

基于 AIEM 和实地观测数据对 GNSS-R 反演土壤水分的研究^①

毛克彪^②* ** 王建明** 张孟阳** 唐华俊* 周清波*

(* 中国农业科学院农业资源与农业区划研究所农业部资源遥感与数字农业重点开放实验室/
呼伦贝尔草原生态系统国家野外科学观测研究站 北京 100081)

(** 北京卫星信息工程研究所 北京 100086)

摘 要 介绍了用 GPS 反射信号反演土壤水分的原理及反演研究的进展,并用改进的积分方程模型(AIEM)和实地观测数据对利用 GPS 反射信号反演土壤水分的方法进行了分析,分析结果表明,由于单个频率的雷达信号受地表粗糙度、角度和地表类型(裸地和植被类型)的影响比较大,很难提出一个实用的通用物理算法。利用美国 2002 年土壤水分实验(SMEX02)实测数据对上述的反演算法进行了分析,分析结果表明,采用经验统计算法对单个站点观测比较实用,平均相关系数达到 0.85 以上。整个分析表明,利用 GPS 前向散射信号与噪声之比反演土壤水分在单个站点能够取得比较高的精度。

关键词 土壤水分,全球导航卫星系统反射(GNSS-R),AIEM 模型,2002 年美国土壤水分实验(SEMX02)

0 引 言

全球定位系统(GPS)导航卫星自 1978 年发射以来,其信号的改进型号已由第 I, II 和 II A 代依次发展到第 II R 代,到 20 世纪 90 年代,GPS 卫星导航系统才发展成熟。GPS 卫星广播频率采用 L1 波段(1.58GHz)作为民用导航信号,L2 波段(1.23GHz)作为军用信号。在 GPS 应用研究中,人们首先发现 GPS 在海洋的反射信号应用潜力非常大,欧洲航天局(ESA))提出 GPS L 波段信号可以用于海洋散射计^[1]。Martin-Neira (1993)提出利用 GPS 反射信号测量海面高度的系统^[2]。许多科学家在海面上利用 GPS 的反射信号做了许多实验,试图获取海洋表面信息(粗糙度、风速和海面高度),已经取得了一系列的研究成果^[3-16]。刘经南等对这些研究做了一些系统的介绍和分析^[17]。后来人们把基于 GPS 反射信号的遥感技术简称为全球导航卫星系统反射(global navigation satellite system-reflection,GNSS-R)技术。由于 GPS 信号具有全天候、穿透性以及不受云的影响,且民用导航信号采用 L1 波段对土壤水分有独特的敏感性,使其在遥感研究全球变化中具有独特的优势。在许多研究中,从地面散射的 GPS 信号已经

被观测到,但对利用地面 GPS 散射信号研究土壤水分的工作不是很多^[18]。由于陆地地表比较复杂,GPS 反射信号在陆地上的应用研究直到 2002 年才逐步引起人们的重视。Masters 大量分析了 2002 年美国土壤水分实验(soil moisture experiment 2002, SMEX02)中机载接受的 GPS 反射信号,初步的研究结果表明 GPS 反射信号对土壤水分比较敏感,是能够被用来监测土壤水分变化的^[19,20]。目前针对 GPS 反射信号来反演土壤水分的研究还不多,还没有通用的物理算法公开发表。其主要原因是目前 GPS 反射信号反演机理还不成熟。另外,目前只有一个民用频率可用,而且是单一极化。雷达受地表面粗糙度的影响比被动微波要大,怎样消除地表粗糙度和植被的影响是算法研究中的难点问题。利用 GPS 反射信号反演土壤水分的研究才刚刚起步,本研究利用改进的积分方程模型(advanced integral equation model, AIEM)和地表实测数据对反演算法进行分析。

1 GNSS-R 反演土壤水分原理

GPS 信号接受器至少可以接受到 4 颗卫星的信号,为了利用 GPS 卫星信号来研究土壤水分,GPS 接受器需要设计成只接受某个方向的信号,如图 1 所

① 863 计划(SQ2007AA12Z339565)和中央级公益性科研院所专项资金资助项目。

② 男,1977 年生,博士;研究方向:微波,热红外遥感,空间数据挖掘及 GIS 应用等方面的研究;联系人,E-mail: maokebiao@126.com
(收稿日期:2008-04-25)

示。利用前向反射系数的变化来监测土壤水分变化。

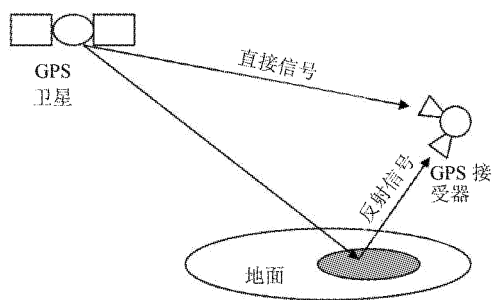


图 1 GPS 反射信号接受图

整个工作流程可以描述如下。假定 P_t 为 GPS 卫星发射信号功率, G_t 为发射天线增益, λ 是波长, R_d 为直接信号达到 GPS 信号接受器的距离, G_d 为接受器的天线增益, 则达到接受器的信号的强度 P_d 为

$$P_d = \frac{P_t G_t}{4\pi R_d^2} \frac{\lambda^2 G_d}{4\pi} \quad (1)$$

假定 R_s 是信号达到地面的距离, R_r 是反射信号达到接受器的距离, σ_0 是反射地面 A 单位面积上的散射系数, G_r 是接受器的天线增益, 则经过地面反射后接受到的信号为

$$P_r = \frac{P_t G_t}{4\pi R_s^2} \frac{\sigma_0 A}{4\pi R_r^2} \frac{\lambda^2 G_r}{4\pi} \quad (2)$$

对于光滑表面, 假定反射率为 Γ , 则式(2)可以简化为

$$P_r = \frac{P_t G_t}{4\pi (R_s + R_r)^2} \frac{\lambda^2 G_r}{4\pi} \Gamma \quad (3)$$

土壤水分的变化直接影响土壤介电常数的变化, 而介电常数是决定发射率 E 变化的最主要因素。反射率和发射率之间满足一定的数学关系, 即

$$\Gamma = 1 - E \quad (4)$$

式(2)中散射系数(σ_0)和式(3)中的反射率 Γ 是受土壤水分和地表粗糙度影响的, 其它参数都是常数。因此, 可以通过接受 GPS 反射信号的强弱来分析土壤水分的变化和获取其它地表相关信息。事实上, GPS 信号接受机受噪声影响, 其输出信号包含了噪声。接受机的噪声输出可以表示为

$$N_r = k T_r B_r \quad (5)$$

式中 k 为波耳兹曼常数, T_r 是等效噪声温度, B_r 是接受器的波宽。信号和噪声的比值表示为

$$SNR = \frac{P_r}{N_r} = \frac{P_t G_t}{4\pi (R_s + R_r)^2} \frac{\lambda^2 G_r}{4\pi} \Gamma \frac{1}{k T_r B_r} \quad (6)$$

SNR 表示接受机的信号与信号的比值, 由于在接受的过程中, 信号和噪声是混合在一起的, 很难将

其分离, 因此如何减小噪声和提高信噪比是非常重要的。GPS 导航主要利用其信号传播的时间和方位信息, 而土壤水分变化信息主要依靠反射信号强度变化, 所以在设计 GPS 接受机时, 需要考虑信噪比的最小阈值。

2 基于 AIEM 模拟和观测数据的土壤水分反演分析

微波模型主要是用来模拟微波的散射信号传输的过程, 要真正反演土壤水分, 需要建立微波散射信号和土壤水分之间的关系。目前主要有两种土壤水分反演方法: 一种是经验(统计)算法, 经验方法就是通过地表同步实测数据和接受器接受到的信号直接做统计回归得到反演表达式; 另一种是基于正向模型反演土壤水分的算法。遥感正向模型是指描述遥感过程中从电磁波传播所经媒质中提取目标参数和传感器所接受信号之间关系的模型。正向模型的输入是地表及大气的各个参数, 输出则为传感器所观测的散射强度。反演过程就是通过接受器信号强度来求输入参数。一般微波遥感正向模型中包含的未知参数多于反演方程, 大多数模型不能求出其反函数的表达式, 是典型的病态反演^[27]。对于 GNSS-R, 这个正向遥感过程是指随机粗糙地表散射的 GNSS-R 信号在经过植被、大气等介质到被传感器接收的整个过程。土壤水分反演主要分成两大块。一是针对裸露地表的土壤水分反演, 典型代表是几何光学模型(GOM)^[21], 物理光学模型(POM)^[21], 小扰动模型(SPM)^[21], 积分方程模型(integrated equation model, IEM)^[21, 22], 改进的积分方程模型(AIEM)^[23]; 另一个是针对植被的土壤水分反演模型, 典型代表是MIMICS模型^[24]、水云模型^[25]和农作物模型^[26]。植被模型非常复杂, 至今还没有一个模型能够很好地模拟各种植被类型, 甚至同一个模型也很难把一种植被不同生长阶段的微波散射模拟得非常。相对而言, 裸露地表要简单多了。积分方程模型(IEM)最早是由 Fung 等人于 1992 年提出^[22], 该模型是基于电磁波辐射传输方程的地表散射模型, 能在一个很宽的地表粗糙度范围内再现真实地表后向散射情况, 已经被广泛应用于微波地表散射、辐射的模拟和分析, 并经过了很多试验研究验证^[23]。本研究用 AIEM 模型模拟裸露地表前向散射和土壤水分的关系, 从而分析可能的土壤水分反演算法。对于 GPS 卫星信号, 只有一个民用频率 L1(1.58GHz)和一个极化方式可用, 这里分四种情况讨论。

第一:GPS 卫星对同一地面的入射角度是变化的,粗糙度是固定的(这里假定均方根高度(s)为 0.05,相关长度(l)为 0.1),土壤水分分为 $0.1\text{cm}^3/\text{cm}^3$,模拟得到的前向散射系数和角度的关系如图 2 所示。从图中可以看出,角度越大,前向散射系数越小。因此在土壤水分反演的过程中,需要考虑角度变化的影响。

第二:在前面模拟的基础上,假定角度在 $0\sim 90^\circ$ 之间变化,粗糙度固定($s = 0.05, l = 0.1$),图 3 是用 AIEM 模拟得到的 HH/VV 极化前向散射系数和土壤水分的变化关系,从图中可以看出,土壤水分与

前向散射系数关系非常复杂,基本没什么规律,很难在角度变化情况下建立一个通用的物理算法。

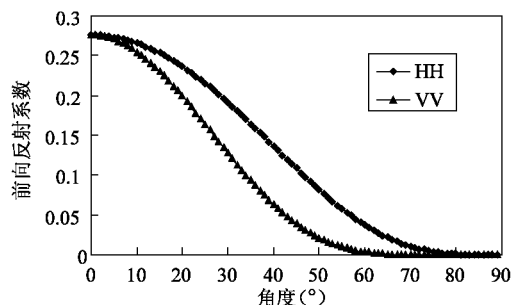


图 2 角度和前向散射系数的关系

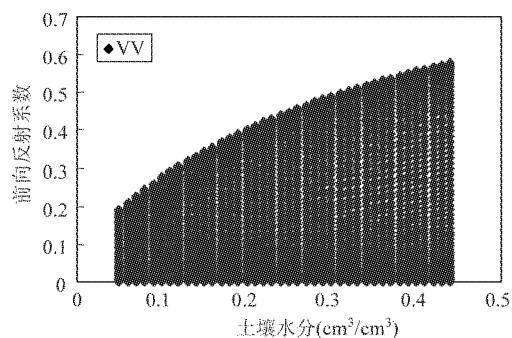
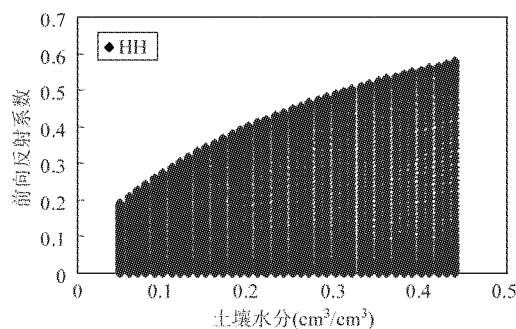


图 3 前向散射系数和土壤水分的关系

第三,固定角度 45° ,变化粗糙度(s 变化范围 $0.02\sim 0.07, l$ 变化范围 $0.02\sim 0.17$),图 4 是模拟结

果。从图 4 中也可以看出,土壤水分和前向散射系数关系也是很差,基本上很难建立关系。

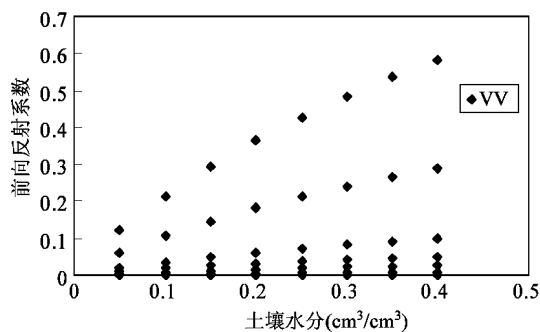
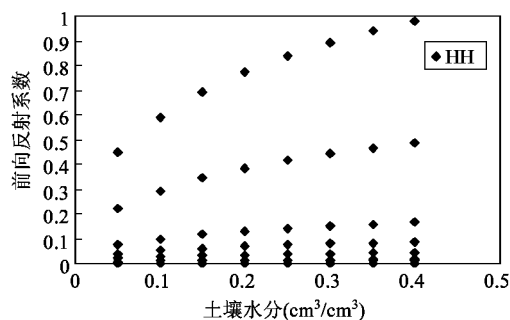


图 4 固定角度条件下前向散射系数和土壤水分的关系

第四,固定角度 45° ,对同一地点,粗糙度假定为 $s = 0.05, l = 0.1$,其模拟结果如图 5 所示。从图 5 中可以看出去,在这种情况下,土壤水分和前向发射系数关系还是非常不错的。

从上面的理论模拟分析可以得出这样一个结论:角度和粗糙度对前向散射信号影响很大。对于单个 GPS 民用频率和极化,很难消除粗糙度和角度的影响。因此,利用 GPS 卫星单频民用信号反演土壤水分时,要获得比较高的反演精度,需要对单个站点在不同的入射角建立不同的反演方程。

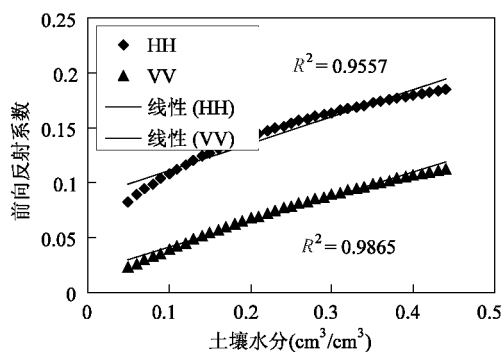


图 5 固定角度和粗糙度条件下土壤水分和前向散射系数的关系

为了研究 GPS 散射信号在土壤水分反演方面的应用潜力,2002 年科研人员在美国爱荷华州 Walnut Creek watershed 地区用机载 GPS 接受器做了一些实验。侧重于监测高生物量并处于成熟期的大豆和玉米,具体介绍可以参见文献[28]。该区域地面在经历了 6 月 25 日到 7 月 4 日间较为干燥的阶段,在

7 月 11 日经历了一场大的降雨,降雨量平均约为 35mm。下面我们用 SMEX02 的实验数据来进行分析,这里我们选择了 8 个站点 6 月 27 日到 7 月 8 日之间的实测数据,作物类型是大豆和玉米,行向分别是东西向和南北向。8 个站点土壤水分与 GNSS-R SNR 关系如图 6 所示,从图中可以看出,单个站点的

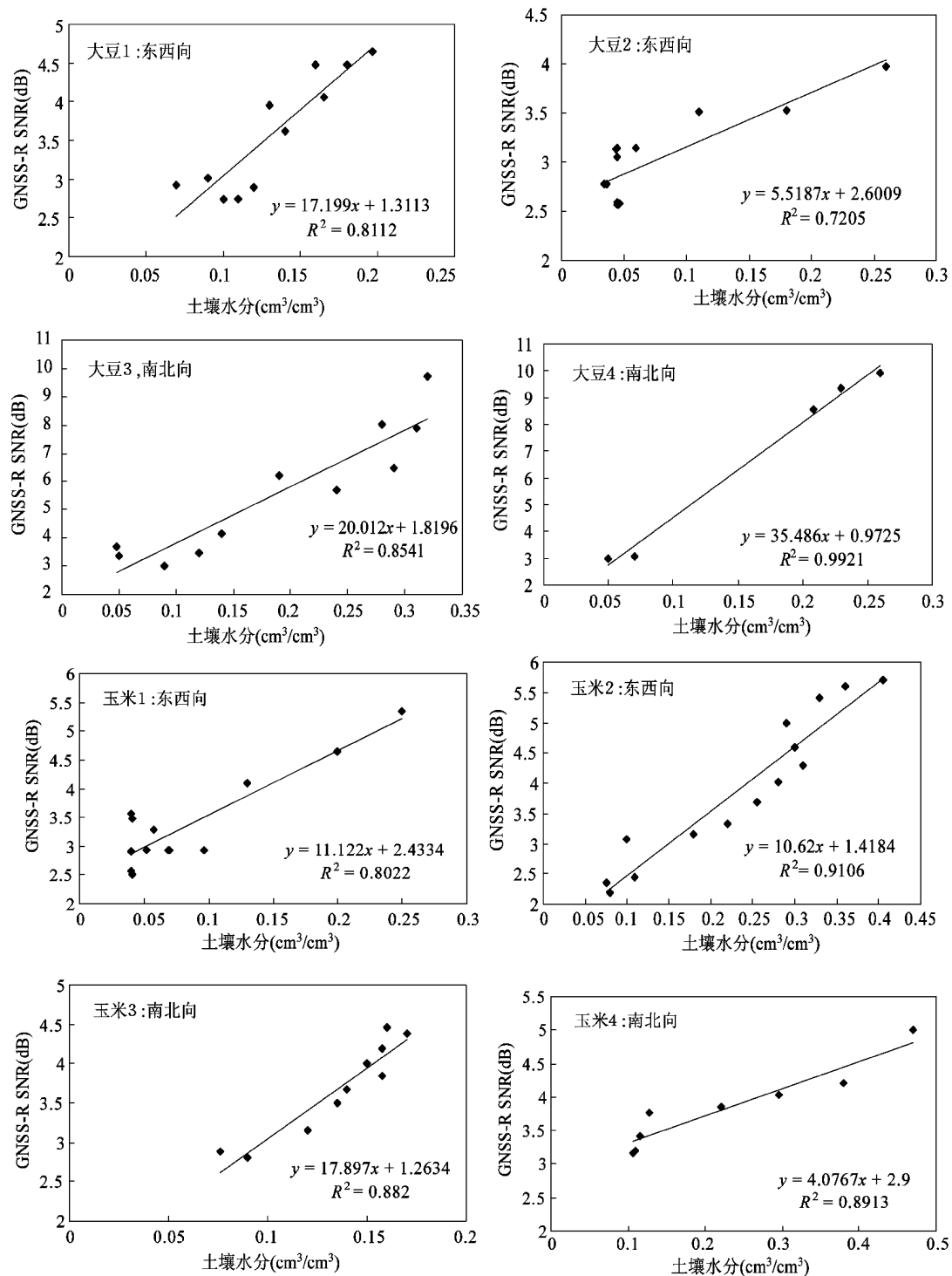


图 6 SMEX02 实验中 8 个站点土壤水分分别和 GNSS-R SNR 信号的关系

关系很好,相关系数在 0.72 ~ 0.99 之间。接下来,对同一种作物同一行向的土壤水分与 SNR 进行分析,如图 7 所示。从图中可以看去,土壤水分与 SNR 的关系还是不错的,相关系数在 0.55 ~ 0.76 之间。对同一种作物不同行向的土壤水分与 SNR 进行分

析,如图 8 所示。从图中可以看去,土壤水分与 SNR 的关系还是不错的,相关系数在 0.65 ~ 0.71 之间。对两种作物不同行向的土壤水分与 SNR 进行分析,如图 9 所示。从图中可以看去,土壤水分与 SNR 的关系不是很好,相关系数只有 0.44。从实测数据分

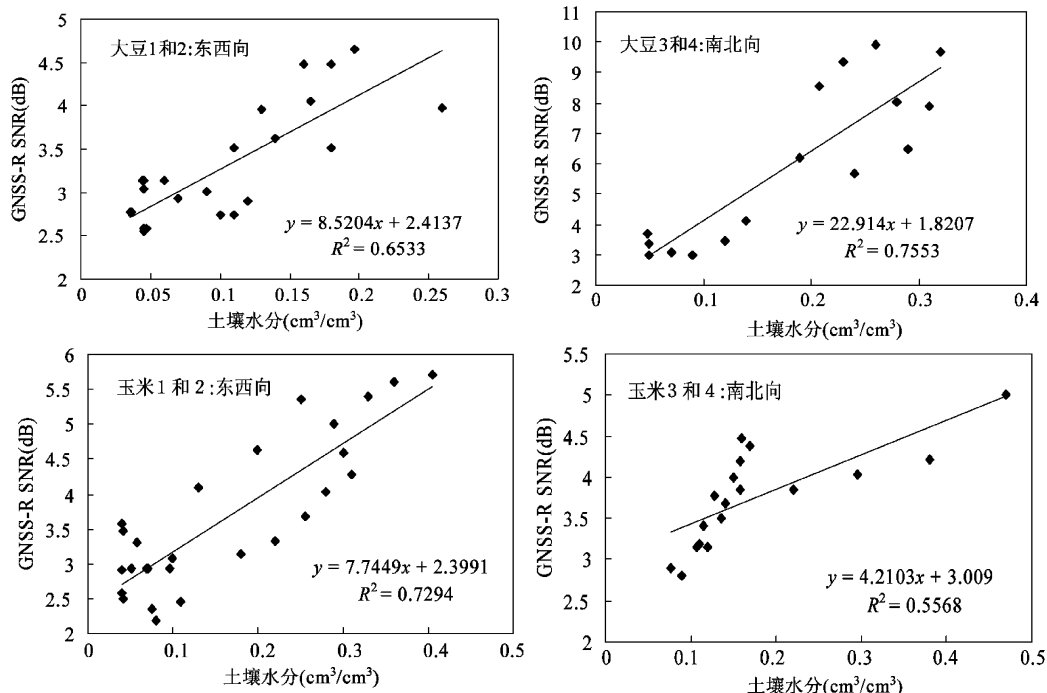


图7 不同行向大豆和玉米地土壤水分分别与 GNSS-R SNR 关系

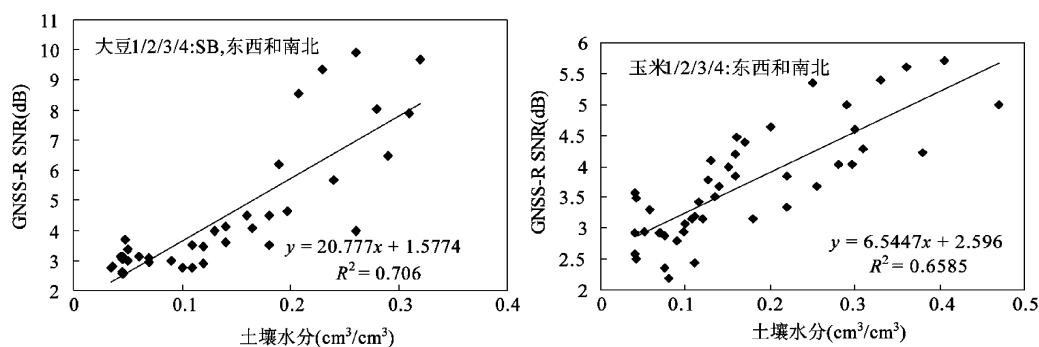


图8 大豆与玉米地土壤水分分别与 GNSS-R SNR 关系

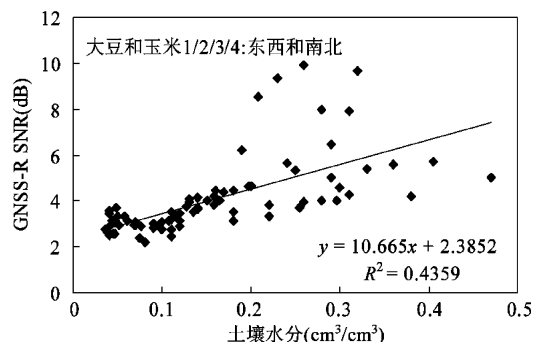


图9 大豆与玉米地土壤水分与 GNSS-R SNR 关系

析可以得到一个结论:虽然 GPS 反射信号的变化受植被类型和行向的影响,但利用 GPS 反射信号是可以监测土壤水分变化信息的。从各站点回归方程的系数可以看出,不同的地块差别还是比较大的,主要原因是粗糙度、植被类型和角度对散射信号影响比较大。因此,经验反演算法所使用的站点越少,估算精度越高。为了提高精度,对不同的站点在不同的角度情况下建立查找表,以建立不同的反演算法。

3 结 论

本文对利用 GPS 散射信号监测土壤水分的方法做了一些分析,结果表明对于单个站点,在考虑角度变化的情况下可以很好地监测土壤水分变化。GPS 信号是全天候的,几乎不受时间和地点的限制。另外就是接受 GPS 信号是免费的,不像其它卫星受卫星寿命的限制,而且 L 波段是监测土壤水分变化的最好波段之一。GNSS-R 为我们建立成本低廉的全球土壤水分网络监测系统提供了非常便利的条件。土壤水分是作物长势监测和估产的主要参数,准确、快速、大范围的土壤水分测量是作物生长状态监测和估产模型所必需的。传统的地面气象站点测量不能满足大尺度土壤水分的时间、空间变化研究的需要。随着微波传感器技术的发展、对地表微波散射机理的深入理解及反演模型和算法的完善,微波遥感监测土壤水分将会有越来越宽阔的应用前景。大尺度的土壤水分变化对于建立全球的水循环模型很重要,进而可以预测气候变化和洪涝监测。但大尺度的反演算法精度评价是非常重要的,算法精度评价是算法推广应用的前提。目前对土壤水分反演算法的实际精度评价是反演方法研究中的一个难点,其主要原因在于很难用地面的一个或者几个点的观测数据来代表一个像元对应的地表几十公里范围的土壤湿度;其次是实测数据与影像成像时的同步性问题、几何配准问题和尺度效应等问题。建立金字塔式的多尺度监测方式有利于进行尺度分析,为大尺度的土壤水分反演算法提供验证依据,并可以根据局部测量数据来修正反演算法,从而提高精度。

随着欧盟的伽利略(Galileo)计划和我国的北斗计划进一步开展和完善,越来越多的 GNSS-R 信号可以用。通过 GNSS-R 信号监测土壤水分时空变化规律,将大大提高和完善水文和气象模型的预报精度,并为农业生产和灾害监测提供准确的数据。目前,基于 GNSS-R 信号反演土壤水分仍然是当前的一个研究热点和难点,至今还没有一种实用的土壤水分监测方法发表,现今这个领域的大部分工作都是实验性的或研究性的,特别是植被覆盖地区需要进一步加强研究。因此需要我们进一步研究,尤其是要结合雷达影像、被动微波以及光学和热红外的优势。建立多尺度的观测数据,并通过数据同化系统在一定程度上解决了陆地表面观测数据稀少、数据精度不高、分布不均的问题。

致谢:感谢匿名审稿老师和编辑部老师提供了许多好的修改意见;感谢 NASA 提供了 SMEX02 地表实验数据。

参考文献:

- [1] Hall C, Cordey R. Multistatic scatterometry. In: Proceedings of the IEEE International Geosci Remote Sensing Symp, Edinburgh, Scotland, 1988. 561-562
- [2] Martin-Neira M. A passive reflectometry and interferometry system (PARIS): application to ocean altimetry. *ESA J*, 1993, 17:331-355
- [3] Auber J C, Bilbaut A, Rigal J M. Characterization of multipath on land and sea at GPS frequencies. ION-GPS-94 Conference, Paris, France, 1994. 1155-1171
- [4] Katzberg S J, Garrison J L. Utilizing GPS to determine ionospheric delay over the ocean. technical memorandum, TM-4750, NASA Langley Research Center, Hampton, VA, 1996. 1-13
- [5] Garrison J L, Katzberg S J, Howell C T. Detection of ocean reflected GPS signals: theory and experiment. In: Proceedings of the IEEE Southeast'97, Blacksburg, VA, USA, 1997. 290-294
- [6] Lowe S T, Hajj G. LEO detection of an ocean-reflected GPS signal. GPS reflections workshop at Goddard Space Flight Center, JPL, Pasadena, CA, 1998
- [7] Zavorotny V, Voronovich A. Scattering of GPS signals from the ocean with wind remote sensing application. *IEEE Trans Geosci Remote Sensing*, 2000, 38(2):951-964
- [8] Martin-Neira M, Caprini M, Font-Rossello J, et al. The PARIS concept: an experimental demonstration of sea surface altimetry using GPS reflected signals. *IEEE Trans Geosci Remote Sensing*, 2001, 39(1):142-150
- [9] Treuhaft R N, Lowe S T, Zuffada C, et al. 2-cm GPS altimetry over crater lake. *Geophys Res Letters*, 2001, 28(23):4343-4346
- [10] Beyerle G, Hocke K. Observation and simulation of direct and reflected GPS signals in radio occultation experiment. *Geophys Res Letters*, 2001, 28(9):1895-1898
- [11] Lowe S T, Zuffada C, Chao Y, et al. 5-cm precision aircraft ocean altimetry using GPS reflection. *Geophys Res Letters*, 2002, 29(10):4359-4362
- [12] Elfouhaily T, Thompson D, Linstrom L. Delay-doppler analysis of bistatically reflected signals from the ocean surface: theory and application. *IEEE Trans Geosci Remote Sensing*, 2002, 40(3):560-573
- [13] Garrison J, Komjathy A, Zavorotny V, et al. Wind speed measurement using forward scattered GPS signals. *IEEE Trans Geosci Remote Sensing*, 2002, 40(1):50-65
- [14] Lowe S, Zuffada C, Chao Y, et al. 5-cm-precision aircraft

- ocean altimetry using GPS reflections. *Geophys Res Letters*, 2002, 29(10):13-14
- [15] Cardellach E, Ruffini G, Pino D, et al. Mediterranean balloon experiment: ocean wind speed sensing from the stratosphere using GPS reflection. *Remote Sensing of Environment*, 2003, 88:351-362
- [16] Komjathy M, Armatys D, Masters P, et al. Retrieval of ocean surface wind speed and wind direction using reflected GPS signals. *J Atmos Oceanic Tech*, 2004, 21(3):515-526
- [17] 刘经南, 邵连军, 张训械. GNSS-R 研究进展及其关键技术, 武汉大学学报(信息科学版), 2007, 32(11):955-960
- [18] Masters D, Zavorotny V, Katzberg S, et al. GPS signal scattering from land for moisture content determination. In: Proceedings of the IEEE International Geosci Remote Sensing Symp, Honolulu, HI, USA, 2000. 3090-3092
- [19] Masters D S. Surface remote sensing applications of GNSS bistatic radar soil moisture and aircraft altimetry:[Ph. D dissertation]. Colorado: University of Colorado (USA), 2004. 1-209
- [20] Masters D, Axelrad P, Katzberg S. Initial results of land-reflected GPS bistatic radar measurements in SMEX02. *Remote sensing of Environment*, 2004, 92:507-520
- [21] Fung A K. Microwave Scattering and Emission Models and Their Applications. Boston: Artech House Inc. 1994.231-303
- [22] Fung A K, Li Z, Chen K S. Backscattering from a randomly rough dielectric surface. *IEEE Trans Geosci Remote Sensing*, 1992, 30:356-369
- [23] Chen K S, Wu T D, Tsang L, et al. Emission of rough surfaces calculated by the integral equation method with comparison to three-dimensional moment method simulation. *IEEE Trans Geosci Remote Sensing*, 2003, 41: 90-101
- [24] Ulaby F T, Sarabandi K, McDonald K, et al. Michigan microwave canopy scattering model. *International Journal of Remote Sensing*, 1990, 11(7): 1223-1253
- [25] Attema E P W, Ulaby F T. Vegetation modeled as a water cloud. *Radio Science*, 1978, 13(2): 357-364
- [26] de Roo R D, Yang D, Ulaby F T, et al. A semi-empirical backscattering model at L-band and C-band for a soybean canopy with soil moisture inversion. *IEEE Trans Geosci Remote Sensing*, 2001, 39(4): 864-872
- [27] 毛克彪, 唐华俊, 周清波等. 被动微波遥感土壤水分反演研究综述, 遥感技术与应用, 2007, 22(3):466-470
- [28] Masters D, Katzberg S. SMEX02 Airborne GPS Bistatic Radar Data. Iowa. Boulder, CO: Colorado Center for Astrodynamics Research (CCAR), University of Colorado. Digital media, 2005

The study of soil moisture retrieval from GNSS-R signals based on AIEM model and experiment data

Mao Kebiao^{* **}, Wang Jianming^{**}, Zhang Mengyang^{**}, Tang Huajun^{*} Zhou Qingbo^{*}

(^{*} Key Laboratory of Resources Remote Sensing and Digital Agriculture, Hulunber Grassland Ecosystem Observation and Research Station, MOA, Institute of Agricultural Resources and Regional Planning, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081)

(^{**} Beijing Institute of Satellite Information Engineering, Beijing 100086)

Abstract

This paper makes a survey of the principle of the soil moisture retrieval from the global navigation satellite system-reflection (GNSS-R) signals and the developments in the retrieval studies, and then makes a thorough analysis of the retrieval algorithm based on the data from the advanced integral equation model (AIEM) and the experimental observation. The result shows that the forward scatter single of the GPS is influenced much by the angle and the roughness of the earth's surface, so the retrieval algorithm should consider the influence of them. The GPS satellite just has one band (L1) for civil application, so it is very difficult to develop a general physical algorithm for retrieving soil moisture from GNSS-R signals. The experiment data in the soil moisture experiment 2002 (SMEX02) is utilized to analyze the retrieval algorithm, which indicates that the average correlation coefficient is above 0.85 for a single field site, so the soil moisture can be accurately retrieved by GNSS-R for single site. Finally, the prospect of passive microwave for soil moisture retrieval is discussed with the development of microwave remote sensing technique.

Key words: soil moisture, global navigation satellite system-reflection (GNSS-R), AIEM model, soil moisture experiment 2002 (SMEX02)