

文章编号: 1007-4619(2005)05-0531-06

# 用双矩阵法和积分方程模型估算地表的亮度温度

张钟军<sup>1</sup>, 孙国清<sup>1, 2</sup>

(1. 北京师范大学 遥感与地理信息系统研究中心, 遥感科学国家重点实验室, 北京 100875; 2. 马里兰大学, MD 20742, 美国)

**摘 要:** 提出了一种估计覆盖植被的地表亮度温度模型。模型中的植被看作是不同的离散散射体如叶、茎、秆构成。植被层内的体散射以及植被与地表之间的多次散射采用了双矩阵法 (Matrix Doubling) 计算, 地表辐射采用了积分方程模型 (Integral Equation Method)。较高频率上的模拟结果显示植被的辐射是主要的, 植被对地表辐射的衰减作用较明显。模拟的亮度温度跟 SGP99 机载 C 波段以及 AMSR-E 的 X 和 Ku 波段实测数据相比接近一致。

**关键词:** 亮度温度 多次散射 积分方程模型 零阶模型

**中图分类号:** TP701 **文献标识码:** A

## 1 引 言

采用被动微波遥感技术对覆盖植被的地表进行土壤水分反演时, 植被是影响敏感性最重要的因素之一。这是由于植被层不仅具有自身向上的辐射, 还要对地表辐射起衰减作用<sup>[1]</sup>。一定厚度的植被可以完全屏蔽地表的辐射<sup>[2]</sup>。

土壤水分反演中通常采用零阶的  $\omega\tau$  模型。该模型中植被层通常看作是均匀介质, 忽略了多次散射效果, 亮度温度用单散射反照率 (single scattering albedo) 和光学厚度 (optical opacity) 描述。前者被指定为一个几乎不受频率和极化影响的常量<sup>[1, 2]</sup>; 后者用半经验算法导出。

$\omega\tau$  模型通常在 5GHz 以下使用<sup>[2, 3]</sup>。最近的研究表明, 随着频率的增加, 植被的几何特性如大小、形状、朝向等因素, 对单散射反照率和光学厚度的影响变得越来越重要。植被内部的多次散射以及植被与地表之间的多次散射作用也更明显, 不宜再把植被看作均匀介质<sup>[3]</sup>。此外  $\omega\tau$  模型中计算地表辐射的  $Q/h$  模型过高地估计了地表粗糙度对发射率的影响<sup>[4]</sup>。因此当使用包含较高频率的 AMSR-E 数据估计地表亮温时, 这些影响因素都应充分考虑。

把植被层看作离散的散射体集合, 可以用电磁

波理论在更宽的频率范围内更准确描述其散射和衰减特性<sup>[5-8]</sup>。为发展一套频率范围适用广泛的亮度温度模型, 本文提出了把基于光线跟踪原理的双矩阵法 (Matrix Doubling) 应用到覆盖植被的地表辐射问题中。模型中的植被层采用了离散模型来计算前向和后向散射<sup>[6, 9]</sup>。植被内部以及植被与边界之间的多次散射效果采用双矩阵法考虑。下垫面采用了积分方程模型 (Integral Equation Method) 来获得地表辐射。本文的最后分别比较了植被和地表的辐射贡献, 并用 SGP99 机载 C 波段以及 AMSR-E 的 X 和 Ku 波段实测数据进行了模型验证。

## 2 模 型

### 2.1 植被模型描述

在本文的模型中, 研究对象分为空气、植被和地表。为了考虑植被层内部的多次散射, 把植被层分割成  $N$  个无限薄子层, 穿过任一薄层的散射认为单次的, 如图 1。同时为计算任意方向上的散射, 在薄层入射和散射方向上用高斯勒让德 (Gaussian-Legendre) 方法分别划分出  $M$  个方向。对于某个入射方向来说, 相邻两个薄子层  $\Delta\tau_1$  和  $\Delta\tau_2$  之间经过多次散射后的向后散射  $S$  和向前散射  $T$ , 用光线跟踪法表示为<sup>[7, 10]</sup>:

收稿日期: 2004-04-13; 修订日期: 2004-08-02

基金项目: 国家自然科学基金 (40271000) 和北京师范大学青年基金项目。Publishing House. All rights reserved. <http://www.cnki.net>

作者简介: 张钟军 (1968—), 男, 山东省烟台市人。博士, 副教授, 1990年毕业于北京师范大学电子系, 主要研究方向为被动微波遥感, 已发表论文 10 余篇。

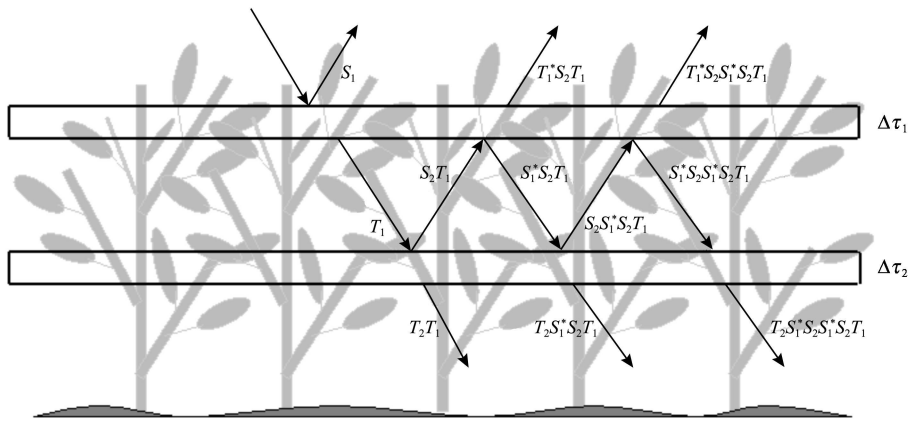


图 1 辐射模型示意图

Fig 1 Emission model

$$S = S_1 + T_1^* S_2 T_1 + T_1^* S_2 S_1^* S_2 T_1 + \dots$$

$$= S_1 + T_1^* S_2 (1 - S_1^* S_2)^{-1} T_1 \quad (1)$$

$$T = T_2 [1 + S_1^* S_2 + (S_1^* S_2)^2 + \dots] T_1$$

$$= T_2 (1 - S_1^* S_2)^{-1} T_1 \quad (2)$$

(1)式和(2)式中  $S_n$  和  $T_n$  ( $n=1, 2$ )是薄子层后向和前向散射的相位矩阵。当把相邻的薄子层合并为  $\Delta\tau_1 + \Delta\tau_2$  一层时,并重复上述过程  $N$ 次,就可以求出任意厚度植被层的散射相位矩阵。

植被层看作离散的散射体如叶、杆组成。为计算其散射,半径小于三分之一波长的圆形叶片或者长度小于十分之一波长的松针看作是扁长的椭球体,使用瑞利金斯(Rayleigh-Jeans)公式近似;否则采用几何光学算法<sup>[8]</sup>。树枝看作是介电圆柱体,采用有限长近似理论<sup>[9]</sup>。植被层水平方向假设对称分布。植被的散射矩阵是通过对所有朝向( $\alpha, \beta$ )和大小( $h, a$ )散射体的斯托克斯矩阵  $L$ 进行统计平均获得<sup>[6]</sup>:

$$\langle P_{pq}(\theta_p, \theta_s, \varphi) \rangle = \int_{\alpha_1}^{\alpha_2} d\alpha \int_{\beta_1}^{\beta_2} d\beta \int_{h_1}^{h_2} dh \int_{a_1}^{a_2} da L(\alpha, \beta; h, a; \theta_p, \theta_s, \varphi) p_1(\alpha, \beta) p_2(h, a) \quad (3)$$

(3)式中  $p_1$  和  $p_2$  分别是散射体朝向和大小概率分布函数,具体细节可参阅文献[6, 11]。为便于矩阵的计算,需要把相位矩阵按方位角展成傅里叶级数。计算各向同性介质的亮度温度只需要相位矩阵的零阶傅里叶分量就足够了<sup>[7]</sup>。

### 2.2 边界处理

本文模型中空气和植被边界没有反射,多次散射只存在于植被层的内部以及与地表之间,这需要把上边界进行简化处理,如图2。因此由植被向上

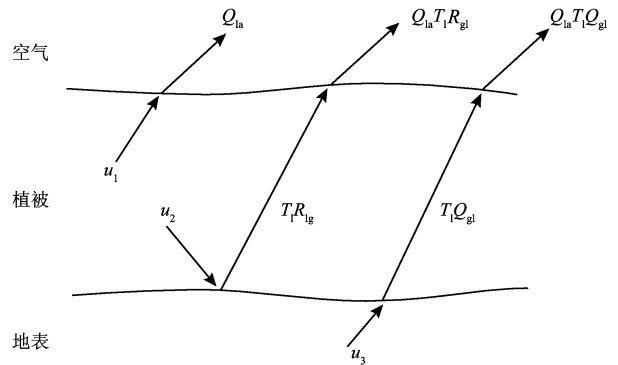


图 2 辐射分量  $u_1, u_2$  和  $u_3$  的边界效果

Fig 2 Boundary effect of emission components  $u_1, u_2$  and  $u_3$

的辐射分量( $u_1$ )、向下的辐射分量( $u_2$ )和地表分量( $u_3$ )构成的总辐射  $u_1$ 表示为<sup>[2, 7]</sup>:

$$u_1 = 2\pi Q_{la} u_1 + (2\pi)^2 Q_{la} T_1 R_g u_2 + (2\pi)^2 Q_{la} T_1 Q_{g1} u_3 \quad (4)$$

(4)式中  $Q_{la}$  和  $Q_{g1}$  分别是植被层到空气、地表到植被层等效的传输矩阵。 $R_g$ 是地表等效的反射矩阵,这些矩阵由积分方程模型(IEM)获得<sup>[7]</sup>。 $T_1$ 是植被层前向散射的相位矩阵,用(3)式得到。

植被层是散射体和空气的混合介质。微波辐射穿越不同介质时会在边界处产生折射,折射角度由斯奈尔(Snell)定理借助介电常数计算。植被层混合介质的平均介电常数  $\epsilon_e$  公式为<sup>[2]</sup>:

$$\epsilon_e^{1/2} = \epsilon_{air} + V_v (\epsilon_v^{1/2} - \epsilon_{air}^{1/2}) \quad (5)$$

(5)式中  $\epsilon_{air}$ 是空气的介电常数,  $\epsilon_v$ 是植被层等效的介电常数,  $V_v$ 是植被的体积。

### 2.3 地表辐射模型简介

微波遥感中计算自然地表散射的常见模型分为

半经验模型和理论模型。前者的代表是 Q/h 模型；后者主要有 Kirchhoff 模型和小波绕模型 (small perturbation model)。Chen 和 Fung 的研究结果表明, Kirchhoff 和小波绕模型分别是 IEM 在高频和低频区域的特例<sup>[12]</sup>。模拟表明, Q/h 模型高估了地表粗糙度对发射率的影响,土壤水分和粗糙度对微波辐射的影响更接近于 IEM 的结果<sup>[4]</sup>,因此在本文中采用 IEM 作为地表模型,来计算地表的发射率、地表到植被层传输率,以及地表对植被辐射的反射率。

在表面小到中等粗糙度情况下, IEM 中的双站 (bistatic) 散射系数由单次散射项和多次散射项组成:

$$\sigma_{qp}^0 = \sigma_{qp}^0(S) + \sigma_{qp}^0(M) \quad (6)$$

(6)式中单次散射系数可以表示为:

$$\sigma_{qp}^0(S) = \sigma_{qp}^k(S) + \sigma_{qp}^{kc}(S) + \sigma_{qp}^c(S) \quad (7)$$

(7)式中第一项是 Kirchhoff 项,第三项是补场项,第二项是两者的交叉项。

(6)式中多次散射项可以表示为:

$$\sigma_{qp}^0(M) = \sigma_{qp}^{kc}(M) + \sigma_{qp}^{c1}(M) + \sigma_{qp}^{c2}(M) \quad (8)$$

(8)式中第二项是补场项的第一部分,第三项是补场项的第二部分<sup>[12]</sup>。每一项的具体表达式较繁琐,可以参考文献 [7, 12]。利用 (6)式至 (8)式可以计算出地表的反射系数矩阵和传输系数矩阵,再根据能量守恒可以得到地表的发射率。

### 3 模拟结果与验证

为了验证模型的正确性,本节中首先对 IEM 在裸土情况下的双站散射系数进行模拟和验证。然后在有植被覆盖的情况下,用本文发展的模型分别进行了 C、X 和 Ku 波段下的亮度温度的模拟,并跟实测数据进行了比较。

#### 3.1 裸露地表的验证

用 IEM 算法模拟裸露地表的结果如图 3。相同条件下双站散射系数的模拟结果跟文献 [7] 完全一致,说明本文中 IEM 算法的正确性。

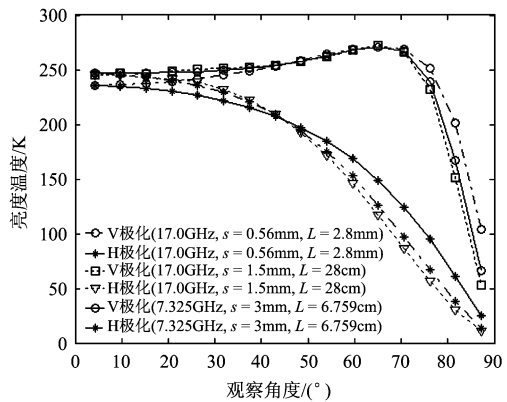
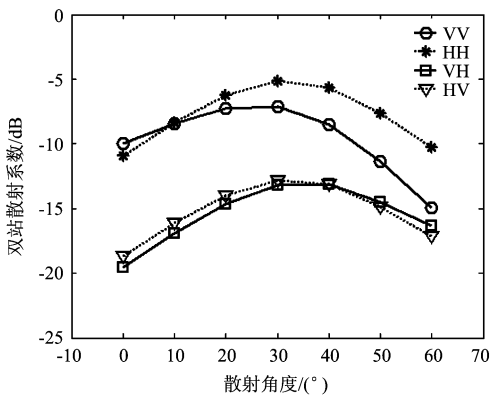


图 3 裸露地表的模拟

(a)均方高度为  $k\sigma = 0.2$  时双站反射系数随散射角的变化,  $\theta = 40^\circ$ ,  $kL = 4$ ,  $\epsilon_r = 16$ ,  $\varphi_s = 20^\circ$ ; (b) C 和 Ku 波段亮度温度随观察角的变化

Fig 3 Simulation of bare surface

(a) Bistatic scattering coefficient simulation when  $k\sigma = 0.2$ ,  $\theta = 40^\circ$ ,  $kL = 4$ ,  $\epsilon_r = 16$ ,  $\varphi_s = 20^\circ$ ;

(b) Brightness temperature with viewing angle at C and Ku band

#### 3.2 C 波段玉米辐射的验证

验证玉米的几何参数来自文献 [5], 考虑到玉米叶片较大的弯曲特性, 因此看作是均匀分布等面积的介电圆片集合。玉米的介电常数用德拜 科尔 (Debye-Cole) 双色散模型计算<sup>[13]</sup>。地表的介电常数用 Dobson 半经验模型计算<sup>[14]</sup>, 计算结果如表 1。

图 4(a) 为 C 波段 (7.325GHz) 模拟的裸土和生长玉米后的亮度温度随不同观察角的变化结果。从图中可以看出, 植被的出现改变了亮度温度随观察

角的变化趋势。裸土时 V 极化亮温随观察角先增大再降低, H 极化亮温则是逐渐降低的; 覆盖植被后, 随观察角增大 V 极化减小, 而 H 极化虽然也降低, 但很平缓, 不如裸土时那么明显。这是由于频率

表 1 计算的介电常数 (7.325GHz)

Table 1 Calculate dielectric constant (7.325 GHz)

玉米叶介电常数	$18.10 - j6.37$
玉米秆介电常数	$22.87 - j8.01$
混合介质介电常数	$1.024 - j5.41 \times 10^{-3}$
地表介电常数	$3.24 - j1.11$

增加到 C 波段以后,微波的穿透力降低,而植被自身的辐射增强所致。植被对裸露地表亮温的影响跟相关研究的结果是一致的<sup>[5]</sup>。植被辐射跟植被高

度也有关。如果玉米高度从 0.5m 增加到 0.92m, C 波段时总辐射的 V 和 H 极化差别将进一步减小(图 4(b))。

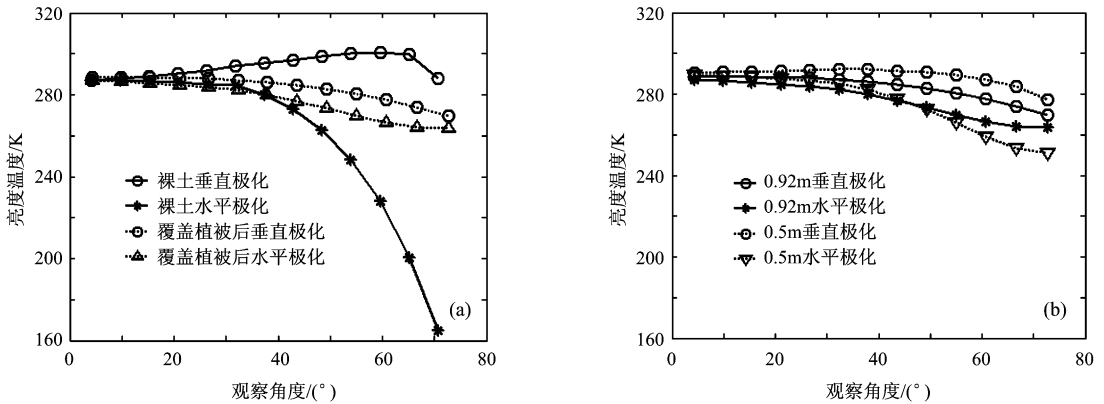


图 4 C 波段 (7.325 GHz)玉米亮度温度随观察角度的变化  
(a)覆盖植被前后的亮度温度;(b)覆盖不同高度植被的亮度温度

Fig 4 Brightness temperature at varying viewing angle for corn at C-band (7.325 GHz)

(a) Brightness temperature for bare and vegetated surface; (b) Brightness temperature with different corn height

为了用实测数据验证模型,采用 SGP99(Southern Great Plains 1999)机载的 PSR(Polarimetric Scanning Radiometer)C 波段数据进行比较<sup>[15]</sup>。SGP99 实验是 1999 年 7 月由美国农业部水文实验室主持,在美国俄克拉荷马州进行的、专门用于发展和验证 AMSR-E 算法的土壤水分实验,其中 7.325GHz 的水平极化数据被认为是抗无线电干扰能力最强、进行土壤水分反演的最佳数据,因此选择为本模型模拟结果的比较数据。选取的玉米实验地点位于 LW(Little Washita)区域(35°0'37.84"E, 97°1'52.51"N)。6 天的实测跟模拟数据对比结果如图 5,由图 5 可见模型比实测数据吻合得很好,模拟结果的误差在 8K 以内。

模拟结果跟测量结果的误差可以用均方根误差衡量:

$$mse = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (T_e - T_m)^2}{n}} \quad (9)$$

式中  $T_e$ 、 $T_m$  分别是模型估计值和测量值,  $n$  是采样点的数目。用(9)式计算垂直极化的相对误差为 2.15%,水平极化的相对误差为 2.33%。

为进一步分析各种辐射分量的贡献,在 7.325GHz 和 55°观察角时将实测数据、模型估计值,以及 H 极化辐射分量  $u_1$ ,  $u_2$  和  $u_3$  的结果列在表 2 中。由于植被向上辐射( $u_1$ )分量跟地表无关(图 2),因此强度不变。由表 2 可见植被的辐射贡献是主要,而且大于地表经过植被衰减后的辐射( $u_3$ )。从图 4(a)中可以看到,裸露地表在 55°的辐射为 240K 左右,但是从表 2 中可以看到覆盖植被后( $u_3$ )只有 60K 左右,由此得知, C 波段时植被对地表辐射的衰减作用非常明显。

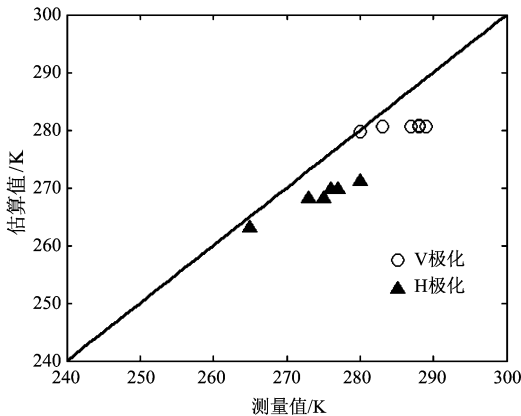


图 5 C 波段 (7.325GHz)玉米的模拟结果跟实测值的比较

Fig 5 Comparison of estimated with measured data for corn at C-band (7.325 GHz)

### 3.3 X 和 Ku 波段小麦辐射的验证

为使用 AMSR-E 较高频率的 X 波段(10.65GHz)和 Ku 波段(18.7GHz)验证模型,选取了北京顺义小麦实验田(赵全营北郎中村),地理坐标为北纬 40°11'39.2",东经 116°34'14.6"。跟植被分类图像对比,在 AMSR-E 的像元尺度上,可以认为这个地区完全是小麦。部分小麦几何实测参数参考

表 2 模拟和实测结果  
Table 2 Simulated and measured results

日期	V 实测数据	H 实测数据	V 模拟数据	H 模拟数据	u <sub>1</sub> 项	u <sub>2</sub> 项	u <sub>3</sub> 项
7 月 8 日	289	277	280.74	269.71	205.55	1.49	62.67
7 月 9 日	288	280	280.83	271.11	205.55	1.32	64.24
7 月 11 日	280	265	279.80	263.15	205.55	2.26	55.34
7 月 14 日	287	275	280.64	268.21	205.55	1.66	61.00
7 月 15 日	283	273	280.64	268.21	205.55	1.66	60.99
7 月 19 日	288	276	280.74	269.71	205.55	1.49	62.67

了文献 [16], 模型模拟的亮温随观察角变化的模拟结果如图 6。AMSR-E 数据来自文献 [17], 数据格式可见文献 [18]。55° 观察角时的模拟结果和实测数据的对比列在表 3 中。

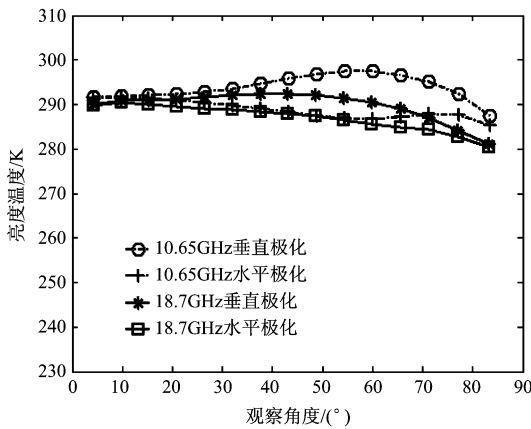


图 6 X 波段和 Ku 波段小麦亮度温度随观察角的变化  
Fig 6 Brightness temperature at X and Ku-band for wheat

表 3 实测和计算的小麦亮度温度

Table 3 Measured and calculated Brightness temperature for wheat		
	X 波段	Ku 波段
V 极化测量值 (Res.)	287.89	292.45
H 极化测量值 (Res.)	275.50	281.10
V 极化计算值	297.386	291.476
H 极化计算值	286.868	286.515

从表 3 中可以看到, X 波段 V 和 H 极化的误差分别为 9.50K, 11.37K; Ku 波段分别为 0.97K, 5.42K。模型跟实测的 AMSR-E 数据具有非常好的一致性。从图 6 中看出, 频率从 X 波段升高到 Ku 波段后波长变短, 介质的极化特性变得不明显, 使得亮度温度 V 和 H 极化的差别进一步减小, 这跟 Karam 的亮度温度模型随频率变化的结论是吻合

的 [19]。

### 4 结 论

本文提出了一种适用多种频率的亮度温度模型。模型中根据光线跟踪原理, 考虑了频率升高时植被内部以及植被跟地表之间增强的多次散射效果。多种频率下的模拟结果和实测数据接近一致。由于模型复杂参数众多, 本文的地表模型部分在计算大粗糙度方面还有待提高。

### 参 考 文 献 (References)

- [1] Kerr Y H, Njoku E G. A Semiempirical Model for Interpreting Microwave Emission from Semiarid Land Surfaces as Seen from Space[J]. IEEE Trans Geosci Remote Sensing, 1990, 28(3): 384-393.
- [2] Ulaby F T, Moore R K, Fung A K. Microwave Remote Sensing: Active and Passive[M]. Vol. 3. Dedham, MA: Artech House, 1986.
- [3] Njoku E G, Jackson T J, Lakshmi V, et al. Soil Moisture Retrieval from AMSR-E [J]. IEEE Trans Geosci Remote Sensing, 2003, 41(2): 215-229.
- [4] Shi J C, Chen K S, Li Q, et al. A Parameterized Surface Reflectivity Model and Estimation of Bare Surface Soil Moisture with L-band Radiometer [J]. IEEE Trans Geosci Remote Sensing, 2002, 40(2): 2674-2686.
- [5] Chauhan N S, Levine D M, Lang R H. Discrete Scatter Model for Microwave Radar and Radiometer Response to Corn: Comparison of Theory and Data [J]. IEEE Trans Geosci Remote Sensing, 1994, 32(2): 416-426.
- [6] Sun G Q, Simonett D S, Stahler A H. A Radar Backscatter Model for Discontinuous Coniferous Forests [J]. IEEE Trans Geosci Remote Sensing, 1991, 29(4): 639-650.
- [7] Fung A K. Microwave Scattering and Emission Models and Their Applications[M]. Norwood, MA: Artech House, 1994.
- [8] Tsang L, Kong J A, Shin R T. Theory of Microwave Remote Sensing[M]. New York: Wiley-Interscience, 1985.
- [9] Ruck G T, Barrick D E. Radar Cross Section Handbook[M].

- Vol 1, New York: Plenum Press 1970
- [10] Fung A K, Eom H J. A Theory of Wave Scattering from an Inhomogeneous Layer with Irregular Interface [J]. IEEE Trans Ant Propagation, 1981, **29**(6): 899-910
- [11] Ulaby F T, Sarabandi K, McDonald K, et al. Michigan Microwave Canopy Scattering Model (MMICS) [R]. Univ of Michigan Radiation Lab., Rep 022486-T-1, July 1988
- [12] Chen K S, et al. Emissions of Rough Surfaces Calculated by the Integral Equation Method with Comparison to Three-dimensional Moment Method Simulations [J]. IEEE Trans Geosci Remote Sensing, 2003, **41**(1): 90-101
- [13] Ulaby F T, El-Rayes M A. Microwave Dielectric Spectrum of Vegetation: Part II: Dual-dispersion Model [J]. IEEE Trans Geosci Remote Sensing, 1987, **25**(1): 550-557
- [14] Dobson M C, Ulaby F T, Hallikainen M T, et al. Microwave Dielectric Behavior of Wet Soil-Part II: Dielectric Mixing Models [J]. IEEE Trans Geosci Remote Sensing, 1985, **23**(1): 35-46
- [15] Jackson T J, Gasiewski A J, Oldak A, et al. Soil Moisture Retrieval Using the C-band Polarimetric Scanning Radiometer During the Southern Great Plains 1999 Experiments [J]. IEEE Trans Geosci Remote Sensing, 2002, **40**(10): 2151-2161
- [16] Alassane T, Keith P B T, Geoffrey E, et al. Adaptation of the MMICS Backscattering Model to the Agricultural Context: wheat and Canola at L and C Bands [J]. IEEE Trans Geosci Remote Sensing, 1994, **32**(1): 47-60
- [17] <http://edc.in.swww.cr.usgs.gov/pub/inswelcome> 2004
- [18] [http://nsidc.org/data/docs/daac/ae\\_2a\\_tbs\\_gd.html](http://nsidc.org/data/docs/daac/ae_2a_tbs_gd.html) 2004
- [19] Karam M A. A Physical Model for Microwave Radiometry of Vegetation [J]. IEEE Trans Geosci Remote Sensing, 1997, **35**(4): 1045-1058

## An Estimation of Brightness Temperature for Vegetated Surface by Matrix Doubling Method and IEM

ZHANG Zhong-jun<sup>1</sup>, SUN Guo-qing<sup>2</sup>

(1. Research Center for Remote Sensing and GIS, Beijing Normal University, State Key Laboratory  
of Remote Sensing Science, Beijing 100875, China;  
2. University of Maryland, MD 20742, USA)

**Abstract** In this paper, a model is proposed to estimate the brightness temperature of vegetated surface based on ray tracing technique to account for increasing multiple scattering effects as frequencies goes higher. The vegetation layer is composed of discrete scatters such as leaf, branch and stalk. The multiple scattering inside the vegetation layer and that between the vegetation and soil surface is accounted for by Matrix Doubling. The surface emission is calculated by IEM (Integral Equation Method) algorithm. Simulation results at higher frequency show that the emission from vegetation layer is dominant and that the vegetation has obvious extinction to surface. A good agreement is obtained by comparison of the simulation with air-borne PSR (Polarimetric Scanning Radiometer) C-band data and X- and Ku-band data from AMSR-E.

**Key words** brightness temperature; multiple scattering; integral equation method; zero-order model