

农作物覆盖地表微波遥感模型研究进展

王 芳^{1,2}, 陶建军¹, 姜良美¹

(1. 湖南科技大学地球空间信息研究所, 湖南 湘潭 411201;

2. 北京师范大学/中国科学院遥感应用研究所遥感科学国家重点实验室, 北京 100875)

摘要:农作物是人类主要的粮食来源,微波遥感技术已被广泛应用于作物长势监测和作物生物量、含水量反演等研究领域,特别是微波遥感模型的发展更是提高了农田参数反演的精度。综述了农作物微波散射和辐射经验、半经验和理论模型的研究进展,对各模型的适用范围及优缺点进行了介绍,最后对农田微波遥感模型未来发展的难度和重点提出了一些见解。

关 键 词:农作物覆盖地表;微波遥感模型;体散射;面散射;研究进展

中图分类号: TP 722.6 **文献标志码:** A **文章编号:** 1004-0323(2011)02-0255-08

1 引 言

遥感科学以电磁波理论为基础,主要分为可见光—反射红外、热红外和微波遥感 3 个主要研究领域。其中微波的波长比较长,具有较强的穿透能力,不仅可以穿透云层,也可以穿透植被到达地表,弥补了可见光和红外遥感的不足。微波遥感按照电磁波发射源的不同,分为主动微波遥感和被动微波遥感。主动微波遥感以后向散射系数来表达地物的散射特征,干涉雷达也可以提供地物的相位信息。被动微波遥感是由传感器直接接收地物自身的辐射信息,以亮度温度来表达地物的辐射特征。

电磁波和地物之间的相互作用以及地物自身的辐射特征是极其复杂的。为了描述这一过程,人们发展了电磁波散射和辐射模型,统称为微波遥感模型。微波遥感模型可分为经验、半经验和理论模型。经验模型简单易行,利于反演,但是一般是针对特定的研究对象和研究区域,很难得到广泛的应用。理论模型是以电磁波理论为基础,可以准确地描述地物的散射和辐射过程,而且随着遥感科学技术的进一步发展,农作物覆盖地表的微波理论模型也在不断地完善,使理论模型与地表的真实情况更为接近。然而,理论模型相当复杂,为参数反演等应用研究带来了一定的困难。半经验模型介于经验模型和理论模型之间,既具有经验模型形式简单的优点,又以一

定的物理理论为基础。目前发展了较多的农田半经验微波遥感模型,而且得到了广泛的应用。

2 微波经验模型

经验模型的构建是建立传感器测量参数和被观测地物物理、几何参数之间的统计关系。经验模型的建立,一方面可以直观地分析不同地物的反射和辐射特征,另一方面,使用这种统计关系易于土壤湿度、植被含水量和生物量等参数的反演。

Ulaby 等^[1]于 1982 年使用车载雷达频谱仪对玉米、大豆、高粱和小麦 4 种植被类型进行了测量,通过 143 次测量数据建立了植被覆盖地表的后向散射系数与土壤表层 5 cm 之内含水量的线性统计关系,相关系数达到 0.92。当仅考虑单次散射时,Ulaby 给出了农作物体散射项的同极化和交叉极化后向散射系数的经验模型^[2]:

$$\sigma_{ww}^0 \cong \sigma_{hh}^0 \cong 0.74a(1 + 0.54a\tau - 0.24(a\tau)^2) \cdot [1 - \exp(-2.12\tau \sec\theta)] \cos\theta \quad (1)$$

$$\sigma_{vh}^0 \cong a(0.044a\tau - 0.018(a\tau)^2 + 0.006(a\tau)^3) \cdot [1 - \exp(-11.7\tau \sec\theta)] \cos\theta \quad (2)$$

其中: a 为单散射反射率, τ 为光学厚度。模型同极化和交叉极化的 RMS 误差分别为 0.17 dB 和 2.17 dB。模型的适用范围为 $8^\circ \leq \theta \leq 85^\circ$, $0.1 \leq \tau \leq 2.2\text{Np}$, $0.01 \leq a \leq 0.5$ 。另外,作者还分析了各极化体一面散射项的贡献,认为 VV 极化的体一面

散射值可以忽略,并给出了 HH 和 VH 极化后向散射系数的经验表达式。Joseph 等^[3]分析了玉米整个生长周期的车载散射计实测数据与 IEM 模型模拟的裸土后向散射系数的比值,发现该比值与植被含水量具有较好的相关性,通过建立两者之间的经验模型去除了植被对土壤湿度反演的影响,使用该模型对 L 和 C 波段的玉米地土壤湿度进行了反演,观测入射角分别为 15°、35°和 55°,其中 55°入射角 HH 极化的反演精度最高。

3 微波半经验模型

主动微波遥感中,典型的农作物微波半经验散射模型为“水云”模型和 Roo 等人提出的散射模型。Attema 和 Ulaby^[4]于 1978 年提出了“水云”模型,模型中得到的总的散射能量为冠层的直接散射能量和地表经过植被层双程衰减后的散射能量之和。该模型做了以下假设:① 散射层近似为“云”层,散射体为近似水珠的均匀分布的球形粒子;② 考虑“云”层的厚度和密度;③ 模型没有考虑多次散射作用;④ 下垫面土壤的直接散射由两个待定的经验参数表达,这两个参数分别与地表粗糙度和土壤含水量有关。模型将后向散射系数表示为植被含水量、植被高度和土壤湿度的函数:

$$\sigma^0 = C[1 - \exp(-DWh/\cos\theta)] + A\exp(Bm_s - DWh/\cos\theta)\cos\theta \quad (3)$$

其中: σ^0 为后向散射系数, W 为植被含水量(kg/m^2), h 为植被层高度(m), m_s 为土壤湿度(kg/m^3), θ 为入射角,待定参数 A 、 B 、 C 、 D 可由简单的统计回归得到。水云模型的假设使得它的形式简洁明了,但是正是这些过于简单的假设,使得模型在应用中存在一定缺陷。因此,后来的研究中很多学者对水云模型做了进一步的改进^[5-6],并将原来的单“云”层、单散射体的散射模型发展为多层、多散射体的散射模型^[7-8]。

Roo 等^[10]的半经验散射模型是在 MIMICS (MIchigan MIcrowave Canopy Scattering Model) 森林散射模型^[9]的基础上,去掉了树干层,此时植被层为作物的叶片和秆的混合层。如公式 4 所示,模型中总的散射能量值 σ_{pq}^0 由 4 部分构成,分别为植被层直接后向散射 σ_{pq1}^0 ,植被层一下垫面地表和下垫面地表—植被层相互耦合作用的后向散射 σ_{pq2}^0 ,下垫面地表—植被一下垫面地表相互耦合作用的后向散射 σ_{pq3}^0 ,以及经过植被层双程衰减的下垫面地表的直接后向散射 σ_{pq4}^0 。

$$\sigma_{pq}^0 = \sigma_{pq1}^0 + \sigma_{pq2}^0 + \sigma_{pq3}^0 + \sigma_{pq4}^0 \quad (4)$$

以上 4 项可以表达为单位体积散射体的双站和后向散射截面、植被层的衰减系数、电磁波穿过植被层的透过率、下垫面地表 Fresnel 反射系数和下垫面地表的直接面散射截面的函数。下垫面地表的面散射截面计算使用 Oh 的半经验模型^[11],其他参数的计算则用实际的测量数据建立经验统计关系。与水云模型相比,该半经验模型对植被层几何特征以及散射机制的考虑更接近地表的真实情况,从而在精度上也有提高。

被动微波遥感中,典型的农作物半经验模型为 $\omega-\tau$ 模型^[12]。模型包括 3 部分:植被自身辐射向上直接到达传感器的部分,植被自身辐射向下经过地表反射后向上到达传感器的部分,地表自身辐射经过植被层衰减后到达传感器的部分。 ω 为单散射反照率, τ 为光学厚度。模型中散射体均匀分布,且不考虑多次散射的作用。用该模型进行反演时, ω 的确定有以下几种方法:① 取零值;② 参考有关文献中给定的值(如玉米在 1.4 GHz 时, $\omega = 0.03$;在 5 GHz 时, $\omega = 0.04$);③ 进行实地测量;④ 通过公式 $\omega = \sigma_s/\sigma_e$ 进行计算, σ_s 和 σ_e 分别为总的散射和透射截面。光学厚度 τ 表达了植被层的衰减特性,通常表示为植被含水量的函数^[16] $\tau_c = b_p\omega_c$ 。 ω_c 为冠层含水量, b_p 为与植被类型相关的系数,其中下标 p 代表波的极化状态。 b_p 值与入射角、极化、植被类型、时间及观察方位角等参数之间均具有一定的相关性^[17]。对于不同种类的植被,以及同一植被的不同生长季节, b_p 值都要有相应的调整^[13,18]。对于小麦和玉米等植被类型,因为有垂直秆结构的影响, $b_v > b_h$ 。

因为 $\omega-\tau$ 模型没有考虑多次散射的影响,因而其适用范围为 6 GHz 以下^[13],频率增加时,该模型的使用会受到限制,Ferrazzoli^[14]和张钟军等^[15]则使用考虑了植被层多次散射的 Matrix-Doubling 模型和 $\omega-\tau$ 模型的模拟结果按照最小二乘法进行拟合,反演得到了等效的 ω^* 和 τ^* 。

常用的地表面散射半经验模型主要有 Oh 模型^[11]、Shi 模型^[19]和 Dubois 模型^[20]等。Oh 模型是 Oh 等于 1992 年利用多波段、全极化车载辐射计发展的一个可用于计算裸露地表土壤水分和地表均方根高度的半经验模型。该模型的关键是后向散射系数的同极化比 $p = \sigma_{HH}^0/\sigma_{VV}^0$ 和交叉极化比 $q = \sigma_{HV}^0/\sigma_{VH}^0$,模型的适用范围为 $0.1 < ks < 6$, $2.5 < kl < 20$, $0.09 < mv < 0.31$,模型的特点是其适用的地表粗糙度范围较广。2002 年,Oh 对该模型进行了

改进,在车载辐射计数据基础上加入了 JPL 的机载 SAR 测量数据,模型考虑了地表相关长度对散射的影响,模型预测值与实测数据及 IEM、GO 模型的模拟值取得了较为一致的结果^[21]。Dubois 通过分析全极化后向散射计的测量值,给出了 VV 和 HH 极化的后向散射系数与地表介电常数 ϵ 及地表均方根高度 s 之间的经验关系表达式,该模型的适用范围为 $ks \leq 2.5$,雷达入射角大于 30° ,土壤含水量小于 35%,入射频率范围为 1.5 ~ 11 GHz。考虑植被的影响,在 L 波段,当 NDVI 值达到 0.4 时,该模型仍然有较好的应用效果。但是,在该模型中没有考虑地表粗糙度的行向、相关长度和地形等因素的影响。Oh 和 Dubois 模型均没有考虑表面功率谱的影响,而表面功率谱与地表相关长度和相关函数是密切相关的。Shi 在 L 波段 IEM 单次散射模型模拟的基础上,通过回归分析法,建立了用来反演裸土土壤和矮植被区域土壤湿度和地表粗糙度参数(包括地表均方根高度和表面功率谱)的半经验模型,模型在 AIRSAR 和 SIR-C 的测量实验中都得到了很好的验证。

常用的地表辐射半经验模型有 Q/H 模型^[22-23]、Hp 模型^[24]和 Qp 模型^[25]。Q/H 模型是 Choudhury 等提出的计算裸土发射率的半经验模型:

$$R_p^e = 1 - \epsilon_p = [Q \cdot r_q + (1 - Q) \cdot r_p] \cdot H \quad (5)$$

其中: R_p^e 为地表的 p 极化有效反射率, r_q 和 r_p 分别为不同极化的 Fresnel 反射系数。Q 表示由于地表粗糙度的影响而产生的 q 极化的反射值,该参数与地表的非相干散射分量具有较强的相关性。H 参数主要表征地表粗糙度对地表相干分量的影响。因为该模型考虑了非相干分量的影响,因此在较高频率也可以得到较好的效果,但是模型中没有考虑不同极化下粗糙度对有效反射率影响的差异。

在 Q/H 模型基础上,假设 $Q = 1$,并考虑参数 H 在不同极化的差异,就得到了 Hp 模型:

$$R_p^e = r_p \cdot H_p \quad (6)$$

该模型仅考虑了地表相干散射分量,因此,在 L 波段能够得到较好的效果,但是无法适用于较高频率,同时该模型也没有考虑正交极化分量的贡献。

Q/H 和 Hp 模型在低频波段得到了较好的应用,Shi 在这两个模型的基础上,提出了适合较高频率,同时具有较宽粗糙度适用范围的 Qp 模型:

$$R_p^e = Q_p \cdot r_q + (1 - Q_p) \cdot r_p \quad (7)$$

通过 AIEM 模型的模拟, Q_p 可表示为频率 f 、地表均方根高度 s 和相关长度 l 的函数。

半经验模型形式简洁,物理含义明确,被广泛应用于裸土和植被覆盖区域的地表参数反演研究。

4 微波理论模型

理论模型可以精确地描述植被特征,而且有利于我们对散射和辐射机理的研究。农作物微波理论模型分为微波散射模型和微波辐射模型。

4.1 农作物微波理论散射模型

农作物理论散射模型中应用较多的为离散介质模型,可以分为非相干(Incoherence)模型和相干(Coherence)模型。

非相干散射模型是以场的能量为基本出发点来考虑地面目标物的散射特性,多基于辐射传输理论。McDonald 等^[27]于 1990 年提出的 MIMICS(Michigan Microwave Canopy Scattering)模型^[9]是得到广泛应用的一阶森林散射模型,如果去掉植被模拟中的树干层,就可以得到适用于农作物的散射模型,已被用来分析小麦、大豆和水稻等作物的散射特征^[26]。最早的 MIMICS 模型假设散射体在植被层中均匀分布,1993 年 McDonald 等^[27]又提出了一阶非连续森林散射模型,即 MIMICS II,在模型中引入了孔隙率和覆盖率等参数。Le Toan 等^[28]对水稻进行研究时,考虑到水稻成簇分布的特点,在模型中加入了集聚效应的影响。

在低频时,入射波很容易穿透植被层到达地表,入射波和植被层内散射体的相互作用不明显,在这种情况下,零阶模型或一阶模型就可以比较精确地得到植被覆盖区域的散射信息,当频率增加时,入射波和植被层内散射体的相互作用增加,那么必然要考虑多次散射对总散射的贡献。Ferrazzoli 等^[29]提出了基于 Matrix Doubling 算法的多次散射全极化植被模型,该模型在植被辐射特征的研究中也得到了较好的应用^[30]。

在农作物微波散射模型中,非相干散射模型得到了广泛的应用。但是非相干模型只考虑了场的能量,不同散射体的散射也是非相干相加的。作物同一植株上的各个散射体是紧密排列的,因而它们之间会产生相干作用。Yueh 等^[31]在模型中给出了大豆树枝的双尺度结构模型,并将各个散射体的散射场相干相加,该模型也称为分枝模型。Chiu 等^[32]在模型中考虑了大豆作物的二阶相干近场效应,该模型也被称为短分枝模型。Du^[33]在模型中考虑了大豆结构引起的相干性,并对地面模型和树干—地表的双次散射等问题进行了更为深入的研究。王芳在

Stile 模型^[34]的基础上,发展出适用于玉米作物的一阶相干散射模型,模型中考虑了不同散射机制之间的相干作用,并使用 ASAR 数据对模型进行了验证^[35]。

农作物区别于其他植被的主要特点在于它成行分布的空间特征,由于成行分布具有一定的周期性,因此在农作物和电磁波相互作用时,会产生不同于其他植被类型的散射特性^[34]。Ulaby^[2]使用多波段车载散射计,对玉米和小麦等作物分别从垂直和平行行播方向进行观测,得到如下结论:频率 ≥ 4 GHz 情况下的同极化冠层散射系数和任意频率的冠层交叉极化散射系数,与观测角度之间不存在相关性。因此,在低频时作物秆的散射贡献比较大,需要用相干散射模型来描述多行作物分布区域的散射特征,但是当频率增加时,作物叶片的散射贡献增加,此时也可以使用非相干散射模型^[36]。Tavakoli 等^[37]提出了考虑作物成行分布特点的非相干散射模型,该模型也是基于辐射传输理论,但是模型局限于平行于地表的二维平面,并没有考虑植被层的高度信息。

为了更真实地表达农作物的几何结构和空间分布特征,Stile^[34]提出了针对农作物和草的全相干一阶散射模型,模型考虑了叶片的曲率和叶片的截面形状以及农作物成行分布的特点,而且通过给定准相位面得到散射体位置函数,从而可以计算电磁波在每个具体位置处的散射和衰减。针对萨赫勒地区的草类植被^[38],发展了一阶相干散射模型,模型中用统计方法确定植株位置函数,各个散射体之间进行相干相加。

然而因为没有考虑多次散射的影响,一阶相干散射模型交叉极化的后向散射系数值不能与测量数据很好地吻合^[34]。因此,Picard^[39]发展了相干的多次散射模型,模型中农作物只有秆的存在,暂时没有考虑叶子的影响,但是模型还是过于复杂。Oh 等^[40]用 Full-wave 方法分析了电磁波多次散射对低矮植被的影响,研究表明,对于成簇分布的短茎来说,多次散射对交叉极化的影响较同极化更为明显。

Lin^[41]用计算机模拟生成树,得到了单个散射体和植株的相对位置,发展的相干散射模型适用于 InSAR 传感器数据反演树高和生物量。Marliani 等^[42]用该模型计算不同作物的散射相位中心,进行作物分类。Liu^[43]又进一步发展了三维的森林相干散射模型,可用于相位中心的求解。

DBA (Distorted Born Approximation) 是在 born 近似的基础上发展的一种对电磁场方程近似

的方法。基于 DBA 方法发展的模型,是从电磁波基础理论出发,在模型中考虑了多次散射和粒子间的相互作用,目前模型已被用来计算森林、草类和玉米的后向散射系数和发射率^[44-45]。

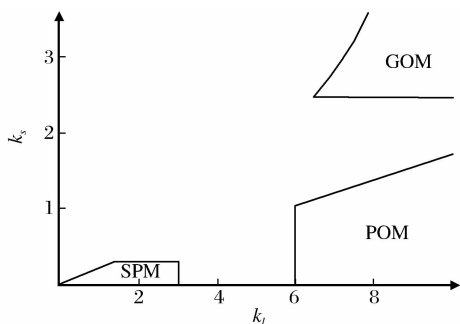
离散介质的散射模型是从求解单散射体的散射矩阵出发的,因此,单散射体散射模型的精度直接影响整个植被散射模型的精度。在早期的农作物散射模型中,叶片被看作具有一定朝向分布且已知半径和厚度的介电圆片或已知宽度、长度和厚度的介电矩形片,作物的秆被看作垂直朝向的介电圆柱体^[9]。通常是根据 ka 的变化选择不同的物理模型计算单散射体的散射矩阵,其中 k 为空间波数, a 为散射体的几何大小。当散射粒子的几何大小均小于波长时,采用瑞利(Rayleigh)模型进行计算^[46],如通常将一个大的叶片看作小叶片的集合,则每个小叶片可以采用瑞利近似。而当叶片作为一个大的矩形片时,其几何尺寸和波长是相当的,则需要使用物理光学(PO)模型^[47]进行计算。RG(Rayleigh-Gans)模型适用于比较纤细的散射体,GRG(General Rayleigh-Gans)模型适用于某一维小于波长的非纤细散射体,是 RG 近似模型的扩展^[47-48]。作物的秆一般采用无限长圆柱体近似模型计算其散射矩阵^[9]。

随着理论模型的发展,人们开始考虑模型的真实性和考虑叶片的曲率和截面形状^[34,49]等因素。使用 PO 模型计算锥形圆柱体的散射^[50]和使用改进的 T-MATRIX 方法计算纵横较大的圆柱体的散射^[51],使得单散射体模型与实际情况更加接近。

另外,地表的面散射也是农田散射中的重要部分。传统的理论面散射模型,主要有几何光学模型(GOM)、物理光学模型(POM)和小扰动模型(SPM)^[1]。这些模型分别适合不同的地表粗糙度情况。如图 1 所示。Fung 等^[52]于 1982 年提出了 IEM(Integrated Equation Model)模型,该模型适用于较宽的地表粗糙度范围,后来有学者又在此基础上发展了 AIEM(Advanced IEM)、I-IEM(Improved IEM)、IEM2M(Second-order Multiple Scattering IEM)、SIEM(Statistical IEM)和 EAIEM(Extended AIEM)^[33]等模型,使得模型可以更好地反映地表真实的散射特征。

然而,农作物覆盖地区的土壤具有一定的特殊性,主要表现在粗糙度呈现一定周期性分布,这也导致用传统参数(相关长度、均方根高度)无法精确地描述农田地表的粗糙度情况。部分学者结合地表实测数据和理论模型的模拟结果,构建了农田地表散

射的半经验模型^[53,55]。Ulaby 等^[2]给出了具有周期分布的裸露地表的半经验模型,并分析了地表在不同观测方位角的散射特征。部分研究基于多尺度和分形等理论构建新的相关函数,并对 IEM 和 SPM 等传统理论模型进行修正^[54]。而 Du^[33]在其大豆的相干散射模型中,考虑了地表的坡度对散射的影响,也可以看作是地表粗糙度的一种描述方法。



(引自 Henderson F. M. & Lewis A. J., Principles and Applications of Imaging Radar, pp 417)

图 1 GOM, POM, SPM 模型的适用地表范围

Fig. 1 The suitable scope of GOM/POM/SPM model

4.2 农作物微波理论辐射模型

农作物覆盖区域的发射率根据能量守恒定律,由双站散射系数积分得到^[52]。前文提到的 MIMICS 模型、基于 Matrix Doubling 方法的全极化多次散射模型、使用 DBA 近似方法的散射模型、草类相干散射模型^[38]以及森林相干散射模型^[56]都可以用来计算双站散射系数,进而研究植被的辐射特征。王芳^[57]推导了 Stile 的一阶相干散射模型的双站散射公式,并模拟了小麦的双站散射和辐射特征,但是模型没有得到实验数据的验证,且仍需要在地表粗糙度及植被空间分布函数等方面进行校正。

目前对于农田粗糙度地表的辐射特征研究较少,Wang^[58]研究农业耕作的行结构对被动微波反演土壤湿度的影响,模型中将以均方根高度表征的小尺度粗糙度和行结构表征的大尺度粗糙度相结合。1984 年 Kong^[59]基于互易原理和能量守恒定律提出了周期地表的辐射模型,这一模型后来在农田地表辐射研究中得到了应用。Promes 等^[60]使用车载辐射计研究农田地表周期分布对其辐射特征的影响,指出行高 (Row height) 和行间距 (Row spacing) 是描述地表周期分布特性的重要因子。

全极化辐射是指考虑 Stokes 向量的所有元素,更为全面地反映地物辐射的极化特征^[61],目前主要用于海洋风向判断的研究领域^[62]。而农作物区裸

露土壤和行播作物的分布都具有类似于海面的周期性分布特征,Søbjerg^[63]通过测量数据分析了玉米耕作区在玉米生长前后,裸露土壤和行播作物的 Stokes 向量 4 个元素值随观测方位角的变化情况。研究表明,当耕作区裸露土壤呈波浪状空间分布时,其辐射具有类似于海浪的全极化特征,而行播作物的全极化特征和裸露土壤的类似,只是在振幅上有所变化。Vazquez 等使用辐射传输模型计算了葡萄园的全极化发射率,并将模拟结果和 SMOS REFLEX 实测数据进行比较,实验观测的入射角为 $25^{\circ} \sim 65^{\circ}$,方位角为 $45^{\circ} \sim 135^{\circ}$ ^[64]。研究结果表明, e_v 和 e_h 对土壤湿度比较敏感。当地表粗糙度为均值为零的高斯概率分布时, e_v 和 e_u 的值为零;而在对葡萄园的观测中,因为在模型中考虑了葡萄果实的随机分布,使得 e_u 值偏大, e_v 的值始终为零。植被覆盖地表的全极化辐射特征的研究,为 SOMS 卫星土壤湿度反演研究,提供了很好的理论依据。

5 结 语

从农田微波遥感模型的发展来看,结合理论模型和实验数据的半经验模型被广泛地应用于反演等研究领域,而且早期发展的经典的半经验模型也不断地得到改进。经典的理论模型如 MIMICS 和 IEM 等目前得到了广泛的认可,但是理论模型的发展有待完善。主要在以下方面展开更深入的研究:① 更为完善的多次散射相干模型的建立;② 叶片、秆和果实的几何特征的考虑,及更为完善的单散射体模型的建立;③ 行播农作物全极化辐射机理的深入探讨,及其反演应用潜力分析;④ 农田地表粗糙度的测量及模型的建立。然而,这些改进也会导致理论模型的形式更为复杂,从而限制了其在应用领域的推广。

参考文献 (References):

- [1] Ulaby F T, Moore R K, Fung A K. Microwave Remote Sensing (Volume II): Radar Remote Sensing and Surface Scattering and Emission Theory[M]. Beijing: Science Press, 1982.
- [2] McDonald K C, Ulaby F T. Radiative Transfer Modelling of Discontinuous Tree Canopies at Microwave Frequencies[J]. International Journal of Remote Sensing, 1993, 14(11): 2097-2182.
- [3] Joseph A T, Van der Velde R, O'Neill P E, et al. Effects of Corn on C- and L-Band Radar Backscatter; a Correction Method for Soil Moisture Retrieval[J]. Remote Sensing of Environment, 2010, 2417-2430.

- [4] Attema E P W, Ulaby F T. Vegetation Modeled as a Water Cloud[J]. *Radio Science*, 1978, 13(2): 357-364.
- [5] Moran M S, Vidal A, Troufleau D, *et al.* Ku- and C-Band SAR for Discriminating Agricultural Crop and Soil Conditions[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1998, 36: 265-272.
- [6] Wigneron J P, Ferrazzoli P, Oliso A, *et al.* A Simple Approach to Monitor Crop Biomass from C-Band Radar Data[J]. *Remote Sensing of Environment*, 1998, 69: 179-188.
- [7] Ulaby F T, Allen C T, Eger G, *et al.* Relating the Microwave Backscattering Coefficient to Leaf Area Index[J]. *Remote Sensing of Environment*, 1984, 14: 113-133.
- [8] Paris J F. The Effect of Leaf Size on the Microwave Backscattering by Corn[J]. *Remote Sensing of Environment*, 1986, 19: 81-95.
- [9] Ulaby F T, Sarabandi K, McDnald K, *et al.* Michigan Microwave Canopy Scattering Model[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 1990, 11(7): 1223-1253.
- [10] Roo R D D, Du Y, Ulaby F T, *et al.* A Semi-empirical Backscattering Model at L-Band and C-Band for a Soybean Canopy with Soil Moisture Inversion[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2001, 39(4): 864-872.
- [11] Oh Y, Sarabandi K, Ulaby F T. An Empirical Model and an Inversion Technique for Radar Scattering from Bare Soil Surfaces[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1992, 30: 370-381.
- [12] Jackson T J, Schmugge T J. Vegetation Effects on the Microwave Emission from Soil[J]. *Remote Sensing of Environment*, 1991, 36: 203-210.
- [13] Van de Griend A A, Wigneron J P. The B-Factor as a Function of Frequency and Canopy Type at H-Polarization[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2004, 42(4): 786-794.
- [14] Ferrazzoli P, Guerriero L, Wigneron J P. Simulating L-Band Emission of Forests in View of Future Satellite Applications[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2002, 40(12): 2700-2708.
- [15] Zhang Z J, Zhang L X, Xu Y, *et al.* Scattering and Attenuation Characteristics of Corn at Multiple Frequencies and View Angles by Model Simulation and Truck-mounted Microwave Radiometer[J]. *Journal of Remote Sensing*, 2010, 14(2): 396-408.
- [16] Mo T, Choudhury B J, Shmugge T J, *et al.* A Model for Microwave Emission from Vegetation-covered Fields[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1982, 87: 11229-11237.
- [17] Wigneron J P, Pardé M, Waldeufel P, *et al.* Characterizing the Dependence of Vegetation Model Parameters on Crop Structure, Incidence Angle, and Polarization at L-Band[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2004, 42: 416-425.
- [18] Le Vine D M, Karam M A. Dependence of Attenuation in a Vegetation Canopy on Frequency and Plant Water Content[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1996, 34: 1090-1096.
- [19] Shi J C, Wang J, Hsu A Y, *et al.* Estimation of Bare Surface Soil Moisture and Surface Roughness Parameter Using L-band SAR Image Data[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1997, 35(5): 1254-1266.
- [20] Dubois P C, Zyl J V, Engman T. Measuring Soil Moisture with Imaging Radars[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1995, 33(4): 915-926.
- [21] Oh Y, Sarabandi K, Ulaby F T. Semi-empirical Model of the Ensemble-averaged Differential Mueller Matrix for Microwave Backscattering from Bare Soil Surfaces[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2002, 40(6): 1348-1355.
- [22] Choudhury B J, Schmugge T J, Chang A, *et al.* Effect of Surface Roughness on the Microwave Emission from Soils[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1979 (84): 5699-5706.
- [23] Wang J R, Choudhury B J. Remote Sensing of Soil Moisture Content over Bare Field at 1.4 GHz Frequency[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1981, 86: 5277-5282.
- [24] Wigneron J P, Laguerre L, Kerr Y H. A Simple Parameterization of the L-Band Microwave Emission from Rough Agricultural Soil[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2001, 39(8): 1697-1707.
- [25] Shi J C, Jiang L M, Zhang L X, *et al.* A Parameterized Multi-frequency-polarization Surface Emission Model[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2005, 43: 2831-2841.
- [26] Alassane T, Keith P B T, Geoffrey E, *et al.* Adaptation of the MIMICS Backscattering Model to the Agricultural Context- Wheat and Canola at L-and C-Bands[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1994, 32(1): 47-60.
- [27] McDonald K C, Ulaby F T. Radiative Transfer Modelling of Discontinuous Tree Canopies at Microwave Frequencies[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 1993, 14(11): 2097-2182.
- [28] Le Toan T, Ribbes F, Wang L, *et al.* Rice Crop Mapping and Monitoring Using ERS-1 Data based on Experiment and Modeling Results[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1997, 35: 41-56.
- [29] Bracaglia M, Ferrazzoli P, Guerriero L. A Fully Polarimetric Multiple Scattering Model for Crops[J]. *Remote Sensing of Environment*, 1995, 54: 170-179.
- [30] Ferrazzoli P, Guerriero L. Passive Microwave Remote Sensing of Forests: a Model Investigation[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1996, 34(2): 433-443.
- [31] Yueh S H, Kong J A, Shin R T, Le Toan T. Branching Model for Vegetation[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1992, 30: 390-402.
- [32] Chiu T, Sarabandi K. Electromagnetic Scattering from Short

- Branching Vegetation[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2000, 38: 911-925.
- [33] Du Y, Luo Y L, Yan W Z. An Electromagnetic Scattering Model for Soybean Canopy[C]//Progress in Electromagnetics Research, 2008, PIER 79: 209-223.
- [34] Stiles J M, Sarabandi K. Electromagnetic Scattering from Grassland; Part I, a Fully Coherent Scattering Model[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2000, 38: 339-348.
- [35] Wang Fang, Sun Guoqing, Wu Xuerui. Application a Coherent Vegetation Backscattering Model to Corn Field and Comparison with Envisat ASAR Data[J]. Journal of Beijing Normal University(Natural Science), 2008, 44(2): 203-206. [王芳, 孙国清, 吴学睿. 基于相干植被模型和 ASAR 数据的玉米地后向散射特征研究[J]. 北京师范大学学报(自然科学版), 2008, 44(2): 203-206.]
- [36] Tavakoli A, Sarabandi K, Ulaby F T. Microwave Propagation Through Cultural Vegetation Canopies[R]. Univ. Michigan, Ann Arbor, MI, Radiation Lab. Rep, 1991, 026511-3-T.
- [37] Tavakoli A, Sarabandi K, Ulaby F T. Horizontal Propagation Through Periodic Vegetation Canopies[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 1991, 39: 1014-1023.
- [38] Monsivais-Huertero A, Sarabandi K, Chenierie I. Multipolarization Microwave Scattering Model for Sahelian Grassland[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2010, 48(3): 1416-1432.
- [39] Picard G, Le Toan T. A Multiple Scattering Model for C-Band Backscatter of Wheat Canopies[J]. Journal of Electromagnetic Waves and Applications, 2002, 16(10).
- [40] Oh Y, Jang Y M, Sarabandi K. Full-Wave Analysis of Microwave Scattering from Short Vegetation: an Investigation on the Effect of Multiple Scattering[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2002, 40(11): 2522-2526.
- [41] Lin Y C, Sarabandi K. A Monte Carlo Coherent Scattering Model for Forest Canopies Using Fractal-generated Trees[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1999, 37: 440-451.
- [42] Marliani F, Paloscia S, Pampaloni P, *et al.* Simulating Coherent Backscattering from Crops During the Growing Cycle[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2002, 40: 162-177.
- [43] Liu D W, Sun G Q, Guo Z F, *et al.* Three-Dimensional Coherent Backscatter Model and Simulations of Scattering Phase Center of Forest Canopies[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2010, 48(1): 349-357.
- [44] 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 Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1994, 32: 416-426.
- [45] Saatchi S S, McDonald K C. Coherent Effects in Microwave Backscattering Models for Forest Canopies[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1997, 35(4): 1032-1044.
- [46] Jin Yaqiu. Remote Sensing Theory of Electromagnetic Scattering and Thermal Emission[M]. Beijing: Science Press, 1993. [金亚秋. 电磁散射与热辐射的遥感理论[M]. 北京: 科学出版社, 1993.]
- [47] Karam M A, Fung A K, Antar Y M M. Electromagnetic Wave Scattering from Some Vegetation Samples[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1988, 26: 99-808.
- [48] Schiffer R, Thielheir K O. Light Scattering by Dielectric Needles and Disks, Journal of Applied Physics, 1979, 50(4): 2476-2483.
- [49] Vecchia A D, Ferrazzoli P, Guerriero L. Modelling Microwave Scattering from Long Curved Leaves[J]. Wave in Random Media, 2004, 14: 333-343.
- [50] De Matthaeis P, Lang R H. Microwave Scattering Models for Cylindrical Vegetation Components[J]. Progress in Electromagnetics Research, 2005, PIER 55: 307-333.
- [51] Yan W Z, Du Y, Wu H, *et al.* EM Scattering from a Long Dielectric Circular Cylinder[J]. Progress in Electromagnetics Research, 2008, PIER 85: 39-67.
- [52] Fung A K. Microwave Scattering and Emission Models and Their Applications. Norwood[M]. MA: Artech House, 1994.
- [53] Oh Y, Hong J Y. Effect of Surface Profile Length on the Backscattering Coefficients of Bare Surfaces[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2007, 45(3): 632-638.
- [54] Mattia F, Le Toan T. Backscattering Properties of Multi-scale Rough Surface[J]. Journal of Electromagnetic Waves and Applications, 1999, 13: 493-527.
- [55] Manninen A T. Multiscale Surface Roughness Description for Scattering Modelling of Bare Soil[J]. Physica A, 2003, 319: 535-551.
- [56] Laetitia T L, Elise C K, Cyril D. Bistatic Scattering from Forest Components. Part I: Coherent Polarimetric Modelling and Analysis of Simulated Results[J]. Waves in Random and Complex Media, 2010, 20(1): 36-61.
- [57] Wang Fang, Zhang Lixin, Li Liying. Discrete Scatter Model for Microwave Bistatic Scattering and Emission from Wheat Field[J]. Remote Sensing Information, 2008, 3: 7-14. [王芳, 张立新, 李丽英. 基于微波离散散射体模型的小麦双站散射和辐射特征研究[J]. 遥感信息, 2008, 3: 7-14.]
- [58] Wang J R, Newton R W, Rouse J W. Passive Microwave Remote Sensing of Soil Moisture: the Effect of Tilled Row Structure[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1980, GE-18(4): 296-302.
- [59] Kong J A, Shing L L, Shun L C. Microwave Thermal Emission from Periodic Surfaces[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1984, GE-22(4): 377-382.
- [60] Promes P M, Jackson T J, O'Neill P. Significance of Agricultural Row Structure on the Microwave Emissivity of Soils[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1988,

26(5);580-589.

[61] Tsang L,Kong J A,Shin R T. Theory of Microwave Remote Sensing[M]. New York;Wiley,1985;160-162.

[62] Piepmeier J R,Gasiewsk A J. High-resolution Passive Polarimetric Microwave Mapping of Ocean Surface Wind Vector Fields[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing,2001,39(3):606-622.

[63] Søbjærg S S. Polarimetric Radiometers and Their Applications [D]. Technical University of Denmark,Ørsted-DTU,Electromagnetic Systems,2002.

[64] Alberto M V,Adriano C,Juan Manuel L S,*et al.* Numerical Simulation of Full-Polarimetric Emissivity of Vines and Comparison with Experimental Data[J]. Rmote Sensing,2009,1:300-317.

Review of Microwave Remote Sensing Models of Agricultural Field

WANG Fang^{1,2},TAO Jian-jun¹,JIANG Liang-mei¹

(1. *Institute of Geospatial Information Science;Hunan University of Science & Technology; Xiangtan 411201,China*;2. *State Key Laboratory of Remote Sensing Science,Jointly Sponsored by Beijing Normal University and the Institute of Remote Sensing Applications of Chinese Academy of Sciences,Beijing 100875,China*)

Abstract: The applications of microwave remote sensing in agriculture require the crop parameters (eg,bio-mass,water content,crop type,etc.) estimation using active and/or passive microwave remote sensing data. Several agricultural microwave remote sensing models have been developed to understand the interaction between the microwave scattering(or emission) and the agricultural field parameters. This paper states the advances of microwave remote sensing models including the empirical,semi-empirical and theoretical models in agriculture field. A number of suggestions were made for developments of microwave remote sensing models of agriculture field in the future researches.

Key words: Agricultural field;Microwave remote sensing model;Volume scattering;Surface scattering;Review