

# 应用微波辐射测量方法监测农作物

G. LUZI S. PALOSCIA P. PAMPALONI

(意大利微波遥感中心)

## 1 引言

在农业管理上,遥感技术可以用来帮助估算作物产量和植株的健康状况。由于微波发射取决于发射体的介电常数,这一常数是随发射体的含水量而改变的。从80年代起我们研究组就微波测量对监测农作物、估算其产量和水分状况的潜力进行了研究,应用一个多频率传感器组件在意大利北部和中部的不同农业试验点上进行了有关土壤湿度和植被的信息收集。本文扼要地总结了主要研究结果并同理论模式进行了比较。

遥感技术通过装在飞机或卫星上工作在几个光谱波段的传感器,使得在大面积上快速获取和传播信息有了可能。一颗地球轨道

卫星可在几天之内探测整个地球表面一次,并能按一定间隔时间重复对同一地区进行监测,而如果有专门的需要(如自然灾害)用一架飞机则可以在一较小的面积上给出更详细的分析。

这些传感器所用的光谱波段覆盖了从可见光到微波之间的整个光谱范围。微波传感器可以是被动的(辐射计)也可以是主动的(雷达和散射计),前者用于测定被测物体的自然发射而后者测定其本身发射的能量束的后向散射部分。与可见光频率相反,微波可以穿透云层且在没有阳光下也能工作,而且微波发射强烈依赖于发射物体的介电常数。由于水的介电常数与干物质非常不同,例如土壤中水分含量稍有小的变化,就可以在微波

表 1 研究中所用辐射计的特性,列出频率带宽(RFBW)、  
积分时间、精度、波束宽(HPBWS)和极化

波段/频率(GHz)	RFBW(MHz)	积分时间	精度((K)	HPBWS(角秒)	极化
L/(1.4)	30	10/1/.1	2	18/21	H 或 V
X/(9.6)	1000	10/1/.1	1	15	H 或 V
K <sub>a</sub> /(36.6)	1000	10/1/.1	1	12	H 或 V
IR	(8—14 $\mu$ m)	.1	.5	2	

微波发射上引起明显的变化,这主要是在较低频率(1—5GHz)下的变化。

遥感技术可应用的主要领域是农业、气象、水文和地质。遥感技术在农业上的应用主要是针对农作物的产量预报和优化生产率,这两者都要求了解作物类型和作物的健康状况。

遥感资料与辅助资料(地理、地形、气象资料)以及物理或统计模式一起有可能估算诸如土壤湿度、植物水分状况、叶面积指数、表面温度和土壤粗糙度的变化。从这些量一方面有可能反演农业产量的估算,另一方面如果资料收集得比较及时,则有可能制定灌溉日程表或药剂处理计划。在这种情况下,主要问题是识别植株受胁迫的情况,这些胁迫主要是由于水分缺乏或是寄生菌侵害,而这一识别应在植株生长以致最终产量受到很大的影响现象出现之前。对于应用微波测量来监测农作物和估算产量以及水分状况方面的潜力,我们小组从 80 年代初就开始了这方面的研究。本文概括了主要结果,用的是三个微波辐射计组成的多频率传感器组件(即 1.4GHz、10GHz 和 36GHz)和一个热红外传感器(8—14 $\mu$ m)的测定。资料是从意大利中部、北部的不同试验点收集的,用的有地基的和航空平台的,所研究的作物有:苜蓿、玉米、甜菜、向日葵、小麦和大麦。文章还讨论了微波发射与土壤湿度、土壤粗糙度、植物水分含量和叶面积指数之间的相关关系。

## 2 设备与试验结果

在最近几年进行试验时,设备包括有三个 Dicke 型微波辐射计,是在 Ka(36GHz),X

(10GHz)和 L(1.4GHz)波段,并有一个 8—14 $\mu$ m 波长的红外(IR)仪,它们的特性扼要地列在表 1 中。

经过几年的研究从不同自然表面获取了大量资料,试验的农作物有苜蓿、玉米、小麦、大麦、向日葵和甜菜。把遥感资料同土壤和植株的生物物理参数进行对比以建立它们之间的关系,并通过物理模型来检验这些关系,在试验时曾测定了土壤和植株的如下参数:土壤含水量(SMC),这些含水量以重量和容积来表示(应用重力法)、土壤密度和粗糙度用剖面仪测定。每一种作物的植株高度和密度、叶片数目和大小、叶面积指数(LAI)用面积仪测定。测定植株的干鲜重、植株的水分含量(Q),这些地面实况资料大部分是同遥感资料同步进行收集的。

初步的分析是研究不同目标物(如裸露土壤和植被)的亮度温度作为入射角( $\theta$ )的函数的不同特性。

为研究更多的地面样本,把传感器设备装在飞机上,1986 年和 1987 年在意大利北部(Oltrepo Pavese)的试验点进行观测,试验点在河的两岸平坦区(2km $\times$ 0.5km)。每块农田是方形的大约 4—6 公顷大小,主要作物是向日葵、小麦、大麦、苜蓿和玉米。作为一个例子,在  $\theta=10^\circ$  沿一飞行线,记录四个频率(36GHz、10GHz、1.5GHz 和 IR)的  $T_b$  剖面,见图 1。具体飞行时间是 1988 年 7 月 13 日,其植株状况如下:

小麦:株高 80—90cm 成熟阶段,LAI 和  $Q=0$ ;

玉米:株高 220cm,LAI = 5.4, $Q = 6.2\text{kgm}^{-2}$ ;

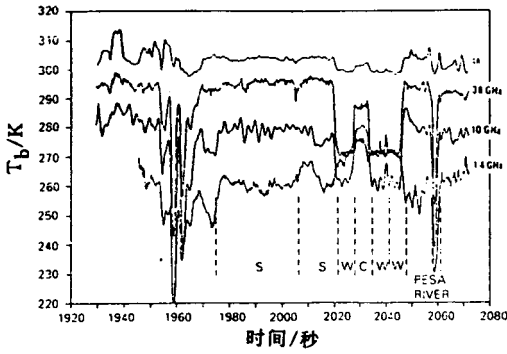


图 1 亮温  $T_b$  (K) 对时间 (s) 在三个微波频率: 1.4GHz、10GHz 和 36GHz 及在 IR (8—14 $\mu$ m) 的剖面图, 所有观测沿飞行线在  $\theta = 40^\circ$  下的不同作物: S: 向日葵、C: 玉米、W: 小麦

向日葵: 株高 210cm, LAI = 5.5,  $Q = 8\text{kgm}^{-2}$ 。

我们看到对于相同的作物, 在 10GHz 和 36GHz 下往往具有相同的亮度温度, 即使在不同田地也是如此。向日葵通常表示出最低的  $T_b$  值, 成熟小麦的值最高, 而玉米的值处于中间。

一般来说, 我们注意到具有宽而水平的叶片的植株 (如向日葵、甜菜) 显示低的  $T_b$  值, 而植株有小而随机方向的叶片时 (如苜蓿和小麦) 显示出较高的  $T_b$  值, 玉米有大的叶片特别在较上部的叶层多为水平的, 它显示居中的  $T_b$  值。并且农田的边界清楚, 特别在 36GHz (Bonsignori 等, 1987)。在 1.4GHz 下相当清楚的是, 影响发射的主要参数是土壤湿度和粗糙度, 而植物类型影响不大。从这些图解中清楚地表明亮温取决于作物类型, 但它也确实受到土壤和植物的物理状态特别是水分和粗糙度的影响。而且由于作物类型引起的变化其大小与其水分状况不同引起的变化大致相当。因此我们考虑用极化和频率的某些组合, 以便较好地地区分几个相互之间的影响, 并定量给出微波发射对不同植株参数的敏感度, 我们特别考虑了  $T_b$  对红外温度的归一化 (即是归一化温度  $T_n$ ), 用极化指数

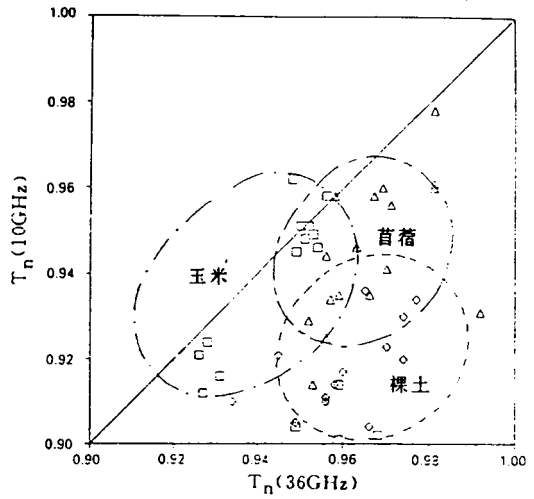


图 2 10GHz 的与 36GHz 的归一化温度  $T_n$ , 各点聚区对应的是裸土、玉米和苜蓿 (Paloscia 等, 1988)

$PI, 2(T_{bv} - T_{bh}) / (T_{bv} + T_{bh})$  来量度水平和垂直极化之间的差异, 和在水平极化下 36GHz 和 10GHz 之间亮温的差异 ( $\delta T_b$ )。

$T_n$  区分作物的能力比亮度温度本身要好, 这从图 2 看出, 把 10GHz 下的  $T_n$  值对它们 36GHz 下的  $T_n$  值作图, 可区分出三个点聚区, 代表不同类型的表面: 玉米、苜蓿和裸土 (Pampaloni 等, 1985)。

在图 2 中裸土点聚区处于图中对角线的下部 (在 36GHz 的  $T_n >$  在 10GHz 的  $T_n$ ), 而植被点聚区是在线上 (36GHz 的  $T_n \approx$  10GHz 的  $T_n$ ) 或有时在线以上 (36GHz 的  $T_n <$  10GHz 的  $T_n$ )。因而我们可以发现, 从裸土过渡到有植被的土壤其主要特征是 10GHz 的  $T_n$  增大。

在高于 5GHz 的频率上的发射, 似乎受植被特征和裸土最表面土层含水量的影响最大。相反, 在较低的频率下, 植被几乎是透明的, 因此发射来自土壤, 并直接与土壤水分含量密切相关。在图 3, 10GHz 归一化温度是作为裸土和有植被土壤表层 0—5cm 土层容积含水量 (SMC) 的函数。植被是正处于成熟的小麦。图中回归曲线的斜率是对土壤水分含量的敏感度, 它变成了裸土时的 1.4K 每 1.

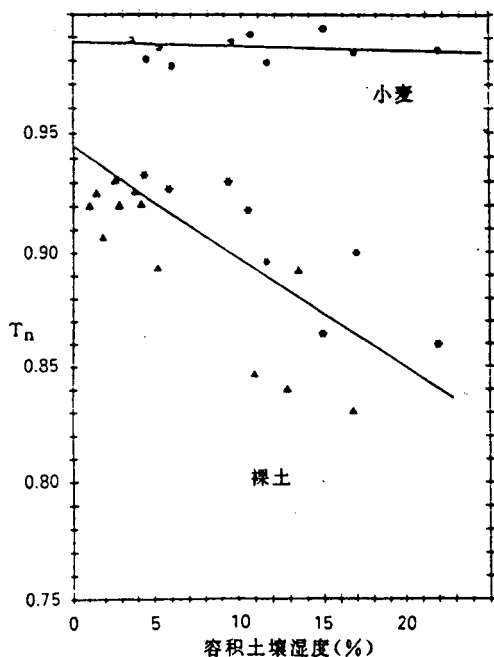


图3 10GHz,  $\theta=10^\circ$ 下归一化温度资料  $T_n$  作为 0—5cm 表层容积土壤水分含量 (SMC) 的函数, 曲线下边是在裸土上的资料,  $\blacktriangle$  = 表面平滑,  $*$  = 粗糙表面, 上边曲线是在成熟的小麦田上的资料

0% 的容积 SMC。另一方面对有植被的土壤, 则对土壤湿度的敏感度是很低的, 这是因为有植被存在时土壤被遮蔽了 (Pampaloni 等, 1986)。如果考虑 1.4GHz 下的归一化温度, 对于有植被土壤对土壤湿度的敏感度一概都是很高的。

现在让我们来考虑由不同的频率和极化组合所得的其它参数, 从原文图 20.3 (略) 我们看到, 10GHz 和 36GHz 下的亮温在充分生长植被田中几乎是一样的, 而在裸土上 (平滑)  $T_b(36\text{GHz})$  比  $T_b(10\text{GHz})$  较高。所以参数  $\delta T_b$  (即是两个亮温之差:  $(T_b36 - T_b10)$ ) 能用于裸土与有植被土壤之间的划分, 并可确定植物不同的生长阶段。在图 4 中,  $\delta T_b$  (H 极化,  $\theta=40^\circ$ ) 是作为不同作物的叶面积指数 (LAI) 的函数来作图的。

随 LAI 增加,  $\delta T_b$  的减少是很缓的, 并且如果裸土足够平坦, 植被的累进生长可以

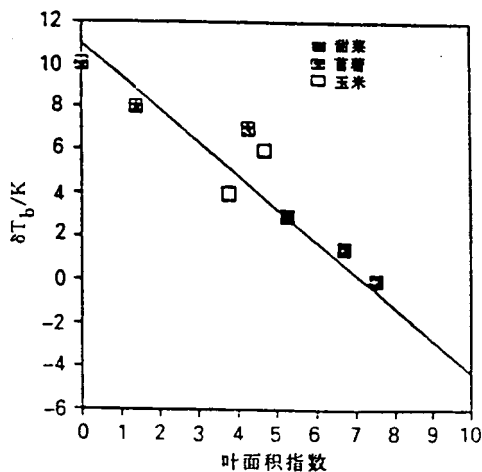


图4 36GHz 和 10GHz 的亮温差值  $\delta T_b$  是不同作物 LAI 的函数 (Chiarantini 等, 1987)

被估算出 (Pampaloni 等, 1987)。从最初的图能看到在这两个频率下 V 和 H 极化之间的差异, 在裸土上差异相对高而在植被上则接近于零。这一情况的检测可以用极化指数 (PI) 而得到增强。

### 3 土壤与植被发射模拟

模拟土壤发射最简单的办法是把土壤当作一个与空气之间有一个平面界面隔开的均一 (土壤湿度均一) 而等温的介质。在这种情况下, 可用能量守恒定律从对应的镜面反射率来计算发射率。当土壤表面是粗糙时, 即在某种与波长相比不算小的随机不规则性时, 发射率会增大, 因为参与发射过程的表面积变大了。

通过引入对镜面反射率的订正因子而得到的半经验方法, 与试验资料吻合得很好 (Choudhury 等, 1979)。一般的理论要求表面参数和表面散射物理过程的知识, 应用几何光学和 Kirchhoff 近似, Mo、Schmugge 和 Wang (1987) 得出一个模式, 这个模式除去垂直极化以外它同 Wang 等在 L 波段收集的资料吻合得相当好。估算非均一土壤湿度剖面的土壤发射的基本办法是分割土壤成若干薄层而后把每层的贡献累加起来, 在 Burke、

Schmugge 和 Paris (1970) 发展的一个模式中, 土壤被处理为成层的介电物质, 每一层假定是均一的, 对每一层用辐射传输理论 (RTT) 方程来求解, 然后层间能量传输用界面 Fresnel 反射率来计算。用 Wilheit 的另一个 (固有) 方法, 土壤也被处理成一些介电层的集合。然而, 每一层的介电场用 Maxwell 方程和界面上的边界条件来计算。以介电场计算能量通量以得出温度为  $T_i$  的每一层的吸收份额  $f_i$ , 合成亮温由  $T_s = \sum f_i T_i$  给出。Schmugge 和 Choudhury (1981) 曾对这两个模式进行了比较, 表明对大部分实际情况两个模式给出了类似的结果, 并且在低频下其差别变得比较显著。

建立一个对植被的通用模型的困难是由于植株生理参量的巨大变化, 这即使在同一作物内也如此。用一个简化办法, 植被按辐射传输理论可以被模拟成固定温度土壤上方的一个均一 lossy 电介质层, 它的吸收性质与生物量特性有相关关系。关于散射性质, 不同作者考虑了不同的近似处理: Kirdiashev、Chukhlantev 和 Shutko (1979) 忽略这一影响, Ulaby 等 (1983) 把植被当作各向同性散射体的一个集合, 而 Mo 等 (1982) 假定散射主要是朝前的。在真实情况下, 植被不是均一的而且叶片温度在时间和空间两方面均有变化。另一方面, 一些作物在形状和大小上是如此的不一样, 以致其散射功能可能有许多差异。假如把植被表示为在一个均一介质 (土壤) 上方的一个平面吸收介质, 具有固定温度  $T$ , 并伴随有随机分布的散射体, 则亮温  $T_{bp}$  的一维辐射传输理论方程变成

$$\frac{dT_{bp}(\tau, \mu)}{d\tau} = -T_{bp}(\tau, \mu) + (1 - \omega)T + \frac{\omega}{2} \int_{-1}^1 P(\mu, \mu') T_{bp}(\tau, \mu') d\mu' \quad (1)$$

式中  $P$  是极化指数,  $\mu = \cos\theta$ ,  $\theta$  是观测角, 而  $\tau$  是光学厚度:

$$\tau = \int_0^{\tau_0} K \epsilon dz \quad (2)$$

反照率  $\omega = K_s / (K_a + K_s)$ ,  $K_a$ 、 $K_s$  是吸收和散射系数, 它考虑了分别由于吸收和散射现象造成的功率减少,  $P(\mu, \mu')$  是散射函数, 它描述每个方向上的散射, 这个方程的求解要求作许多近似才行。如果我们按 Mo 等 (1982), 考虑散射功率主要是向前的, 就可写成

$$P(\mu, \mu') = 2f\delta(\mu - \mu') \quad (3)$$

其中  $f$  是一个参数, 与整个散射功率中向前的百分数有关;  $\delta(\mu - \mu')$  是 Dirac 函数。按 Joseph 等 (1976) 引用的关系, 把  $\tau$  和  $\omega$  转换为  $\tau'$  和  $\omega'$ 。

$$\tau' = \tau(1 - f\omega) \quad (4)$$

$$\omega' = \omega(1 - f)/(1 - f\omega) \quad (5)$$

$\tau'$  是等价光学厚度,  $\omega'$  是等价单次散射反照率。

#### 4 模式与资料比较

计算显示等价单次散射反照率在 36GHz 和 10GHz 两频率下都  $\ll 1$ ; 而等价光学厚度经常高于 1, 在 36GHz 下甚至可以达到 3 或 4。可建立起  $\tau'$  和植株水分含量  $Q$  之间关系式

$$\tau' = (k/\sqrt{\lambda}) \ln(1 + Q) \quad (6)$$

式中  $k(m^{-0.5})$  只取决于作物类型, 而对波长是独立的: 对苜蓿它是 0.25, 玉米是 0.16;  $\lambda$  是波长 (m), 而  $Q$  是植株水分含量 ( $kgm^{-2}$ )。在图 5 中,  $\tau'$  被波长的平方根相乘, 可作为植株水分含量的函数。曲线代表公式 (6), 而各点是收集到的玉米和苜蓿试验值, 在图中有两个数据点是由 Mo 等 (1982) 在 5GHz 和 1.5GHz 下从玉米田得出的值, 虽然这公式可任意扩展到较低的频率, 这些测定点还是与模式合理地相吻合。在这模式中, 被植被引起的辐射成份被假定是非极化的, 而由整个冠层—土壤系统发射的辐射是极化的。辐射的极化情况可由极化指数 (PI) 来表征。应用同一模式和光学厚度与植株水分含量之间的关系 (公式 (6)), 并假定植被与土壤处于热平衡下, 则 PI 可用下式定义:

$$PI(Q, \mu) = PI(O, \mu)(1 + Q)^{-1/\mu} \sqrt{\tau} \quad (7)$$

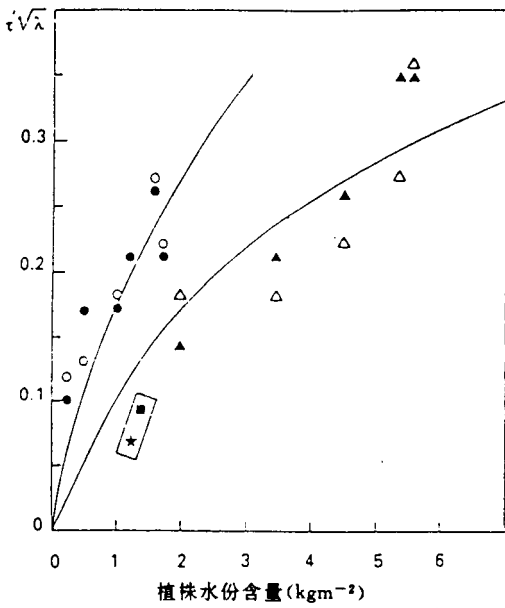


图5  $\tau \sqrt{\lambda}$  作为植株水分含量  $Q$  的函数(玉米:  $\circ = Ka$ ,  $\bullet = X$ ;  $\triangle = Ka$ ,  $\blacktriangle = X$ ), 计算值  $\tau \sqrt{\lambda}$  是由方程  $\tau \sqrt{\lambda} = k \ln(1+Q)$  近似计算出的, 式中  $k=0.16(m^{0.5})$  (对玉米),  $k=0.25(m^{0.5})$  (对苜蓿)(Pampaloni 等, 1986)。  $\circ$  和  $\star$  分别为在 L 和 C 波段下由 Mo 等(1982)收集的资料

式中  $PI(Q, \mu)$  是裸土的极化指数。

我们看到植株水分含量  $Q$  是植株物理状况的一个好的指标, 叶面积指数(LAI)是一个在农业应用上能更好表征植株特性的参数, 因为它代表着光合作用能力。从几个农田上收集到的资料我们发现, LAI 和  $Q$  之间的关系可以用对数律来表达(Paloscia 等, 1986)。PI 和 LAI 之间的相关可以写成下式

$$LAI = ((v\mu \sqrt{\lambda}/k) \ln(PI(O, \mu)/PI_{(LAI)})) \quad (8)$$

式中  $v$  是对苜蓿和玉米的 LAI 和  $Q$  资料拟合得最好的系数。因此一旦裸土上植被类型和极化指数  $PI(Q, \mu)$  已知, LAI 可从作物极

化指数来估算。

为检验用公式(5), 模式预报 LAI 的能力, 曾在 10GHz 下对观测到的 LAI 与计算的 LAI 值进行比较, 从比较可看到, 这模式对预报玉米和苜蓿的 LAI 来说是相当可以的(虽然有些估值偏低), 至少在它们生长周期的第一阶段当玉米 LAI 是 5 以下和苜蓿 LAI 是 2 以下时预报结果是可以的。

Ferrazzoli 等(1988)进行了计算, 并与在 10GHz、 $H$  极化,  $\theta=40^\circ$  下收集到的试验资料  $T_n$  相比较。  $T_n$  随植物生长的变化趋势和计算的相似,  $T_n$  的测定范围比计算的要小一点。可是我们观测到, 在 LAI 值低时, 田块表面发射在很大程度上要受土壤参数和矮苜蓿茎存在的影响, 而这模式本身仅考虑到土壤和叶片。特别是发现土壤粗糙度对理论曲线有很大的影响。

## 5 结论

理论和试验研究均已表明微波辐射测量法能检测土壤和植株参数。特别是我们看到多频率多极化的观测结果能够区分不同作物, 检测土壤水分状况和植株的生物量。观测波长减小得更多则更多的发射来自植被上层, 并且依据植物水分含量而变化。对植物水分含量的监测可能是非常重要的, 因为真实和潜在蒸散之间的关系不完全取决于土壤湿度, 还取决于植株和天气条件。通过根据辐射传输理论建立起的模式与实验资料的比较, 其结果表明, 至少对某些作物, 这些模式能够很好地解释农业参数与微波辐射测定参数之间的几种关系。

张宏名摘译自 *Applications of Remote Sensing in Agriculture*

张建军、郝望校