

土壤湿度微波遥感监测研究进展

孙安利^{①②}, 贾建华^①, 徐新刚^②, 黄文江^②

(^①西安科技大学, 西安 710054; ^②国家农业信息化工程技术研究中心, 北京 100097)

【摘要】土壤湿度是农业生产的重要影响因子, 获取土壤湿度信息以制定人工干预调节措施是稳固生产的重要保证, 实时、有效地监测土壤墒情显得尤为重要。利用遥感数据反演土壤湿度有多种方法, 微波遥感法被认为是目前最佳的监测方法。本文总结了被动、主动微波土壤湿度遥感监测的主要模型、方法及其优缺点和适用范围, 分析了雷达遥感监测土壤湿度的最优参数选取等, 展望了微波遥感监测土壤湿度的应用前景, 以期对土壤湿度微波遥感监测研究提供参考和借鉴。

【关键词】土壤湿度; 反演; 被动微波; 主动微波

【中图分类号】 TP79

【文献标识码】 A

【文章编号】 1009-2307(2009) 06-0105-04

1 引言

土壤湿度是作物生长发育的基本条件和作物产量预报的重要参数。同时, 它也是水文学、气象学等科学研究领域的重要环境因子和过程参数, 因此对于土壤湿度的研究具有重要意义。目前, 在众多的遥感土壤湿度监测方法中, 利用微波监测土壤湿度是研究的重点。因为微波对云层有较强的穿透能力, 不受光照条件限制, 能够全天候工作, 且长波段微波能够穿透植被并对土壤具有一定的穿透能力, 与土壤湿度和介电常数密切相关, 这些特点使得微波遥感在土壤湿度监测中具有其独特的优越性, 在该领域内占有重要的地位。

2 微波遥感监测土壤湿度的基本原理

微波遥感就是利用传感器接收地面各地物发射或反射的微波信号, 提取和分析有用信息。在土壤湿度遥感监测中微波对水分反应敏感, 使其成为对土壤含水量遥感监测非常有效的一种手段。利用微波遥感数据监测土壤湿度包含两种方式: 被动微波遥感法和主动微波遥感法。探测原理都根据水、土的介电常数差异显著。被动和主动两种方法的不同点在于它们手段的特点和它们对目标特征传感器不同。被动式的传感器依靠接收地面物体自身辐射的微波, 如微波辐射计、微波散射计等, 通过测量土壤亮温来估测土壤湿度, 土壤亮温由土壤介电常数和土壤温度决定, 介电常数又和温度与土壤湿度有关, 因此可以通过土壤亮温反演土壤湿度; 主动式由传感器发射微波波束再接收由地面物体反射或散射回来的回波, 如侧视雷达, 它测量土壤的后向散射系数, 土壤后向散射系数主要由介电常数和土壤粗糙度决定, 介电常数由土壤湿度决定, 因此可以利用雷达较好地反演土壤湿度。

3 微波遥感监测土壤湿度的方法

3.1 土壤湿度被动微波模型

地面上各种物体发射的自然辐射, 在波谱上不同物体对应电磁波的频率和波长各不相同, 被动微波遥感就是利用传感器如微波辐射计接收地表不同物体的辐射信号。微波辐射计是用来测量地表和植被以及大气辐射能量的。常用微波亮度温度来衡量微波辐射, 据此关系, Raleigh Jeans 提出了辐射方程式^[1,2]:

$$T_{bp}(\tau, \mu) = (1 - \omega)(1 - e^{-\tau})T_c + \varepsilon_p T_s e^{-\tau}$$

该方程建立了土壤亮温和发射率的关系, 根据辐射方程结合被动微波测土壤水分常用模型便可反演出土壤湿度。

无论是裸土还是植被覆盖的土壤, 地表的微波辐射都会受到一些因素的影响, 如表面的粗糙度、土壤的质地、测量深度以及地形起伏因素等, 对于裸露地来说, 地表粗糙度对传感器接收地表的微波辐射的精度影响是问题的主要所在, 为了建立正确的地表微波辐射模型, 就必须选择正确的粗糙度参数来描述地表的几何特性。而植被覆盖的土壤, 地表辐射主要受植被的影响较大。因此, 反演土壤湿度需要针对土地类型建立各自相对应适合的模型。针对裸露地表的土壤湿度反演, 已有的模型如: 物理光学模型(POM)、小扰动模型(SPM)、Q/H模型以及Q/P模型等; 另一个是针对植被覆盖的土壤湿度反演模型, 典型代表MIMICS模型、农作物模型、 $\tau - \omega$ 模型等。现对其中一部分的模型做以说明和评价。

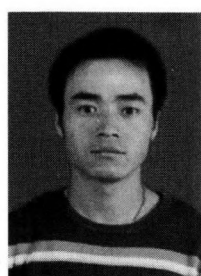
3.1.1 Q/P模型

在被动微波监测土壤湿度的应用中, 比较常见的裸土地表微波辐射模型为Q/P模型。正如前面所提到的, 由于裸土表面的粗糙度是传感器接收土壤微波辐射精度的最关键影响因素, 针对这一现象, Q/P模型引入了 Q_p 参数, 可以建立粗糙表面与光滑表面透射率之间的关系:

$$\varepsilon_p = Q_p t_q + (1 - Q_p) t_p$$

得到的发射率结合Raleigh Jeans的辐射方程式, 便可反演土壤湿度^[1]。具体可以参见Shi等^[3]。

Choudhury等认为, 地表粗糙度的出现降低了地表反射率, 增加了地表比辐射率。而Q/P模型的关键之处就是将粗糙表面和光滑表面较好地连接了起来。在Q/P模型之前出现的Q/H模型同样可以建立粗糙表面与光滑表面反射率之间的关系, 但实际中发现Q/H模型过高地估计了地表粗糙度对传感器接收微波辐射信号的影响^[4]。此外, Q/H模型中用到的粗糙度参数是一种有效的粗糙度参数, 并不是实际可测量的粗糙度参数。为此, 由Shi等再次提出的地表微波辐射模型, 即Q/P模型, 能够较好地反映裸土的微波辐射信息, 极大地削弱了地表粗糙度的影响^[5]。通过AIEM



作者简介: 孙安利(1983-), 男, 陕西宝鸡人, 硕士生, 现为西安科技大学地图制图学与地理信息工程专业硕士研究生, 主要研究方向为遥感技术及其应用。

E-mail: sal1983@163.com

收稿日期: 2008-05-22

基金项目: 国家科技支撑项目(2006BAD10A01, 2007BAD44B06, 2007BAH12B02); 北京市涌泉行动(YQE005); 北京市农林科学院青年科研基金

模拟比较, Q/P 模型比 Q/H 模型有更广泛的实用性。然而作为半经验模型的 Q/P 模型, 模型的精度就会对数据的质量产生极大的依赖, 为了达到让它准确地反映信息, 就需要依靠较多的数据作为经验推理。那么, 期望该模型今后的发展是在精准的基础上, 以更为深入的理论算法代替经验算法来减少人工工作量。

3.1.2 τ - ω 模型

当土壤表面有植被覆盖的时候, 植被层削减了土壤的微波辐射并且在总的辐射能中增加了自己的辐射。在低频波段, 这个影响从辐射传输方程(RT)的一阶近似解得到。因为该模型基于 τ 和 ω 这两个参数(植被的光学厚度以及单次散射反照率), 这个模型称为 τ - ω 模型。 τ 表示植被的衰减属性, ω 表示植被冠层的散射特性。这个模型将植被看作是均匀的介质, 忽略了多次散射作用。利用该半经验模型进行土壤湿度反演时, ω 常当作一个跟频率无关的常量。 ω 在低频常设置为 0 或者在稍高频率通道通过定标来确定^[6]。对于植被的衰减, 通常认为 τ 可以近似地表达为:

$\tau_p = \frac{b_p W}{\cos\theta}$ 其中: $\cos\theta$ 表示从不同的角度观测, 系数 b 依赖于植被的结构和频率。 W 是植被含水量 $W(\text{kg/m})$ 。

该模型将植被覆盖条件下土壤的微波辐射受到植被的影响进行简化, 运用简单的参数表征复杂的辐射衰减过程, 使模型的运算简而可行。但对于不同的频率, 模型中的一些参数对植被的影响不一样, 这个还需要在实际应用中根据实际情况确定。模型在计算植被含水量时, 需要与 NDVI 的建立经验关系, 从光学辅助数据中获得。这就在一定程度上依赖于植被的类型。因此, 不同的植被类型, 使用该模型不能一概而论, 对于大尺度应用来说, 就需要根据不同的冠层类型或者植被覆盖种类对参数进行标定, 这样才能保证它的精度。

3.1.3 土壤亮温反演湿度算法

被动微波模型是用来模拟地表发出微波的辐射信号传输的过程, 要真正反演土壤湿度, 还需要将微波信号和土壤湿度建立关系。应用经验算法就是归纳大量的统计数据, 建立土壤湿度和微波亮温之间的关系, 进而反演得出土壤湿度。经验模型的建立和反演相对于理论模型来说较容易, 但所建立的模型往往只实用于特定植被类型和特定植被生长期, 在很大程度上模型质量还依赖于所获取的数据质量, 因而不能直接把经验模型应用于其他的研究情况。要建立适合不同研究条件植被散射模型, 加强对植被散射机理的理解, 弄清影响植被散射的主导因子, 还有赖于各种理论模型的建立和分析。

3.2 土壤湿度主动微波模型

主动微波遥感主要依靠测量微波的后向散射系数的手段获取信息, 反演土壤湿度。与被动微波遥感相比较, 主动微波遥感具有较高的分辨率, 能够提供更多的信息, 其接收回波信号较强, 因而受到地表面的影响也更大。它测得地物的后向散射系数与四类参数有关: 地物的几何特征参数, 地面的电磁特征参数, 系统的参数, 地面的物理温度。在这些参数中, 有些是人为设置的, 有些是待求的, 有些是敏感的, 有些是不敏感的^[7]。反演土壤湿度的思想是: 通过设定系统的参数, 使土壤湿度成为一个敏感的参数, 而使得地物的几何特征参数成为不敏感的参数, 从而由后向散射系数反演出土壤的土壤湿度。为此, 需研究和选择适当的散射模型及土壤模型, 针对特定情况, 选取合适的系统参数, 最后结合散射模型和土壤模型, 确立土壤湿度反演方法。典型的散射模型有: 小扰动模型、双尺度模型、Kirchhoff 模型、积分方程模型、广义随机粗糙面散射模型、水-云模型等。同样, 对部分常用模型加以说明。

3.2.1 几何光学模型

几何光学模型(GOM)常用于较粗糙, 而起伏较小的地

面^[8]。假设粗糙表面的任何散射单元的曲率半径大于入射电磁波长, 则在粗糙面上任一点利用切平面代替曲面。在这个假设条件下, 当表面标准化的均方根高度 σ 较大时, 采用驻留相位近似, 即假设电磁波只能沿着表面上存在有镜面点的方向发生散射, 这种近似得到的几何光学模型的后向散射系数计算公式如下:

$$\sigma_{pq}^0 = \frac{R_{pq}(0) \exp\left[\frac{-\tan^2(\theta)}{2\sigma^2 |\rho^n(0)|}\right]}{2\sigma^2 |\rho^n(0)| \cos^4(\theta)}$$

$$RW(0) = R_{HH}(0) = \left| \frac{(\sqrt{\epsilon} - 1)}{(\sqrt{\epsilon} + 1)} \right|^2$$

$RW(0)$ 为垂直、水平极化方式法向入射时的 Fresnel 反射系数^[9]。

几何光学模型抓住了地物散射与大气散射的主要差别, 有简单明晰的优点, 特别适用于不连续植被及粗糙地表等, 其不足之处是尚未考虑多次散射对构成“阴影区”地物反射强度的影响, 因而在植被趋于连续, 阴影区与非阴影区之间反差较小时模型不够严密^[10]。

3.2.2 “水-云”模型

Attna 和 Ulaby 等人以农作物为研究对象, 在 1978 年就提出了估算农作物覆盖地表土壤湿度的“水-云”模型。该模型是建立在辐射传输模型基础之上, 通常使用很少的参数, 但这些参数具有一定机理性的意义, 在将模型用到具体的研究时, 模型的参数用实测数据来确定^[11,12]。“水-云”模型建立的基本假设为: ①植被被假设为水平均匀的云层, 土壤表层与植被顶端之间分布着均匀的水粒子; ②不考虑植被和土壤表层之间的多次散射; ③模型中的变量仅为植被高度、植被含水量和土壤湿度^[13]。模型的形式如下:

$$\sigma^0 = \sigma_v^0 + \tau^2 \sigma_s^0$$

$$\sigma_v^0 = AM_v \cos(\theta) (1 - \tau^2)$$

$$\tau^2 = \exp(-2BM_v \sec(\theta))$$

土壤表面散射系数值 σ_s^0 通过总的雷达后向散射系数 σ^0 减去植被衰减的影响而获得, 式中 σ^0 为雷达波经植被层散射的后向散射系数, σ_v^0 为直接植被后向散射系数, τ^2 为雷达波穿透农作物层的双层衰减因子^[14]。

“水-云”模型是一个描述农作物覆盖地区的雷达散射机制的非常简单实用的模型, 它将植被层假定为一个各向均质散射体, 忽略了多次散射, 将农作物覆盖地区的总的雷达后向散射简单描述为两个组成成分, 即由农作物直接反射回来的体散射项, 以及经作物双次衰减后地面的后向散射项。该模型易于获得土壤后向散射系数, 因此常被用作农作物覆盖区相关信息估算的工具。但在水云模型估算地表土壤湿度时, 考虑到对于具有不同结构的植被, 描述植被的参数也应不同, 且水云模型本身较为简单, 它来自植被覆盖地表的雷达后向散射描述为两类, 植被层的体散射以及经植被层双次衰减后的地表散射。而在实际雷达后向散射机制中却远非如此简单, 例如在 HH 极化下, 杆状植被的植被与土壤之间的双次散射量较大, 不能忽略^[19], 这些都会影响到模型的精度。

3.2.3 主动微波极化与入射角参数的选择

在主动微波中常用的 3 个波段为 L 波、C 波和 X 波。依据它们不同的波长和频率可对不同植被覆盖和裸土类型的土壤湿度探测效果较好。不同波段、不同极化状态的雷达入射波对同种地物的探测可以获取地物对不同波段的回波响应及线极化状态下同极化与交叉极化信息, 可更准确地探测目标特征^[15]。如在植被覆盖地区, L 波段比 C 波段具有更强的穿透能力, 有利于探测植被覆盖下的地面信息; 而 C 波段则更有利于探测植被本身; 又如平坦地表的 V 极化入射波的回波较强, 而垂直分布的地物对 H 极化回波更强。因此多波段多极化雷达比单波段单极化雷达具有更好

的应用潜力。

粗糙的地面会对精度造成很大的影响,主动微波遥感应用的几个波段分别对应一个入射角,使其影响最小,选取合适的极化方式使得回波信号最强,即选取最佳的雷达参数。如C波段、VV极化的雷达后向散射系数取决于土壤和植被的水分含量、植被类型、植被的覆盖程度及地表粗糙度和介电常数。Ulaby等曾建议的雷达参数为:①入射角 $7^{\circ} \sim 17^{\circ}$;②雷达频率 $f \geq 4.25\text{GHz}$,并尽可能接近 4.25GHz ;③采用HH极化方式。结果显示:当土壤湿度值低于田间持水能力的50%时,估测精度处于可接受的程度;而在50%~150%的范围时,植被的影响就必须加以考虑。李杏朝在GPS定位的基础上,同步测量土壤水分、土壤后向散射系数和同步获取的x波段、HH极化的机载SAR图像,建立了土壤湿度与后向散射系数、雷达图像灰度之间的线性关系,获取的土壤湿度的相对误差分别为17%和12%。Sano等利用多波段(c和Ku波段)、多角度雷达数据对农业区裸地的土壤湿度进行了大面积制图研究。指出在土壤表面粗糙度较小时,C波段的 23° 入射角数据和Ku波段的 35° 入射角数据对土壤湿度反应敏感,而对于中等粗糙度情况下,C波段和Ku波段雷达数据几乎对土壤湿度的变化失去反应。

雷达后向散射系数随土壤和植被水分含量的增加而增大,对于小入射角($\theta < 30^{\circ}$),雷达后向散射系数对水分特别敏感,随着粗糙度的增加而减小;对于大入射角($40^{\circ} \sim 50^{\circ}$),雷达后向散射系数随地表粗糙度的增加而增大,在有植被存在时,又随着生物量的增加而增大;在干旱地区,雷达后向散射系数取决于地表粗糙度、介电常数和穿透深度。表1中笔者根据实验,得出了土壤水分取较大值(37%含水量)时粗糙度影响情况下得出的一些最佳参数。

表1 中简单

表1 L、C、X波段最佳参数

波段	适合类型	最佳入射角	测得土壤深度
L	植被覆盖	6°	0~5cm
C	裸土	22°	0~5cm
X	裸土	35°	0~5cm

罗列了3个常用波段的最佳入射角、植被覆盖土壤与裸土的选择和测得土壤的深度,依据实验数据的经验性判断相关性较好,可供参考和研究。

4 微波遥感土壤湿度监测方法的选取

在对一个地区进行土壤湿度微波遥感监测的过程中,要选取合适的微波辐射或散射模型,这需要对实地具体情况进行一定程度的了解,才可能获得精度较高的结果,如是否裸露地,若不是,植被的种类、特点等信息。在对主、被动的比较中,总体来讲,主动微波法已经成为监测土壤湿度的主要途径,具有更大的潜力,尤其是较小范围的区域,应用雷达监测已经变得越来越广泛。那么,除选取合适的散射模型作为计算方法外,雷达自身的一些参数也至关重要,依据土壤的粗糙度和植被灌层结构等特点选取最佳的入射角度和极化方式来反演土壤湿度。也可结合土壤模型和介电常数模型等更准确的表达土壤信息^[16~18]。

5 结束语

微波遥感土壤湿度反演已有30年的历史,目前该反演方法仍是研究的重点和热点。

被动微波遥感监测土壤湿度的研究和应用已有较为成熟的技术和模型。被动微波遥感影像的空间分辨率相对较低,适用于研究大范围区域,但要实现实用的全球化土壤湿度反演还有一段距离,而且植被和地表粗糙度对土壤湿度反演的影响仍未得到根本解决,需要继续深入研究。近些年来,随着星载被动微波遥感的研究和快速发展,被动

微波土壤湿度反演正迅速向高时空分辨率的全球化迈进。

主动微波土壤湿度反演相对于被动微波土壤湿度反演来说仍然处于起步阶段,主动微波遥感的信号强,影像的空间分辨率高等优点弥补了被动微波遥感监测土壤湿度的不足,很快就成为监测土壤湿度多种方法中的主力军。然而,它受到地表粗糙度和植被的影响更大,为了克服这一缺陷,专家学者们对雷达土壤湿度的模型和参数做了许多研究,取得了一定的成果。目前成像雷达系统正向着多波段、多极化、多模式,全极化、干涉测量、多参数全极化干涉的方向发展,主动微波遥感土壤湿度的研究将受到更广泛的重视。

航天、航空事业的发展为微波遥感带来更多更好的支持平台,微波遥感获取地表信息的能力越来越强,获取的信息越来越多,越来越全面。同时数据处理方法和手段也日趋完善,这都使得微波遥感监测土壤湿度具有越来越广泛的应用前景。

参考文献

- [1] 毛克彪,等. 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, 22(3).
- [2] 钟若飞,郭华东,王为民. 被动微波遥感反演土壤水分进展研究[J]. 遥感技术与应用, 2005, 20(1).
- [3] Shi Jiancheng, Lingmei Jiang, Lixin Zhang, et al. A Parameterized Multifrequency -polarization Surface Emission Model [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2005, 43.
- [4] Jackson T J, Schmugge T J. Vegetation Effects on the Microwave Emission from Soils [J]. Remote Sensing of Environment, 1991, 36.
- [5] Wang J R, Choudhury B J. Remote Sensing of Soil Moisture Content Over Bare Field at 1.4 GHz Frequency [J]. Journal of Geophysical Research, 1981, 86.
- [6] Njoku E G, Li L. Retrieval of Land Surface Parameters Using Passive Microwave Measurements at 6~18 GHz [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1999, 37(1).
- [7] 李宗谦,冯孔豫. 从雷达后向散射系数反演土壤湿度与复介电常数[J]. 中国科学, 1997, 27(3).
- [8] Ulaby F T, Elachi C. Radar Polarimetry for Geoscience Applications. Artech House, 1990.
- [9] 黄世奇,刘代志,陈亮. 光滑地表面毁伤检测方法研究[J]. 地球物理学报, 2007, 50(4).
- [10] 李小文,等. 不连续植被二向性反射的几何光学与辐射传输一体化综合模型初探[J]. 环境遥感, 1993, 8(3).
- [11] Magagi R D, Kerr Y H. Retrieval of soil moisture and vegetation characteristics by use of ERS-1 wind scatterometer over arid and semi-arid area [J]. Journal of Hydrology, 1997, 189.
- [12] Wigneron J P, Fermozzi P, et al. A simple approach to monitor cro Phiomass from C-Band radar data [J]. Remote Sensing of Environment 1999, 69.
- [13] 戈建军,王超,张卫国. 土壤湿度微波遥感中的植被散射模型进展[J]. 遥感技术与应用, 2002, 17(4).
- [14] 刘万侠,等. 植被覆盖地表主动微波遥感反演土壤水分算法研究[J]. 热带地理, 2007, 27(5).
- [15] 谭衢霖,邵芸,范湘涛. 雷达遥感的地质学应用及其进展[J]. 遥感技术与应用, 2002, 17(5).

(下转第45页)

该像爱护数字水准仪主机一样爱护条码尺, 应该经常对水准尺的圆水准器进行校正, 使其处于正确的工作状态^[4]。

7 垂直角观测限差的制定问题

在进行跨河水准测量中, 经纬仪倾角法也是一个重要的方法。但 GB/T12897 中 8.9.4 规定的测量方法和限差源于光学经纬仪, 与测量生产实践中广泛使用的全站仪(或电子经纬仪)相比, 显然是落伍了。同时在 8.9.4.2 款还规定“采用 T-2000 经纬仪观测时, 垂直角度的观测组数可以减半”, T-2000 电子经纬仪已经非常落伍了, 在国内很难在寻得到。

表 1 给出的垂直角观测限差: 指标差互差 $\leq 8''$, 同一标志垂直角互差 $\leq 4''$, 这也是不恰当的^[2]。推导如下: 假定第 j 个目标盘左位置及盘右竖盘的测量值 L_j 、 R_j , 计算出第 j 个目标的垂直角 α_j :

$$\alpha_j = \frac{1}{2}(R_j - L_j - 180^\circ) \quad (4)$$

其相应的指标差为:

$$I_j = \frac{1}{2}(L_j + R_j - 360^\circ) \quad (5)$$

由(5)式可计算出指标差互差:

$$\Delta I = I_j - I_k \quad (6)$$

根据方差协方差传播率, 由(5)及(6)两式可得指标差互差的标准差 $s_{\Delta I}$:

$$s_{\Delta I} = \sqrt{2}s_I = \sqrt{2}m_B \quad (7)$$

式中: m_B —— 测回垂直角测角标准差。

由(4)式可得同一标志垂直角的互差:

$$\Delta \alpha = \alpha_i - \alpha_k \quad (8)$$

根据方差协方差传播率, 由(4)及(8)两式可得各目标垂直角互差的标准差 $s_{\Delta \alpha}$:

$$s_{\Delta \alpha} = \sqrt{2}m_B \quad (9)$$

(7)及(9)是在盘左位置及盘右竖盘的测量值独立的前提下得出的结论。在一般情况下, 取 3 倍标准差作为限差, 由此得:

垂直角指标差互差的限差 $\leq 3\sqrt{2}m_B = 4.2m_B$, 测回间

每个目标垂直角互差的限差 $\leq 3\sqrt{2}m_B = 4.2m_B$ 。因此, 指标差互差及同一标志垂直角互差的限差应该是一致的。依据 GB/T12897-2006 表 6 的规定 $m_B = 1.5''$, 则垂直角的观测限差为:

8 结束语

水准测量规范作为指导实际生产作业的法规性技术文件, 应该做到结构严谨、方法正确、能代表当前(或标准起草时)水准测量技术的发展状况。但 GB/T12897-2006 却存在这么多疑议, 建议国家有关部门进行修订。在修改本规范时, 应该多参考国外的作业规定并多研究国内外的相关论文, 这样才能够起草出一本符合要求的规范。

参考文献

- [1] 白殿一. 标准编写与指南 [M]. 北京: 中国标准出版社, 2007: 1-35.
- [2] GB/T12891-2006, 国家一、二等水准测量规范 [S].
- [3] 杨俊志, 刘宗泉. 数字水准仪测量系统的周期误差问题 [M]. 北京: 中国测绘出版社, 2007: 67-94.
- [4] Fröhlich H, Schauerte W, Schuler D. Praxistipps zum Präzisionsnivellement mit Digitalnivellieren [C] // Sankt Augustin: Selbstverlag Fröhlich, 2003: 18-38.
- [5] Heister H. Zur Kalibrierung von digitalen Nivelliersystemen [J]. AVN, 2002 (11-12) 4.
- [6] 杨俊志, 等. 测绘仪器精度的表示与检定 [J]. 测绘科学, 2006, 31(3).
- [7] Schauerte W, Heister H. Der Ringversuch 2003/2004 zur Kalibrierung von Präzisionsnivellieren [J]. AVN, 2005, (6).
- [8] Staiger R, Witte B. Zur Bedeutung der Prüfung von Präzisionsnivellierlatten für die Praxis [J]. AVN, 2005, (6).
- [9] Woschitz H. System calibration of digital levels: calibration, facility, procedures and results [Dissertationen]. Aachen: Shaker Verlag, 2003.
- [10] Woschitz H. Systemkalibrierung: Effekte von digitalen Nivelliersystemen. AVN, 2005(6).

Improving specifications for the first and second order leveling

Abstract: Leveling specifications are national forced standard, they should not be defective and ambiguous. This paper described the limitations and mistakes in specifications for the first and second order leveling GB/T 12897-2006. It gave some advices to fill the requirements.

Key words: leveling specifications; mistakes; correcting advices

LI En-bao (Liaoning Station for Surveying and Mapping Products Quality Supervising and Inspecting, Shenyang 110034, China)

(上接第 107 页)

- [16] Martti T Hallikainen, Ulaby F T, et al. Microwave Dielectric Behavior of Wet Soil—Part I: Empirical Models and Experimental Observations [J]. IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing, 1984, 23(1).
- [17] 冯志敏, 等. 遥感监测土壤湿度综述及其在新疆的

应用展望 [J]. 测绘科学, 2008, 33(5).

- [18] 刘伟, 施建成, 余琴, 等. 地表土壤水分与雷达后向散射系数及入射角之间关系研究 [J]. 国土资源遥感, 2004, (3).
- [19] 刘伟, 施建成, 余琴. 基于机载极化雷达技术的农作物覆盖区土壤水分估算 [J]. 干旱区地理, 2005, 28(6).

Research progress of soil moisture monitoring based on microwave remote sensing

Abstract: Soil moisture is an important influencing factors in agricultural production. Trying to get the soil moisture information and make artificial intervention and adjustment measures is important guarantee for keeping stable production. So, it is very important to monitor soil moisture content real-timely and efficiently. There are many methods for inversion soil moisture by remote sensing data, but microwave remote sensing is considered to be the best way nowadays. Main model, method, scope of application and advantages and disadvantages of passive and active microwave remote sensing for soil moisture were summarized. Optimal parameters selection of remote sensing monitoring soil moisture using radar was analyzed. The application prospect of the remote sensing monitoring soil moisture using microwave was done to provide reference for research of the remote sensing monitoring soil moisture using microwave.

Key words: soil moisture; inversion; passive microwave; active microwave

SUN An-li^{①②}, JIA Jian-hua^①, XU Xin-gang^②, HUANG Wen-jiang^② (①Xi'an university of science and technology, Xi'an 710054, China; ②National Engineering Research Center for Information Technology in Agriculture, Beijing 100097, China)