

# 微波遥感裸露土壤和植被覆盖土壤 含水量的研究\*

赵昌龄 郝卫星 李生平 李晓红

(中国科学院遥感应用研究所, 100101)

古健康 李桂奎

(中国电波传播研究所)

## 摘 要

用X波段微波散射计研究了裸露土壤,有植被(红薯、大豆和花生)覆盖的土壤含水量与微波后向散射系数之间的关系,对X波段与C波段的结果做了分析对比。结果表明:在微波遥感裸露土壤含水量方面,入射角 $\theta = 6^\circ$ 时灵敏度 $S_0$ 最大;在 $\theta = 45^\circ$ 时, $S_0 = 0$ ;在 $\theta > 45^\circ$ 时,土壤含水量增大,而后向散射系数反而变小。在小入射角时,两个波段的精度相差不大。微波遥感在有植被覆盖的土壤含水量方面,X波段比C波段的灵敏度和精度要低,但是只要工作参数选择适当,就能达到一定的灵敏度和精度。应用本文提出的估算模型,X波段土壤含水量的估算误差大约为 $\pm 25\%$ 左右。

**关键词** 微波遥感,土壤含水量,微波后向散射系数

## 一、引 言

地表层土壤含水量的数据,对农作物产量预测,合理灌溉,气象数值预报、洪水灾害预报、监测和损失的调查都有着重要意义。在实际应用中,往往需要大面积的动态监测资料,依靠常规多点实地采集土壤样品进行测试分析的办法,显然是不能满足要求的,只有依靠遥感技术,尤其是微波遥感技术才能取得好的效果。微波波段,水的介电常数 $\epsilon$ 接近于80,而干土的 $\epsilon$ 仅为3—5,湿土的 $\epsilon$ 可高达20以上。正是介电常数的明显差别,而使得雷达后向散射系数的差异可大于10dB<sup>[1]</sup>以上,在微波遥感图像上,不同湿度的土壤将以不同的灰度反映出来。

在国外,研究裸露土壤(以下简称裸土)和植被覆盖下土壤含水量与微波方向散射系数之间的关系,已经有十多年了,取得了不少成果<sup>[2-11]</sup>。在我国,黄扬等<sup>[1]</sup>开展过裸土含水量的微波散射特性的研究,取得了较好的效果。理论和实验都充分证明,微波后向散射

\* 参加本项工作的还有吕永红、冯文甫、程瑞庭、岳小平等同志,在此向他们表示感谢。

系数与土壤含水量之间有着密切联系,微波遥感技术对土壤含水量的估测有着广阔的应用前景。

土壤含水量与微波后向散射系数之间不存在简单的函数关系,它还与地表随机粗糙度、土壤组成(土壤类型)、植被覆盖和电磁波的频率、入射角、极化等因素有关。研究有植被覆盖情况下土壤含水量的微波响应,困难是较大的,国内尚未见有人做过这方面的工作。国外的研究,许多都是在 C 波段上开展的, F. T. Ulaby 等就是在 C 波段(频率: 4.25—4.75GHz)研究了植被覆盖下土壤含水量的雷达响应<sup>[1]</sup>。他们认为 C 波段, HH 极化,小入射角( $\theta = 10^\circ$ )是雷达遥感土壤含水量的最佳参数。

目前,国内只有 X 波段的合成孔径成像雷达和真实孔径成像雷达,有人已在利用 X 波段的雷达图像,开展微波遥感土壤含水量的研究工作。那么, X 波段成像雷达是否能用来估测植被覆盖下土壤含水量呢?本文总结了大量的实验数据,分析了 X 波段微波后向散射系数与裸土含水量之间的关系,详尽地研究了各种类型植被对微波遥感土壤含水量的影响,从而证明 X 波段雷达图像在微波遥感土壤含水量方面具有的能力。

## 二、 试验研究方法

1989 年 5 月 10 日—6 月 8 日,我们在河南省新乡市郊区对裸土地块进行了微波后向散射系数与土壤含水量的测量。1989 年 8 月 4 日—9 月 27 日又在河南省封丘县潘店中国科学院南京土壤研究所生态试验站,分别对红薯、大豆和花生覆盖的地块进行同样的测量,在工作中所使用的测量系统是由上海电子物理研究所研制的 X 波段(频率为 9375MHz,波长为 3.2cm)微波散射计,入射角可以步进改变( $0^\circ$ — $48^\circ$ ,步进间隔  $6^\circ$ ),方位角可以连续改变。

在实验中我们注意到了土壤组成,地表随机粗糙度给土壤含水量的微波响应带来的影响。为了减小土壤组成的影响,我们用田间持水百分比  $m_f$  来表示土壤含水量。考虑到电磁波对含水土壤的穿透是很有限的,因此在测量土壤含水量时,只采集 0—5cm 层厚的土壤作为测量含水量的样品。一些研究表明,入射角在  $5^\circ$ — $17^\circ$  时,地表随机粗糙度对土壤含水量的测量影响最小。在不同波段上,最佳入射角是有些差别的,一般认为小的入射角较为有利。在本研究中,对于有植被覆盖的情况,主要讨论入射角为  $6^\circ$  的情况。

## 三、 结果与讨论

### (一) 裸露土壤

一般裸土含水量的遥感要比植被覆盖下的简单。通过实验求出后向散射系数对土壤含水量的偏导数  $S_i = \frac{\partial \sigma_i^0}{\partial m_f}$ , 从对  $S_i$  的分析中即可看出在什么条件下  $\sigma_i^0$  将对土壤含水量  $m_f$  最为敏感。田间持水百分比  $m_f$  可以表示为:

$$m_f = \frac{100m_s}{FC_s} \% \quad (1)$$

式中  $m_s$  是 0—5cm 层厚土壤重量含水量,单位为 g 水/克干土重,  $FC_s$  是  $\frac{1}{3} \times 10^3 \text{Pa}$

张力时的土壤重量含水量,通常称为田间持水量。通过土壤组成分析,可以获得沙土粒和粘土粒的含量,根据 Schmutge<sup>[12]</sup> 提供的经验公式即可求  $FC_s$ :

$$FC_s = 25.1 - 0.21S + 0.22C \quad (2)$$

这里  $S$  和  $C$  分别表示土壤中沙土和粘土的含量。

对实验得到的数据,用最小二乘线性回归法,可以得到如下方程:

$$\sigma_s^0(\theta) = A \cdot m_s + B \text{ dB} \quad (3)$$

因此,  $S_s = \frac{\partial \sigma_s^0}{\partial m_s} = A$ .

图 1 所示的是 0—5cm 层厚的裸土田间持水百分比  $m_s$  对微波后向散射系数  $\sigma_s^0$  的响应,不同入射角的回归方程的有关参数列于表 1:

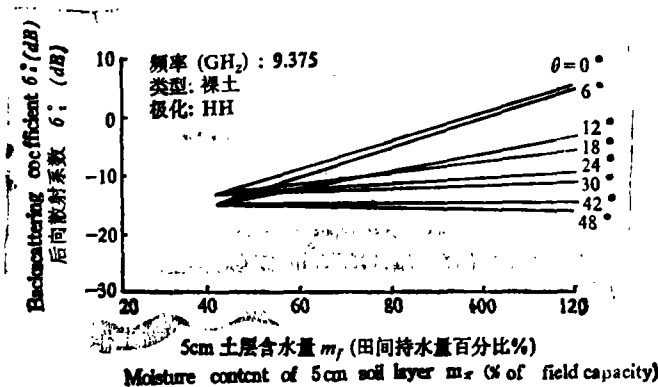


图 1 裸土含水量的雷达响应

Fig. 1 Radar response to soil moisture of bare fields

表 1 X 波段不同入射角的回归公式(3)的参数

Table 1 Parameters of regression on equation (3) for different incidence angles at x-band

$\theta(^{\circ})$	0	6	12	18	24	30	42	48
$A$	0.245	0.261	0.114	0.100	0.045	0.028	0.005	-0.005
$B(\text{dB})$	-23.63	-25.83	-18.36	-17.88	-15.21	-14.64	-15.14	-15.32

从数据的分析中可以看到,  $S_s$  在  $\theta = 6^{\circ}$  时有最大正值,随  $\theta$  增大,则  $S_s$  减小,在  $\theta = 45^{\circ}$  左右时  $S_s = 0$ ,  $\theta$  继续增大则  $S_s$  变为负值。类似情况在其它波段也已观察到。F. T. Vlaby 等人在 1974—1975 年间测得的结果<sup>[13]</sup>是: 在  $f = 4.7\text{GHz}$  和  $7.1\text{GHz}$  时,  $S_s$  都在  $\theta = 0^{\circ}$  时有最大正值,随  $\theta$  增大则  $S_s$  减小,当  $\theta$  分别为  $40^{\circ}$  和  $20^{\circ}$  时,  $S_s = 0$ 。随后,  $S_s$  变为负值,即含水量增大测得的后向散射系数反而变小。

这里采用线性回归法来处理实验数据, 是因为  $\sigma_s^0(\text{dB})$  与功率反射系数  $\Gamma(\text{dB})$  成正比,而  $\Gamma(\text{dB})$  与  $m_s$  是近似为线性关系<sup>[9]</sup>。

从表 1 数据可知,  $\theta = 6^{\circ}$  时回归方程可以表示为:

$$\sigma_s^0 = 0.261 m_s - 25.83, \text{ dB} \quad (4)$$

我们可以进一步把(4)式用自然单位  $m^2 \cdot m^{-2}$  来表示,  $\sigma_s^0(\text{dB})$  与  $\sigma_s^0(m^2 \cdot m^{-2})$  的转换关系为:

$$\sigma_i^0(dB) = 10 \lg \sigma_i^0(m^2 \cdot m^{-2}) \quad (5)$$

由此可得:

$$\sigma_i^0 = 0.003 \exp(0.060 m_f), \quad m^2 \cdot m^{-2} \quad (6)$$

## (二) 植被覆盖下的土壤

有植被覆盖时,对土壤含水量的遥感是比较复杂的。电磁波从发射到接收,在传输过程中要经受植被的双程衰减。此外,植被层本身的体散射也形成了后向散射的一部分。在这里,假设由土壤和植被产生的后向散射分量,在接收天线处是非相干相加的,而且忽略了多重散射波造成的影响。这样,有植被覆盖土壤总的后向散射系数可以表示为:

$$\sigma_v^0(\theta) = \sigma_s^0(\theta) + \frac{\sigma_v^0(\theta)}{L^2(\theta)}, \quad m^2 \cdot m^{-2} \quad (7)$$

上式中  $\sigma_v^0(\theta)$  为植被和覆盖下土壤的后向散射系数;  $\sigma_s^0(\theta)$  为植被的后向散射系数;  $\sigma_s^0(\theta)$  为土壤的后向散射系数;  $L(\theta)$  为植被层的单程损耗因子;  $\theta(^{\circ})$  为入射角。

根据(7)式,只要求出有植被土壤的后向散射系数  $\sigma_v^0(\theta)$  与裸土后向散射系数  $\sigma_s^0(\theta)$  之间的函数关系,即可得到某种类型植被后向散射系数  $\sigma_v^0(\theta)$  和电磁波受到植被双程衰减的  $L^2(\theta)$  值。必须强调指出,  $L^2(\theta)$  是一项重要参数,该参数反映了电磁波对植被的穿透能力。本文对红薯、大豆和花生等三种不同植被覆盖情况,应用(6)式和(7)式估算  $\sigma_v^0(\theta)$  所产生的影响。

根据以上所述,可以从红薯地块和裸土地块的实验数据推导出  $\sigma_{i,p}^0(m^2 \cdot m^{-2})$  与  $\sigma_s^0(m^2 \cdot m^{-2})$  的关系,  $\sigma_s^0(m^2 \cdot m^{-2})$  是根据(6)式由测出的  $m_f$  值计算出来的。由此可以得到:

$$\sigma_{i,p}^0 = 0.146 + 0.786 \sigma_s^0, \quad m^2 \cdot m^{-2}, \quad \theta = 6^{\circ}, \quad r = 0.54 \quad (8)$$

式中  $r$  是相关系数。 $\sigma_{i,p}^0$  与  $\sigma_s^0$  的关系如图 2 所示。将(8)式与(7)式进行比较可以得到:

$$\frac{\sigma_{i,p}^0}{L^{-2}} = 0.146 \quad m^2 \cdot m^{-2}$$

$$\frac{\sigma_s^0}{L^{-2}} = 0.786$$

对大豆和花生地块可以做相同的分析,其结果如表 2 所示,表中  $N$  表示实验数据点数。如果忽略了各类作物之间的差异,把它们当作同一类作物来处理,那么它们的后向散射系数  $\sigma_i^0$  与  $m_f$  之间的关系如图 3 所示。用处理红薯地块的方法,可以求得  $\sigma_v^0(m^2 \cdot m^{-2})$  与  $\sigma_s^0(m^2 \cdot m^{-2})$  的关系:

$$\sigma_v^0 = 0.226 + 0.321 \sigma_s^0, \quad m^2 \cdot m^{-2}$$

(全部作物)

$$\theta = 6^{\circ}, \quad r = 0.36 \quad (9)$$

由此得到:

$$\frac{\sigma_v^0}{L^{-2}} = 0.226 \quad m^2 \cdot m^{-2}$$

$$\frac{\sigma_s^0}{L^{-2}} = 0.321$$

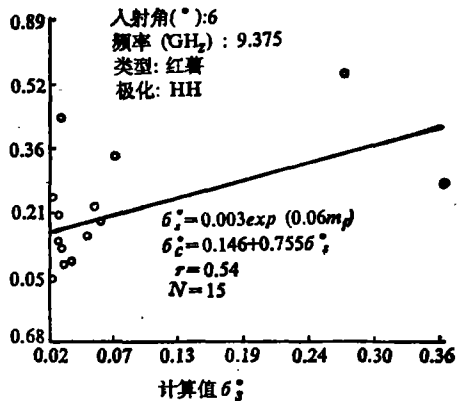


图 2 红薯地块与裸土地块的后向散射系数的关系

Fig. 2 Relationship Between the backscattering coefficients of sweet potato-covered fields and bar soils

(全部作物)

表 2 X 波段植被后向散射系数的回归结果

Table 2 Results of regression of vegetation backscattering coefficients at X-band

N	作物类型 Crop type	$\overline{\sigma}_v^0 (m^2 \cdot m^{-1})$	$\overline{L^2} (dB)$	r
15	红薯	0.146	1.05	0.54
14	大豆	0.105	1.71	0.50
16	花生	0.125	13.28	0.35
45	三种作物	0.226	4.93	0.49

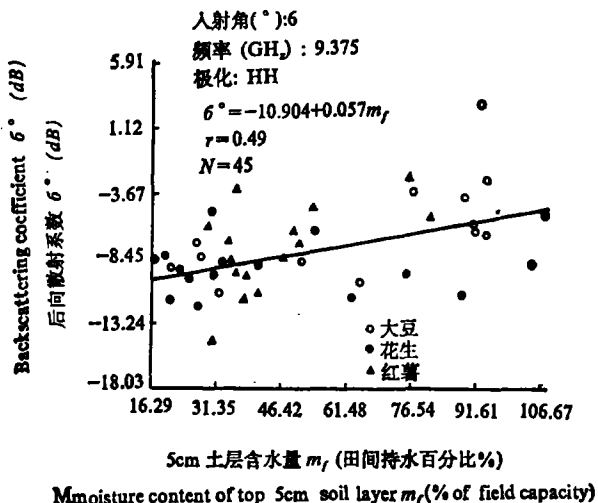


图 3 植被覆盖地块后向散射系数与土壤含水量的关系

Fig. 3 Relationship between the backscattering coefficients and soil moisture of vegetation-covered fields

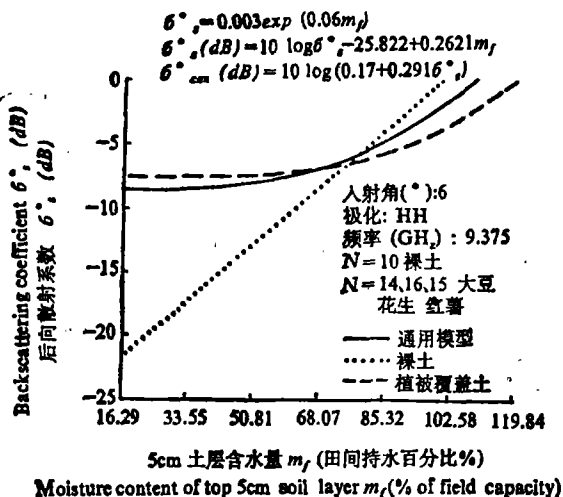


图 4 裸土和有植被覆盖土壤的雷达响应的比较  
Fig. 4 Comparison of the radar responses to soil moisture between bare and vegetation-covered fields

根据(9)式和(6)式, 可以分别求出  $\sigma_v^0$  与  $m_f$ ,  $\sigma_h^0$  与  $m_f$  的关系, 如图 4 所示。从图中可以看出, 当  $m_f$  较小时, 植被对土壤含水量的估测影响较大; 当  $m_f$  较大时, 则植被的影响大大减弱。有植被覆盖土比裸土的电平平均低 4.93dB。这个数值是平均值, 因为在作物生长期, 含有的水份较多, 植被双程衰减因子  $L^2$  值就比较大。而作物在接近收获期时, 水份失去许多,  $L^2$  值就小。

(三) 估测精度

为了判读雷达图像上有关土壤含水量的信息, 我们需要一个既适用于裸土又适用于有植被覆盖土的比较简单的估测模型, 在这里我们提出一个综合的估

算模型：

$$\sigma_m^0 = 0.133 + 1.34 \times 10^{-3} \exp(0.06m_f) \tag{10}$$

$\sigma_m^0$  与  $m_f$  的函数关系如图 4 所示，它介于  $\sigma_s^0$  与  $\sigma_v^0$  之间。

由 10 式可求得：

$$m_f = 110.3 + 16.7 \ln(\sigma_m^0 - 0.133) \tag{11}$$

因此，只要雷达图像能定量地提供  $\sigma^0$  值，代入(11)式，即可估算出土壤含水量。

从应用角度来看，估算模型的精度是大家所关心的。我们定义估算误差为：

$$\Delta m_f = \hat{m}_f - m_f$$

由此，可以估算出裸土与有植被覆盖土壤含水量的估测误差，其结果如图 5 所示。当  $m_f < 75\%$  时，裸土的估测值偏低，而有植被覆盖的值偏高。当  $m_f > 75\%$  时则相反。

现在我们用实测的数据来分析估测精度。裸土和有植被覆盖土壤含水量的估测精度分别以图 6 和图 7 表示。在 90% 置信度内，裸土的估测误差为 +33% 和 -10%。而有植被覆盖土约为 +40% 和 -25%。误差主要来自：(1) 田间持水百分比的测量误差；(2) 后向散射系数  $\sigma^0$  的测量误差，包括地表粗糙度和植被覆盖给  $\sigma^0$  测量带来的误差。我们估计，如果上述测量误差源能得到有效控制的话，估测误差将不大于  $\pm 25\%$ 。

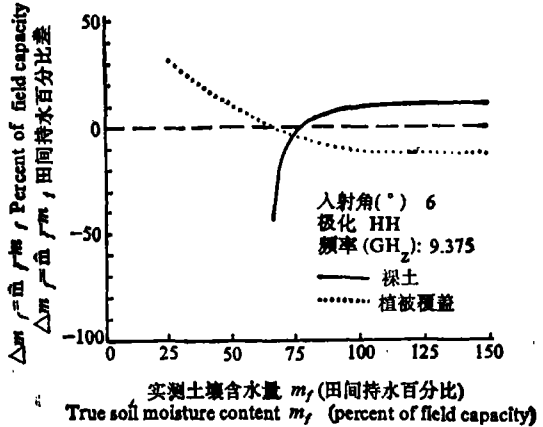


图 5 土壤含水量估测精度和  $m_f$  值  
Fig. 5 Soil moisture prediction accuracy versus  $m_f$

误差主要来自：(1) 田间持水百分比的测量误差；(2) 后向散射系数  $\sigma^0$  的测量误差，包括地表粗糙度和植被覆盖给  $\sigma^0$  测量带来的误差。我们估计，如果上述测量误差源能得到有效控制的话，估测误差将不大于  $\pm 25\%$ 。

#### (四) X 波段与 C 波段的比较

在遥感裸土含水量方面，本研究的结果与 F. T. Ulaby<sup>[7]</sup> 的结果相比，其相关系数分别为 0.81 与 0.85，因此只要有关参数选择适当，两个波段的水平基本相当。

有植被覆盖土的情况，两个波段则相差较大。表 3 列出 C 波段的有关数据<sup>[11]</sup>。从表 2 和表 3 比较来看，X 波段的相关系数低，双程衰减平均比

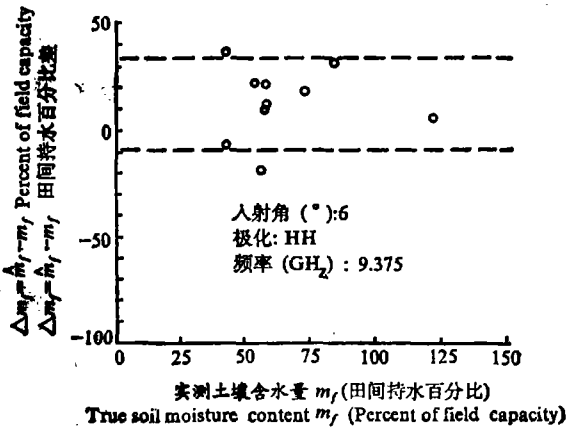


图 6 裸土含水量的估测误差  
Fig. 6 Prediction error for bare soil

C 波段大 5—6 倍。同样，用大豆的数据来比较，X 波段的  $\sigma_s^0$  和  $L^2$  值都要比 C 波段的大，反映了随着微波波长变短，植被的影响明显比植被覆盖下土壤的影响增强了。

总之，微波波长越短，穿透植被的能力越弱，其后向散射系数与植被覆盖下土壤含水量的相关性越差。当然，只要参数选择恰当，还是能达到一定的估测精度的。在 90% 置

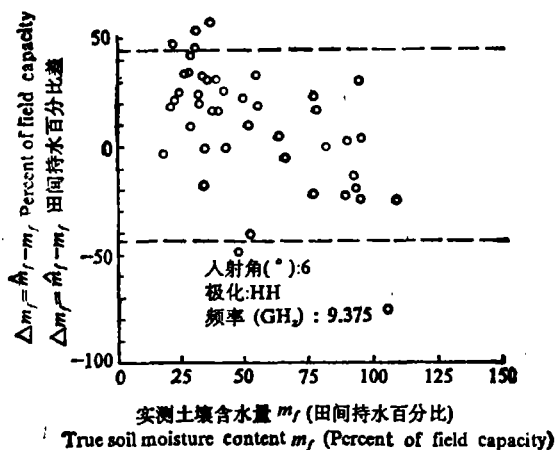


图 7 有植被覆盖土含水量的估测误差

Fig. 7 Prediction error for vegetation -covered soil

表 3 C 波段植被后散射系数的回归结果

Table 3 Results of regression of vegetation backscattering coefficients C-band

N	作物类型	$\bar{\sigma}_v^0 (m^2 \cdot m^{-2})$	$\bar{L}^1 (dB)$	r
34	玉米	0.164	0.97	0.81
22	高粱	0.070	2.15	0.82
54	大豆	0.054	0.51	0.81
33	小麦	0.110	1.31	0.94
143	四种作物	0.066	1.25	0.91

信度内, C 波段和 X 波段的估测误差分别为  $\pm 15\%$  和  $\pm 25\%$ 。

### (五) 几点认识

通过实验,我们详尽地研究了 X 波段后向散射系数与裸土、有植被覆盖土含水量的关系。从结果分析中可以得到以下几点认识:

1. 在微波遥感裸土含水量方面,我们观察到 X 波段在  $\theta = 6^\circ$  时灵敏度最高,随着  $\theta$  的增大则灵敏度降低,在  $\theta = 45^\circ$  时  $S_v = 0$ ,  $\theta$  继续增大则后向散射系数随土壤含水量增加而变小。总的来说,只要工作参数选择恰当, X 波段与 C 波段的水平相差不大。

2. 在微波遥感有植被覆盖土含水量方面, X 波段的精度要比 C 波段的差,但是只要适当选择参数,还能达到一定的估测精度。在 90% 的置信度内,各类覆盖情况下的估测误差将不大于  $\pm 25\%$ 。

总之,植被覆盖对雷达遥感土壤含水量肯定要产生重要影响,尤其在植被覆盖下土壤的含水量低 (c 波段:  $m_f < 50\%$ ; x 波段:  $m_f < 75\%$ ) 和微波波长较短的情况下,影响更为严重。为了更好地为成像雷达设计和雷达图像应用提供基本依据,我们还准备进一步开展植被覆盖对 L 波段雷达遥感土壤含水量影响的研究。

### 参 考 文 献

- [1] 黄扬等, 1986 年; 潮湿裸露土壤的微波散射特性,《遥感信息》第 1 期, 24—27 页。

- [2] Schmugge T. S., 1983: Remote Sensing of Soil Moisture: Recent Advances, IEEE Trans. Geosci. and Remote Sensing, vol. GE-21, pp. 336—344.
- [3] Ulaby F. T., 1974: The Effects of Soil Moisture and Plant Morphology on the Radar Backscatter from Vegetation, RSL Technical Rep. 177—51, University of Kansas Center for Research, Inc. Lawrence, Kansas
- [4] Ulaby F. T., et al., 1975: Active Microwave Measurement of Soil Moisture, Journal of Remote Sensing of Environment, January.
- [5] Reaves R. G., 1975: Manual of Remote Sensing, vol. 2, Keuffel and Esser Co.
- [6] Ulaby F. T., 1975: Radar Response to Vegetation, IEEE Trans. (AP), vol. AP-23, No. 1.
- [7] Ulaby F. T., et al., 1978: Microwave Backscatter Dependence on Surface Roughness, Soil Moisture and Soil Texture: Pt. 1. Bare Soil, IEEE Trans. (GE), vol. GE-16, pp. 286—295.
- [8] Ulaby F. T., et al., 1979: Microwave Backscatter Dependence on Surface Roughness, Soil Moisture and Soil Texture: Pt. 2. Vegetation-Covered Soil, IEEE Trans. (GE), vol. GE-17, pp. 33—40.
- [9] Dobson M. C., et al., 1981: Microwave Backscatter Dependence on Surface Roughness, Soil Moisture and Soil Texture: Pt. 3., Soil Tension, IEEE Trans. (GE). vol. GE-19, pp. 51—61.
- [10] Ulaby F. T., et al., 1982: Microwave Remote Sensing: Active and Passive, vol 2., Addison-Wesley Publishing Company.
- [11] Ulaby F. T., et al., 1982: Effects of Vegetation Cover on the Radar Sensitivity to Soil Moisture, IEEE Trans. (GE), vol. GE-20, pp. 476—481.
- [12] Schmugge T. J., 1980: Effect of Texture on Microwave Emission from Soil, IEEE Trans. Geosci. Electron., vol. GE-18, pp. 253—261.

## STUDY ON MICROWAVE REMOTE SENSING FOR BARE AND VEGETATION-COVERED SOIL MOISTURE

Zhao Changling, Hao Weixing, Li Shengping and Li Xiaohong

(Institute of Remote Sensing Application, Academia Sinica, 100101)

Gu Jiankang, Li Guikui

(China Research Institute of Radiowave Propagation)

### Summary

In this paper, the relationship between the microwave backscattering coefficient and soil moisture of bare and vegetation (sweet potato, soybean and peanut)-covered fields is discussed, and the comparison between the results of X- and C-bands is made. The study results indicate that for microwave remote sensing of the soil moisture of bare fields, when incidence angle  $\theta = 6^\circ$ , the sensitivity  $S_v$  is the maximum; when  $\theta = 45^\circ$ ,  $S_v = 0$ ; and while  $\theta > 45^\circ$ , the backscattering coefficient is getting lower with the increase of soil moisture. At small incidence, X- and C-bands are quite similar in the accuracy. For microwave remote sensing vegetation-covered fields, the sensitivity and accuracy of X-band are lower than those of C-band, but X-band still has a certain sensitivity and accuracy as long as proper working parameters are selected. The prediction error of soil moisture which has been estimated by a simple model proposed in this paper is about  $\pm 25\%$  at X-band.

**Key words** Microwave remote Sensing, Soil moisture, Microwave backscattering coefficient