

双频多极化 SAR 测量深层土壤湿度

张晓娟^① 张文吉^{①②} 路晓荣^{①②} 康高健^{①②} 方广有^①

^①(中国科学院电子学研究所 北京 100080)

^②(中国科学院研究生院 北京 100039)

摘要: 该文提出了利用由矢量网络分析仪构造的 VHF/UHF 双频、多极化合成孔径雷达(SAR)测量深层土壤湿度的方法; 给出植被后向散射机理、深层土壤后向散射机理, 土壤介电常数模型; 对裸露土壤深层后向散射、土壤介电特性给出仿真结果。通过已知的单层土壤(双层介质粗糙面模型)的后向散射验证了模型的正确性。

关键词: 合成孔径雷达; 土壤湿度; UHF; VHF; 后向散射系数

中图分类号: TN959.4

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2007)11-2711-04

Dual-Frequency Synthetic Aperture Radar for Deep Soil Moisture Estimation

Zhang Xiao-juan^① Zhang Wen-ji^{①②} Lu Xiao-rong^{①②} Kang Gao-jian^{①②} Fang Guang-you^①

^①(Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

^②(Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

Abstract: The method of measuring deep soil moisture by VHF/UHF dual frequency multiple polarization Synthetic Aperture Radar (SAR) consisting of vector network analyzer is proposed. The backscattering mechanism of vegetation and soil at depth, dielectric properties of soil are presented. The simulation results of the backscattering of multilayered soil, dielectric properties of soil are given and the models are validated by special case of single layered soil.

Key words: SAR; Soil moisture; UHF; VHF; Backscattering coefficient

1 引言

土壤湿度是研究水文、气候、生态的一个重要的基本参数。各国对土壤湿度探测设备已有大量的投入。土壤湿度测量可以用实地测量或用遥感的手段测量。实地测量的效率很低。目前检测土壤湿度的遥感方法有: (1)可见光, 近红外遥感监测; (2)热红外遥感监测; (3)被动微波遥感监测; (4)雷达遥感监测。根据测量机理, 可见光, 近红外遥感监测和热红外遥感监测只能测量土壤表层的湿度, 并受云层和植被的影响。微波遥感测量是全天候的, 尽管被动微波遥感在过去、现在和计划中的辐射计系统中被广泛应用, 但它们只能得到裸露土壤或低矮植被下土壤表层的湿度参数。在植被覆盖条件下, 穿透到深层土壤, 用低频段的合成孔径雷达更有效。

土壤湿度随时间是动态变化的。进行水文、气候、生态研究, 所需要的深层土壤湿度时间间隔取样数远少于表层土壤湿度的时间间隔取样数。深层土壤湿度及其动态变化等参数控制全球水文变化, 水分蒸发, 运移, 流失和排水。进行土壤深层湿度测量是十分有意义的工作。

国内外学者在用雷达进行土壤湿度的测试、建模等方面已做了很多工作。Ulaby^[1]等人在土壤湿度测量方面做了大量的工作, 获得了大量的数据, 对土壤湿度反演模型的建立提供了依据。但过去的工作大都集中在较高的频率段: K, X, C,L等波段, 要获得深层土壤湿度及相应的研究数据, 需要搭建测试设备, 采集数据, 建立深层土壤的电磁散射模型, 建立相应的土壤介电模型, 获取大量的数据信息, 进行土壤湿度的反演。

美国NASA JPL实验室与美国密西根大学 Moghaddam 等人合作建立了基于VHF/UHF Tower-based SAR的测试平台^[2], 对森林的生物量进行了测量, 获得了很好的结果, 并开始了对深层土壤湿度的研究工作。日本东北大学^[3]开发了一种用于植被监测的地面轨道式的极化超宽带SAR, 采用频率步进连续波模式, 系统工作频率在 400MHz -6GHz范围。用于研究不同季节的树木植被散射特性及植被散射机理。

本文提出构建基于矢量网络分析仪的 VHF/UHF 双频合成孔径雷达测试平台, 测量深层土壤湿度及其动态变化, 文章第 3, 第 4 节分析和给出植被散射模型, 分层土壤后向散射模型, 土壤介电常数模型, 并通过相应的仿真结果加以分析。

2 VHF/UHF 双频多极化 SAR 测量原理及测量深度

2.1 系统结构

系统的原理示意图如图 1 所示。由矢量网络分析仪、PC 机、微波功放、对数周期天线与天线控制器构成双频段、多极化、多角度、多时相测量系统。由矢量网络分析仪产生 VHF/UHF 脉冲信号。采用多极化定标测量方法, 分别获得 VHF/UHF 双频、多极化、多角度测量数据。通过不同频率的测量数据反演不同深度的湿度信息。在某一频率下, 在保证发射功率相同的情况下, 控制天线控制器, 发射和接收同极化的信号, 获得同极化的后向散射系数比。调整天线的角度, 可以得到不同角度的同极化后向散射系数比值。这一比值受植被、土壤湿度、入射角度的影响; 不受测量系统参数、目标土壤粗糙度的影响。在土壤分层散射模型中, 粗糙度与土壤湿度信息可以分离, 使得在同极化后向散射系数比值中消去了粗糙度信息。从多角度的测量数据中分离出土壤后向散射分量, 从而可以计算出深层土壤的介电常数。采用脉冲压缩技术和合成孔径技术提高采样的分辨率。

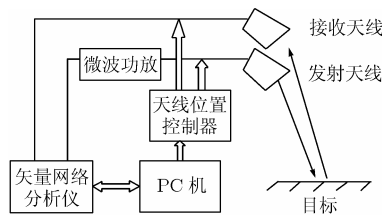


图 1 系统原理示意图

2.2 测量深度

测量深度即雷达信号在土壤中的穿透深度, 电磁波穿透土壤的深度由土壤介电常数和电磁波的频率而定。当一定幅度的平面电磁波入射到土壤中, 由于土壤湿度不同会产生不同程度的衰减, 定义电磁波能量衰减 $1/e$ 倍时在介质中的传播距离为穿透深度。

土壤中电磁波的波数为

$$k = \omega \sqrt{(\epsilon' - j\epsilon'')\mu} \quad (1)$$

传播常数为

$$\gamma = jk = \alpha + j\beta \quad (2)$$

其中 α , β 分别为衰减常数和相移常数。

$$\alpha = \frac{2\pi}{\lambda} \text{Im}(\sqrt{\epsilon}), \quad \beta = \frac{2\pi}{\lambda} \text{Re}(\sqrt{\epsilon}) \quad (3)$$

设电磁波在土壤和空气交界面处功率为 $p(0)$, 则电磁波在土壤中传播距离 z 时的功率为

$$p(z) = p(0)e^{-2\alpha z} \quad (4)$$

对式(3)做级数展开, 对土壤这类弱损耗媒质, 满足 $\epsilon'' \ll \epsilon'$, 得到电磁波对土壤穿透深度为

$$d_{\text{penetration}} = \frac{1}{2\alpha} = \frac{\lambda\sqrt{\epsilon'}}{2\pi\epsilon''} \quad (5)$$

土壤的复介电常数是入射波频率、土壤类型、土壤湿度的非线性函数, 由Ulaby等人的土壤介电常数模型^[4], 当土壤体湿度在 0.05-0.25 间, 不同类型的土壤, 在UHF频段, 穿透深度约 0.3-6m; 在VHF频段, 穿透深度约 0.5-10m。

3 植被和土壤的后向散射机理

在VHF/UHF频段, 考虑到电磁波波长较长, 有较大的穿透深度, 将土壤等效为各向同性的分层介质。土壤表面及双层介质分界面均为粗糙面, 粗糙度为小到中等粗糙度。如果不考虑分层, 即将土壤看成一种表面粗糙的均匀介质, 用小扰动散射模型即可计算土壤的散射特性。在考虑分层的情况下, 通过分层介质电磁散射的递推公式^[5], 公式中的系数由边界条件求出; 土壤表面和分层介质分界面为粗糙面, 在边界条件中加入小扰动模型^[3]。边界条件的复杂性使得得到的一阶小扰动解非常复杂。由于分层土壤交界面的粗糙度与VHF/UHF波段的波长相比很小; 本文通过后向散射系数的同极化比反演土壤湿度, 该比值中已去掉粗糙度的影响, 进一步将土壤分层模型简化为交界面为平面的情况。文献[6]对该分层介质模型, 针对探地雷达给出分层介质散射的初步分析, 在文献[6]的基础上, 本文得到计算分层土壤后向散射模型。对于入射的平面电磁波 $\mathbf{E}_i = \mathbf{E}_0 e^{ik_x x + ik_z z - i\omega t}$, 上层土壤的粗糙表面函数为 $z = f(x, y)$, 根据小扰动理论, 取一阶近似解得到分层土壤同极化后向散射公式:

$$\sigma_{pp} = 16k^4 \cos^4 \theta_i |\alpha_{Lpp}|^2 W(2k \sin \theta_i, 0) \quad (6)$$

式中 k 为波数, p 为极化, pp 表示 vv 或 hh 极化方式, θ_i 为入射角, W 为粗糙面功率谱密度, 与粗糙面均方根高度, 相关长度, 粗糙面相关函数有关; α_{Lpp} 为多层介质的极化幅度系数, 与极化方式, 上下层分界面之间的距离, 分层介质中电磁波传播相关^[6]。在式(6)中, 粗糙度函数是可以分离的。图 2 为用该模型计算的一层土壤的后向散射系数, 即假设第一层厚度为无穷大时的结果, 与Ulaby^[1]的图 12.6 结果一致, 验证了该模型的正确性。图 3 说明 vv 极化和 hh 极化的后向散射系数受土壤粗糙度不同的影响, 为消除粗糙度的影响, 在反演过程中使用后向散射系数同极化比的测量数据。

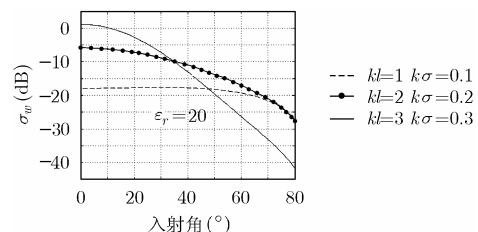


图 2 重现文献[1]中图 12.6(a)的结果, 证明模型的正确性

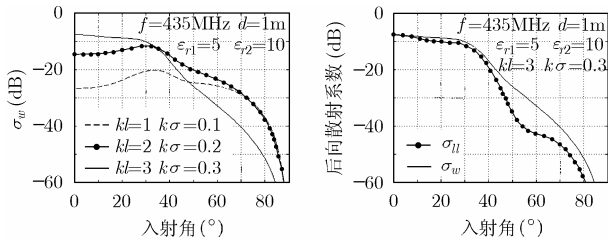


图 3 同极化后向散射系数随土壤粗糙度和入射角的变化

植被层考虑草和小麦两种植被的散射和衰减模型。草的散射机理较简单, 只需考虑刃状叶片层及土壤层的两项后向散射 σ_l, σ_g , Γ_l 为植被层的衰减系数。总的后向散射系数为

$$\sigma_{total} = \sigma_l + \Gamma_l \sigma_g \Gamma_l \quad (7)$$

草属密覆盖植被, 土壤散射分量项需考虑双程植被衰减; 衰减系数通过仿真模型计算并由测试验证, 以确定散射模型。测试方法为, 在植被的下方放置一个接收天线, 通过发射信号和接收信号计算出散射系数和衰减系数。小麦的后向散射需考虑植被的生长期, 在不同的生长期, 散射模型不同。

4 土壤的介电模型

土壤的复介电常数为 $\epsilon = \epsilon' - j\epsilon''$, 实部表示两种不同介质表面发生的波的折射和反射现象, 虚部的大小影响入射电磁波在土壤中的衰减(吸收和转化)。土壤的介电常数与电磁波频率、土壤类型、土壤湿度相关。土壤由黏土、沙土、有机物和水组成。水分为束缚水和自由水: 土壤的类型, 黏土颗粒表面积的大小确定束缚水和自由水在土壤水分中的比例; 而束缚水和自由水的比例又影响土壤湿度的变化率。所以在反演土壤湿度前, 首先要确定土壤类型。在UHF频段, 土壤的介电常数模型为^[4]

$$\epsilon = \epsilon' - j\epsilon'' \quad (8)$$

其中

$$\epsilon' = 1.15\epsilon'_m - 0.68 \quad (9)$$

$$\epsilon'_m = \left[1 + \frac{\rho_b}{\rho_s} (\epsilon_s^\alpha - 1) + m_v^{\beta'} \epsilon_{fw}^{\alpha'} - m_v \right]^{\frac{1}{\alpha}} \quad (10)$$

$$\epsilon'' = \left[m_v^{\beta''} \epsilon_{fw}^{\alpha''} \right]^{\frac{1}{\alpha}} \quad (10)$$

式中 $\rho_s = 2.66 \text{ g/cm}^3$ 为固态土壤颗粒密度; $\alpha = 0.65$ 为经验常数, β', β'' 为与土壤类型有关的经验常数。

$$\left. \begin{aligned} \beta' &= 1.2748 - 0.519S - 0.152C \\ \beta'' &= 1.33797 - 0.603S - 0.166C \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

S, C 分别是沙土和黏土质量含量; $\epsilon'_{fw}, \epsilon''_{fw}$ 分别是自由态水的介电常数的实部和虚部, 由德拜迟豫方程确定。

图 4 是用上面给出的土壤介电常数模型进行仿真得到的部分结果。图 4(a) 为频率为 435MHz 时, 4 种不同类型土壤相对介电常数的实部、虚部随体积分含水量的变化。从图可见, 在该频率下, 当土壤体积分含水量在 0.05-0.25 间, 不同土壤

类型, 介电常数的实部值在 5-20 范围, 虚部值在 0.5-5 内。沙土含量大时, 散射大而衰减减小; 而黏土含量大时, 反射小而衰减量大。

图 4(b) 给出在频率范围 0.3-1.3GHz 时, 第 1 种类型土壤湿度在 0.05 和 0.25 时, 介电常数的实部和虚部随频率的变化曲线。从图中看出: 实部随频率变化较小, 虚部随频率增加而减小。在湿度为 0.05 时, 实部为 6, 虚部介于 0.3-1.2 之间; 在湿度为 0.25 时, 实部在 19-20 范围内, 虚部介于 1.4-3.3 之间。其变化规律符合物理含义。在 VHF 频段, 土壤介电常数模型通过以上模型的频率延长线获得并加以修正, 并通过实验测试加以验证。

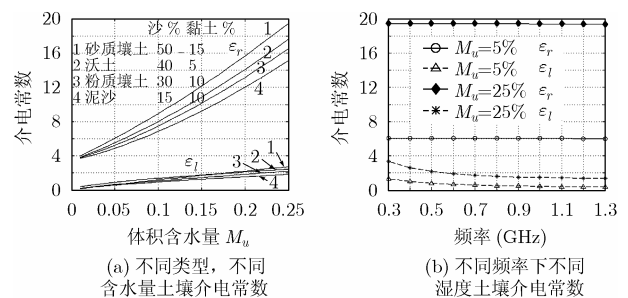


图 4 土壤复介电常数随土壤类型, 湿度, 频率的变化

5 仿真结果与讨论

根据建立的模型, 我们做了一些仿真计算。

例 1 (图 5) 入射波频率 $f=435\text{MHz}$, 第一层为土壤类型 4, 湿度为 5%, 介电常数为 $4.8949+j0.64337$, 第二层土壤 $S=42\%, C=8.5\%$, 湿度为 10%, 介电常数为 $8.9213+j1.3794$ 时, 介质分界面位于深度 2m 处时, 土壤的后向散射系数的仿真结果。

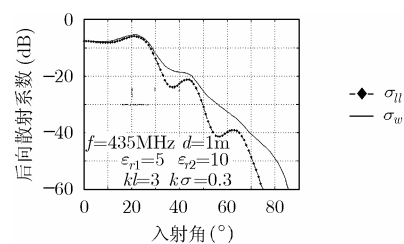


图 5 分层土壤的后向散射

例 2 (图 6) 下层含水量(介电常数)不变, 上层含水量(介电常数)改变, 介质分界面位于深度 2m 处时, 不同入射角时, 土壤的后向散射系数比的仿真结果, 可以看出, 后向散射系数比对入射角很敏感。

应用中提出的系统测量时, 得到的数据是后向散射系数, 从后向散射系数反演湿度信息, 属非线性估计问题, 这一过程分两步进行。第一: 反演出探测深度和介电常数; 对于双层土壤, 有 5 个未知量: 深度、两层土壤的介电常数的

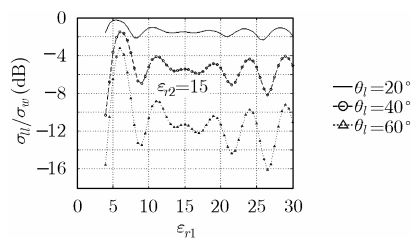


图 6 下层含水量不变, 上层含水量改变

实部和虚部, $x = \{d, \epsilon_1', \epsilon_1'', \epsilon_2', \epsilon_2''\}$, 解非线性方程组需要多角度的测量值。第二: 湿度反演; 湿度反演首先要知道土壤类型, 然后按土壤类型在相应的数据库中从介电常数反演湿度。在今后的应用中, 也不排除不知道土壤类型的情况, 这时反演工作会更复杂, 需要求解的未知量中, 除湿度外还包括每层土壤的类型参数, 即土壤中的黏土含量, 沙土含量, $y = \{m_{v1}, m_{v2}, S_1, C_1, S_2, C_2\}$ 。在目前的仿真工作中, 我们通过查表或查图形的方法从仿真数据中反演出湿度信息。在数据量很大的情况下, 需要使用一些反演算法: 最速下降法, 共轭梯度法, 牛顿法, 神经网络法, Davidon-Fletcher-Powell 法等。

本文主要提出双频多极化 SAR 测量深层土壤湿度的具体方法, 文中给出的深层土壤的散射模型和介电常数模型可以作为该系统测量深层土壤湿度的仿真工具, 用于建立模型数据库, 进行下一步的反演工作。由于文章篇幅所限, 深层土壤的散射模型及公式的详细推导和仿真结果另文给出。进一步的实验验证和有效的反演算法研究的工作正在进行, 我们将陆续有文章报道。

参 考 文 献

[1] Ulaby F T, Moore R K, and Fung A K. Microwave Remote

Sensing, Artech house, 1990, vol. 2, chapter 11.

- [2] Moghaddam M, Pierce L, and Tabatabaenejad A. Microwave observatory of subcanopy and subsurface: A low-frequency radar for global deep soil moisture measurements, IGARSS'04 Proceeding, Anchorage, AK, 2004: 500-502.
- [3] Zhou Zhengsu, Boerner V, and Sato M, Development of a ground-based polarimetric broadband SAR system for non-invasive ground-truth validation in vegetation monitoring. *IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing*, 2004, 42(9): 1803-1810.
- [4] Peplinski N R, Ulaby F T, and Dobson M C. Dielectric properties of soil in the 0.3-1.3GHz range. *IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing*, 1995, 33(3): 803-807.
- [5] Weng Cho Chew 著, 聂再平, 柳清伙译. 非均匀介质中的场和波. 北京: 电子工业出版社, 1992, 第二章.
- [6] Fuks I M. Radar contrast polarization dependence on subsurface sensing. Proc. IGARSS'98, Seattle, 1998: 1455-1459.

张晓娟: 女, 1964 年生, 副研究员, 主要研究方向为微波遥感、天线、计算电磁学、电磁散射与逆散射.

张文吉: 男, 1982 年生, 硕士生, 研究方向为微波遥感.

路晓荣: 女, 1980 年生, 硕士生, 研究方向为微波遥感.

康高健: 男, 1980 年生, 硕士生, 研究方向为微波遥感.

方广有: 男, 1963 年生, 研究员, 博士生导师, 中科院“百人计划”入选者, 主要研究方向为超宽带电磁学及其工程应用、损耗介质中隐蔽目标的电磁探测、微波成像新技术和新方法、电磁场数值计算方法等.