

# 多频段微波辐射计对农作物热辐射的遥感和分层随机介质辐射传输的数值模拟\*

金亚秋 张俊荣 赵仁宇

(复旦大学电子工程系) (中国科学院长春地理研究所)

1990年12月10日收稿

## 摘 要

本文给出了用多频段微波辐射计(3.09, 5.4, 9.6, 36GHz)于1990年9月对长春净月潭遥感实验站地区的水稻、大豆等农作物微波热辐射的一些测量结果;发展了多层随机介质辐射传输的理论模式,得出了矢量辐射传输方程的数值解;定量地讨论了农作物微波热辐射的特征及其与各物理参数之间的函数对应关系。

**关键词** 农作物微波热辐射 遥感测量 辐射传输数值模拟

## 一、引 言

农作物微波热辐射特征的研究是空对地遥感中农作物估产和监视的主要问题之一。自1987年以来,中国科学院长春地理研究所微波遥感研究室用自行研制的多频段微波辐射计对农作物热辐射进行了多次遥感测量。1990年9月又在长春净月潭遥感实验站地区,对水稻、大豆、玉米等进行了车载遥感试验。为定量地分析和理解农作物微波热辐射特征,及其与各种参数(如农作物高度,含水量,几何构造以及频率、极化、视角等)之间的函数对应关系,发展辐射传输的数值模式,提供了定量的数值依据。

农作物一般由秆茎、枝叶和果实组成。它的物理模型大致上可分成离散散射粒子和连续的随机介质二类。在离散散射粒子模型中,秆茎、枝叶、果实等被看成是随机分布的球形或非球形散射体,如椭球状、针状、盘状、柱体等等,并具有一定的空间取向的概率分布。这种模型在主动遥感中已用来计算一阶(单次散射)的后向散射系数<sup>[1]</sup>。而要计算高阶的多次散射和双站散射系数,并进而由互易性定理从反射率计算热发射率,还有很多问题有待于进一步研究。在连续随机介质<sup>[2]</sup>模型中,从遥感器看来,农作物植被层中的散射元,是由随机分布在空气背景中的果实、枝叶和秆茎等不同生物物理成分引起的围绕植被平均介电常数的随机起伏。而这种介电常数随机起伏的统计方差和相关函数,可以用来描述随机介质中热辐射强度的散射和传输。但是,以往的辐射传输理论的数值模拟仅是一层模式。这对于像水稻、小麦等果实与枝叶有明显上下不同位置的分层结构的植被来说,以往的模式是不够精细的。并且,以往一些辐射传输的数值模拟,其参数的选取缺少

\* 本课题为国家自然科学基金项目,并得到霍英东教育基金会的资助。

胡学伟、李靖、韦剑、郭凤莲、金吉南、刘宝江、孙志宝等参加了农作物辐射亮度温度的遥感测量和模式研究,特此致谢。

一致的规范,而有一定的任意性。因此,结合我们自己的遥感实验结果,建立多频段微波热辐射的理论和数值方法,完善和实验数据拟合的理论模式,对热辐射特征进行定量讨论,是十分必要的。

本文给出了 1990 年 9 月在长春净月潭遥感实验站地区对水稻、大豆等不同农作物多频段(3.09, 5.4, 9.6, 36GHz)双极化、多视角的辐射亮度温度的一些测量结果。把水稻、小麦等植被看成是由两层不同的随机介质所组成。即由果实(主要由稻穗、麦穗等)组成的顶层,秆茎和枝叶组成的中间层以及下垫半空间土壤。二散射层有其各不相同的平均介电常数、各不相同的垂直和水平方向的相关长度。介电起伏的相关长度与植被材料(作为介电起伏的散射元)的大小形状尚未得到定量的数值关系,但它们对应于其大小与形状,可作为特征参数来选取。对于两层随机介质,有两个辐射传输方程,和四个耦合的边界条件<sup>[2,3]</sup>。从农作物可看出,中间层秆茎枝叶具有垂直向上的结构,即中间层垂直相关长度,远远大于水平相关长度。因而使得中间层辐射传输方程中的相矩阵具有 $\delta$ 函数的特征,而使中间层辐射传输方程有形式上的解析解<sup>[4]</sup>。其待定系数由耦合边界条件统一求解<sup>[3]</sup>。我们用离散坐标-高斯求积法将顶层的辐射传输方程化成离散坐标的常微分方程组,然后用特征值求解法<sup>[1,2]</sup>求解顶层的辐射传输方程及其包括了中间层和底层热辐射贡献的边界条件,从而得到观察到的辐射亮度温度。对于大豆等不易于分层的农作物,我们采用一层随机介质的模型,其散射系数和相矩阵则是豆荚、秆茎等不同成分混和的平均值。

在计算农作物材料的介电常数时,采用了多相混和的双色散公式<sup>[5]</sup>,此式是近年来在实验测量基础上得到的经验性解析公式;在计算农作物植被层的平均介电常数时,采用了非球形植被材料和空气混和的 Polder-Van/de Loor 公式<sup>[6]</sup>。下垫土壤的介电常数可参阅文献[7]。对各频段上农作物介电参数的选取都由上述公式计算,服从一致的规范。从而使我们的数值模拟结果以及与实验结果的对比较国外的一些工作有更高的可信性。

我们计算了水稻和大豆在几个频段(3.09, 5.4, 9.6, 36GHz)垂直和水平极化的辐射亮度温度和视角变化的关系,并与 1990 年 9 月遥感实验数据进行了比较。同时讨论了辐射亮度温度与频率、极化、视角,以及农作物参数(如含水量,农作物高度,几何结构等)的定量的函数对应关系。

## 二、农作物的平均介电常数

农作物植被层是果实、枝叶、秆茎等植被材料随机分布在空气背景中的混和物。从连续随机介质的模型看,辐射经历的是介电常数的随机起伏,而并不是通常视觉中的叶、秆等。植被层的平均介电常数与植被材料的介电常数、所占体积比(通常均小于 1%)及植被材料的大小形状有关。植被材料是由植物本体材料、水、和空气组成的混合物。其中的水分可分为自由状态的水和与植被材料紧密结合的束缚状态的水。由于水分子是极性分子,具有永久偶极矩。在外场作用下,水分子偶极矩将趋于外场方向。自由状态的水分子偶极矩能很快地与外场方向保持一致,即弛豫时间很短;而束缚状态的水在植被材料的其它非电性结合力的作用下,需很长的弛豫时间才能改变其偶极矩的方向。因此,自由状态

的水和束缚态的水表现出不同的介电特性。但是,植被材料中的本体材料、两种状态的水和空气的组成方式是不清楚的,水也往往以连续的方式分布在材料中。因此,在计算植被材料的介电常数时,就只能采用简单的多相混和叠加的公式。Ulaby 等用传输线波导技术测量了玉米叶等的介电常数,并采用了植被材料介电折射系数的经验公式来计算<sup>[6,8]</sup>:

$$\sqrt{\varepsilon_v} = v_a \varepsilon_0 + v_{fw} \sqrt{\varepsilon_{fw}} + v_{bw} \sqrt{\varepsilon_{bw}} + (1 - m_v - v_a) \sqrt{\varepsilon_{bk}} \quad (1)$$

其中,下标  $v, a, fw, bw, bk$  分别表示植被材料、空气、自由态水、束缚态水和植物本体材料;  $v_i (i = a, fw, bw)$  为相应成分的体积占空比,含水量体积  $m_v = v_{fw} + v_{bw}$ 。束缚态水  $\varepsilon_{bw}$  采用微波波段中与频率几乎无关的冰的介电常数。但是, Ulaby 等<sup>[9]</sup>近来用同轴探针技术测定玉米叶和秆的介电常数的结果认为,束缚态水介电行为与冰仍有很大区别,与频率有关,即有色散特性。因此他们提出用新的 Debye-Cole 双色散模式,来计算植被材料的介电常数,与实验取得了很好的一致。双色散模式的植被材料介电常数写为:

$$\varepsilon_v = v_{fw} \varepsilon_{fw} + v_{bv} \varepsilon_{bv} + v_{rv} \varepsilon_{rv} \quad (2)$$

其中,下标  $bv$  表示束缚水和与束缚水结合在一起的植被材料部分,有色散特性;下标  $rv$  表示余下的未与束缚水结合的材料和空气部分。自由态水  $\varepsilon_{fw}$  由 Debye 公式<sup>[6,9]</sup>计算,其含盐量在 5‰量级。经验性的解析公式有

$$\varepsilon_{bv} = \left[ 2.9 + \frac{55}{1 + (jf/18)^{0.5}} \right] \varepsilon_0 \quad (3a)$$

$$v_{bv} = 4.64 m_g^2 / (1 + 7.36 m_g^2) \quad (3b)$$

$$v_{fw} = m_g (0.55 m_g - 0.076) \quad (3c)$$

$$v_{rv} \varepsilon_{rv} = (1.7 - 0.74 m_g + 6.16 m_g^2) \varepsilon_0 \quad (3d)$$

其中,  $m_g$  为植被材料中含水分的重量比,由实验数据给定; (3a) 中的  $f$  为频率 (GHz)。我们在 (2) 式中将文献 [6] 中的  $\varepsilon_r$  改写成  $v_{rv} \varepsilon_{rv}$ , 以便于讨论。当植被材料中含水量  $m_g$  减小时,空气的体积比  $v_a$  的增加是否正好填满含水量减少而余留下的空间? Ulaby 等曾怀疑为什么  $\varepsilon_{rv}$  与  $m_g$  有关。我们认为  $v_{rv}$  是未与束缚水结合的植被材料和空气的总和,即

$$v_{rv} \varepsilon_{rv} = v_{rbk} \varepsilon_{rbk} + v_a \varepsilon_0$$

$m_g$  的变化导致  $v_{rbk}$  和  $v_a$  的重新调整。我们不必细究这一调整变化是如何分配的,而只用其总值  $v_{rv} \varepsilon_{rv}$  由 (3d) 给出。由于双色散模式 (2), (3) 与实验结果取得很好的一致,且目前没有更多可靠的数据可以利用,因此我们将用 (2), (3) 式来计算各农作物材料的介电常数,而仅对农作物的果实和秆茎的含水量作些变化。

农作物植被层是由非球形的植被材料随机分布在空气背景中的随机介质,其平均介电常数与植被材料的介电特性、几何大小、体积占空比、空间取向等有关。我们采用通常

的水平方向高斯分布的、垂直方向指数分布的、具有不同相关长度的相关函数来描述植被材料随机分布产生的介电起伏。并采用非球形粒子混和物的 Polder-Van/de Loor 公式<sup>[6]</sup>计算农作物植被层的平均介电常数  $\varepsilon_m$ ，写为

$$\varepsilon_m = \varepsilon_0 + \frac{1}{3} f_v (\varepsilon_v - \varepsilon_0) \sum_{i=1}^3 \left[ \frac{1}{1 + A_i (\varepsilon_v / \varepsilon_0 - 1)} \right] \quad (4)$$

其中

$$A_3 = \frac{1 - e^2}{2e^3} \left[ \ln \left( \frac{1 + e}{1 - e} \right) - 2e \right] \quad (5a)$$

$$A_1 = A_2 = (1 - A_3) / 2 \quad (5b)$$

$$e = [1 - (l_p / l_z)^2]^{1/2} \quad \text{当 } l_p < l_z \quad (5c)$$

$$e = [1 - (l_z / l_p)^2]^{1/2} \quad \text{当 } l_p > l_z \quad (5d)$$

这里的  $f_v$  为植被材料在植被层中的体积占空比，一般均小于 0.01。根据我们对水稻和大豆的实测数据，取  $f_v = 0.002$ ； $l_p$  和  $l_z$  分别为水平和垂直方向上的相关长度。显然，由于  $f_v$  很小，不论用何种模式， $\varepsilon_m$  的实部仅略高于  $\varepsilon_0$ ，而其虚部则变化敏感。介电起伏方差可写成

$$\delta = f_v |(\varepsilon_v - \varepsilon_m) / \varepsilon_m|^2 + (1 - f_v) |(\varepsilon_0 - \varepsilon_m) / \varepsilon_m|^2 \quad (6)$$

### 三、多层随机介质的辐射传输方程和边界条件

在多层模式中，分别对应于果实层和秆茎层的为区域 1 和 2 的随机介质，其介电常数分别写为  $\varepsilon_1(\vec{r}) = \varepsilon_{1m} + \varepsilon_{1f}(\vec{r})$ ， $\varepsilon_2(\vec{r}) = \varepsilon_{2m} + \varepsilon_{2f}(\vec{r})$ ，这里的  $\varepsilon_{im}$  ( $i = 1, 2$ ) 为平均介电常数； $\varepsilon_{if}(\vec{r})$  为介电常数的随机起伏。区域 1 和 2 的辐射传输方程可分别写成：

$$\begin{aligned} \cos \theta_1 \frac{d}{dz} \bar{I}_1(\theta_1, z) &= -\kappa_{e1}(\theta_1) \bar{I}_1(\theta_1, z) \\ &+ \int_0^\pi d\theta'_1 \sin \theta'_1 \bar{P}_1(\theta_1, \theta'_1) \bar{I}_1(\theta'_1, z) + \kappa_{a1}(\theta_1) C \bar{T}_1 \end{aligned} \quad (7a)$$

$$\begin{aligned} \cos \theta_2 \frac{d}{dz} \bar{I}_2(\theta_2, z) &= -\kappa_{e2}(\theta_2) \bar{I}_2(\theta_2, z) \\ &+ \int_0^\pi d\theta'_2 \sin \theta'_2 \bar{P}_2(\theta_2, \theta'_2) \bar{I}_2(\theta'_2, z) + \kappa_{a2}(\theta_2) C \bar{T}_2 \end{aligned} \quad (7b)$$

其中， $\theta_1$  和  $\theta_2$  满足 Snell 法则；辐射强度  $\bar{I} =$  柱矢量  $[I_v(\theta, z), I_h(\theta, z)]$ ； $v, h$  分别记为垂直和水平极化； $T_1, T_2$  分别为区域 1 和 2 的物理温度； $\kappa_e$  和  $\kappa_a$  分别为消光和吸收系数； $\bar{P}$  为相矩阵<sup>[10]</sup>； $C = B/\lambda^2$ ； $B$  为 Boltzmann 常数； $\lambda$  波长。相应的边界条件可以写为

$$\bar{I}_1(\pi - \theta_1, z = d_1) = \bar{R}_{10}(\theta_1) \bar{I}_1(\theta_1, z = d_1) \quad (8a)$$

$$\bar{I}_1(\theta_1, z = 0) = \bar{R}_{12}(\theta_1) \bar{I}_1(\pi - \theta_1, z = 0) + \bar{i}_{21}(\theta_2) \bar{I}_2(\theta_2, z = 0) \quad (8b)$$

$$\bar{I}_2(\pi - \theta_2, z = 0) = \bar{R}_{21}(\theta_2)\bar{I}_2(\theta_2, z = 0) + \bar{I}_{12}(\theta_1)\bar{I}_1(\pi - \theta_1, z = 0) \quad (8c)$$

$$\bar{I}_2(\theta_2, z = -d_2) = \bar{R}_{23}(\theta_2)\bar{I}_2(\pi - \theta_2, z = -d_2) + \bar{I}_{32}(\theta_2)C\bar{T}_3 \quad (8d)$$

其中,  $0 \leq \theta_1, \theta_2 \leq \pi/2$ , 具有  $\theta$  的  $\bar{I}$  为向上的辐射强度, 而具有  $(\pi - \theta)$  的  $\bar{I}$  为向下的辐射强度;  $\bar{R}_{ij}$  和  $\bar{I}_{ij}$  ( $i, j = 1, 2, 3$ ) 为对角化的反射率和透射率矩阵, 下标  $ij$  记为从区域  $i$  到区域  $j$ . 显然  $i, j$  是互易的。

由连续随机介质的辐射传输方程<sup>[4,10]</sup>可知, 相矩阵  $\bar{P}_i$  ( $i = 1, 2$ ) 中各元素具有介电起伏相关函数的谱函数:

$$w_i(\bar{k}) = \lim_{\nu_i \rightarrow \infty} \frac{\omega^4 \mu_0^2}{16 \pi^2 \nu_i} \int_{\nu_i} d\bar{r} \int_{\nu_i} d\bar{r}' e^{i\bar{k} \cdot (\bar{r} - \bar{r}')} \langle \epsilon_{ij}(\bar{r}) \epsilon_{ij}^*(\bar{r}') \rangle \quad (9)$$

这里的  $\nu_i$  为求积散射元的体积, 可最终消去;  $\omega$  为圆频率,  $\mu_0$  磁导率。我们采用通常假设的相关函数

$$\langle \epsilon_{ij}(\bar{r}) \epsilon_{ij}^*(\bar{r}') \rangle = \delta_{ij} \epsilon_{im}^2 \exp \left[ -\frac{|z - z'|}{l_{zi}} - \frac{|x - x'|^2 + |y - y'|^2}{l_{pi}^2} \right] \quad (10)$$

代入(10)至(9)式, 可得到  $w_i(\bar{k})$  的解析表达式<sup>[4]</sup>。在区域 2 中, 有  $l_{z2} \gg l_{p2}$ 。可以得知<sup>[4]</sup>, 区域 2 的  $w_2(\bar{k})$  具有  $\delta(\cos\theta_2 - \cos\theta'_2)$  的因子。因此, 方程 (7b) 中多次散射的对  $\theta'_2$  的求积可解析地完成, 使方程 (7b) 变成常微分方程:

$$\begin{aligned} \cos\theta_2 \frac{d}{dz} I_{2\alpha}(\theta_2, z) = & -[\kappa_{a2}(\theta_2) + \kappa_2(\theta_2)]I_{2\alpha}(\theta_2, z) \\ & + \kappa_2(\theta_2)I_{2\beta}(\theta_2, z) + \kappa_{a2}(\theta_2)CT_2 \end{aligned} \quad (11)$$

其中  $\alpha, \beta$  分别取极化  $\nu, h$ ; 且有

$$\kappa_2(\theta_2) = \frac{\delta_2 k'_{2m} \pi \cos^2\theta_2}{2 \sin^2\theta_2} e^{-\frac{1}{2} k'_{2m} l_{2p}^2 \sin^2\theta_2} I_1 \left( \frac{1}{2} k'_{2m} l_{2p}^2 \sin^2\theta_2 \right) \quad (12)$$

这里  $k'_{2m}$  为区域 2 中平均波数  $k_{2m}$  的实部,  $I_1$  为一阶的 Bassel 函数。方程 (11) 的解析解可写成<sup>[3]</sup>

$$I_{\nu_2}(\theta_2, z) = (a_u - CT_2)e^{-\kappa_{a2}z \sec\theta_2} + b_u e^{-(\kappa_{a2} + 2\kappa_2)z \sec\theta_2} + CT_2 \quad (13a)$$

$$I_{h_2}(\theta_2, z) = (a_u - CT_2)e^{-\kappa_{a2}z \sec\theta_2} - b_u e^{-(\kappa_{a2} + 2\kappa_2)z \sec\theta_2} + CT_2 \quad (13b)$$

$$I_{\nu_2}(\pi - \theta_2, z) = (a_d - CT_2)e^{\kappa_{a2}z \sec\theta_2} + b_d e^{(\kappa_{a2} + 2\kappa_2)z \sec\theta_2} + CT_2 \quad (13c)$$

$$I_{h_2}(\pi - \theta_2, z) = (a_d - CT_2)e^{\kappa_{a2}z \sec\theta_2} - b_d e^{(\kappa_{a2} + 2\kappa_2)z \sec\theta_2} + CT_2 \quad (13d)$$

其中  $a_u, b_u, a_d, b_d$  为待定的未知系数, 由耦合边界条件来确定。将解 (13a—d) 代入边界条件 (8b), 则  $a_u$  和  $b_u$  由  $\bar{I}_1(\theta_1, z = 0)$  和  $\bar{I}_1(\pi - \theta_1, z = 0)$  表示; 将 (13a, b) 代入 (8c, d), 则  $a_d$  和  $b_d$  由  $\bar{I}_1(\theta_1, z = 0)$  和  $\bar{I}_1(\pi - \theta_1, z = 0)$  表示。并给出  $z = 0$  处新的耦合边界条件为

$$\begin{bmatrix} I_{\nu_1}(\theta_1, z = 0) \\ I_{h_1}(\theta_1, z = 0) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_{\nu\nu} & R_{\nu h} \\ R_{h\nu} & R_{hh} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{\nu_1}(\pi - \theta_1, z = 0) \\ I_{h_1}(\pi - \theta_1, z = 0) \end{bmatrix} + C \begin{bmatrix} T_\nu \\ T_h \end{bmatrix} \quad (14)$$

其中  $R_{\nu\nu}, R_{hh}$  为包括中间层和底层辐射贡献的同极化反射率;  $R_{\nu h}, R_{h\nu}$  为去极化反射率, 且当  $\delta_2 \rightarrow 0$  时(即中间层为非随机介质时), 去极化反射率为零;  $T_\nu$  和  $T_h$  分别为垂直和水平极化的中间层和底层辐射的透射贡献。 $R_{ij}$  和  $T_i$  ( $i, j = \nu, h$ ) 的解析表达式可参阅文献[3]。

于是,我们的任务是求解辐射传输方程 (7a) 和边界条件 (8a) 和(14),然后得到辐射亮度温度

$$\bar{T}_B(\theta) = \frac{1}{C} \bar{i}_{10}(\theta_1) \bar{I}_1(\theta_1, z = 0) \quad (15)$$

它包括了吸收和多次散射的顶层、中间层和下垫底层的热辐射总和。

作为一个特例  $d_2 = 0$ , 即无中间层时,  $R_{\alpha\alpha} = R_{\beta\alpha}$ ,  $R_{\alpha\beta} = 0$ ,  $T_\alpha = \tau_{\beta\alpha} T_3$  ( $\alpha\alpha = \nu\nu, hh; \alpha\beta = \nu h, h\nu; \alpha = \nu, h$ )。即单层随机介质。我们对于大豆这种无明显分层结构的农作物,采用一层随机介质的模式,求解辐射亮度温度。若令  $\delta_2 = 0$ , 即中间层为非随机的均匀介质,  $R_{\alpha\alpha}$ ,  $R_{\alpha\beta}$ ,  $T_\alpha$  给出多层均匀介质的反射率和透射率。

#### 四、实验和数值结果的讨论

图 1 和图 2 给出了 9 月 13 日就水稻 3.09, 9.6, 36 GHz 辐射亮度温度对视角关系的测量值。图中的三角和圆点分别为相应频率的垂直和水平极化的测量值。由水稻样品烘干前后的重量,得到水稻含水重量比  $m_g = 0.554$ , 我们选定顶层的  $m_g$  略小些,为 0.3; 秆叶部分  $m_g$  仍为 0.554。我们在一定大小的稻田面积上统计生长水稻总横向截面的平均值,取二者之比作为水稻体积占空比的近似值,测得为 0.002。土壤的体湿度 = 0.27。由文献 [7] 计算  $\epsilon_3$ , 其中参数  $w_T = 0.2$ ,  $\beta = 0.3$ ,  $\alpha = 0$ 。其它实验测值和有关参数均列在图中和图的标题下。图中曲线为辐射传输理论数值计算的结果。3.09 GHz 水平极化

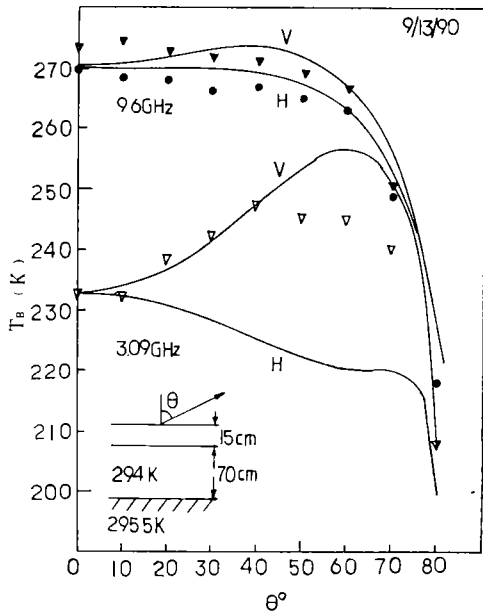


图 1 水稻 3.09, 9.6GHz 辐射亮度温度与视角关系

3.09GHz:  $\epsilon_{1m} = (1.01 + i1.4 \times 10^{-3})\epsilon_0$ ,  $\delta_1 = 0.1$ ,  $l_{p1} = 0.4\text{cm}$ ,  $l_{s1} = 0.8\text{cm}$ ;  $\epsilon_{2m} = (1.01 + i2.4 \times 10^{-3})\epsilon_0$ ,  $\delta_2 = 0.6$ ;  $\epsilon_3 = (11.94 + i1.51)\epsilon_0$   
 9.6GHz:  $\epsilon_{1m} = (1.002 + i3 \times 10^{-3})\epsilon_0$ ,  $\delta_1 = 0.2$ ,  $l_{p1} = 0.1\text{cm}$ ,  $l_{s1} = 0.2\text{cm}$ ;  $\epsilon_{2m} = (1.009 + i4 \times 10^{-3})\epsilon_0$ ,  $\delta_2 = 0.4$ ,  $\epsilon_3 = (10.34 + i3.52)\epsilon_0$

Fig. 1 Brightness temperature of rice vs observation angle at 3.09, 9.6GHz

测得为 0.002。土壤的体湿度 = 0.27。由文献 [7] 计算  $\epsilon_3$ , 其中参数  $w_T = 0.2$ ,  $\beta = 0.3$ ,  $\alpha = 0$ 。其它实验测值和有关参数均列在图中和图的标题下。图中曲线为辐射传输理论数值计算的结果。3.09 GHz 水平极化

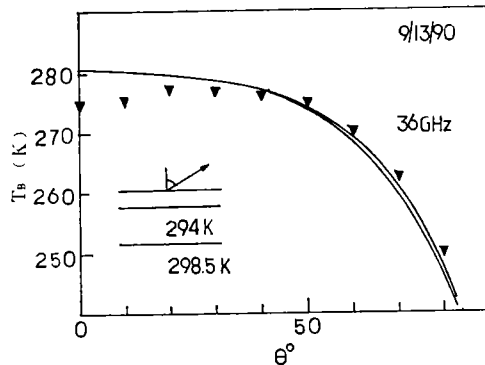


图 2 水稻 36GHz 辐射亮度温度与视角关系

$\epsilon_{1m} = (1.001 + i3 \times 10^{-3})\epsilon_0$ ,  $\delta_1 = 0.2$ ,  $l_{p1} = 0.04\text{cm}$ ,  $l_{s1} = 0.08\text{cm}$ ;  $\epsilon_{2m} = (1.01 + i6.9 \times 10^{-3})\epsilon_0$ ,  $\delta_2 = 0.4$ ;  $\epsilon_3 = (4 + i0.78)\epsilon_0$

Fig. 2 Brightness temperature of rice vs observation angle at 36 GHz

辐射亮度温度实测值缺。可以看出，理论结果与实验测值基本上是一致的。比较几个频段可以看出，随频率的增加，不同极化的辐射亮度温度的差别减小。这是由于在较高的频率，顶层的漫散射变得显著，并使地面的热发射得到遮蔽。在实验中风的驱动能明显影响辐射亮度温度，使有风时辐射亮度温度的测值有所波动。由于散射体(果实，叶秆等)空间取向受风的影响而改变，使相关长度亦相应变化，从而影响辐射亮度温度。在我们的模式中，地表面粗糙的影响未予以考虑。在视角为  $0^\circ$  时，垂直和水平极化的亮度温度有差异，可能是农作物成行结构的影响以及在  $0^\circ$  视野中，辐射计纳入了遥感平台机构的影响。

图 3 和图 4 给出了 9 月 23 日对大豆 3.09, 9.6, 36 GHz 辐射亮度温度对视角关系的测量值及辐射传输的数值计算结果，二者的拟合是一致的。3.09 GHz 水平极化辐射亮度在大视角时的实测值，可能由于实验时误差及阵风的影响，而与理论结果有些差异。由大豆样品烘干前后的重量，测得大豆总含水重量比  $m_g = 0.59$ 。用单位体积大豆田里大豆总株数所占的体积作为大豆体积占空比，测得为 0.0015，土壤体湿度 = 0.12。其它实验测值和有关参数均列在图中和图的标题下。

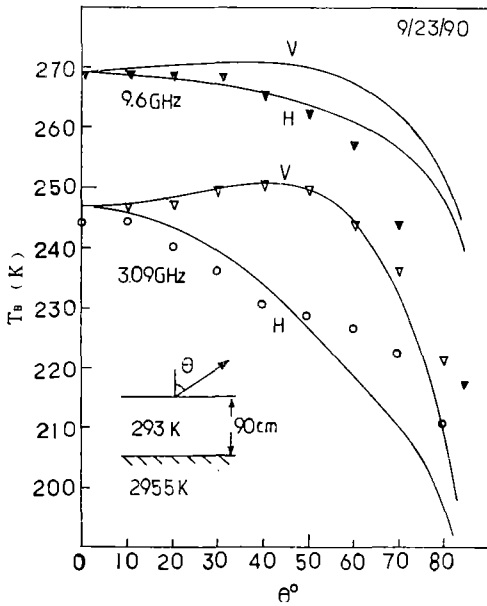


图 3 大豆 3.09, 9.6GHz 辐射亮度温度与视角关系

3.09GHz:  $\epsilon_{1m} = (1.01 + i3 \times 10^{-3})\epsilon_0, \delta_1 = 0.58, l_{p1} = 0.4\text{cm}, l_{z1} = 0.8\text{cm}; \epsilon_s = (5 + i0.4)\epsilon_0$   
 9.6GHz:  $\epsilon_{1m} = (1.008 + i3.4 \times 10^{-3})\epsilon_0, \delta_1 = 0.4, l_{p1} = 0.1\text{cm}, l_{z1} = 0.2\text{cm}; \epsilon_s = (4.8 + i0.74)\epsilon_0$

Fig. 3 Brightness temperature of soy bean vs observation angle at 3.09, 9.6GHz

大豆样品烘干前后的重量，测得大豆总含水重量比  $m_g = 0.59$ 。用单位体积大豆田里大豆总株数所占的体积作为大豆体积占空比，测得为 0.0015，土壤体湿度 = 0.12。其它实验测值和有关参数均列在图中和图的标题下。

图 5 给出了不同高度和不同含水量时 5.4 GHz 的大豆辐射亮度温度与视角关系的

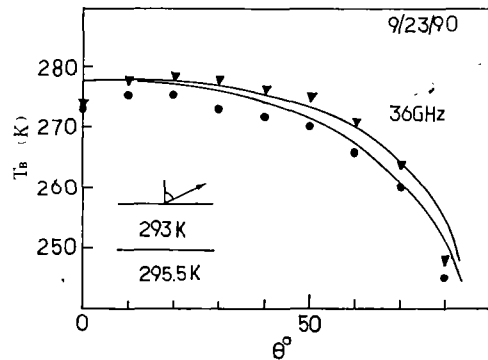


图 4 大豆 36GHz 辐射亮度温度与视角关系

$\epsilon_{1m} = (1.004 + i3 \times 10^{-3})\epsilon_0, \delta_1 = 0.17, l_{p1} = 0.035\text{cm}, l_{z1} = 0.07\text{cm}, \epsilon_s = (4 + i0.78)\epsilon_0$

Fig. 4 Brightness temperature of soy bean vs observation angle at 36 GHz

数值模拟结果。随着农作物高度的增加，在视角较小时，由于层高增加，热辐射贡献也会增加。但在大视角时，多次散射明显增强，而使辐射亮度温度降低。同时，地表发射率的 Brewster 角特征也得到遮蔽，使两种极化的辐射亮度温度差别减小。当含水量增大时，会使热发射有所增强。同时，吸收和散射亦使两种不同极化的辐射亮度温度更加接近。但是进一步加大含水量，反会使辐射亮度温度趋于下降。

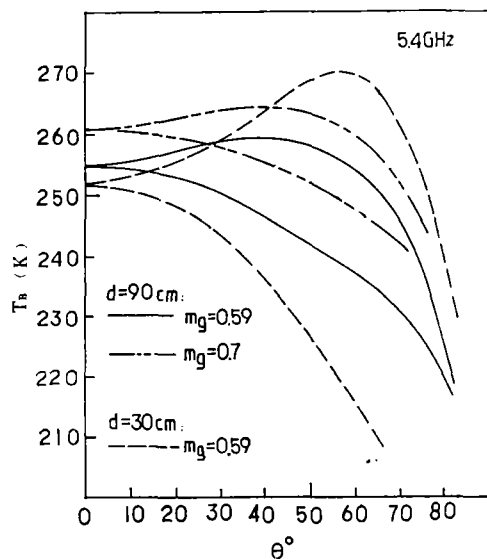


图 5 不同高度不同含水量时 5.4GHz 大豆辐射亮度温度与视角的关系

$\epsilon_s = (5 + i0.56)\epsilon_0$ ,  $l_p = 0.2\text{cm}$ ,  $l_x = 0.4\text{cm}$ , 其余参数与图 3 相同。

Fig. 5 Brightness temperature of soy bean vs observation angle at 5.4 GHz for different depth and water contents

## 五、结 论

本文给出了多频段微波辐射计 (3.09, 5.4, 9.6, 36 GHz) 对水稻、大豆等辐射亮度温度遥感测量的一些结果。利用双色散模式和 Polder-Van/de Loor 公式计算农作物植被层的平均介电常数, 作为辐射传输数值模拟的输入参数。发展了多层随机介质辐射传输的理论模式, 讨论了辐射传输方程及其边界条件的推导。用高斯求积-离散坐标法和特征值求解法, 得到了辐射传输方程的数值解。数值结果与水稻大豆遥感数据进行了比较, 表明我们的实验结果和理论模式数值模拟的工作是完善的。从而能定量地解释和讨论辐射亮度温度与农作物各物理参数, 比如含水量、农作物高度等, 以及频率、极化、视角的函数对应关系, 为农作物估产和监视提供了可靠的实验基础和数值模型。

## 参 考 文 献

- [1] 曾亮、金亚秋, 物理学进展, (10), 57, 1990。
- [2] Y. Q. Jin and R. G. Isaacs, J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer, (37), 461, 1987。
- [3] 韦剑、金亚秋, 电波科学学报, 1(1), 1990。
- [4] S. L. Chuang, J. A. Kong, and L. Tsang, J. Appl. Phys., (51), 5588, 1980。
- [5] F. T. Ulaby and M. A. El-Rayes, IEEE Trans. on Geosci. Rem. Sen., (25), 550, 1987。
- [6] F. T. Ulaby, R. K. Moore, and A. K. Fung, Microwave Remote Sensing, Vol. 3, Dedham, MA: Arttech, 1986。
- [7] 金亚秋, 张俊荣, 赵仁宇, 环境遥感, 5(3), 195, 1990。
- [8] F. T. Ulaby and R. P. Jedlicka, IEEE Trans. on Geosci. Rem. Sens., (22), 406, 1984。
- [9] 金亚秋, 张俊荣, 赵仁宇, 环境遥感, 7(1), 1992。
- [10] L. Tsang, J. A. Kong, and R. Shin, Theory of Microwave Remote Sensing, Wiley Interscience, NY, 1985。



## Remote Sensing of Crops by Multi-Frequency Microwave Radiometers and Numerical Modeling of Radiative Transfer of Multi-Layer Random Media\*

Jin Yaqui

*(Department of Electronic Engineering Fudan University, Shanghai)*

Zhang Junrong Zhao Renyu

*(Changchun Institute of Geography Academia Sinica, Changchun)*

### Abstract

Since 1987 the thermal emission from crop canopies has been measured by multi-frequency microwave radiometers designed by Changchun Institute of Geography, Academia Sinica. The relationship between dualpolarized brightness temperature and some related parameters, such as crop height, moisture content, geometric structure, etc., has been experimentally obtained. To quantitatively understand the functional dependence of brightness temperature on those parameters and frequency, polarization, observation angle, we have developed a numerical modeling of radiative transfer for multi-layer random media, which modeled the stratified layers of fruit, leaves and stalks. The newly-derived dual-dispersion model and Polder Van/de Looor formulation are used to calculate the mean dielectric permittivity. All parameters are chosen in a consistent way. The radiative transfer equation for multi-layer random media is derived. By using the discrete-ordinate and eigenanalysis methods, numerical results of radiative transfer are obtained, and are favorably compared with the experimental data. The functional relationship between the brightness temperature and various parameters are discussed.

**Key words** Microwave thermal emission of crops Measurements Numerical simulation of radiative transfer

---

\* Project supported by the National Natural Science Foundation of China, and Fok Ying Tung Education Foundation.