

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2013.12.025

雷达影像提取垄行结构土壤含水率方法研究*

尹楠^{1,2} 姜琦刚¹ 王晶玮³ 张建全^{3,4}

(1. 吉林大学地球探测科学与技术学院, 长春 130026; 2. 吉林建筑大学测绘与勘查工程学院, 长春 130118;
3. 东北电力设计院, 长春 130033; 4. 吉林大学环境与资源学院, 长春 130026)

摘要: 目前通过主动微波法建立的土壤含水率反演模型都是针对非周期的随机粗糙地表, 而不适用于周期性垄行结构的地表。通过对全极化雷达影像和野外采样数据的分析, 证明了同极化(hh和vv)后向散射强度受垄行观测方位角的影响可达4 dB, 而交叉极化(vh)对方位角不敏感, 据此建立了同极化后向散射强度随方位角变化的响应函数。在hh和vv极化模式下, 构造的采样点到响应函数曲线的距离参数与土壤体积含水率的相关系数分别为0.7095和0.8723, 分离出了方位角的影响。同时通过3种极化组合方案消除了粗糙度参数的实测误差对反演精度的影响。18个检验点的反演值与实测值之间的相关系数为0.9461, 标准差为0.0366 cm³/cm³。证明了该模型对垄行结构土壤含水率的反演是有效并可靠的。

关键词: 雷达影像 周期性地表 土壤含水率 观测方位角 粗糙度参数

中图分类号: P208; TP79 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2013)12-0154-06

SAR Images in Retrieving Soil Moisture of Periodic Surfaces with Row Structure

Yin Nan^{1,2} Jiang Qigang¹ Wang Jingwei³ Zhang Jianquan^{3,4}

(1. College of Geo-exploration Science and Technology, Jilin University, Changchun 130026, China
2. School of Surveying and Prospecting Engineering, Jilin Architectural University, Changchun 130118, China
3. Northeast Electric Power Design Institute, Changchun 130033, China
4. College of Environment and Resources, Jilin University, Changchun 130026, China)

Abstract: The previous retrieval models of soil moisture based on active microwave remote sensing are applicable for non-periodic random surfaces, not available to periodic surfaces with row structure yet. This study was based on fully polarimetric data and field data. It was found that the like-polarized (hh and vv) backscattering coefficients react obviously to the azimuth angles, up to 4 dB. while the cross-polarized (vh) backscattering reacts insensitively to row-direction changes, then the response functions of hh and vv polarizations were given. A distance parameter that denotes the distance between a sampling point and response function curve was constructed to remove the influence of azimuth angles. The correlation coefficients between the distance parameter and soil moisture were 0.7095 and 0.8723, in hh and vv polarization modes, respectively. Meanwhile the influence of the error of roughness parameters in field measurement was removed by three different polarization combination schemes. The effectiveness of this model was demonstrated by the estimated soil moisture of checkpoints. This study selected 18 sampling points as checkpoints. The correlation coefficient between estimated soil moisture and measured soil moisture was up to 0.9461, the standard deviation was 0.0366 cm³/cm³. The model was reliable and applicable for periodic surfaces.

Key words: SAR images Periodic surfaces Soil moisture Azimuth angle Roughness parameters

收稿日期: 2013-04-22 修回日期: 2013-05-02

* 国家自然科学基金资助项目(41174068)和黄河流域基础地质环境遥感调查联合资助项目(1212010911084)

作者简介: 尹楠, 博士生, 吉林建筑大学讲师, 主要从事遥感定量反演研究, E-mail: yinnanbaby@126.com

通讯作者: 姜琦刚, 教授, 博士生导师, 主要从事 GIS 与遥感地学环境研究, E-mail: jiangqigang@jlu.edu.cn

引言

土壤含水率是影响农作物产量的关键参量, 过多或过少都会影响农作物的正常生长, 导致旱涝灾害^[1-2]。目前世界上大多数国家和地区对农用地土壤含水率的动态监测还远远不够^[3]。传统的土壤水分测定方法^[4-6]的样点通常较稀疏, 遥感的应用能从宏观上了解土壤的旱涝程度^[7]。微波遥感可获取地表下垫面一定厚度层的特征信息, 对土壤含水率信息的获取具有不可比拟的优势。基于合成孔径雷达(Synthetic aperture radar, SAR)的主动微波法弥补了被动微波法空间尺度过大的不足^[8-9], 通过建立土壤含水率与雷达后向散射系数的关系来建立反演模型。

基于主动微波法的土壤含水率理论模型和经验模型^[10-16]已经非常成熟, 但都建立在平坦的随机粗糙地表条件下。大多数旱田作物(如玉米、大豆、高粱等)栽培中普遍采用具有周期性垄行结构的土壤耕作和播种方式, 建立适用于周期性地表的土壤含水率反演模型对旱田作物的旱涝监测和估产具有重要的意义。

本文着重分析在不同极化模式下, 后向散射系数对垄行方向变化的敏感性, 以及去除垄行和地表粗糙度对土壤含水率反演的影响, 建立适用于周期性地表土壤含水率反演的模型。

1 研究区域概况

研究区位于吉林省公主岭市境内, 主要包括大岭镇和怀德镇, 在 $124^{\circ}37'20''\text{E} \sim 125^{\circ}00'40''\text{E}$ 、 $43^{\circ}41'15''\text{N} \sim 43^{\circ}58'28''\text{N}$ 之间。公主岭市属于温带大陆性季风气候, 冬冷夏热, 四季分明。地貌类型分为南部山地和北部平原两大地貌区。本文研究区位于北部平原区, 属于松辽平原的东部高平原, 地势非常平坦。研究区的土地利用类型以农用地为主, 主要种植玉米、大豆等垄行结构的作物。研究区土壤肥沃, 含水率适中, 东部有小部分洼地, 含水率较高。

使用 RADARSAT-2 全极化精细模式的雷达卫星影像, 标称分辨率的距离向为 12 m, 方位向为 8 m, 影像覆盖 $25 \text{ km} \times 25 \text{ km}$ 的区域, 入射角范围为 $46.79^{\circ} \sim 47.99^{\circ}$, 工作频率为 5.3 GHz, 工作在 C 波段的波长可以有效提取地表 5 cm 剖面内的土壤水分信息^[17]。图像获取时间为 2012 年 5 月 4 日, 地表为未耕种的裸土, 土壤中残留有少量玉米秸秆残渣, 研究证明少量的农作物残渣对后向散射强度无明显影响^[18]。土壤采样时间为 2012 年 5 月 3 日和 4 日, 采样当天及前 7 d 内研究区均无降雨, 保证了

土壤含水率的稳定性。

野外测量的主要内容包括土壤体积含水率、表面粗糙度及垄行的观测方位角。观测方位角 ϕ ^[18] 定义为雷达波束在地面上的投影轴与垄行之间的夹角, ϕ 的取值范围是 $[0^{\circ}, 180^{\circ}]$ 。本研究选取 50 个定位采样点, 采样点基本均匀地分布在整个研究区。使用环刀法采集剖面 0 ~ 5 cm 的土壤样本, 测量土壤体积含水率; 使用针式粗糙度板测量土壤剖面的均方根高度 s 和相关长度 L ^[19-21], 探针间的间隔为 1 cm, 剖面板的长度为 120 cm; 使用 GPS 采集的地块垄行的始末点坐标计算方位角。野外测量的所有参数均采用多次测量取平均值作为最后的结果。同时对野外测量的方位角与同期的高分辨率遥感影像提取的方位角比较, 发现两者的误差在 $\pm 2^{\circ}$ 以内。

2 数据处理与分析

2.1 雷达影像处理

采用的 SAR 影像为 SLC 级, 需要对影像进行辐射定标、滤波、地斜距转换和几何校正等处理。先根据 RADARSAT-2 数据自带的定标参数文件和入射角图像进行辐射定标。然后采用 Lee-Refined Sigma 滤波方法, 滤波器设置为 7 像素 \times 7 像素的窗口。Lee-Refined Sigma 滤波法对原始 Lee-Sigma 滤波器的缺陷进行了改进, 滤除了孤立的暗像素, 保存了强反射的点目标, 滤波效果有所提高^[22]。对经过斜地距转换的雷达影像进行多项式几何纠正, 选取了 260 个控制点, 图像纠正后的均方根误差在 1.5 个像素以内。

2.2 不同极化后向散射对垄行方位角的响应

影响周期性裸土表面后向散射强度的主要因素包括雷达系统参数、土壤参数和垄行的观测方位角。雷达系统参数已知的情况下, 土壤含水率反演的核心就变成抑制粗糙度和垄行方位角对反演精度的影响。

本文选取基于指数自相关函数的均方根坡度 Z_s 作为粗糙度参数, 其中 $Z_s = s/L$ ^[23]。采样点在不同极化方式下的后向散射系数 σ° 与土壤体积含水率 m_v 、粗糙度参数 Z_s 的相关系数在表 1 中列出, 令 σ_{vh}° 为交叉极化后向散射系数、 σ_{hh}° 为水平极化后向散射系数和 σ_{vv}° 为垂直极化后向散射系数。只有 σ_{vh}° 与 m_v 的相关系数达到显著水平, 同极化后向散射系数 σ_{vv}° 和 σ_{hh}° 对 m_v 均不敏感, 尤其是 σ_{hh}° 与 m_v 的相关系数只有 0.383 1, 与 Li 等^[24] 总结的同极化交叉极化对土壤含水率更加敏感的结论相悖。这主要是由于不同极化方式下后向散射系数对方位角的敏感程度不同造成的。如果直接采用传统的模型反演土

壤含水率,反演的结果必定含有很大的误差。同时,所有极化方式下的后向散射系数与粗糙度参数 Z_s 的相关系数均很低。

表1 不同极化模式下 σ° 与 m_v 、 Z_s 的相关系数比较

Tab.1 Comparison of correlation coefficients among σ° and m_v , Z_s in different polarization modes

极化方式	σ° 与 m_v	σ° 与 Z_s
hh	0.383 1	0.402 8
vv	0.529 5	0.462 1
vh	0.687 8	0.402 9

本文提取 166 个地块的观测方位角,并在雷达影像上提取对应地块 hh、vv、vh 极化方式下的平均后向散射系数。由图 1a、1b 不难看出, σ_{vv}° 和 σ_{hh}° 随观测方位角变化的响应曲线呈余弦函数。当地块的垄行方向与雷达波束的入射方向平行时 ($\phi = 0^\circ$ 或 180°),后向散射系数为最小值;当地块垄行的方向与雷达波束的入射方向垂直时 ($\phi = 90^\circ$),后向散射系数达到最大值,这个规律与 Ulaby^[18] 论述相一致。

$$\sigma_{pp}^\circ(\phi_i)_c = a \cos(2\phi_i + \pi) + b \quad (1)$$

式中 $\sigma_{pp}^\circ(\phi_i)_c$ ——在 pp 极化模式下,拟合曲线上方位角为 ϕ_i 的后向散射系数

pp ——接收极化和发射极化相同,是水平极化 hh 和垂直极化 vv 的统称

ϕ_i ——采样点的方位角

a 、 b ——拟合参数

因此,只需求出式(1)中参数 a 、 b 即可建立同极化后向散射强度和方位角的关系。

通过最小二乘曲线拟合,分别得到 $\sigma_{hh}^\circ(\phi)$ 和 $\sigma_{vv}^\circ(\phi)$ 的响应曲线,如图 1a、1b 所示,两种极化方式下的曲线决定系数均大于 0.9,拟合效果非常好。两种极化方式下拟合曲线偏移 X 轴的距离近似相等, hh 极化拟合曲线的振幅略大于 vv 极化拟合曲线的振幅, hh 极化在 $0^\circ \sim 180^\circ$ 之间受方位角影响的最大变差接近 4 dB。如图 1c 所示, σ_{vh}° 对方位角的变化不敏感,这与上述对表 1 的分析结果相对应,由于 σ_{vh}° 不受方位角的影响,与 m_v 的相关性最高。

3 实例研究

3.1 模型建立

通过以上分析,本文研究的重点应是分离出方位角和粗糙度对后向散射系数的影响,以提高周期性地表土壤含水率反演的精度。在图 1a、1b 中,拟合曲线反映了同极化后向散射系数随方位角的变化规律,那么采样点偏离曲线的距离则反映了不同采

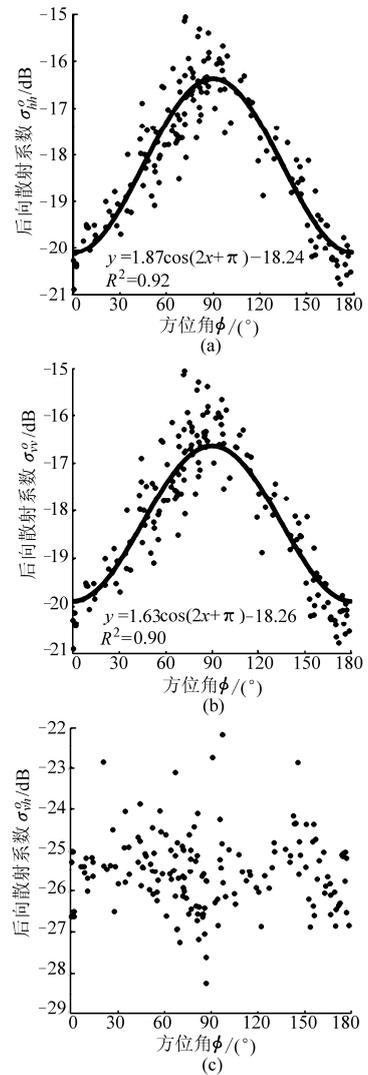


图1 方位角 ϕ 对不同极化后向散射系数 σ° 的影响

Fig.1 Variation of σ° with an azimuth angle ϕ in different polarization modes

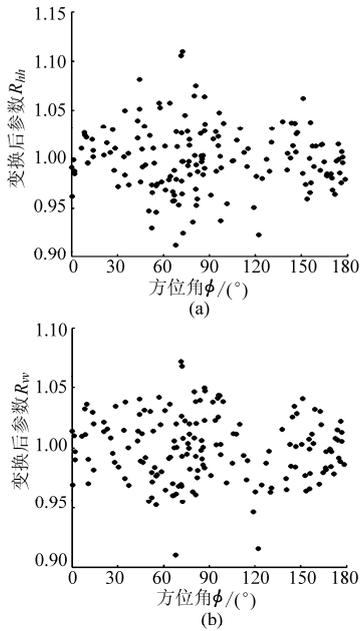
(a) hh 极化 (b) vv 极化 (c) vh 极化

样点的土壤体积含水率和粗糙度的差异。设偏离曲线的距离为 $R_{pp}(\phi_i)$,则

$$R_{pp}(\phi_i) = \sigma_{pp}^\circ(\phi_i)_c / \sigma_{pp}^\circ(\phi_i) \quad (2)$$

式中 $\sigma_{pp}^\circ(\phi_i)$ ——雷达图像上后向散射系数

对比图 1a 和图 2a、图 1b 和图 2b,变换后的参数 R_{pp} 的值对方位角不再敏感,而是在 $R_{pp} = 1$ 附近的一定区间内呈随机分布,分离出了同极化后向散射系数对方位角的敏感性。通过对 R_{pp} 与 Z_s 、 m_v 的相关系数分析发现(表 2),本文建立的周期性地表后向散射系数距离参数 R_{hh} 、 R_{vv} 与 m_v 之间的相关系数分别为 0.709 5 和 0.872 3,与随机粗糙地表条件下的后向散射系数与土壤湿度的相关系数大小相当。 R_{pp} 对 Z_s 的敏感性比 σ_{pp}° 有所提高,但仍不显著相关,这是由于土壤粗糙度在时间和空间上是频繁变化的,测量精度难以保证^[25]。

图 2 方位角 ϕ 对变换后参数 R_{pp} 的影响Fig. 2 Variation of R_{pp} with an azimuth angle ϕ

(a) hh 极化 (b) vv 极化

表 2 不同极化模式下 R_{pp} 与 m_v 、 Z_s 的相关系数比较Tab. 2 Comparison of correlation coefficients among R_{pp} and m_v, Z_s in different polarization modes

极化方式	R_{pp} 与 m_v	R_{pp} 与 Z_s
hh	0.709 5	0.495 6
vv	0.872 3	0.573 9

通过大量模拟分析,同时结合前人的研究,发现后向散射系数往往与土壤含水率和粗糙度的对数具有较好的线性关系^[26-27],首先建立 σ_{vh}^o 与 Z_s 、 m_v 之间的关系,即

$$\sigma_{vh}^o = a_1 \ln m_v + b_1 \ln Z_s + c_1 \quad (3)$$

同理,建立 R_{pp} 与 m_v 、 Z_s 的关系为

$$R_{hh} = a_2 \ln m_v + b_2 \ln Z_s + c_2 \quad (4)$$

$$R_{vv} = a_3 \ln m_v + b_3 \ln Z_s + c_3 \quad (5)$$

式中 a_1 、 b_1 、 c_1 、 a_2 、 b_2 、 c_2 、 a_3 、 b_3 、 c_3 为拟合参数,解超定方程组,求得的系数如表 3 所示。通过对表 3 中的模型对比分析,本研究构造的后向散射系数距离参数 R_{hh} 与 $\ln m_v$ 、 $\ln Z_s$ 拟合函数的相关系数,由变换

表 3 不同极化模式下拟合函数及相关系数

Tab. 3 Fitting functions and correlation coefficients in different polarization modes

极化方式	拟合函数	相关系数	均方差
vv	$\sigma_{vv}^o = 2.0108 \ln m_v + 1.3455 \ln Z_s - 11.7628$	0.5809	1.0451
	$R_{vv} = 0.2031 \ln m_v + 0.0318 \ln Z_s + 1.3996$	0.8451	0.0320
hh	$\sigma_{hh}^o = 1.2698 \ln m_v + 1.5926 \ln Z_s - 12.4731$	0.4971	1.1863
	$R_{hh} = 0.1574 \ln m_v + 0.0339 \ln Z_s + 1.3246$	0.7327	0.0423
vh	$\sigma_{vh}^o = 4.0552 \ln m_v + 0.2140 \ln Z_s - 18.0387$	0.6643	1.0490

前的 0.4971 提高到 0.7327;而 R_{vv} 的相关系数由原来的 0.5809 提高到 0.8451。同时,使用同极化参数 R_{pp} 拟合的相关系数均高于交叉极化 σ_{vh}^o 拟合的相关系数,与 Li 等^[24] 总结的同极化后向散射系数比交叉极化对土壤含水率更加敏感的结论相对应。

使用方程(3)、(4)、(5)中的任意两个,建立方程组即可消去粗糙度参数,求得 m_v 的反演公式。但反演模型的精度受到 m_v 和 Z_s 的野外测量值精度的影响。土壤体积含水率的测量方法往往简单,精度也较高,但复杂的自然地表的粗糙度却很难用简单的数学公式模拟,同时均方根高度 s 和相关长度 L 也很难精确测量,直接影响到拟合系数,从而影响了土壤含水率反演的精度。

根据式(3)和式(5)联立可知 $\ln m_v$ 与 σ_{vh}^o 、 R_{vv} 之间有很强的线性关系,那么不考虑粗糙度的实测值,直接拟合 $\ln m_v$ 和 σ_{vh}^o 、 R_{vv} 之间的关系,如式(6),同理得到式(7)、式(8),从而去除了粗糙度参数的测量误差对反演精度影响,即

$$\ln m_v = d_1 \sigma_{vh}^o + e_1 R_{vv} + f_1 \quad (6)$$

$$\ln m_v = d_2 \sigma_{vh}^o + e_2 R_{hh} + f_2 \quad (7)$$

$$\ln m_v = d_3 R_{vv} + e_3 R_{hh} + f_3 \quad (8)$$

选取 50 个采样点中的 32 个点进行建模,18 个点进行检验。最终的反演模型如表 4 所示。vh/vv 和 vv/hh 两种极化组合建立的土壤含水率反演模型的模拟值与实测值之间的相关系数高达 0.92, vh/hh 极化组合下的相关系数达到了 0.8678,3 种极化组合模型的模拟精度均非常高。

3.2 精度评价

对 18 个野外采样的检验点采用表 4 建立的模型进行反演。实践证明,3 种极化组合模型的反演精度都很高,最终的反演结果取 3 个模型的平均值。如图 3 所示,检验点土壤湿度的实测值与模型反演值之间的相关系数为 0.9461,反演的土壤体积含水率与实测值非常接近,在直线 $y = x$ 附近分布,相对误差在 10% 以内的点有 8 个,相对误差在 10% ~ 20% 的点有 8 个,只有 2 个点相对误差在 20% ~ 30% 之间,反演值与实测值的均方差为 $0.0366 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ 。

表4 土壤含水率反演模型

Tab.4 Retrieving models of soil moisture

极化组合	土壤含水率反演模型	相关系数	均方差
vh/vv	$m_v = \exp(0.0239\sigma_{vh}^0 + 2.6872R_{vv} - 3.7661)$	0.9210	0.0228
vh/hh	$m_v = \exp(0.0635\sigma_{vh}^0 + 2.0025R_{hh} - 2.0758)$	0.8678	0.0301
vv/hh	$m_v = \exp(3.8780R_{vv} - 0.9356R_{hh} - 4.6264)$	0.9230	0.0223

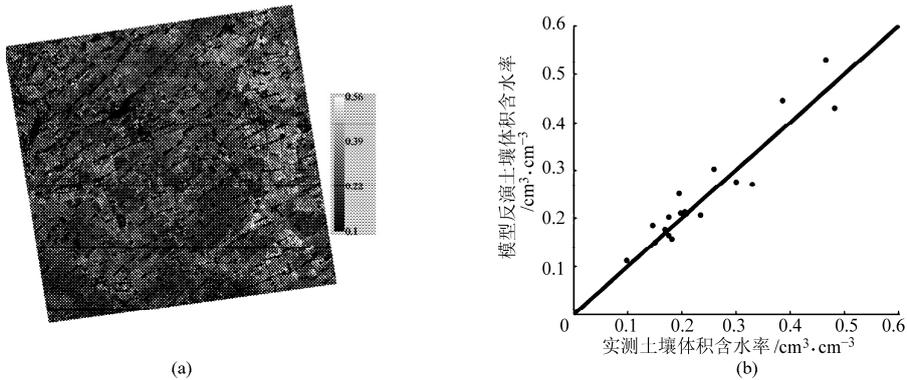


图3 研究区与检验点土壤含水率反演结果

Fig.3 Estimated soil moisture of study area and checkpoints

(a) 研究区结果图 (b) 检验点结果图

4 结论

(1) 周期性地表垄行的观测方位角对交叉极化后向散射系数无明显影响,但对同极化的影响可达4 dB左右,直接影响了土壤含水率的反演精度,必须去除。同极化后向散射系数随方位角的变化呈余弦函数的形式。

(2) 建立的周期性地表后向散射系数距离参数 R_{hh} 、 R_{vv} 与 m_v 之间的相关系数分别为0.7095和0.8723,与非周期随机地表条件下的同极化后向散射系数与土壤湿度之间的相关系数大小相当。证明使用 R_{pp} 参数能够分离出方位角对后向散射系数的影响。

(3) 利用参数 R_{hh} 、 R_{vv} 和 σ_{vh}^0 建立3种极化组合的反演模型。反演模型不需要粗糙度参数实测值,去除了粗糙度测量误差对土壤含水率反演精度的影响。3种极化组合模型拟合的相关系数分别为0.921、0.868和0.923。18个检验点的反演结果证明3个模型的反演精度都很高,16个检验点的相对误差在20%以下,反演值和实测值的相关系数高达0.9461,标准差为 $0.0366\text{ cm}^3/\text{cm}^3$ 。建立的周期性垄行结构土壤含水率反演模型的精度与随机地表条件下的反演精度相当,证明了本研究基于雷达影像建立的周期性垄行结构土壤含水率的反演模型是有效并可靠的。

参 考 文 献

- 刘英,马保东,吴立新,等. 基于NDVI-ST双抛物线特征空间的冬小麦旱情遥感监测[J]. 农业机械学报,2012,43(5): 55~63.
Liu Ying, Ma Baodong, Wu Lixin, et al. Drought remote sensing for winter wheat based on double parabola NDVI-ST space[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(5): 55~63. (in Chinese)
- 杨玉建,朱建华,刘淑云,等. 小麦拔节期农学参数和土壤含水量空间统计[J]. 农业机械学报,2009,40(增刊):159~164.
Yang Yujian, Zhu Jianhua, Liu Shuyun, et al. Spatial statistic properties of agronomic parameters and soil moisture content in wheat jointing stage[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(Supp.): 159~164. (in Chinese)
- Merzouki A, McNairn H. Mapping soil moisture using RADARSAT-2 data and local autocorrelation statistics[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 2011, 4(1): 128~137.
- 张学礼,胡振琪,初士立. 土壤含水量测定方法研究进展[J]. 土壤通报,2005,36(1):118~123.
Zhang Xueli, Hu Zhenqi, Chu Shili. Methods for measuring soil water content: a review[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2005, 36(1): 118~123. (in Chinese)
- 时新玲,王国栋. 土壤含水量测定方法研究进展[J]. 中国农村水利水电,2003(10):84~86.
Shi Xinling, Wang Guodong. Research advances in measuring method of soil water content[J]. China Rural Water and

- Hydropower, 2003(10): 84 ~ 86. (in Chinese)
- 6 邵明安,王全九,黄明斌. 土壤物理学[M]. 北京:高等教育出版社,2006:55 ~ 61.
- 7 Baghdad N, Saba E, Aubert M. Evaluation of radar backscattering models IEM, Oh, and Dubois for SAR data in X-band over bare soils[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2011, 8(6): 1 160 ~ 1 164.
- 8 田辉,王澄海,文军,等. 基于简化参数方法的蒙古干旱区土壤湿度被动微波遥感[J]. 地球物理学报,2012,55(2):415 ~ 427.
Tian Hui,Wang Chenghai,Wen Jun,et al. Soil moisture estimation over an arid environment in Mongolia from passive microwave remote sensing basedon a simplified parameterization method[J]. Chinese Journal of Geophys, 2012, 55(2): 415 ~ 427. (in Chinese)
- 9 郭英,沈彦俊,赵超. 主被动微波遥感在农区土壤水分监测中的应用初探[J]. 遥感与信息技术应用,2011,19(5):1 162 ~ 1 167.
Guo Ying, Shen Yanjun, Zhao Chao. Soil moisture monitoring in agricultural lands via active-passive microwave remote sensing [J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2011, 19(5): 1 162 ~ 1 167. (in Chinese)
- 10 Wu T D, Chen K S. A reappraisal of the validity of the IEM model for backscattering from rough surfaces[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2004, 42(4): 743 ~ 753.
- 11 Dubois P C, Van Z J, Engman E T. Measuring soil moisture with imaging radars[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1995, 33(4): 915 ~ 926.
- 12 Shi J C, Wang J, Hsu A Y, et al. Estimation of bare surface and moisture and surface roughness parameter using L-band SAR image data[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1997, 35(5): 1 254 ~ 1 266.
- 13 Oh Y, Sarabandi K, Ulaby F T. An empirical model and an inversion technique for radar scattering from bare soil surface[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1992, 30(2): 370 ~ 381.
- 14 Wu T D, Chen K S, Shi J C, et al. A transition model for the reflection coefficient in surface scattering[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2001, 39(9): 2 040 ~ 2 050.
- 15 Fung A K, Chen K S. An update on the IEM surface backscattering model[J]. Geoscience and Remote Sensing Letters, IEEE, 2004, 1(2): 75 ~ 77.
- 16 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 simulations[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2003, 41(1): 90 ~ 101.
- 17 Zhou P, Ding J L, Wang F, et al. Retrieval method of soil water content in vegetation covering areas based on multi-source remote sensing data[J]. Journal of Remote Sensing, 2010, 14(5): 959 ~ 965.
- 18 Ulaby F T, Moore R K, Fung A K. Microwave remote sensing: active and passive, Vol. III—Volume scattering and emission theory, advanced systems and applications[M]. Dedham, Massachusetts: Artech House, 1986: 1 797 ~ 1 848.
- 19 El-Shenawee M, Magda O, Miller E L. Multiple-incidence and multi-frequency for profile reconstruction of random rough surfaces using the 3-D electromagnetic fast multiple model[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2004, 42(11): 2 499 ~ 2 510.
- 20 Harada K, Noguchi A. Reconstruction of two dimensional rough surface with gaussian beam illumination[J]. IEICE Transactions on Electronics, 1996, E79-C(10): 1 345 ~ 1 349.
- 21 Potthast R. A point source method for inverse acoustic and electromagnetic obstacle scattering problems[J]. IMA Journal of Applied Mathematics, 1998, 61(2): 119 ~ 140.
- 22 Lee J S, Pottier E. Polarimetric radar imaging: from basics to applications[M]. New York: CRC Press, 2009: 1 ~ 150.
- 23 郭立新,王蕊,吴振森,等. 随机粗糙面散射的基本理论和方法[M]. 北京:科学出版社,2010.
- 24 Li Z, Ren X, Wang L. Soil moisture measurement and retrieval using Envisat ASAR imagery[C]//IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium(IGARSS), 2004: 3 539 ~ 3 542.
- 25 邓孺孺,田国良,柳钦火,等. 粗糙地表土壤含水量遥感模型研究[J]. 遥感学报,2004,8(1):75 ~ 80.
Deng Ruru, Tian Guoliang, Liu Qinhuo, et al. Research on remote sensing model for soil water on rough surface[J]. Journal of Remote Sensing, 2004, 8(1): 75 ~ 80. (in Chinese)
- 26 任鑫. 多极化、多角度 SAR 土壤水分反演算法研究[D]. 北京:中国科学院研究生院,2004.
Ren Xin. A surface moisture inversion technique using multi-polarization and multi-angle radar images[D]. Beijing: Graduate University of Chinese Academy of Sciences, 2004. (in Chinese)
- 27 李震,陈权,任鑫. Envisat-1 双极化雷达数据建模及应用[J]. 遥感学报,2006,10(5):777 ~ 782.
Li Zhen, Chen Quan, Ren Xin. Modeling Envisat-1 dual-polarized data and its applications[J]. Journal of Remote Sensing, 2006, 10(5):777 ~ 782. (in Chinese)