

## 分层土壤后向散射及其在深层土壤湿度探测中的应用

张文吉<sup>①②</sup> 张晓娟<sup>①</sup> 李芳<sup>①</sup>

<sup>①</sup>(中国科学院电子学研究所 北京 100190)

<sup>②</sup>(中国科学院研究生院 北京 100039)

**摘要:** 该文定量地分析了频率、入射角、土壤介电常数等主要因素对电磁波穿透性能的影响。计算了分层土壤后向散射系数与地表参数,介电常数,系统工作频率,极化方式,入射角的关系,并从理论上得到验证,为深层土壤湿度反演提供了一个比较合理的模型。文中结论对低频段(0.1-1GHz)合成孔径雷达系统设计及深层土壤湿度反演具有实际应用价值。

**关键词:** 微波遥感; 后向散射; 分层土壤; 深层土壤湿度

中图分类号: TP722.6

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2008)09-2107-04

## Backscattering from Multilayer Soil and Its Application to Deep Soil Moisture Estimation

Zhang Wen-ji<sup>①②</sup> Zhang Xiao-juan<sup>①</sup> Li Fang<sup>①</sup>

<sup>①</sup>(Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

<sup>②</sup>(Graduate University of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

**Abstract:** Influence of frequency, incident angle, soil dielectric on the penetration ability of electromagnetic wave is quantitatively analyzed. The backscattering from multilayered soil is studied. The model is validated against known solutions to special cases, which can be used in the inversion of deep soil moisture. The conclusion provides a good reference for the design of low frequency (0.1-1GHz) synthetic aperture radar and inversion of deep soil moisture.

**Key words:** Microwave remote sensing; Backscattering; Multilayer soil; Deep soil moisture

### 1 引言

土壤湿度的时空分布常作为陆面水资源形成、转化、消耗过程中的基本研究参数,是联系地表水与地下水的纽带,也是研究地表能量交换的基本要素,对气候变化起着重要的调节作用。土壤湿度同时也是研究植物水分需求、进行旱情监测、农作物估产等的重要指标。为实现大范围、动态测量土壤湿度,微波遥感方法在近二十年取得了很大发展。微波遥感测量土壤湿度通常有被动方式和主动方式。被动微波遥感主要是接收地物自身辐射的信号来进行研究;主动微波遥感则是利用雷达或散射计等发射微波信号,经地物反射后接收回波信号来分析地物的特性。其分别测量的物理量是亮温度和散射系数。

近二十年来采用微波遥感测量土壤湿度主要集中在对浅层土壤湿度的测量(0-15cm)。其主要原因有两方面:其一目前运行的 SAR 大多工作在 L, S, C, X 等频率较高波段,对土壤和植被穿透能力很弱;其二没有低频段(0.1-1GHz)适合的土壤散射模型。如果要得到深层土壤的湿度信息(如

0-2m),需要采用更低频率的电磁波。低频合成孔径雷达对土壤和植被都有较大穿透深度因而具有许多特殊应用:(1)探测、识别隐蔽在树林中或较深地下的军事目标;(2)深层土壤湿度或森林覆盖地区土壤湿度测量;(3)较深地下古城遗址探测;(4)森林生物量研究等。2000年瑞典农业大学 Fransson 等人利用瑞典 VHF 波段机载 SAR CARABAS-II 对森林生物量进行研究,得到雷达后向散射系数与森林生物量之间为近似线性关系<sup>[1]</sup>。2003年美国密西根大学 Moghaddam 等人利用自己研制的 SAR(Tower-based Radar)研究 VHF/UHF 波段裸露地表和森林散射特性,估测森林生物量和探测深层土壤湿度<sup>[2]</sup>。采用低频合成孔径雷达探测大范围尤其是深层地表土壤水分分布和含水量已成为当前遥感领域一个很活跃的方向<sup>[3]</sup>。

本文定量地分析了频率、入射角、土壤介电常数等参数对电磁波穿透性能的影响,给出了穿透深度与这些参数的数学关系。研究了分层土壤后向散射特性,并从理论上得到验证,为深层土壤湿度反演提供了一个比较合理的散射模型。

### 2 低频电磁波对土壤穿透深度

与土壤湿度紧密联系的电磁参数为土壤的介电常数。土壤为有耗媒质,介电常数通常为复数,设土壤复介电常数

$\varepsilon = \varepsilon' - j\varepsilon''$ 。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)。当电磁波入射到土壤表面时,一部分将产生反射,另外一部分透射入土壤内部。电磁波在介质中传播规律为  $E(z) = E(0)e^{-jkz}$ 。其中  $E(0)$  为电磁波进入介质时初始幅度,  $E(z)$  为传播距离  $z$  时的幅度,定义空气和分界面处  $z=0$ ,  $k = \omega\sqrt{\mu(\varepsilon' - j\varepsilon'')}$  为介质中的波数。传播常数为  $\gamma = jk = \alpha + j\beta$ , 其中  $\alpha$ ,  $\beta$  分别为衰减常数和相移常数:

$$\alpha = \frac{2\pi}{\lambda} \text{Im}(\sqrt{\varepsilon}), \quad \beta = \frac{2\pi}{\lambda} \text{Re}(\sqrt{\varepsilon}) \quad (1)$$

设在空气与土壤分界面电磁波功率为  $p(0)$ , 则电磁波在介质中传播距离  $z$  时的功率为

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

定义穿透深度为入射波功率衰减到初始功率的  $1/e$  时电磁波在介质中的传播距离, 则穿透深度:

$$d_{\text{penetration}} = 1/(2\alpha) \quad (3)$$

在这个深度电磁波功率比空气和介质分界面处功率低 4.34dB。

趋肤深度  $d_{\text{skin}} = 1/\alpha$  在这个深度电场强度的幅值比空气和介质分界面处场强低 4.34dB。穿透深度为趋肤深度的一半, 两者物理意义不同, 不可以等同。对土壤这类弱损耗媒质, 满足  $\varepsilon'' \ll \varepsilon'$ , 对式(2)作级数展开并应用  $\varepsilon'' \ll \varepsilon'$  得到

$$\alpha \approx \frac{\pi\varepsilon''}{\lambda\sqrt{\varepsilon'}} \quad (4)$$

沿电磁波传播方向上穿透深度:

$$d = \frac{1}{2\alpha} = \frac{\lambda\sqrt{\varepsilon'}}{2\pi\varepsilon''} \quad (5)$$

垂直方向穿透深度:

$$d_{\text{penetration}} = d\cos\theta_i = \frac{\lambda\sqrt{\varepsilon'}}{2\pi\varepsilon''} \cos[\arcsin(\sin\theta_i/\sqrt{\varepsilon})] \quad (6)$$

其中  $\theta_i$ ,  $\theta_t$  分别为入射角和透射角。

由式(6)可见电磁波对土壤穿透深度与波长(频率), 土壤介电常数, 入射角有关。土壤介电常数与土壤湿度、矿物质组成等有很大关系。Ulaby等人对土壤介电常数作了大量研究, 得到了不同含水量, 不同类型, 不同频率条件下土壤的介电常数模型<sup>[4]</sup>。利用此模型可以计算300MHz时3种不同类型土壤在不同含水量条件下的复介电常数。由这些介电常数结合式(5)可计算300MHz垂直入射电磁波对不同类型, 不同湿度土壤的穿透深度, 如图1所示。图2为频率为300MHz电磁波在不同入射角条件下对第一种类型土壤(湿度5%)的穿透深度。

频率为300MHz垂直入射电磁波对不同类型土壤在含水量从1%~25%时穿透深度为0.2m~1.8m, 在含水量低于1%的沙漠地区穿透深度更大, 可达2m~10m。在相同条件下, 频率越高电磁波对土壤穿透性能越弱。在同一频率条件下, 电磁波穿透深度视土壤类型、含水量而不同: 对同一种土壤其穿透深度随含水量增大而变小, 随入射角增大而减小, 对

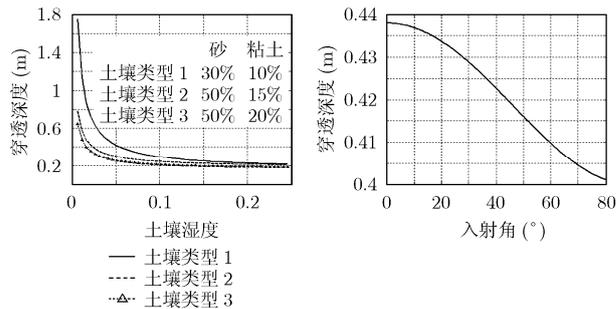


图1 不同湿度条件下穿透深度

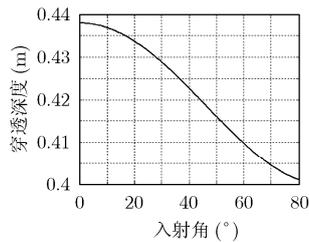


图2 不同入射角条件下穿透深度

不同类型土壤来说一般粘土含量越大穿透性能越弱。

### 3 分层土壤散射模型

目前运行的SAR对土壤的穿透深度很浅, 一般小于10cm, 此时向后散射主要来源于表层土壤的散射。所以传统的散射模型<sup>[5]</sup>(Kirchhoff模型、小扰动模型、积分方程模型、Oh模型、Dubois模型、Shi模型等)将土壤视为上层为空气, 下层为随机粗糙面的两层几何结构。当雷达工作频率较低时对土壤的穿透深度可达几米, 此时需要考虑下层地表的散射, 上层地表和下层地表间的二次散射。传统的粗糙面散射模型没有考虑下层地表的作用, 这样会带来较大误差, 也不可能提取下层地表的信息。为更精确描述多层土壤的散射, 使散射模型中包含下层地表的介电常数, 本文将土壤抽象为图3所示几何结构。

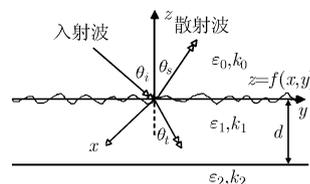


图3 三层土壤散射几何结构

此结构将土壤视为介电常数各异的多层平行介质, 最上层为空气, 介电常数为  $\varepsilon_0$ 。第2层为介电常数为  $\varepsilon_1$  的各向同性均匀介质, 第1, 2层的分界面为具有高度起伏  $z = f(x, y)$  的粗糙面。第3层为介电常数为  $\varepsilon_2$  的各向同性均匀介质, 每一层的磁导率均为  $\mu$ 。根据李宗谦等人的研究结果, 在VHF/UHF波段随机地表的均方根高度一般小于5cm, 相对该波段波长(1~3m)比很小<sup>[7]</sup>, 可将第二层和第三层土壤的分界面近似视为平滑表面。Fuks等人在研究雷达极化对比(radar contrast polarization)时对上述三层粗糙面散射模型做了初步介绍<sup>[6]</sup>。本文将在其基础上进一步研究电磁波对分层土壤的散射特性, 并将其应用到深层土壤湿度的反演中。

设入射平面电磁波为  $E_i = E_0 e^{ik_{ix}x + ik_{iy}y - ik_{iz}z}$ , 入射角为  $\theta_i$ , 每层的波数分别为  $k_0, k_1, k_2$ , 上层粗糙面均方根高度和相关长度分别为  $s, l$ 。对同极化雷达向后散射系数有<sup>[6]</sup>

$$\sigma_{hh} = 16k^4 \cos^4 \theta_i |\alpha_{Lhh}|^2 W(2k \sin \theta_i, 0) \quad (7)$$

$$\sigma_{vv} = 16k^4 \cos^4 \theta_i |\alpha_{Lvv}|^2 W(2k \sin \theta_i, 0) \quad (8)$$

其中  $W$  为粗糙面功率谱密度, 对表面高度分布为高斯函数的粗糙面, 其功率谱密度为

$$W(2k \sin \theta_i, 0) = \frac{\sigma^2 l^2}{4} \exp(-k^2 l^2 \sin^2 \theta_i) \quad (9)$$

对TE入射波式(7)中

$$\alpha_{Lhh} = \alpha_{shh} \left( \frac{1 + R_{hh}}{1 + R_{01}^h R_{hh}} \right)^2 \quad (10)$$

其中  $\alpha_{shh}$  为只有一层土壤时散射系数, 根据小扰动方法<sup>[8]</sup>:

$$\alpha_{shh} = \frac{k_{0z} - k_{1z}}{k_{0z} + k_{1z}} \quad (11)$$

其中  $k_{0z} = k_0 \cos \theta_i$ ;  $k_{1z} = \sqrt{k_1^2 - k_0^2 \sin^2 \theta_i}$ ;  $k_{2z} = \sqrt{k_2^2 - k_0^2 \sin^2 \theta_i}$ 。  $R_{01}^h$  为  $z=0$  处, 即上层地表的Fresnel反射系数:

$$R_{01}^h = \frac{k_{0z} - k_{1z}}{k_{0z} + k_{1z}} \quad (12)$$

$R_{hh}$  为  $z=-d$  处, 即下层地表的反射系数:

$$R_{hh} = R_{12}^h e^{i\varphi} \quad (13)$$

其中  $\varphi = 2k_1 d k_{1z} / k_0$  为电磁波在第1, 2层土壤之间传播的相移。

$R_{12}^h$  为下层地表 ( $z=-d$  处) Fresnel 反射系数:

$$R_{12}^h = \frac{k_{1z} - k_{2z}}{k_{1z} + k_{2z}} \quad (14)$$

对TM入射波式(8)中

$$\alpha_{Lvv} = \alpha_{svv} \frac{(1 + R_{vv})^2 \sin^2 \theta_i + (1 - R_{vv})^2 \cos^2 \theta_i}{(1 + R_{01}^v R_{vv})^2 (\sin^2 \theta_i + \cos^2 \theta_i)} \quad (15)$$

其中  $\theta_i$  为入射波的透射角, 由Fresnel反射定律有

$$\theta_t = \arcsin(\sin \theta_i / \sqrt{\epsilon_1})$$

$\alpha_{svv}$  为只有一层土壤时散射系数, 根据小扰动方法<sup>[8]</sup>:

$$\alpha_{svv} = \frac{(k_1^2 - k_0^2)(k_1^2 k_0^2 \sin^2 \theta_i + k_0^2 k_{1z}^2)}{(k_1^2 k_{0z} + k_0^2 k_{1z})^2} \quad (16)$$

$R_{01}^v$  为  $z=0$  处, 即上层地表的Fresnel反射系数:

$$R_{01}^v = \frac{\epsilon_1 k_{0z} - \epsilon_0 k_{1z}}{\epsilon_1 k_{0z} + \epsilon_0 k_{1z}} \quad (17)$$

$R_{vv}$  为  $z=-d$  处, 即下层地表的反射系数:

$$R_{vv} = R_{12}^v e^{i\varphi} \quad (18)$$

其中  $R_{12}^v$  为下层地表 ( $z=-d$ ) 的Fresnel反射系数:

$$R_{12}^v = \frac{\epsilon_2 k_{1z} - \epsilon_1 k_{2z}}{\epsilon_2 k_{1z} + \epsilon_1 k_{2z}} \quad (19)$$

为验证此模型的正确性, 令  $d \rightarrow \infty$  或  $\epsilon_1 = \epsilon_2$ , 此时该模型退化为两层散射模型, 其计算结果应与小扰动模型结果一致。图4为采用此模型重现Ulaby微波遥感第2卷<sup>[5]</sup>图12.6(a), (b)的结果, 验证了该模型的正确性。

#### 4 计算结果与讨论

采用此分层媒质散射模型可以计算不同条件下分层土壤的后向散射。图5为土壤深度为2m时, 在120MHz和

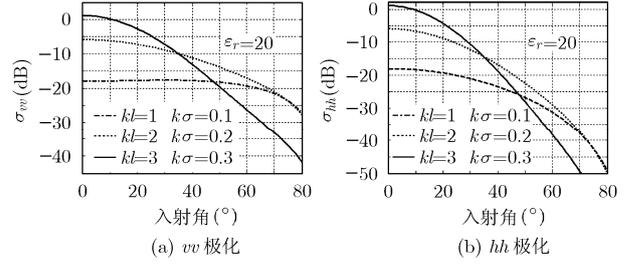


图4 重现文献[5]中图12.6(a),(b)验证该模型正确性

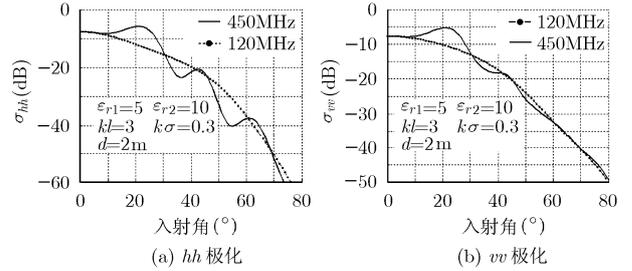


图5 相同深度不同频率条件下土壤后向散射系数

450MHz平面电磁波入射条件下分层土壤的后向散射系数。图6为不同深度时土壤后向散射系数。可见在相同深度条件下, 频率越高上下层之间的多次散射越强; 在相同频率条件下, 深度越大上下层之间的多次散射越强, 在图中表现为后向散射系数起伏越大, 这是符合物理规律的。

图7为入射波频率为450MHz, 深度为2m, 不同粗糙度条件下分层土壤的后向散射系数, 可见不同粗糙度的地表对后向散射影响是很大的。

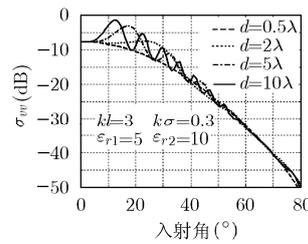


图6 不同深度时多层土壤后向散射

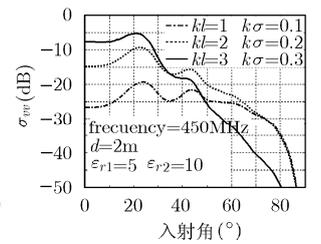


图7 不同粗糙度对后向散射的影响

图8(a)为上层土壤介电常数(含水量)不变, 深度为1m, 不同入射角条件下,  $\sigma_{vv}$  随下层土壤介电常数(含水量)变化的结果; 图8(b)为下层土壤介电常数(含水量)不变, 深度为1m, 不同入射角条件下,  $\sigma_{vv}$  随上层土壤介电常数(含水量)变化的结果。可以看出, 后向散射系数对入射角以及上下层土壤的介电常数(含水量)都很敏感。

本文计算结果对低频段合成孔径雷达系统设计及参数的选择(工作频率、极化方式、入射角等)具有实际应用价值。雷达后向散射系数与地物几何参数(相关长度、均方根高度), 目标介电常数, 系统参数等均有关。在工程应用中可以结

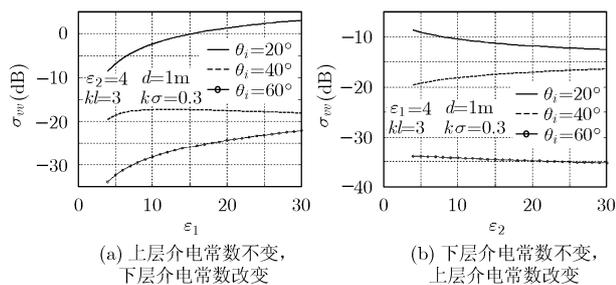


图8  $\sigma_w$  随上下层土壤介电常数的变化

合穿透深度和分辨率的要求选择合适的工作频率, 综合考虑雷达系统结构和被观测地区植被及地表情况选择适当的入射角和极化方式。应用文中分层土壤散射模型, 可反演出上下两层土壤介电常数, 再由 Ulaby 等人的介电常数模型<sup>[4]</sup>可得到每一层土壤含水量。限于文章篇幅, 实验数据的获取平台及结合分层土壤散射模型的反演方法在文献<sup>[9]</sup>中给出。

### 参考文献

- [1] Fransson J E S, Walter F, and Ulander L M H. Estimation of forest parameters using CARABAS-I1 VHF SAR data. *IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing*, 2000, 38(2): 720-727.
- [2] Moller D, Rodriguez E, Moghaddam M, and Hoffman J. A dual low frequency radar for sub-canopy and deep soil-moisture measurements, Big Sky Conference, Montana, 2003: 1102-1113.
- [3] 成跃进. P波段SAR的独特作用及意义[J]. 空间电子技术, 1996, 1: 41-42.
- [4] Peplinski N R, Ulaby F T, and Dobson M C. Dielectric properties of soils in the 0.3-1.3 GHz range. *IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing*, 1995, 33(3): 803-807.
- [5] Ulaby F T, Moore R K, and Fung A K. *Microwave Remote Sensing*. Massachusetts: Artech House, 1990, vol. 2, chapter 11.
- [6] Fuks I M. Radar contrast polarization dependence on subsurface sensing, Proc. IGARSS'98, Seattle, 1998: 1455-1459.
- [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): 243-248.
- [8] Kong J A. *Electromagnetic wave theory* [M]. New York: Wiley-Interscience, 1986, chapter 6.
- [9] 张晓娟, 张文吉, 路晓容, 康高健, 方广有. 双频多极化SAR测量深层土壤湿度. 电子信息学报, 2007, 29(11): 2711-2714.

张文吉: 男, 1982年生, 博士生, 研究方向为电波传播、电磁散射与逆散射.

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.

李芳: 女, 1944年生, 教授, 博士生导师, 中国电子学会会士, 主要研究兴趣为特殊介质中的场与波、电磁散射与逆散射、微波异向介质应用等.