances in Earth Science,2006,21(7):747-751. (in Chinese))

[5] 严颂华,张训械. 基于 GNSS-R 信号的土壤湿度反演研究[J]. 电波科学学报,2010,25(1):8-13. (YAN Songhua, ZHANG Xunxie. Retrieving soil moisture based on GNSS-R signals [J]. Chinese Journey of Radio Science,2010,25(1):8-13. (in Chinese))

[6] 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:自然科学版,2007,32(11):955-960. (LIU Jingnan, SHAO Lianjun, ZHANG Xunxie. Advances in GNSS-R studies and key technologies [J]. Journal of Wu Han University:Natural Sciences,2007,32(11):955-960. (in Chinese))

[7] SHEN J C,JUANG J C,TAI C L,et al. Monitoring water levels and currents using reflected GPS carrier Doppler measurements and coordinate rotation model [J]. IEEE Transactions on Instruction and Measurement,2010,59(1):153-163.

[8] 王迎强,严卫,府养,等. 机载 GPS 反射信号土壤湿度测量技术[J]. 遥感学报,2009,13(4):678-685. (WANG Yingqiang, YAN Wei,FU Yang,et al. Soil moisture determination of reflected GPS signals from aircraft platform [J]. Journal of Remote Sensing,2009,13(4):678-685. (in Chinese))

[9] WANG J R,SCHMUGGE T. An empirical model for the complex dielectric permittivity of soils as a function of water content [J]. IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing,1980,18(4):288-295.

[10] SHEN L C,JUANG J C,et al. Stream soil moisture estimation by reflected GPS signals with ground truth measurements [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement,2009,58(3):730-737.

[11] ZAVOROTNY V,VORRONOVICH A. 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.

[12] 宋冬生,赵凯,关止. 记载平台基于全球卫星定位系统的土壤湿度遥感[J]. 东北农业大学学报,2007,35(5):94-96. (SONG Dongsheng,ZHAO Kai,GUAN Zhi. Remote sensing of soil moiture using global positioning system on aircraft platform [J]. Journal of Northeast Forestry University,2007,35(5):94-96. (in Chinese))

· 简讯 ·

河海大学 10 项成果获 2013 年大禹水利科学技术奖

2013 年大禹水利科学技术奖(即原水利部科技进步奖)获奖项目共评出获奖成果 49 项,其中特等奖 1 项、一等奖 9 项、二等奖 17 项、三等奖 22 项。河海大学有 10 项成果获奖,其中特等奖 1 项、一等奖 1 项、二等奖 5 项、三等奖 3 项。

河海大学获得的 10 项奖分别是:朱岳明教授为主要完成人的“强涌潮河口曹娥江大坝工程建设关键技术研究与实践”获特等奖;余钟波教授主持的“水文全要素实验与模拟预测理论及应用”获一等奖;郑源教授主持的“低扬程低水头水力机械节能关键技术研究与应用”、蒋亚清教授主持的“特种高性能外加剂研究与应用”、钟平安教授为主要完成人的“淮河洪水多元协同调控技术与实践”、胡凤彬教授为主要完成人的“长江入海控制站水沙通量实时监测关键技术研究”以及郝振纯教授为主要完成人的“土壤大孔隙流机理及产汇流模型研究”获二等奖;郑金海教授主持的“闽江口潮流泥沙运动特性与船坞码头优化布置研究”、束龙仓教授为主要完成人的“淮河流域地下水安全开采及控制技术综合研究与应用”以及许峰教授为主要完成人的“江苏省防汛防旱监测预警系统”获三等奖。

(本刊编辑部供稿)