

土壤含水量与其微波反射特性关系的研究

黄扬 杨习荣 耿淮滨

(中国科学院遥感应用研究所)

1985年6月28日收到

农作物生长状况的预测,产量的估计,农田灌溉管理,都需要较及时地掌握土壤的含水量,因而,用简便方法监测土壤的含水量,一直是农业管理的重要研究课题。在微波波段,土壤含水量与它的电特性有较明显的关系。因此,研究土壤不同含水量的微波反射特性和介电特性一直受到农林科技界的重视。为了指导在野外条件下土壤电特性的研究,我们先在室内人工控制的条件下进行了模拟研究。这样,一方面可探索测试和数据处理的方法,另一方面能在环境条件参数相对稳定的条件下,取得更精确的实验数据供野外测试时参考,这就是研究本课题的主要目的。

一、实验原理与过程

在室内用空间波法测试土壤的反射特性和介电常数,可以少破坏一些土壤的结构,保持土壤的原始状况,因而,它更接近于野外实地测量的结果。

研究用空间波法测试土壤介电常数,可以依据菲涅尔公式:

$$R_{\perp} = \frac{\cos\theta - \sqrt{\epsilon - \sin^2\theta}}{\cos\theta + \sqrt{\epsilon - \sin^2\theta}} \quad (1)$$

$$R_{\parallel} = \frac{\epsilon \cos\theta - \sqrt{\epsilon - \sin^2\theta}}{\epsilon \cos\theta + \sqrt{\epsilon - \sin^2\theta}} \quad (2)$$

式中, R_{\perp} 为电磁波的垂直反射系数, R_{\parallel} 为平行反射系数, θ 为人射角, ϵ 为物质的复介电常数。

由(1)式可得

$$\begin{aligned} & \frac{\cos\theta - \sqrt{\epsilon' - j\epsilon'' - \sin^2\theta}}{\cos\theta + \sqrt{\epsilon' - j\epsilon'' - \sin^2\theta}} \\ &= \frac{\cos\theta - \sqrt{\epsilon' - \sin^2\theta} \sqrt{1 - j\epsilon''/(\epsilon' - \sin^2\theta)}}{\cos\theta + \sqrt{\epsilon' - \sin^2\theta} \sqrt{1 - j\epsilon''/(\epsilon' - \sin^2\theta)}} \end{aligned}$$

式中, ϵ' 和 ϵ'' 分别表示复介电常数的实部和虚部。

$$|-j\epsilon''/(\epsilon' - \sin^2\theta)| < 1$$

所以

$$\sqrt{1 - j\epsilon''/(\epsilon' - \sin^2\theta)} = 1 - j\frac{\epsilon''}{2(\epsilon' - \sin^2\theta)} + O(\epsilon^2)$$

将上式展开,并舍去二阶最小量,得

$$R_{\perp} = \frac{\cos\theta - \sqrt{\epsilon' - \sin^2\theta} \left[1 - j\frac{\epsilon''}{2(\epsilon' - \sin^2\theta)} \right]}{\cos\theta + \sqrt{\epsilon' - \sin^2\theta} \left[1 - j\frac{\epsilon''}{2(\epsilon' - \sin^2\theta)} \right]}$$

两边取模,得

$$\begin{aligned} |R_{\perp}| &= \frac{\left| \cos\theta - \sqrt{\epsilon' - \sin^2\theta} \left[1 - j\frac{\epsilon''}{2(\epsilon' - \sin^2\theta)} \right] \right|}{\left| \cos\theta + \sqrt{\epsilon' - \sin^2\theta} \left[1 - j\frac{\epsilon''}{2(\epsilon' - \sin^2\theta)} \right] \right|} \\ &= \frac{\left| \cos\theta - \sqrt{\epsilon' - \sin^2\theta} + j\epsilon''/2\sqrt{\epsilon' - \sin^2\theta} \right|}{\left| \cos\theta + \sqrt{\epsilon' - \sin^2\theta} - j\epsilon''/2\sqrt{\epsilon' - \sin^2\theta} \right|} \end{aligned}$$

令 $P = \sqrt{\epsilon' - \sin^2\theta}$, 两边取平方,得

$$|R_{\perp}|^2 = \frac{(\cos\theta - P)^2 + \frac{\epsilon''^2}{4P^2}}{(\cos\theta + P)^2 + \frac{\epsilon''^2}{4P^2}} \quad (3)$$

同理

$$\begin{aligned} R_{\parallel} &= \frac{\epsilon \cos\theta - \sqrt{\epsilon - \sin^2\theta}}{\epsilon \cos\theta + \sqrt{\epsilon - \sin^2\theta}} \\ &= \frac{(\epsilon' - j\epsilon'') \cos\theta - \sqrt{\epsilon' - \sin^2\theta} \left[1 - j\frac{\epsilon''}{2(\epsilon' - \sin^2\theta)} \right]}{(\epsilon' - j\epsilon'') \cos\theta + \sqrt{\epsilon' - \sin^2\theta} \left[1 - j\frac{\epsilon''}{2(\epsilon' - \sin^2\theta)} \right]} \\ |R_{\parallel}|^2 &= \frac{(\epsilon' \cos\theta - P)^2 + \epsilon''^2 \left(\frac{1}{2P} - \cos\theta \right)^2}{(\epsilon' \cos\theta + P)^2 + \epsilon''^2 \left(\frac{1}{2P} + \cos\theta \right)^2} \quad (4) \end{aligned}$$

(3)和(4)式可进一步化简为:

$$(\cos\theta - P)^2 + \frac{\epsilon''^2}{4P^2} - |R_{\perp}|^2 \left[(\cos\theta + P)^2 + \frac{\epsilon''^2}{4P^2} \right] = 0 \quad (5)$$

$$\begin{aligned} &(\epsilon' \cos\theta - P)^2 + \epsilon''^2 \left(\frac{1}{2P} - \cos\theta \right)^2 \\ &- |R_{\parallel}|^2 \left[(\epsilon' \cos\theta + P)^2 + \epsilon''^2 \left(\frac{1}{2P} + \cos\theta \right)^2 \right] = 0 \quad (6) \end{aligned}$$

由菲涅尔公式可以看出,反射系数 R_{\perp} 和 R_{\parallel} 只与电磁波的人射角及反射体的介电常数有关。当入射角是已知的,则在测出反射系数后,即可由菲涅尔公式解出介电常数。

实际上,入射波不是以一点投射在平面上,而是以立体角为 Ω 的一束波投射在反射面上。凡波束照射内的各面积元,均成为二次辐射源,辐射出球面波。各面积元到接收点的距离不同,它们对接收点的场强的贡献也不一样。

由于反射面内各面积元到接收点的距离不同,因而它们的相位也不同。定量计算证明,反射面内各等相面形成一个个椭圆带,相邻两个圆带的相位差为 π 。设其半径由小到大的每个圆带的场强为 $E_0, E_1, E_2, \dots, E_n$, 则, $E_0 > E_1 > E_2 > \dots > E_n$ 。这些圆带叫做菲涅尔带,第一个圆带及其相邻的几个圆带,对创立接收的辐射场来说,是最重要的区域。计算表明,取 9 个菲涅尔区的二次辐射场强的结果,与取全部菲涅尔带二次辐射场强的结果,相差不超过 15%,就是说,9 个菲涅尔区以外的区域的二次辐射场强,只占接收点场强总量的 15% 以下。我们在设计实验用的样品箱时,考虑了这一因素。样品箱及样品的尺寸,满足远大于第 9 个菲涅尔带的直径。

根据在不同的人射角下,对干燥土壤反射系数的多次测定,选定了 10 度和 15 度两个角度,作为测试不同含水量土壤反射系数的测量角度。其主要原因是,受条件所限,微波吸收箱不可能做得很大,因而当入射角稍大时,因波束受箱体的遮挡,而影响测量效果。

为了使实验更接近实际的土壤状况,将样品放在一个大的微波吸收箱内,用空间波法进行测试。我们在样品上覆盖一块平铝板,取其反射电场强度为一个单位,从样品得到的反射强度,与此相比即得反射系数的模 $|R|$ 。图 1 为实验框图。

样品的制取 本实验取砂土为工作样品。考虑到电波穿透干燥土壤的深度约为三个波长,因此,取样品厚度为 14cm。样品尺寸为 60cm × 80cm。先将土块敲成细末状,再倒入样品盒内,使其表面为光滑面。然后分数次均匀洒水,到水份基本饱和为止。用直径等于 2cm 的试管在三处取土样,同时记下环境温度和湿度。按土壤自然含水量测定规范,测量并计算出其含水量的重量百分比。

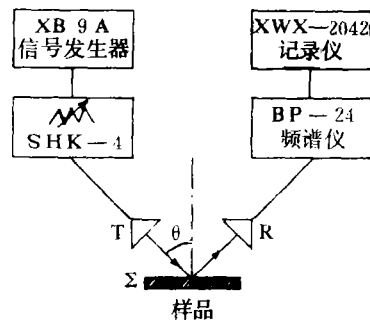


图 1 实验框图

Fig. 1 The Experiment frame Figure

入射角度的选取 在 $0-45^\circ$ 的范围内,对干燥土壤进行测试。由于吸收箱的尺寸有限,当入射角大于 15° 时,波束将被木箱箱壁遮挡,使照射能量急剧下降。因而,实际上只在 10° 和 15° 两个人射角时进行实验。

试验在 HH、VV 两种极化状态下进行。土壤水份让其自然蒸发,视蒸发情况每日或

隔日测一次,直至土壤基本干燥为止。表 1 为实验数据。

二、测试 结果

以土壤含水量为 x 轴,做出 $|R_{\parallel}|$ 、 $|R_{\perp}|$ 随土壤水份变化的曲线(图 2 和 3)。曲线基本呈线性。其回归直线方程如下:

表 1 实验数据
Table 1 Measured Data

日期 (上午)	环境 温度 (°C)	环境 湿度 (%)	土 壤 含水量 (%)	10°		15°	
				$ R_{\parallel} $ 平均	$ R_{\perp} $ 平均	$ R_{\parallel} $ 平均	$ R_{\perp} $ 平均
1983 年							
12.5	16.5	30	27.01	0.7308	0.7203	0.8961	0.9413
12.6	16	39	22.42	0.7188	0.7498	0.5768	0.5428
12.7	17.5	32	22.32	0.5966	0.4800	0.6235	0.6802
12.8	17	31	22.59	0.4949	0.5214	0.6371	0.5790
12.10	16	29	20.33	0.4447	0.4689	0.5672	0.6517
12.12	15	25	18.62	0.3898	0.5307	0.4628	0.6313
12.14	15	25	17.33	0.2146	0.4952	0.4576	0.5010
12.16	14.5	30	16.39	0.4128	0.4039	0.4582	0.5000
12.19	14.5	30	13.37	0.2483	0.3787	0.2758	0.4329
12.22	14	28	11.78	0.1545	0.3577	0.3195	0.4288
12.27	15	25	7.72	0.0212	0.2474	0.2620	0.3533
12.30	16	23	5.97	0.0574	0.2469	0.2317	0.2970
1984							
1.5	15	25	5.68	0.0277	0.1528	0.0495	0.2032
1.9	14	23	4.52	0.0678	0.1958	0.0336	0.2201

表 2 计算求出的 ϵ' 和 ϵ'' 值
Table 2 Values of ϵ' and ϵ'' in Computation

含水量(%)	4.52	5.68	5.97	7.72	11.78	13.37	16.39	17.33	18.62	20.33	22.32	22.42
ϵ'	1.950	1.950	1.996	2.160	3.637	4.685	7.336	8.360	10.522	14.740	20.087	21.433
ϵ''	0.116	0.112	0.128	0.203	0.254	0.433	0.608	0.989	1.102	1.685	4.765	3.028

$$y = \begin{cases} \left. \begin{aligned} &-0.176 + 0.033x && \theta = 10^\circ \\ &-0.076 + 0.031x && \theta = 15^\circ \end{aligned} \right\} |R_{\parallel}| \\ \left. \begin{aligned} &0.076 + 0.024x && \theta = 10^\circ \\ &0.096 + 0.027x && \theta = 15^\circ \end{aligned} \right\} |R_{\perp}| \end{cases}$$

由图可见,入射角为 15° 的反射系数,大于 10° 时的反射系数。由此可知,15° 时的反射强度较 10° 时更接近峰值。将 15° 时的 $|R_{\parallel}|$ 和 $|R_{\perp}|$ 值代入方程(5)和(6)。用下降法解该非线性方程组,可求出介电常数值(表 2,图 4)。其回归方程如下:

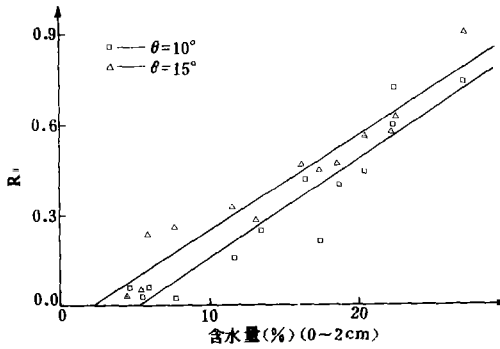


图 2 土壤含水量与 $|R_{\parallel}|$ 的关系曲线

Fig. 2 The Relation Curves of $|R_{\parallel}|$ with Soil Moisture

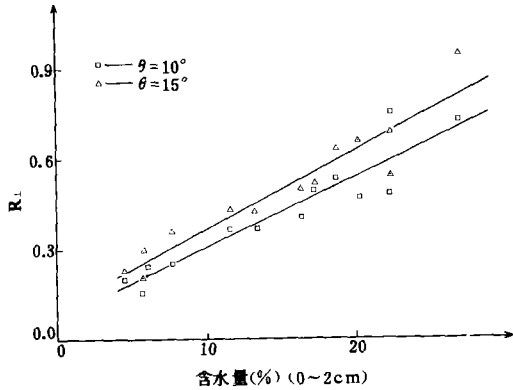


图 3 土壤含水量与 $|R_{\perp}|$ 的关系曲线

Fig. 3 The Relation Curves of $|R_{\perp}|$ with Soil Moisture

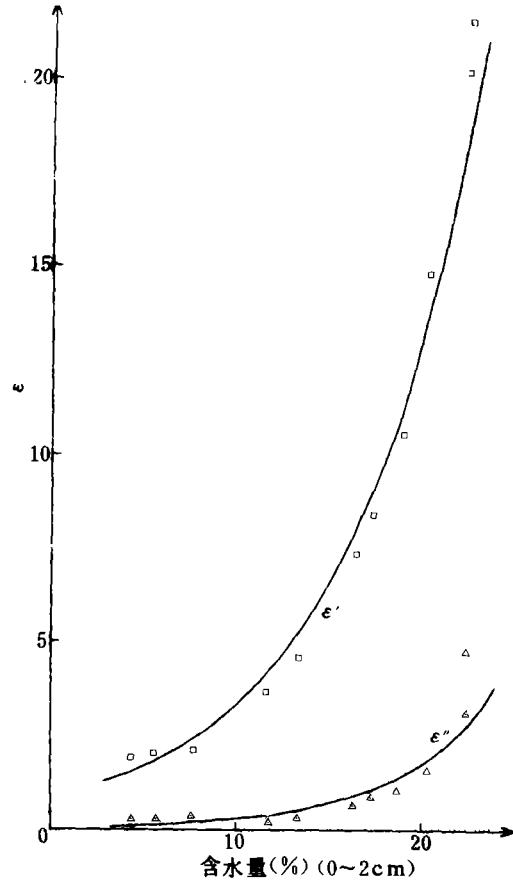


图 4 土壤含水量与 ϵ' 和 ϵ'' 的关系曲线

Fig. 4 The Relation Curves of ϵ' and ϵ'' with Soil Moisture

$$y = \begin{cases} 0.840 \times 1.148^x & (\epsilon') \\ 0.039 \times 1.210^x & (\epsilon'') \end{cases}$$

在实验中产生误差的因素很多,主要有:

- (1) 信号源发射不稳定,产生频漂,有频移误差。
- (2) 喇叭天线支架不够稳固,每次角度变化后,不能较好地重复,且天线的方位不易调准确,有位置上的偏差。
- (3) 土壤的介电常数与环境温度、湿度都有关。在整个实验过程中,未对这两个因素进行控制,影响实验结果。

此外,在数据计算中,有的取的近似值而且含有误差,但与前面提到的各种产生误差的因素相比,计算产生的误差是比较小的。

三、结 束 语

带来很大的方便。

土壤介电常数随土壤湿度变化的趋势与其它资料上的结果基本一致^[1-4]。从图 4 可以看出,介电常数,特别是 ϵ' 随土壤含水量的变化十分明显,并可以看出复介电常数的变化趋势。

在这一实验的基础上,我们进行了野外测试,并取得了良好的结果^[5]。

参 考 文 献

- [1] M. C. Dobson, E. Kouyaté and F. T. Ulaby, A Reexamination of Soil Textural Effects on Microwave Emission And Backscattering Remote Sensing Laboratory University of Kansas Center for Research Inc. Kansas 660452969.
- [2] M. C. Dobson and F. T. Ulaby, Microwave Backscatter Dependence on Surface Roughness, Soil Moisture, and Soil Texture: Part 3-Soil Tension, *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, Vol. GE-19, No. 1, pp. 51-61 Jan., 1981.
- [3] 汪一飞译([美]理查德 K. 穆尔著),《遥感手册》第三分册,144—149 页,国防工业出版社,1982 年。
- [4] Thomas J. Schmugge, Remote Sensing of Soil Moisture: Recent Advances, *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, Vol. GE-21, No. 3, pp. 336—338, July, 1983.
- [5] 黄扬等,土壤湿度的微波散射特性研究。遥感信息,1(1),1986。

The Relationship of the Microwave Reflective Characteristic to Soil Moisture

Huang Yang Yang Xirong Geng Huaibin

(Institute of Remote Sensing Application, Academia Sinica)

Abstract

To measure the soil dielectric Constant at X band by Means of Space-Wave Measurement is introduced in this Paper. It can well simulate the Fieldwork Condition. The Paper sums up the Relationship of the Microwave Reflective Characteristic and dielectric Constant to Soil Moisture: (1) the Reflective Coefficient presents linear Relationship with Soil Moisture. (2) The Soil dielectric Constant likely presents exponential Change with Soil Moisture Increase.