

# GNSS-R 信号反演土壤水分研究分析

毛克彪<sup>1</sup>, 王建明<sup>2</sup>, 张孟阳<sup>3</sup>, 周清波<sup>4</sup>, 马柱国<sup>5</sup>

(<sup>1</sup> 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, 北京 100081; <sup>2</sup> 北京卫星信息工程研究所, 北京 100086; <sup>3</sup> 中国科学院东亚区域气候—环境重点实验室, 北京 100029)

**摘要:** 由于 GNSS-R 信号具有全天候、穿透性以及不受云的影响, 且对土壤水分非常敏感等特性, 使其在遥感研究全球变化中具有独特的优势。简要评述了利用 GPS 地面反射信号在土壤水分反演研究领域的进展, 然后侧重分析介绍了 GPS 反射信号土壤水分反演原理, 前向模型分析反演土壤水分的关键技术, 并指出目前存在的问题和发展方向。

**关键词:** 土壤水分; GNSS-R; AIEM 模型; MIMICS 模型

**中图分类号:** TP751 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-3177(2009)103-0092-06

## 1 引言

土壤水分是土壤-植被-大气系统能量与物质交换及土地资源和环境管理的重要参数之一。土壤水分信息在提高气象预报和干旱监测, 以及作物估产等方面非常重要。因为土壤含水量决定了地表蒸发量, 影响农业耕作对水资源的需求, 在全球水循环中起着重要作用。土壤水分也是地表能量平衡的重要决定因素。因此, 获取区域土壤水分空间差异, 进而分析其对区域资源环境变化的影响, 是区域资源环境动态监测的重要内容之一。

在遥感技术发展的过程中, 微波遥感已经成为土壤水分反演技术中最为有效的方法之一。GPS 系统是 20 世纪 90 年代发展起来的卫星导航系统。GPS 卫星广播频率中采用的 L1 (1.58 GHz) 作为民用导航信号, L2 (1.23 GHz) 作为军用信号。欧空局 (European Space Agency (ESA)) 提出 GPS L 波段信号可以作为海洋散射计, Hall 和 Cordey 1988 年在国际地理与遥感学会上第一次强调了这一点<sup>[1]</sup>。Martin-Neira 于 1993 年提出利用 GPS 反射信号建立测量海面高度的系统<sup>[2]</sup>。法国科学家 Auber 等在 1994 年的 ION-GPS 年会上指出 GPS 能接收海面的反射信号, 而且这种信号干扰了定位精度, 因此需要将海面反射信号当作噪声去除<sup>[3]</sup>。许多研究人员对这个报道产生了兴趣, 认为 GPS 的反射信号可

能成为一种新的遥感手段。他们接下来在海面上利用 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), 并且已经取得了一系列的研究成果<sup>[4~16]</sup>。后来人们把基于 GPS 反射信号的遥感技术简称为 GNSS-R (Global Navigation Satellite System-Reflection) 技术。刘经南等对这些研究做了一些系统的介绍和分析<sup>[17]</sup>。GPS 的 L 波段信号非常适合反演土壤水分。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<sup>[18]</sup>。2002 年美国科学家做了一个大型的土壤水分实验, Masters 对机载接收的 GPS 反射信号进行了大量分析, 研究结果表明 GPS 反射信号对土壤水分比较敏感, 能够用来监测土壤水分变化<sup>[19~20]</sup>。

由于 GPS 地面接收机在处理直接信号和地面反射信号方面还存在一些问题, 现在主要是利用地面接收的反射信号与土壤水分之间的关系做了一些简单分析<sup>[20]</sup>。研究利用 GPS 反射信号反演土壤水分才刚刚起步, 需要人们针对不同的条件开发各种模型和算法, 以推动 GPS 土壤水分反演走向实用化。为了促进国内这方面的研究, 本文介绍 GPS 反演土壤水分的基本原理和前向模型, 并对反演方法进行一些分析。

## 2 GNSS-R 反演土壤水分原理

由于 GPS 信号接收机至少可以接收到 4 颗卫

收稿日期: 2008-09-04 修订日期: 2008-10-19

基金项目: 国家 863 计划 (编号: SQ2007AA12Z339565) 和中央级公益性科研院所基本科研业务费专项的资助。

作者简介: 毛克彪 (1977~), 男, 博士, 主要从事微波、热红外遥感、空间数据挖掘及 GIS 应用等方面的研究。

E-mail: kebiaomao2004@hotmail.com.

星的信号,地面不同方向散射的信号强度是不一样的。为了研究方便, GPS 接收机可能需要设计成只接收某个方向的信号。GPS 卫星信号传播和地面 GPS 信号接收机的简图如图 1 所示。理想状态下(地面光滑),当卫星在图 1 的左上角位置时, GPS 信号接收机接收到的是前向散射信号;当卫星在右上角时, GPS 信号接收机接收到的是后向散射信号。在这里,我们介绍第一种情况。

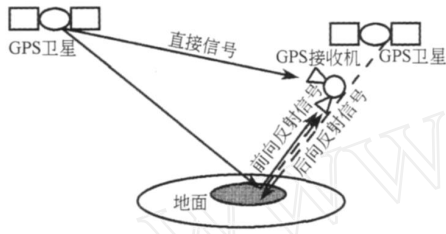


图 1 GNSS-R 信号接收图

假定  $P_t$  为 GPS 卫星发射信号功率,  $G_t$  为发射天线增益,  $\lambda$  是波长,  $R_d$  为直接信号到达 GPS 信号接收机的距离,  $G_d$  为接收机的天线增益, 则到达接收机信号强度  $P_d$  为:

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

假定  $R_s$  是信号到达地面的距离,  $R_r$  是反射信号到达接收机的距离,  $\sigma$  是反射地面 A 单位面积上的散射系数,  $G_r$  是接收机的天线增益, 则经过地面反射后接收到信号  $P_r$ :

$$P_r = \frac{P_t G_t}{4 R_s^2} \frac{\sigma A}{4} \frac{G_r}{4} \quad (2)$$

对于光滑表面,假定反射率为  $\epsilon$ , 则式(2)可以简化为:

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

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,如式(4)。

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

式(2)中散射系数  $\sigma$  和式(3)中的反射率  $\epsilon$  受土壤水分和地表粗糙度影响,其他参数都是常数。因此,可以通过接收 GPS 反射信号的强弱来分析土壤水分的变化和获取其他地表相关信息。

### 3 土壤水分反演模型与方法

Masters 对机载接收的 SNR(GPS 反射信号与噪声比)与土壤水分进行了相关分析,得到了一些初步的研究结果<sup>[19-20]</sup>。目前针对 GPS 反射信号来反

演土壤水分的研究还不多,还没有算法公开发表。其主要原因是目前 GPS 反射信号反演土壤水分机理还不成熟。另外只有一个民用频率可用,而且是单一极化。主动雷达受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。

对于土壤水分反演模型而言,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)<sup>[21]</sup>,物理光学模型(POM)<sup>[21]</sup>,小扰动模型(SPM)<sup>[21]</sup>,积分模型(IEM)<sup>[22-23]</sup>,改进的积分模型(AIEM)<sup>[24]</sup>;另一个是针对植被的土壤水分反演模型,典型代表 MIMICS 模型<sup>[25]</sup> [MICSmo 水云模型<sup>[26]</sup>,农作物模型<sup>[27]</sup>。虽然 AIEM 和 MIMICS 模型比较复杂,但适用范围更广,模拟精度更高。根据 GNSS-R 土壤水分反演的技术路线如图 2 所示。先判断地表类型,然后用 AIEM 来模拟裸露地表类型,用 MIMICS 来模拟植被覆盖地表类型,最后建立反演算法计算得到土壤水分。相对而言,裸地的土壤水分反演要成熟一些。这里我们对两种典型 AIEM 和 MIMICS 模型进行简单介绍。

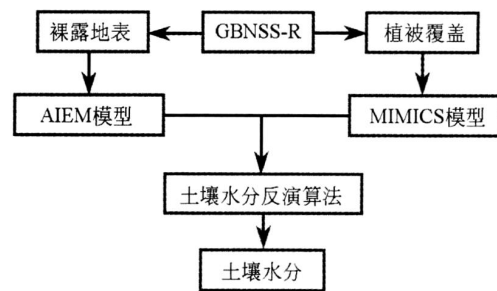


图 2 GNSS-R 土壤水分反演技术路线

积分方程模型(Integrated Equation Model, IEM)是由 Fung 等人于 1992 年提出<sup>[22]</sup>,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模拟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<sup>[28]</sup>。IEM 模型的基本思想是把未知的表面场分成两部分:一部分保留原始的切面近似场(Kichhoff);另外一部分引进补偿场,用来对 Kichhoff 场进行校正<sup>[22]</sup>。因此 IEM 模型的双站系数可以表示为基尔霍夫( $\frac{k}{pq}$ )、基尔霍夫项的补偿项( $\frac{c}{pq}$ )和二者交叉项( $\frac{kc}{pq}$ )之和:

$$\frac{0}{pq} = \frac{k}{pq} + \frac{c}{pq} + \frac{kc}{pq} \quad (5)$$

各项后向散射系数具体形式如下<sup>[22,33-34]</sup>:

$$k_{pq} = \frac{k^2}{4} [ |f_{pq}|^2 \exp(-4k_z^2) ] \cdot [ \exp[4k_z^2 ( \dots )] - 1 ] \cdot \exp[-j2k_x] d d \quad (6)$$

$$k_c = \frac{k^2}{16} \operatorname{Re} \left\{ (F_{pq} f^*) \exp[-3k_z^2] \exp E(k_z^2) ( \dots ) ] \cdot [ \exp\{ (2k_z^2) [ ( \dots ) + ( \dots ) ] \} - 1 ] \cdot \exp[ju( \dots ) + jv( \dots ) - jk_x( \dots )] d d d u d v \right\} \quad (7)$$

$$c_{pq} = \left| \frac{k}{16^{2.5}} \right| \left\{ \iint F_{pq} F^* \exp(-2k_z^2) \cdot \exp\{ - (k_z^2) [ ( \dots ) + ( \dots ) + ( \dots ) ] \} \cdot \exp\{ k_z^2 [ ( \dots ) + ( \dots ) ] \} = 1 \right\} \cdot \exp\{ j[ (u - k_x) + v( \dots ) - (k_x + u) + (u - u) + (v - v) k] \} d d d d d k d u d v d u d v \quad (8)$$

式中各参数的意义请参见[22,33~34]。为了降低复杂性和提高运算速度,IEM在推导过程中做了一些简化,但也因此影响了模拟精度。许多研究人员针对IEM模型的缺点,进行不断改进和完善,模型模拟精度得到不断提高。Hsieh等1997年修正了原来IEM中对格林函数的波谱表达式所做的简化<sup>[29]</sup>。Chen等2000年<sup>[30]</sup>采用新的地表坡度的表示方法,得到新的补偿场系数,修正了IEM模型中的多散射项。Wu等2000年对IEM模型中菲涅耳反射系数的计算方式作了改进<sup>[31]</sup>。Wu等2004年进一步去除了原先用于格林函数上的近似假设,使得补偿场的振幅与相位由近似值恢复到原先的精确值,并结合IEM模型的最新研究成果,对IEM模型进行重新推导,将IEM模型发展为AIEM模型<sup>[32,34]</sup>。

在利用微波反演植被覆盖的土壤水分时,对植被影响的校正是非常必要的。由于光照和地理环境的影响,不同植被的结构不一样,具体表现在组成植被的各部分(叶、茎、秆)具有不同形状,大小,厚度、朝向,从而导致不同植被类型的微波散射特征不一样。因此,要校正植被微波散射影响,首先必须定量地确定植被结构各部分对微波后向散射的贡献大小。Ulaby等在1990年提出了微波植被散射模型MIMICS(Michigan Microwave Canopy Scattering Model)<sup>[35]</sup>。MIMICS模型是基于微波辐射传输方程一阶解的植被散射模型,其模拟精度和实用性得到了许多科研人员证实,特别是对于高大的灌木模拟性能较好<sup>[36~37]</sup>。MIMICS模型根据微波散射特性和植被结构特点,将植被覆盖地表分为三个部分:植被冠层(包括不同大小、朝向、形状的枝条和叶片),植被茎秆部分(用介电圆柱体表示)和植被下垫

面的粗糙地表(用土壤介电特性和随机地表粗糙度表示)。为了便于描述和计算,MIMICS模型对植被进行了一些简化处理<sup>[33~35]</sup>:用高度 $d$ 和直径为 $D_c$ 的椭球体表示树冠;用高度 $H_t$ 和直径 $D_t$ 表示树干;冠层中的枝条被当作介电圆柱体,用概率密度函数(PDF) $f_c(l, d_c, \phi_c)$ 进行描述,其中 $l$ 为圆柱体的长度, $d_c$ 为圆柱体的直径, $(\phi_c)$ 表示圆柱体轴线的取向;冠层中的叶片描述成扁长状的片体,用概率密度函数 $f_d(a, b, \phi_d)$ 进行描述,其中 $a$ 和 $b$ 为叶片的长轴和短轴大小, $(\phi_d)$ 表示叶片的法线取向;假定树在水平方向上是随机分布的,且单位面积内数的棵数以密度 $N$ 表示;地表粗糙度用粗糙度相关函数表示,地表可能是土壤或者水;树干、枝条、茎和叶和地表的介电常数分别是水分、微波频率和物理温度的函数。根据植被特征简化,MIMICS模型植被微波后向散射系数分为五个部分(见图3):

$${}^0_{pq} = {}^0_{pq1} + {}^0_{pq2} + {}^0_{pq3} + {}^0_{pq4} + {}^0_{pq5} \quad (9)$$

式中 $pq$ 表示不同的极化方式(垂直极化或者水平极化), ${}^0_{pq}$ 表示来自植被覆盖地表的雷达总后向散射系数, ${}^0_{pq1}$ 为植被冠层直接后向散射系数, ${}^0_{pq2}$ 为植被冠层—地表—植被冠层相互作用的后向散射系数, ${}^0_{pq3}$ 为植被冠层—地表相互作用后向散射系数, ${}^0_{pq4}$ 是经过植被双程衰减后的地表后向散射系数, ${}^0_{pq5}$ 是经过冠层衰减后的树干—地表—树干相互作用的后向散射系数。以上各项雷达后向散射均为植被参数、地表参数及雷达极化方式、入射角的函数<sup>[33~35]</sup>。在MIMICS模型简化和描述过程中,做了以下几个假定<sup>[33~34]</sup>:假定冠层在水平方向上被看作是连续且封闭;假定冠层在垂直方向的物理性质和水平方向是一致的;假定地表是光

滑的。从而在散射项目中可以忽略树干的直接后向散射；树干相位矩阵的交叉极化可以忽略；计算植被和地表的相互作用时，地表假设是镜面的；应用前向散射定理进行植被的消光系数的计算，因此低频近似下只计算吸收系数而不计算散射系数；使用物理光学方法计算叶片散射，该方法主要适合于叶片大于波长时的情况。这些假定使得模型并不能适应所有的植被类型，就是同一种植被在不同的生长期其适用性也有一定的局限性，因此对于植被散射模型需要进一步研究和改进。

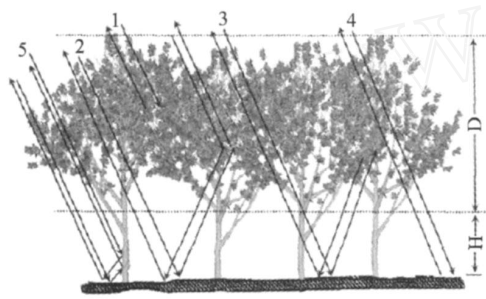


图3 MIMICS模型植被各散射项

- (1. 植被冠层, 2. 冠层—地表—冠层, 3. 冠层—地表, 4. 地表, 5. 树干—地表—树干)<sup>[33]</sup>

微波模型主要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，还需要将微波散射信号和土壤水分建立关系。目前主要有两种土壤水分反演方法：一种是经验（统计）算法；第二种是基于正向模型土壤水分反演算法。经验方法就是通过地表同步实测数据和接收机接收到的信号直接做统计回归得到反演表达式。遥感正向模型是指描述在遥感过程中从电磁波传播所经媒质中提取的目标参数和传感器所接收信号的之间的关系的模型。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。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收机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，是病态反演。因此要由散射强度反演得到地表参数，通常得借助迭代方法和最小二乘法解非线性方程求得地表参数。另外一种比较实用的方法是：使用理论模型和神经网络联合进行反演。具体操作是用理论模型或者实际测量一组代表性的训练和测试数据

集，然后利用该数据集对神经网络进行训练，最后通过测试数据对神经网络进行调整。通过反复训练和测试得到最佳的神经网络反演结构，一旦训练完成，就可以用训练好的网络进行参数反演<sup>[38]</sup>。

#### 4 结束语

本文主要分析了GPS反射信号监测土壤水分变化的原理，重点对裸露地表模型AIEM和植被模型MIMICS以及土壤水分反演方法做了介绍和分析。水资源是制约我国经济发展的主要因素之一，如何建立水资源管理系统，合理进行水资源配置是首要解决的问题。生产实践证明，农作物从播种到收获，每时每刻都离不开水。因此，水对农作物生长发育至关重要。我国是一个农业大国，由于干旱导致欠收不仅是我国，也是全球范围内面临的重大问题。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须的。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广阔的应用前景。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，算法精度评价对一个算法的实际应用非常的重要，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、几何配准和尺度效应等问题。建立金字塔式的多尺度监测方式有利于进行制度分析，对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信号反演土壤水分反演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。

## 参考文献

- 1 Hall C, Cordey R. Multistatic scatterometry[A]. In Proc. IEEE Int. Geosci. Remote Sensing Symp[C]. Edinburgh, Scotland, 1988:561~562.
- 2 Martin-Neira M. A passive reflectometry and interferometry system (PARIS): application to ocean altimetry[J]. ESA Journal, 1993(17):331~355.
- 3 Auber J. C., Bilbaut A., Rigal J. M. Characterization of multipath on land and sea at GPS frequencies[A]. ION-GPS-94 Conference[C]. Paris, France, 1994.
- 4 Katzberg S. J., Garrison J. L. Utilizing GPS to determine ionospheric delay over the ocean[R]. Technical Memorandum, TM-4750, NASA Langley Research Center, Hampton, VA, 1996.
- 5 Garrison J. L., Katzberg S. J., Howell C. T. Detection of ocean reflected GPS signals: Theory and experiment[A]. IEEE Southeaston '97[C]. Blacksburg, VA, 1997.
- 6 Lowe S. T., Hajj G. LEO detection of an ocean-reflected GPS signal [R]. 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[J]. IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing, 2000(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[J]. IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing, 2001(1):142~150.
- 9 Treuhaft R. N., Lowe S. T., Zuffada C., et al. 2-cm GPS altimetry over crater lake[J]. Geophysical Research Letters, 2001(23):4343~4346.
- 10 Beyerle G., Hocke K. Observation and simulation of direct and reflected GPS signals in radio occultation experiment[J]. Geophysical Research Letter, 2001(9):1895~1898.
- 11 Lowe S. T., Zuffada C., Chao Y., et al. 5-cm precision aircraft ocean altimetry using GPS reflection[J]. Geophysical Research Letters, 2002(10):4359~4362.
- 12 Elfouhaily T., Thompson D., Linstrom L. Delay-doppler analysis of bistatically reflected signals from the ocean surface: theory and application[J]. IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing, 2002(3):560~573.
- 13 Garrison J., Komjathy A., Zavorotny V., et al. Wind speed measurement using forward scattered GPS signals[J]. IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing, 2002(1):50~65.
- 14 Lowe S., Zuffada C., Chao Y., et al. 5-cm-precision aircraft ocean altimetry using GPS reflections[J]. Geophysical Research Letter, 2002(10):13~14.
- 15 Cardellach E., Ruffni G., Pino D., et al. Mediterranean balloon experiment: Ocean wind speed sensing from the stratosphere, using GPS reflection[J]. Remote Sensing of Environment, 2003(88):351~362.
- 16 Komjathy, Armatys M., Masters D., et al. Retrieval of ocean surface wind speed and wind direction using reflected GPS signals[J]. J. Atmos. Oceanic Tech., 2004(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[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2007(11):955~960.
- 18 Masters D., Zavorotny V., Katzberg S., et al. GPS signal scattering from land for moisture content determination[A]. In Proc. IEEE Int. Geosci. Remote Sensing Symp[C]. 2000:3090~3092.
- 19 Masters D. S. Surface Remote Sensing Applications of GNSS Bistatic Radar Soil Moisture and Aircraft Altimetry[M]. University of Colorado, USA, 2004.
- 20 Masters D., Axelrad P., Katzberg S. Initial results of land-reflected GPS bistatic radar measurements in SMEX02[J]. Remote Sensing of Environment, 2004(92):507~520.
- 21 Ulaby F. T., Moore R. K., Fung A. K. Microwave Remote Sensing: Active and Passive Dedham [M]. MA: Artech House, 1986(3).
- 22 Fung A. K., Z Li, Chen K. S. Backscattering from a randomly rough dielectric surface [J]. IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing, 1992(30):356~369.
- 23 Fung A. K. Microwave Scattering and Emission Models and Their Applications [M]. Artech House Inc. 1994.
- 24 Chen K. S., Wu Tsong-Dar, Tsang Leung, et al. Emission of rough surfaces calculated by the integral equation method with comparison to three-dimensional moment method simulation[J]. IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing, 2003(41):90~101.
- 25 Ulaby F. T., Sarabandi K., McDonald K., et al. Michigan microwave canopy scattering model [J]. International Journal of Remote Sensing, 1990(7):1223~1253.
- 26 Attema E. P. W., Ulaby F. T. Vegetation modeled as a water cloud [J]. Radio Science, 1978(2):357~364.
- 27 Roger D., De Roo, Yang Du, et al. A semi-empirical backscattering model at L-band and C-band for a soybean canopy

- with soil moisture inversion [J]. IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing, 2001(4): 864 ~ 872.
- 28 Wu T. D., Chen K. S., J. Shi., et al. A transition model for the reflection coefficient in surface scattering[J]. IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing, 2001(9): 2040 ~ 2050.
- 29 Hsieh C. Y., A. K. Fung, G. Nesti, et al. A further study of the IEM surface scattering model[J]. IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing, 1997(35): 901 ~ 909.
- 30 Chen K. S., Wu T. D., Fung A. K. A note on the multiple scattering in an IEM model[J]. IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing, 2000(38): 249 ~ 256.
- 31 Wu T. D., Chen K. S., Shi J. C., et al. A transition model for the reflection coefficient in surface scattering[J]. IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing, 2001(39): 2040 ~ 2050.
- 32 Wu T. D., Chen K. S. A reappraisal of the validity of the IEM model for backscattering from rough surfaces[J]. IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing, 2004(42): 743 ~ 753.
- 33 王建明. 基于 ERS 散射计数据的青藏高原地表土壤水分估算方法研究[D]. 中国科学院遥感应用研究所, 2005. 8.
- 34 刘伟. 植被覆盖地表极化雷达土壤水分反演与应用研究[D]. 中国科学院遥感应用研究所, 2005. 7.
- 35 Ulaby F. T., Sarabandi K., McDonald M., et al. Michigan microwave canopy scattering model[J]. International Journal of Remote Sensing, 1990(11): 1223 ~ 1253.
- 36 McDonald K. C., Dobson M. C., Ulaby F. T. Modeling multi-frequency diurnal backscatter from a walnut orchard[J]. IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing, 1991(29): 852 ~ 863.
- 37 Toure A., Thomson K. P. B., Edwards G. Adaptation of the MIMICS backscattering model to the agricultural context-wheat and canola at Land Cbands[J]. IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing, 1994(32): 47 ~ 61.
- 38 毛克彪, 唐华俊, 周清波, 陈佑启. 被动微波遥感土壤水分反演研究综述[J]. 遥感技术与应用, 2007(3): 466 ~ 470.

## Research on Soil Moisture Inversion by GNSS-R Signal

MAO Ke-biao<sup>\*</sup>, WANG Jiam-ming<sup>\*</sup>, ZHANG Meng-yang<sup>\*</sup>, ZHOU Qing-bo<sup>\*</sup>, MA Zhu-guo<sup>\*</sup>  
 (*Key Laboratory of Resources Remote Sensing and Digital Agriculture,*  
*MOA, Institute of Agricultural Resources and Regional Planning,*  
*Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081;*  
*Beijing Institute of Satellite Information Engineering, Beijing, 100086);*  
*Key Laboratory of Regional Climate Environment Research for Temperate East Asia (RCE-TEA),*  
*Chinese Academy of Science, Beijing 100029)*

**Abstract:** Microwave remote sensing is influenced slightly by cloud and atmosphere, what makes it more advantageous in study on global change. In the development of remote sensing technique, the microwave remote sensing has been proved as one of the best methods to retrieve soil moisture during last 30 years. However, many studies have shown that soil moisture is an important parameter in numerical weather-prediction model that lead to significant forecasting improvement in the physics of land surface processes on regional and global scales. But it is very difficult to obtain the soil moisture by ground measurement in both time and space, especially at large spatial scales. This paper introduces the retrieving soil moisture from GNSS-R. The AIEM model is mainly suitable for bare soil and MIMICS model is mainly suitable for land surface covered by vegetation. Finally, with the development of microwave remote sensing technique the prospect of GNSS-R for soil moisture retrieval is also discussed.

**Key words:** soil moisture; GNSS-R; AIEM model; MIMICS model

(上接第 84 页)

## The Construction of 3D Landscape Based on WorldView Stereo Images

YI Pi-yuan, ZHAO Ying-jun  
 (*National Key Lab. of Remote Sensing Information and Image Analysis Technique,*  
*Beijing Research Institute of Uranium Geology, Beijing 100029)*

**Abstract:** Based on the new WorldView stereo image, the extraction of DEM and orthophoto map making are completed. The article discussed the joint modeling by using ERDAS and 3DS Max. A 3D virtual landscape with good effect was constructed.

**Key words:** DEM extraction; imagine fusion; modeling