

水稻后向散射的模拟、验证及参数敏感性分析

贾明权, 童玲, 陈彦

(电子科技大学自动化工程学院 成都 611731)

【摘要】根据蒙特卡洛方法建立的水稻微波散射模型, 针对水稻的生长特征对模型进行了修正, 利用散射计实测数据验证了修正后模型模拟结果的准确性。结果表明, 基于蒙特卡洛方法建立的水稻后向散射模型能够很好地模拟水稻的后向散射特征。根据水稻生长参数实测数据设定模型输入参数的变化范围, 模拟不同输入参数对应的水稻后向散射系数, 获得了系统参数、稻秆和稻叶等水稻生长参数与后向散射系数之间的定量关系, 并针对各类参数进行了敏感性分析。

关键词 后向散射系数; 蒙特卡洛; 参数敏感性; 水稻; 散射计

中图分类号 TP7

文献标志码 A

doi:10.3969/j.issn.1001-0548.2013.06.016

Rice Backscattering Simulation, Verification and Parameter Sensitivity Analysis

JIA Ming-quan, TONG Ling, and CHEN Yan

(School of Automation Engineering, University of Electronic Science and Technology of China Chengdu 611731)

Abstract This paper establishes rice microwave scattering model according to the Monte Carlo method, and modifies the model to meet the rice growth characteristics. The model simulation results were compared with scatterometer measured data, the result show that the proposed rice backscatter model can well simulate the backscattering characteristics of rice. The variation ranges of input parameters of the model were set according to the actual growth parameters of rice. The rice backscattering coefficients with different input parameters, such as rice straw and rice leaf parameter, were simulated. Finally, the sensitivity analysis according to the rice backscattering coefficient and growth parameters is presented.

Key words backscattering coefficient; Monte Carlo method; parameter sensitivity; rice; scatterometer

地物微波散射特性的研究是微波遥感进行目标分类、识别和数据判读等图像解译的基础。随着我国微波遥感应应用研究的进展, 特别是各种机载和星载微波遥感数据源的飞速发展和数据质量的不断提高, 不仅需要定性分析雷达参数(频率、极化、入射角)和地表参数(如湿度、粗糙度、生物量等)对地物微波散射特性的影响, 更要求定量研究雷达后向散射系数与各种参数之间的复杂函数关系, 以及如何从各种有效数据源中提取和反演感兴趣的地物参数^[1]。

植被作为典型的地物目标, 是一种结构十分复杂的非各向同性介质, 组成植被的各部分如茎、秆、叶等都具有不同形状、大小、厚度和朝向, 形成不同微波体散射机制。常用的植被散射模型有MIMICS模型^[2]和Karam分层介质模型^[3], 其中, 密歇根微波植被观测模型首次将来自植被冠层的散射分解为树

冠层、树干层和地面散射, 成为研究散射特性和模型建立的基础。由于水稻等农作物的茎秆和植被冠层没有明显区别, 因此研究人员去除了MIMICS模型地表-茎秆之间的散射项, 将植被层当作一层处理, 其中散射体包括叶和枝条^[4-5]。然而, 这些模型都是建立在辐射传输理论基础上的, 该理论一般假设介质颗粒散射相互独立, 需要考虑植被元素之间的相干波的相互作用^[6]。然而, 获取自然植被的概率密度函数和双分布函数较困难, 因此, 需要发展基于蒙特卡洛方法的相关散射模型, 目前该蒙特卡洛模型已用于计算植被^[7-8]的散射。水稻散射模型多为从植被散射发展而来, 将蒙特卡洛模型应用于水稻散射模型已有报道^[9-10], 研究表明, 该方法能够获得与实测数据吻合较好的模拟结果。

任何植被散射模型都有较多的输入参数, 但不

收稿日期: 2011-06-22; 修回日期: 2011-07-15

基金项目: 国家自然科学基金(40871160, 41071222)

作者简介: 贾明权(1982-), 男, 博士生, 主要从事微波遥感和微波测量方面的研究

同参数对模拟结果的影响程度的分析报告还很少见。参数的敏感性分析对改进散射模型、实验中参数采样精度和建立有效的反演模型至关重要,因此,本文根据蒙特卡洛方法建立的水稻微波散射模型,一方面针对水稻的生长特征对模型进行修正,并利用散射计实测数据验证了模型的准确性;另一方面根据水稻生长参数实测数据设定参数敏感性分析的变化范围,全面分析了各类水稻生长参数与后向散射系数之间的定量关系。

1 水稻散射模型及改进

Monte-Carlo模拟计算亦称统计模拟方法,即利用随机数进行数值模拟的方法。该方法首先分解水稻的散射单元(水稻叶片、水稻茎秆和水面)组成与结构,分析组成水稻的各个散射单元的散射过程。模型假设在一定区域的分布如图1所示,图中,对来自各散射单元(茎和叶)的散射,考虑将相位修正后相干地叠加在一起,主要有4种散射成分:a为冠层直接后向散射,b为散射体散射加水面反射,c为水面反射加散射体散射,d为水面反射加散射体后向散射加水面反射。

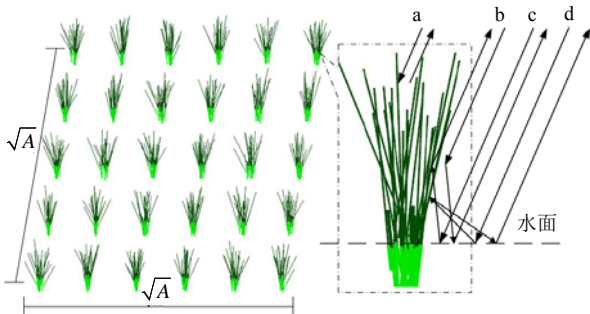


图1 稻田的蒙特卡洛方法仿真示意图

$$\sigma_{qp}^o = 4\pi r^2 / A \langle |E_q^s|^2 \rangle / |E_q^i|^2 \quad (1)$$

详细表达式为:

$$E_q^s(\vec{r}) = \frac{e^{ikr}}{r} \sum_{t=\text{stem or leaf}} \sum_{j=1}^{N_t} \left[f_{qp}^t(\pi - \theta_i, \pi + \phi_i; \theta_i, \phi_i) \times e^{-M_{qq} \frac{z_j'}{\cos(\theta_i)}} e^{-M_{pp} \frac{z_j'}{\cos(\theta_i)}} e^{2i(k_x^i x_j' + k_y^i y_j' - k_z^i z_j')} + R_q(\theta_i) f_{qp}^t(\theta_i, \pi + \phi_i; \theta_i, \phi_i) \times e^{M_{qq} \frac{2h+z_j'}{\cos(\theta_i)}} e^{-M_{pp} \frac{z_j'}{\cos(\theta_i)}} e^{2i(k_x^i x_j' + k_y^i y_j' + k_z^i h)} + f_{qp}^t(\pi - \theta_i, \pi + \phi_i; \pi - \theta_i, \phi_i) R_p(\theta_i) \times e^{-M_{qq} \frac{z_j'}{\cos(\theta_i)}} e^{M_{pp} \frac{2h+z_j'}{\cos(\theta_i)}} e^{2i(k_x^i x_j' + k_y^i y_j' + k_z^i h)} + R_q(\theta_i) f_{qp}^t(\theta_i, \pi + \phi_i; \pi - \theta_i, \phi_i) R_p(\theta_i) \times e^{M_{qq} \frac{2h+z_j'}{\cos(\theta_i)}} e^{-M_{pp} \frac{2h+z_j'}{\cos(\theta_i)}} e^{2i(k_x^i x_j' + k_y^i y_j' + k_z^i (2h+z_j'))} \right] E_p^i \quad (2)$$

式(2)包含了水稻的4项传播机制:冠层直接后向散射、水面-冠层后向散射、冠层-水面散射、水面-冠层-水面散射,其中,

$$M_{qp} = \frac{i2\pi N_c N_s}{k_0 Ah} \langle f_{qp}^{\text{stem}}(\theta, \phi; \theta, \phi) \rangle + N_l \langle f_{qp}^{\text{leaf}}(\theta, \phi; \theta, \phi) \rangle \quad (3)$$

式中, $\langle \rangle$ 的意义为按照散射体的几何参数,物理参数等的概率密度分布作平均; A 为天线照射区域; $k_x^i = k_0 \sin \theta_i \cos \phi_i$, $k_y^i = k_0 \sin \theta_i \sin \phi_i$, $k_z^i = k_0 \cos \theta_i$; t 表示散射类型:茎或叶,故表示茎时 $N_t = N_c N_s$,表示叶时 $N_t = N_c N_s N_l$; $R_q(\theta_i)$ 为菲涅耳反射系数; f_{qp}^t 表示不同散射类型对应的不同极化散射矩阵元素; 参数 $\vec{r}_j^t = \hat{x}x_j^t + \hat{y}y_j^t - \hat{z}z_j^t$ 表示元素茎或叶的位置参数,对于茎秆位置参数 x_j^t 和 y_j^t 在以墩圆心在冠层顶处为原点的坐标系中,茎秆在墩半径为 a_c 内服从均匀分布, z_j^t 为固定值 $-H$ 或 $-H/2$,对于叶片,表征叶子方向特征的为3个欧拉角 α 、 β 、 γ ,叶片的位置和方向均为服从一定分布的随机变量; f_{qp}^t 由Karm模型给出^[11]。

本文假设圆柱体茎秆条数 N_s 在墩半径为 a_c 的区域内服从均匀分布,叶片数 N_l 的位置在高度为 $(0, -H)$ 的茎秆竖直方向上服从均匀分布。叶片的方位角也服从均匀分布,这和实际情况是基本相符的。然而,在以往的研究中,一般假设稻秆处于竖直状态,叶倾角服从均匀或正态分布,而实际情况往往并非如此。在水稻不同的生长期,稻叶的叶倾角是不一样的,其基本规律为水稻生长前期叶倾角稍大,到达孕穗期和抽穗期变到最小,随后逐渐增大,到成熟期之后达到最大。因此,模型需要用不同的概率密度函数描述不同时期叶片的空间几何分布特征,故在模型模拟时需要特定的概率密度函数(PDF, probability distribution function)描述叶片的空间几何分布特征。水稻分蘖期叶倾角 β 的概率密度函数为:

$$\text{PDF}_{\text{leaf}} = \begin{cases} |\sin 4.5(\beta + 15)| / 5 & 20^\circ > \beta \geq 0^\circ \\ -2.9 \times 10^{-7} \beta^2 + 6.7 \times 10^{-5} \beta - 5.3 \times 10^{-3} + 0.16 & 90^\circ \geq \beta \geq 20^\circ \end{cases} \quad (4)$$

同时,根据实际情况,随着水稻茎秆的分蘖,必然导致稻秆在生长的中后期出现一定的倾斜,而且是向周围发散性倾斜。因此模型中必须考虑水稻茎秆的这一明显倾斜特征,特别是确保交差极化和同极化差异模拟的正确性。改进方法为在模型中加入一个合乎稻秆生长状态的随机倾斜角度 θ_{sb} :

$$f_{qp}^t(\theta, \phi; \theta, \phi) = f_{qp}^t(\theta + \theta_{sb}, \phi; \theta + \theta_{sb}, \phi) \quad (5)$$

由于稻叶生长在稻秆上, 故还需将这一角度叠加在稻叶叶倾角和方位角上。

2 模型模拟及实验验证

2.1 陆基散射计测量

利用陆基散射计测量系统^[12], 如图2所示。陆基散射测量系统主要由一个具有俯仰和方位向扫描能力的陆基散射计及其支撑平台构成。其中, 系统支撑平台为一台GTWY40015液压升降机, 最大升起高度为15 m。散射计采用频率调制连续波(FM-CW)制式, 可实现L、S、C和X 4波段、多入射角、多方位角和全极化(VV、HH、VH、HV)的测量。入射角变化范围为0°~90°, 方位角范围为0°~360°。该散射计主要由中科院空间中心研制, 在测量之前已经在微波暗室中进行过绝对标定, 其散射系数测量相对精度可达±0.5 dB。

实验区位于四川省成都邛崃市东部, 成都平原的西南侧, 经纬度为103°32'24"和30°24'11", 海拔高度约483 m。在夏季, 水稻是该区域的主要种植作物, 而且只种植一季稻。典型的水稻生长期, 从移栽开始计算, 一般是从五月下旬或六月初到九月初, 大约100天左右。陆基散射计测量点的水稻种植面积约45亩, 为电子科技大学和四川农业大学合作建立的农作物研究和种植示范基地, 种植的水稻品种为川香优稻。2009年5月到9月整个水稻生长期内, 开展了多时相的水稻后向散射系数测量实验, 测量内容包括4个波段(L、S、C、X)、4种极化(HH、VV、HV、VH)、0°~90°入射角和5个时相的水稻数据。



图2 陆基散射计测量系统

水稻从播种到收割大致经历120天, 其中从移栽到成熟的时间大约为100天, 主要包括分蘖期、拔节期、孕穗期、抽穗期、扬花期、乳熟期、蜡熟期、完熟期共8个时期。为了确保较为完整地记录水稻生长期内, 后向散射系数随各生长参数的变化, 根据

水稻的生长情况, 制定了相应的实验计划, 完成了5个不同时期的观测实验, 水稻生长参数记录如表1所示。

表1 散射计实验同步测量的水稻生长参数列表

参数	天数				
	10	30	50	75	100
行距/m	2/8	2/8	2/9	2/9	2/9
列距/m	2/8	2/8	2/9	2/9	2/9
墩半径/cm	2.0	2.8	3.5	3.7	4.0
墩高度/cm	30	75	109	105	97
秆数	5	15	14	18	18
秆半径/cm	0.13	0.25	0.30	0.45	0.40
秆介电常数	57.0-j10.1	46.4-j8.4	35.0-j6.6	50.5-j9.1	44.4-j8.2
叶数	2	3	5	5	4
叶长/cm	23	27	30	30	27
叶宽/cm	0.6	0.8	1.0	1.3	1.2
叶厚/cm	0.02	0.03	0.04	0.04	0.03
最大叶倾角(°)	10	12	20	30	45
叶介电常数	25.0-j7.9	26.4-j8.2	27.5-j8.2	25.4-j8.0	25.4-j8.0
水介电常数	74.0-j21	74.0-j21	74.0-j21	-	-
土介电常数	-	-	-	20.0-j5.0	20.0-j5.0
均方差高度/cm	-	-	-	-	1.0
相关长度/cm	-	-	-	-	10.0

2.2 模拟与实测数据比较

将表1中的水稻生长参数代入水稻散射模型, 模拟S波段30°入射角下各极化的水稻后向散射系数随生长天数的变化曲线, 并与S波段散射计实测数据比较如图3所示。

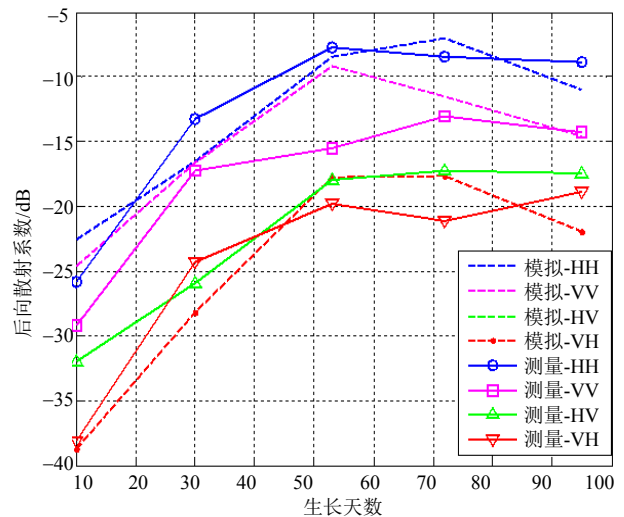


图3 Monte-Carlo模型模拟与实测数据比较曲线

从图中可以看出, 模拟和测量结构无论是变化趋势还是值的大小, 都吻合比较好, 在整个生长期内的总体相对误差在15%以内。说明改进后的Monte-Carlo模型可以很好地反应水稻的真实后向散

射特性。

3 参数敏感性分析

从模型表达式和输入参数列表可以看出，水稻理论散射模型的输入参数较多，参数之间的相关性较为复杂。为了全面掌握水稻散射特征及模型输入输出之间的对应关系，同时，为模型简化、参数反演算法的建立提供理论依据，需要进行参数敏感性分析。参数敏感性分析主要是分析模型各个输入参数对模拟结果的影响，即保持其他参数不变的情况下，变化一组或多组参数模拟水稻的后向散射系数。为了确保模拟结果的可信度，所有输入参数均根据实测数据取合乎实际的变化范围。下面分别给出敏感性相对较大的3类参数模拟结果，即系统参数、稻杆参数和稻叶参数。

3.1 系统参数

系统参数包括入射角、频率和极化，其中4种极化均表示在每一次模拟中。图4分别给出了后向散射系数随入射角和频率的变化曲线。

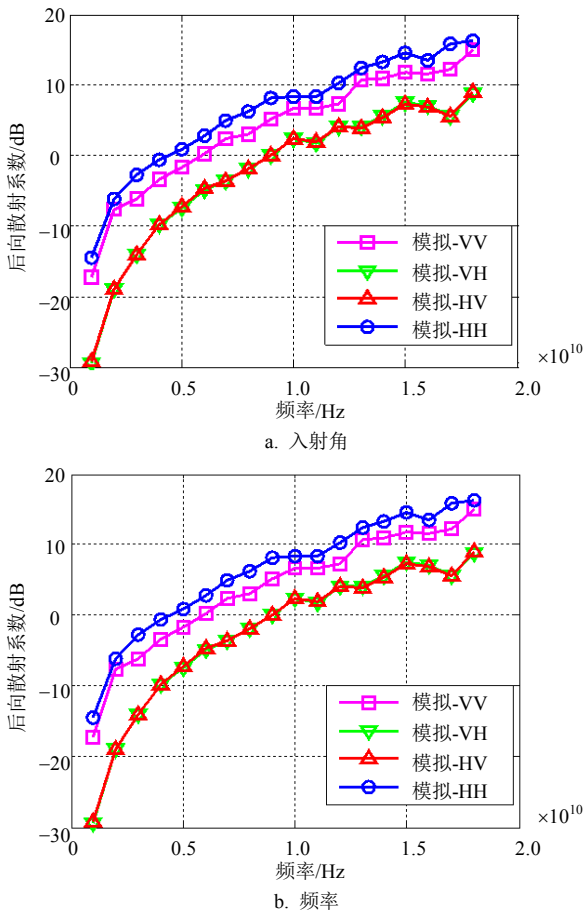


图4 系统参数敏感性分析曲线

3.2 稻杆相关参数

稻杆参数包括杆长、杆半径、每墩杆数、杆含

水量等，图5给出后向散射系数随稻杆长度和半径的变化曲线。

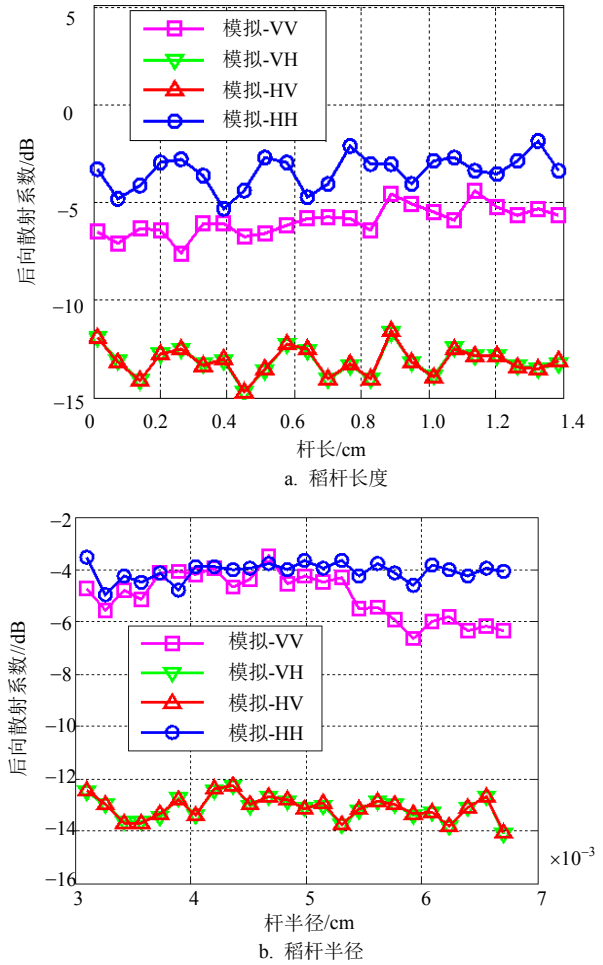


图5 稻杆参数敏感性分析曲线

3.3 稻叶相关参数

稻叶参数包括叶长、叶宽、叶厚、每株叶数、叶含水量、叶倾角等，图6给出后向散射系数随稻杆长度和半径的变化曲线。

综合图4~图6，得到敏感性分析结论如下：

1) 入射角：水稻后向散射随入射角的增加而减小，同极化减小趋势逐渐平缓，交叉极化减小趋势逐渐增大。HH极化一般较VV极化大，可以解释为垂直生长的水稻植株，对电场震动方向为垂直方向的VV极化电磁波衰减更大^[9]。

2) 频率：水稻后向散射系数随频率的增加而显著增大，且增大的趋势逐渐平缓，最终趋于稳定。

3) 稻杆长度：稻杆越长，模拟结果越大，但不显著，而且随杆长的变化周期性的波动较大，波动范围在2 dB左右。

4) 稻杆半径：杆半径变大，模拟结果变化不大，尤其是HH；当稻杆半径大于4.5 mm时，VV极化有减小的趋势，每增加1 mm，减小约1 dB。因此半径

大小的不同能影响极化差异。

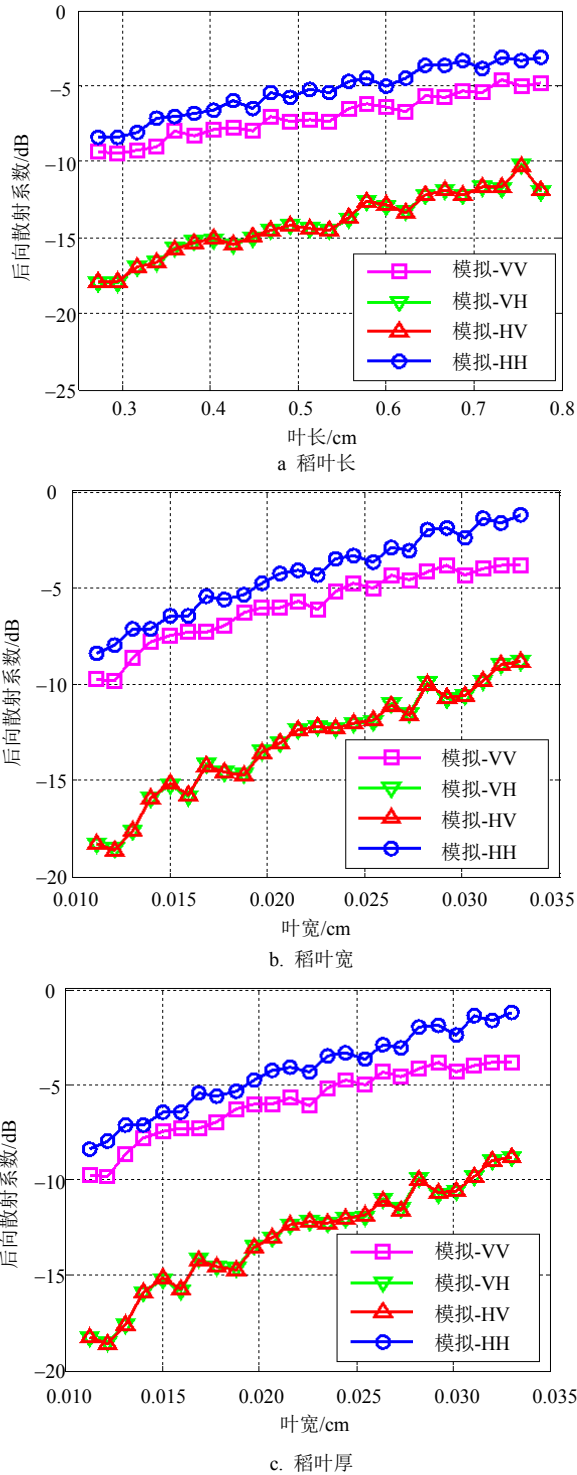


图6 稻叶参数敏感性分析曲线

5) 叶长和叶宽: 对后向散射系数影响较大, 而且基本呈线性增加, 叶长每增加10 cm, 后向散射系数增加约1 dB, 叶宽每增加0.5 cm, 后向散射系数增加约1 dB, 都不影响极化差异。叶参数影响显著是由于单位面积叶片总的数量较大。

6) 叶厚: 后向散射系数随叶厚的增加而显著增

大, 而且增大的趋势逐渐趋于稳定, 叶厚每增加0.2 mm, HH极化后向散射系数增加约3 dB, 厚度小于0.6 mm时, 对HH极化影响更加显著。故叶片厚度能影响到极化差异。

此外, 水稻参数还包括植株之间的行列距、墩半径、每墩的秆数、每株的叶数、秆和叶介电常数、叶倾角、水温度等。这些参数由于其敏感性较小, 或者生长过程中变化不大, 这里不一一列出。如行列距越宽, 墩数、秆数和叶数就越少, 故模拟结果越小, 增加10 cm行列距, 约减小1 dB, 但水稻生长期行列距是基本不变化的。又如每墩的秆数越多, 模拟结果越大, 但超过约14株后逐渐趋于稳定, 总影响范围在3 dB左右; 每株的叶数越多, 结果越大, 但整个水稻生长期的叶数一般稳定为3~5株, 故影响较小。

4 结束语

本文根据蒙特卡洛方法建立的水稻微波散射模型, 首先针对水稻的生长特征对模型进行了修正, 进而利用散射计实测数据验证了修正后模型模拟结果的准确性。结果表明, 基于蒙特卡洛方法建立的水稻后向散射模型能够很好地模拟水稻的后向散射特征。在此基础上, 根据水稻生长参数实测数据设定模型输入参数的变化范围, 模拟不同输入参数对应的水稻后向散射系数, 最后针对各类参数进行敏感性分析, 获得了各类水稻生长参数与后向散射系数之间的定量关系。敏感性分析结果表明, 系统参数如入射角和频率对后向散射的影响较大, 而且基本都是单调变化的。水稻后向散射系数对稻叶参数的变化非常灵敏, 也基本是线性增加的; 而稻秆参数对后向散射系数的影响具有一定的波动性。特别地, 稻秆半径和叶厚两个水稻生长参数对同极化差异有较大的影响。接下来, 可以进一步分析组合参数的敏感性, 如稻叶的面积、稻秆的体积、生物量和叶面积指数等, 以便减少模型参数输入的个数, 在此基础上建立相应的参数反演模型。

参 考 文 献

[1] ULABY F T, MOORE R K, FUNG A K. Microwave remote sensing: Active and passive[M]. Dedham, MA: Artech House, 1982.
 [2] ULABY F T, SARRABANDI K, MCDONALD K, et al. Michigan microwave canopy scattering model[J]. INT J Remote Sensing, 1990, 11(7): 223-1253.

(下转第925页)

参 考 文 献

- [1] GAREY M R, JOHNSON D S, SETHI R. The complexity of flowshop and jobshop scheduling[J]. *Mathematics of Operations Research*, 1976, 1(2): 117-129.
- [2] 邢文训, 谢金星. 现代优化计算方法[M]. 北京: 清华大学出版社, 1999.
- XING Wen-xun, XIE Jin-xing. *Modern optimization methods*[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1999.
- [3] WANG Ling, ZHANG Liang, ZHENG Da-zhong. An effective hybrid genetic algorithm for flow shop scheduling with limited buffers[J]. *Computers and Operations Research*, 2006, 33(10): 2960-2971.
- [4] KUO I H, HORNG S J, KAO T W, et al. An efficient flow-shop scheduling algorithm based on a hybrid particle swarm optimization model[J]. *Expert Systems with Applications*, 2009, 36(3): 7027-7032.
- [5] FUELLERER G, DOERNER K F, HARTL R F, et al. Ant colony optimization for the two-dimensional loading vehicle routing problem[J]. *Computers & Operations Research*, 2009, 36(3): 655-673.
- [6] PALMER D S. Sequencing jobs through a multi-stage process in the minimum total time—a quick method of obtaining a near optimum[J]. *Operational Research Quarterly*, 1965(16): 101-107.
- [7] GUPTA J. A functional heuristic algorithm for the flowshop scheduling problem[J]. *Operational Research Quarterly*, 1971(22): 39-47.
- [8] CAMPBELL H G, DUDEK R A, SMITH M L. A heuristic algorithm for the n-job, m-machine scheduling problem[J].
- [9] DANNENBRING D G. An evaluation of flow shop sequencing heuristics[J]. *Management Science*, 1977, 23(11): 1174-1182.
- [10] NAWAZ M, ENSCORE E, HAM I. A heuristic algorithm for the m machine, n job flow shop[J]. *OMEGA: the International Journal of Management Sciences*, 1983, 11(1): 91-95.
- [11] 盛立纲, 顾幸生. 混合遗传NEH算法在流水车间调度中的应用[J]. *控制工程*, 2010, 17(4): 497-500.
- SHENG Li-gang, GU Xing-sheng. Hybrid genetic NEH algorithm for permutation flowshop scheduling problems [J]. *Control Engineering of China*, 2010, 17(4): 497-500.
- [12] 高守玮, 戴杨, 刘媛媛. 对于NEH启发式方法搜索邻域的研究[J]. *控制工程*, 2008, 15(2): 217-219.
- GAO Shou-wei, DAI Yang, LIU Yuan-yuan. Study on the neighborhood of NEH heuristic[J]. *Control Engineering of China*, 2008, 15(2): 217-219.
- [13] GAO Shou-wei, LEISTEN R, DAI Yang, et al. Break the ties for NEH heuristic in solving the permutation flow shop problems[J]. *Journal of Donghua University(English Edition)*, 2008, 25(3): 258-262.

编辑 漆 蓉

(上接第899页)

- [3] KARAM M A, AMAR F, FUNG A K, et al. A microwave polarimetric scattering model for forest canopies based on vector radiative transfer theory[J]. *Remote Sensing of Environment*, 1995, 53(1): 16-30.
- [4] MCDONALD K C, DOBSON M C, ULABY F T. Using MIMICS to model L-band multiangle and multitemporal backscatter from a walnut orchard[J]. *IEEE Trans Geosci Remote*, 1990, 48(4): 477-491.
- [5] DE ROO R D, DU Yang, 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 Trans Geosci Remote Sensing*, 2001, 39(4): 864-872.
- [6] YUEH S H, KONG J A, JAO J K, et al. Branching model for vegetation[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1992, 30(2): 390-402.
- [7] TSANG L, MANDT C, DING K H. Monte Carlo simulations of the extinction rate of dense media with randomly distributed dielectric spheres based on solution of Maxwell's equations[J]. *Opt Lett*, 1992, 17(5): 314-316.
- [8] ZURK L M, TSANG L, DING K H, et al. Monte Carlo simulations of the extinction rate of densely packed spheres with clustered and non-clustered geometries[J]. *Journal of the Optical Society of America A (Optics, Image Science and Vision)*, 1995(12): 1772-1781.
- [9] TOAN T L, RIBBES F, WANG L F, et al. Rice crop mapping and monitoring using ERS-1 data based on experiment and modeling results[J]. *IEEE Trans Geosci Remote Sensing*, 1997, 35(1): 41-56.
- [10] OH Y, HONG J Y. Moment method - Monte Carlo simulation of the microwave backscatter of wet-land rice fields[C]//IEEE IGARSS 2007. Busan, Korea: IEEE, 2007: 69-72.
- [11] KARAM M A, FUNG A K. Leaf-shape effects in electromagnetic wave scattering from vegetation[J]. *IEEE Trans Geosci Remote Sensing*, 1989, 27(6): 687-697.
- [12] JIA Ming-quan, CHEN Yan, TONG Ling, et al. Land-based scatterometer measurements and retrieval of surface parameters using neural networks[C]//IITA Conference on Geoscience and Remote Sensing (IITA-GRS 2008) 2008. Shanghai, China: [s.n.], 2008.

编辑 漆 蓉