

# 微波遥感的物理基础及其在农业上的应用

金 仲 辉

(北京农业大学,北京 100094)

文章阐述了被动微波遥感和主动微波遥感的物理基础,着重介绍了亮温和散射系数与天线接收到的微波功率之间的线性关系,以及亮温和散射系数在测量土壤湿度和监测农作物生长情况方面的应用。

## Abstract

This paper reviews the physical foundation of the microwave remote sensing. The linear relationships among the brightness temperature, scattering coefficient and the received microwave power by antenna are described. The brightness temperature and scattering coefficient can be used to measure the soil moisture and inspect crop growth in agriculture.

在微波波段范围内,大气对电磁波的传输几乎没有影响,所以微波遥感具有全天候、全天时的探测能力,而且微波对某些介质具有一定的穿透能力。正是由于这些在光学波段所不具备的优点,使近十余年来微波遥感得到了更为广泛的应用。约从80年代开始,一些国家开始重视星载微波遥感的开发应用,并先后发射了可对地面进行雷达探测的卫星。1978年美国发射的海洋卫星1号便装有合成孔径成像系统(SAR),使雷达图像开始得到了应用。接着1981年哥伦比亚号航天飞机上载有成像雷达(SIR-A),用L波段微波成功地探测到埃及西北部沙漠地区的地下古河床。1984年10月挑战者号航天飞机又换上了SIR-B成像雷达。1983年前苏联发射的金星15号,用合成孔径侧视雷达探测金星取得了成功,1987年又发射钻石系列卫星用微波探测地球。1992年2月日本发射了地球资源卫星1号(JERS-1),可定期提供地面分辨率为 $18 \times 18\text{m}^2$ 的雷达图像。

我国有些单位从80年代中期开始从事微波遥感应用的研究,微波遥感在农业上的应用正有待开发。

## 一、微波遥感的物理基础

微波遥感分为主动微波遥感(或有源微波遥感)和被动微波遥感(或无源微波遥感),前者是天线发射微波信号至目标,再接收它的散射信号;后者是天线接收目标自身发射的微波信号。

### 1. 被动遥感

自然界一切物体都辐射电磁波。在微波波段,黑体辐射的亮度可用瑞利-金斯公式代替普朗克公式,有

$$L_b = \frac{2kT}{\lambda^2} \quad (\text{Wm}^{-2}\text{Hz}^{-1}\Omega^{-1}), \quad (1)$$

上式表示黑体单位表面积、单位立体角、单位频率范围内所辐射的微波功率。

一个微波辐射计所接收到的功率可写成

$$P = \frac{1}{2} \int_{\Delta f} df \int_{\Omega_s} \frac{2kT}{\lambda^2} A(\theta, \varphi) d\Omega, \quad (2)$$

式中 $A$ 表示天线有效面积, $\Omega_s$ 为天线波束立体角,它等于 $\lambda^2/A$ , $1/2$ 表示以线极化方式工作的天线只能接收到从目标发出的无规极化辐射

功率的一半。因为

$$\iint_{\Omega_s} A(\theta, \varphi) d\Omega = \iint_{\Omega_s} \frac{x^2}{\Omega_s} d\Omega = 1^2$$

为天线响应函数,而

$$\int_{\Delta f} df = \Delta f$$

为微波辐射计的带宽,于是(2)式可写为

$$P = k\Delta f T. \quad (3)$$

上式说明,微波辐射计接收到的功率和黑体的温度成线性的关系,于是我们可用温度的高低来表示微波辐射功率的大小。

一般物体并不是黑体,它的辐射亮度  $L_s$  与同温度的黑体亮度  $L_b$  间的关系为

$$L_s = \varepsilon L_b = \varepsilon \frac{2kT}{\lambda^2}, \quad (4)$$

其中  $\varepsilon$  称为物体的比辐射率(或发射率),它的数值范围是  $0 < \varepsilon \leq 1$ 。定义物体的亮度温度(简称亮温)  $T_b$  为

$$T_b = \varepsilon T. \quad (5)$$

微波辐射计接收到一般物体所辐射的微波功率为

$$P = k\Delta f T_b = \varepsilon K\Delta f T. \quad (6)$$

地物的亮温(或  $\varepsilon$ )是多种因素的复杂函数,它与地物的表面粗糙度、复介电常数及温度有关,也与测量时采用的频率、极化方式、测量方向等因素有关。

## 2. 主动遥感

图1形象地表示雷达系统的发射天线向一个孤立目标发射微波信号,然后接收机接收这个目标散射的信号。

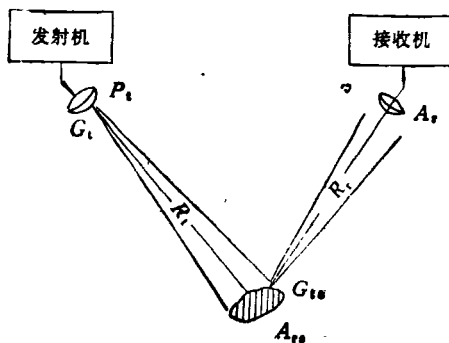


图1 雷达方程所包含的各量及其几何关系

如果雷达系统发射功率为  $P_t$ , 天线增益为  $G_t$ , 则入射到目标处的单位面积功率为

$$S_t = P_t G_t \frac{1}{4\pi R^2}, \quad (7)$$

其中  $R_t$  为发射天线至目标的距离。目标截取到的功率为

$$P_{t0} = S_t \cdot A_{t0}, \quad (8)$$

其中  $A_{t0}$  为目标截取入射波束的有效面积。由于存在目标对微波的吸收损耗,用  $f_a$  表示,则目标再辐射的功率为

$$P_{r0} = P_{t0}(1 - f_a). \quad (9)$$

在接收天线处单位面积的功率为

$$S_r = P_{r0} G_r \frac{1}{4\pi R^2}, \quad (10)$$

其中  $G_r$  是接收方向上目标的增益,  $R_r$  是目标至接收天线的距离。如果接收天线的有效孔径为  $A_r$ , 则接收机输入端功率为

$$P_r = S_r A_r.$$

将(7)至(10)式代入上式,得

$$P_r = P_t G_t \frac{1}{4\pi R_t^2} A_{t0} (1 - f_a) G_r \frac{1}{4\pi R_r^2} A_r = \left( \frac{P_t G_t A_r}{(4\pi)^2 R_t^2 R_r^2} \right) [A_{t0} (1 - f_a) G_r], \quad (11)$$

上式方括号内的因子仅与目标有关,它的量纲为面积,通常把它作为一个因子来处理,称为散射截面

$$\sigma = A_{t0} (1 - f_a) G_r. \quad (12)$$

散射截面  $\sigma$  不仅是入射波的方向和接收机方向的函数,而且还决定于散射体的形状及其介电特性。将(12)式代入(11)式,得

$$P_r = \frac{P_t G_t A_r}{(4\pi)^2 R_t^2 R_r^2} \sigma, \quad (13)$$

上式称为双基地雷达方程。通常雷达系统是将发射与接收设在同一位置,或同一天线兼作发射与接收用,于是有

$$R_t = R_r = R, G_t = G_r = G, A_t = A_r = A. \quad (14)$$

又由于天线有效面积与它的增益有如下关系:

$$A = \frac{\lambda^2 G}{4\pi}, \quad (15)$$

于是(13)式成为

$$P_r = \frac{P_t G^2 \lambda^2}{(4\pi)^3 R^4} \sigma, \quad (16)$$

上式称为单基地雷达方程。

如果目标是扩展的, (16)式可用积分形式来代替, 即

$$P_r = \frac{\lambda^2}{(4\pi)^3} \int_{\text{扩展面积}} \frac{P_t G^2 \sigma^0}{R^4} dA, \quad (17)$$

其中

$$\sigma^0 = \frac{\sigma}{\Delta A},$$

称为微分散射系数或简称散射系数, 对于面扩展目标来说它是一个无量纲的量。(17)式称为面扩展目标的雷达方程。如果目标是一个体分布(例如云、雨、植被层等), 则(17)式中的积分应用体积分来取代面积分, 式中散射系数  $\sigma^0$  的单位应是  $\text{m}^2/\text{m}^3$ 。

在一般情况下, 可假定  $P_t$  和  $\sigma^0$  在照射区内为常数, 于是(17)式成为

$$P_r = \frac{P_t \lambda^2 \sigma^0}{(4\pi)^3} \int \frac{G^2}{R^4} dA,$$

由上式得

$$\sigma^0 = \frac{P_r (4\pi)^3}{P_t \lambda^2} \frac{1}{\int \frac{G^2}{R^4} dA}. \quad (18)$$

现在考虑一种最简单的近似情况, 即假设在照射区域内,  $G$  和  $R$  均为常数, 则(18)式简化为

$$\sigma^0 = \frac{P_r (4\pi)^3 R^4}{P_t G^2 \lambda^2 A}. \quad (19)$$

由上式可以看出, 在  $P_t, G, \lambda, A, R$  确定情况下, 散射系数  $\sigma^0$  和接收天线接收到的目标散射的功率成正比, 即  $\sigma^0 \propto P_r$ 。这说明  $\sigma^0$  和  $P_r$  具有等价的地位, 这也就是在主动微波遥感(指散射测量)中, 采用  $\sigma^0$  这个物理量的原因。(19)式中的  $\sigma^0$  也常称为后向散射系数。

散射系数与许多因素有关, 它与微波散射计的参数(例如波长、极化方式)、测量参数(例如入射角、方位角)、目标参数(例如复介电常

数、表面粗糙度等)和环境条件有关, 于是我们可以利用它来识别物体和监测农作物生长情况, 等等。

在实际测量中, 由于不同条件下测得的  $\sigma^0$  值相差很大, 可达几个数量级, 为了压缩比例尺, 习惯用分贝来做  $\sigma^0$  的单位, 这时有

$$\sigma_{\text{dB}}^0 = 10 \log \sigma^0.$$

### 3. 极化方式

由于天线发射或接收的微波信号一般是以线极化态方式进行的, 所以在微波遥感中分为水平分量(H)和垂直分量(V)两种极化方式。它们是这样定义的: 若信号中的电矢量平行于界面表面(电矢量垂直于入射面, 即图2的纸面), 则为水平分量(H); 若信号中的电矢量位于入射面内, 则为垂直分量(V)。

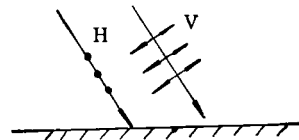


图2 极化方式

由以上可看出, 在亮温测量中有H和V两种极化方式, 而在散射系数测量中有HH, VV, HV, VH四种极化方式。

## 二、亮温在农业中的应用

### 1. 测定土壤的湿度

R. W. Newton 等<sup>[1]</sup>测定了在表层5cm深度内裸土壤湿度和归一化亮温(亮温除以土壤的实际温度)之间的关系, 如图3所示。采用的波长为  $\lambda = 21.4\text{cm}$ , 极化方式为H, 入射角为  $0^\circ$ 。裸土壤表面高度起伏的标准离差  $h = 0.88\text{cm}$ 。根据 Peake-Oliver 判据, 若

$$h < \frac{\lambda}{25 \cos \theta},$$

则视比表面为光滑的(若  $h > \frac{\lambda}{44 \cos \theta}$ , 则视为粗糙的)其中  $\theta$  为入射角。显然, 在  $\lambda = 21.4\text{cm}$  和  $\theta = 0$  情况下,  $h = 0.88\text{cm}$  的土壤表面接近

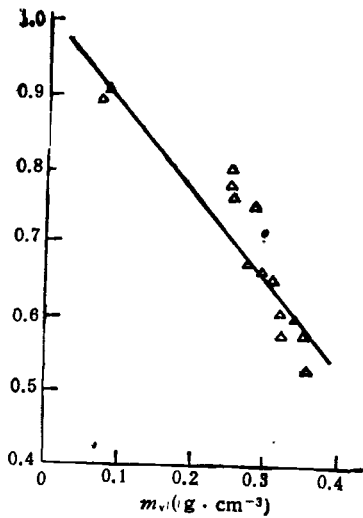


图3 归一化亮温和土壤湿度间关系

是光滑的。由图3可以看出，随着土壤含水量的增加，土壤的亮温是以近似线性的规律下降。R. W. Newton et al.<sup>[3]</sup>还测量了三种不同表面粗糙条件下，裸土壤湿度和归一化亮温之间的关系，如图4所示。由图4可以看出，在测量条件下，随着土壤表面粗糙度的增大，曲率的斜率将减小。这表明，在土壤表面粗糙情况下，降低了湿度对亮温的灵敏度。

土壤表面在植被覆盖情况下能否用亮温来测量土壤的湿度呢？北京农业大学遥感研究所

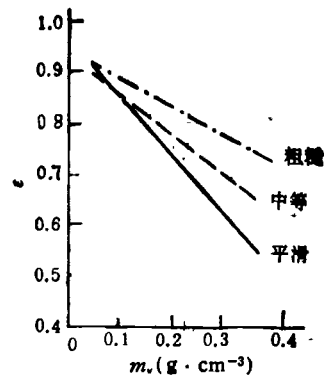


图4 三种不同粗糙度下裸土壤归一化亮温和湿度间关系

微波课题组于1991年8月测量两块生长情况类同，但土壤湿度相差较大的玉米田的亮温，测量结果如表1所示。由表1可看出：在两种波长和两种极化方式下，土壤湿度大，亮温就小，这与前述的结果是一致的；由于植被层（玉米）要衰减土壤发射的微波信号，所以测得的亮温要比实际裸土壤的亮温要小，但长波长微波衰减比短波长微波要小，所以在测量土壤湿度时，一般宜用分米波段的微波。

## 2. 亮温与生物量的关系

北京农业大学微波课题组还测量了土壤湿度几乎相同但长势有明显差异的两块玉米田的

表1 入射角为20°时两种不同土壤湿度玉米田的亮温

地 块	土壤湿度	土 壤 表面温度	$\lambda = 21\text{cm}$		$\lambda = 8\text{mm}$	
			H	V	H	V
1号	8.9%	299K	287.6K	279.8K	198.3K	200.3K
2号	18.3%	301K	272.1K	265.2K	157.7K	161.6K

表2 入射角为20°，两种不同长势玉米田的亮温

玉 米 长 势 情 况				不同波长和极化方式下的亮温 (K)							
地块	每亩植株 总鲜重 (kg)	叶面指数	土壤湿度	H				V			
				8mm	3cm	5cm	21cm	8mm	3cm	5cm	21cm
				1号	1741	2.0	8.9%	198.3	269.1	279.6	287.6
3号	3240	4.4	9.0%	249.6	275.2	282.5	302.2	265.0	275.7	282.5	297.0

亮温值,测量时采用的人射角为  $20^\circ$ , 四种波长和两种极化方式, 测量结果如表 2 所示. 由表 2 可看出: 在各波长下, 无论采用何种极化 (H 或 V) 方式, 长势好(每亩植株的总鲜重量大和叶面指数高)的玉米亮温高, 反之长势差的玉米亮温低; 选用的四种波长中, 波长最短的  $8\text{mm}$  (H 或 V) 测得的两块玉米田亮温差最大, 可达  $50\text{--}60\text{K}$ , 所以对于监测植被(玉米)生长情况来说, 宜选用波长较短的微波, 因为它在更大程度上消除了植被下土壤对测量的影响.

### 三、散射系数在农业中的应用

#### 1. 测量土壤的湿度

裸土壤的散射系数受土壤参数(例如土壤表面粗糙度、土壤含水量、土壤质地等)和雷达测量参数(雷达波长、极化方式和方向)的影响. 图 5<sup>[2]</sup> 中的两个图分别表示在频率  $1.1\text{GHz}$  和  $7.25\text{GHz}$  下测得的散射系数  $\sigma^0$  对入射角  $\theta$  的响应曲线. 图中说明的土壤表面高度起伏的标准离差值  $h$  代表了土壤表面粗糙度情况, 其中  $1.1\text{cm}$  代表土壤表面最光滑,  $4.1\text{cm}$  代表土壤表面最粗糙. 由图 5(a) 可看出, 土壤表面粗糙度对散射系数  $\sigma^0$  的影响是显而易见的: 最光滑

的第一号农田的  $\sigma^0$  随入射角  $\theta$  增大而急剧下降, 从天顶角时的  $18\text{dB}$  下降到  $\theta = 30^\circ$  时的  $-27\text{dB}$ ; 相反, 在最粗糙的第 5 号农田, 从天顶角到  $\theta = 30^\circ$  的  $\sigma^0$  变化落差仅为  $3\text{dB}$ . 由图 5(b) 可看出, 在频率为  $7.25\text{GHz}$  下, 五种不同土壤表面粗糙度的  $\sigma^0$  对  $\theta$  变化都比较缓慢, 说明在较高频率下这五种土壤表面显示出比在低频下要粗糙些. 由图 5 还可看出一个很重要的特点, 那就是五条曲线在  $\theta = 7^\circ$  附近几乎相交在一起(即具有相同的  $\sigma^0$  值), 这说明在入射角为  $7^\circ$  的附近, 测得的  $\sigma^0$  几乎与土壤表面粗糙度无关, 于是利用雷达测量土壤的含水量时应尽量选择在此范围. Ulaby 等<sup>[3]</sup> 通过分析, 得出测定土壤含水量的最佳雷达测量参数是: 频率为  $4\text{--}5\text{GHz}$  范围, 入射角为  $7^\circ\text{--}17^\circ$  范围和 HH 极化方式.

Ulaby et al.<sup>[4]</sup> 用车载雷达在 11 种不同的土壤类型和表面粗糙度的裸土壤上测量了  $5\text{cm}$  厚的土壤表面层的农田持水百分比  $m_t$  下的散射系数  $\sigma^0$ , 采用的测量参数是入射角  $\theta = 10^\circ$ , 频率  $f = 4.5\text{GHz}$ , HH 极化方式. 对 181 个实验数据进行线性回归, 得到

$$\sigma^0(\text{db}) = 0.148m_t - 15.96,$$

其线性相关系数为  $\rho = 0.85$ .

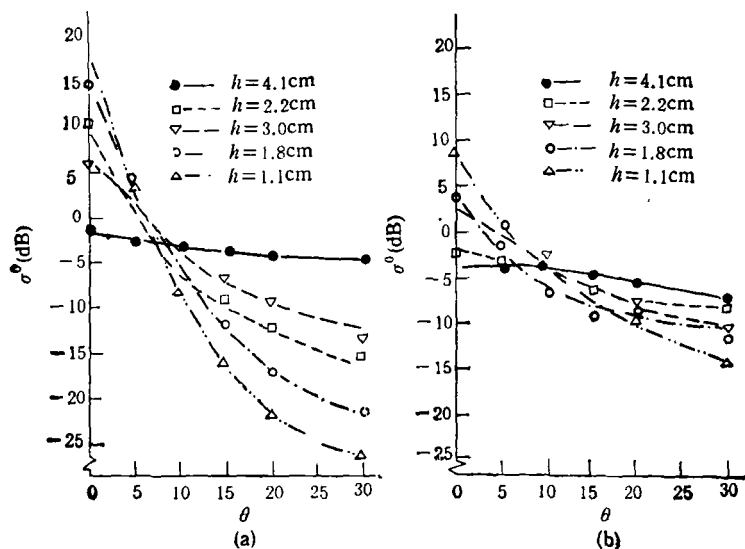


图 5 五种裸土壤表面粗糙度下  $\sigma^0\text{--}\theta$  曲线  
(a)  $1.1\text{GHz}$ , HH (b)  $7.25\text{GHz}$ , HH

表3 玉米、高粱和小麦的  $\sigma^0$  和 L 的回归分析结果

品种	回归方程系数			相关系数	标准偏差 (db)	样品数
	a	b	c			
玉米	0.17	1.1	0.14	0.62	0.8	60
高粱	0.15	1.4	0.018	0.74	0.6	64
小麦	0.037	0.20	0.013	0.90	1.2	13

Ulaby 等还在种植高粱、玉米、大豆和小麦的农田里进行了上述类似的散射测量，采用的测量参数不变 ( $\theta = 10^\circ$ ,  $f = 4.5\text{GHz}$  和 HH 极化方式)。对 143 个实验数据进行线性回归分析，得出散射系数  $\sigma_{\text{obs}}^0$  和  $m_t$  的关系式为

$$\sigma_{\text{obs}}^0(\text{db}) = 0.133m_t - 13.84,$$

其线性相关系数为  $\rho = 0.92$ 。

由以上二式可知，在一定的雷达测量参数下测定农田的散射系数  $\sigma^0(\text{db})$ ，就可推知农田含水量的情况。

## 2. 监测和鉴别农作物

测量农作物的散射系数时，要尽量缩小农作物下土壤的影响，为此雷达测量参数选用较高的频率和较大的人射角。图 6<sup>[9]</sup> 表示小麦在不同生长期下的散射系数，采用的测量参数为  $\theta = 50^\circ$ ,  $f = 17.0\text{GHz}$ , VV 极化方式。由图 6 可看出，小麦的散射系数  $\sigma^0$  有两个峰值。第一个峰值大约出现在小麦种植后的第 130 天，此时小麦的叶面指数有最大值。我们知道，农作物(如小麦)由叶片、枝条、茎秆和果实(当作物成熟时才有)组成。第一个  $\sigma^0$  峰值说明此时小麦的散射主要是叶片的贡献。第二个  $\sigma^0$  峰值出现在小麦收割的前夕，相应地，此时有小麦最大的干物质重量，而干物质重量主要包含在麦穗里，说明此时小麦散射主要是麦穗的贡献。由此可见，在小麦的不同生长期，它的散射系数的变化明显地与小麦叶面指数、小麦干物质积累相关。据此，我们可以监测小麦的生长情况。

Ulaby 等<sup>[9]</sup>在玉米、高粱、小麦的生长期内，采用  $\lambda = 2.3\text{cm}$ ,  $\theta = 30^\circ$  和 VV 极化方式，分别测量了它们的散射系数和叶面指数，并按下列函数形式进行回归分析

$\sigma^0 = aL^n[1 - \exp(-bL)] + c \exp(-bL)$ ，其中  $L$  为叶面指数， $a, b, c$  为常数。对于玉米和高粱， $n = 0$ ，对于小麦， $n = 1$ ，具体结果如表 3 所示。

由以上结果可以清楚地看出，散射系数和三种作物的叶面指数存在着明显的相关性。总之，采用不同测量参数(频率、入射角和极化方式)和进行多时相的测量就可以监测作物生长情况和达到鉴别它们的目的。

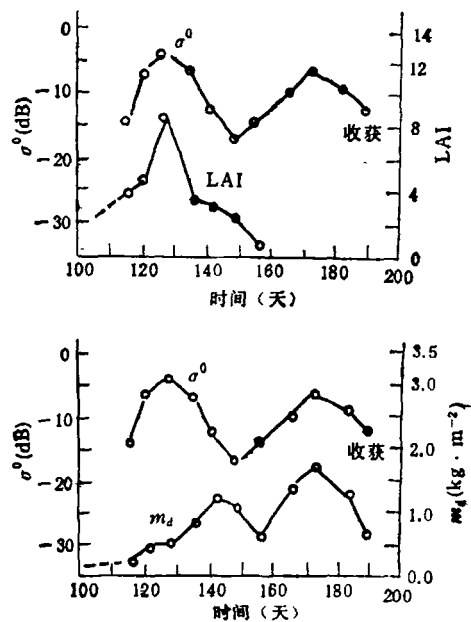


图6 小麦的散射系数  $\sigma^0$ 、叶面指数 LAI 和干物质  $m_d$  的时序变化

农业地物微波辐射特性和散射特性都比较复杂，它们受多种因素的影响。目前在我国仅有少数单位在这方面做了一些工作。因此，要获得农业地物微波遥感的正确解译和判读，还需要做大量的地面测量和深入的研究。

(下转第 132 页)