

# 小麦S波段多层后向散射模型

何磊, 童玲, 陈彦, 李玉霞

(电子科技大学自动化工程学院 成都 611731)

**【摘要】**针对麦穗出现后小麦生长期的微波散射特性, 基于矢量辐射传输理论(VRT), 建立了小麦S波段多层后向散射模型。模型把小麦冠层划分为麦穗层、麦秆叶层和土壤层, 并基于能量守恒的矢量辐射传输理论, 对电磁波强度的反射、吸收和传输进行了分析, 采用5项后向散射贡献构成冠层总后向散射。模型的解析首先采用先进积分方程模型(AIEM)对土壤粗糙面的后向散射进行模拟, 然后利用消光矩阵和相矩阵分别计算散射能量的衰减和散射方向的变化, 最后利用Mueller矩阵获得最终的解析解。该文选用2011年川西实验场测量的小麦S波段散射数据对构建的模型进行验证与分析, 模型的模拟值与实测值吻合较好。研究结果表明麦穗出现后对小麦冠层后向散射影响较大, 建模时有必要单独考虑麦穗的影响。

**关键词** 后向散射模型; 麦穗; S波段; 矢量辐射传输理论; 小麦

**中图分类号** TP7 **文献标志码** A **doi**:10.3969/j.issn.1001-0548.2016.05.013

## Multiple Layers Backscatter Model of Wheat for S Band

HE Lei, TONG Ling, CHEN Yan, and LI Yu-xia

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

**Abstract** The paper presents a multiple layers backscatter model of wheat for S-band based on vector radiative transfer (VRT) theory, which focuses on the microwave character of wheat at the growth stage that wheat ears appeared. The scattered, absorbed and transferred electromagnetic intensity is analyzed based on the law of energy conservation of VRT, and the wheat canopy is divided into three layers, the ears layer, the stem and leaf layer and the soil layer. Furthermore, the total backscatter is composed by using five back-scattering contributions. An advanced integral equation model (AIEM) is applied to simulate the soil backscatter. The extinction and phase matrices are used to compute the scattering intensity decayed and transferred. In addition, Mueller matrix is used to obtain the backscatter values. The backscatter of S-band, which was measured at the West Sichuan Experiment Location in 2011, is applied to analyze and verify the model. The results show the simulated values agreed well with the measured data, and the wheat ears should be taken into account in modeling as a separate element for its influence to backscatter.

**Key words** backscatter model; ears; S-band; VRT; wheat

小麦是世界上总产量位列第二位, 仅次于玉米的粮食作物。我国去年全年小麦产量12 617万吨, 增产3.5%<sup>[1]</sup>。小麦大尺度的长势动态监测和产量预估都具有重要的现实意义。鉴于微波对低矮植被尺寸的敏感性及后向散射所携带的植被信息对小麦各参数研究的重要性, 需要对小麦微波散射机理进行更详尽的研究, 从而提高对小麦各个生长阶段监测的有效性。低矮农作物属于非各向同性介质且结构复杂, 各组成部分的形状、大小、高低、厚度和朝向等对微波后向散射都有较大的影响, 因此会造成散射机理的不同<sup>[2]</sup>。辐射传输理论来源于恒星谱的研究, 利用电磁波在散射介质中的多次散射、传播

与吸收机理对植被进行研究。由辐射传输理论推广而来的矢量辐射传输理论遵从能量守恒定律, 具有物理意义明确和能够叠加计算多次散射的特点, 适用于散射粒子较稀少, 占空比小于0.005的植被和农作物等地物情况<sup>[3]</sup>。本文采用了文献[4]提出的求解3个函数(散射振幅函数、消光矩阵、相矩阵)以及解矢量辐射传输方程得出相应Mueller矩阵和Stokes矩阵的方法。该方法首先基于散射振幅函数中入射场与散射场的耦合关系, 然后求解消光矩阵内散射粒子的散射及吸收系数和背景介质的吸收系数, 最后由相矩阵描述散射能量不同方向之间的转移来处理总的后向散射系数。

收稿日期: 2015-06-25; 修回日期: 2015-09-16

基金项目: 国家自然科学基金(41071222, 41371340, 60841006)

作者简介: 何磊(1978-), 男, 博士生, 主要从事微波遥感方面的研究。

文献[5]建立的针对森林环境的密歇根微波冠层散射模型以其严密性和准确性获得了广泛的应用,该模型综合考虑了冠层、茎干、地表三层介质的散射作用。文献[6]省略了文献[5]创建模型中的树干层,利用L波段和C波段较好地模拟了小麦后向散射系数。低矮农作物的散射机理研究衍生出的算法模型推进了微波散射机理的发展<sup>[7]</sup>。文献[8]提出了一个二阶散射模型来研究小麦,但对麦叶和麦穗的作用研究不够深入。文献[3]对农作物植被的电磁散射机理进行了系统研究,推进了散射模型的发展。文献[9-10]利用微波散射测量数据对小麦的后向散射进行了研究,对各个生长阶段的小麦的微波散射进行了分析。本文选取小麦生长阶段中麦穗出现后的两个生长时期灌浆期和成熟期,针对麦穗出现在小麦最上层以及麦穗和麦秆叶的物理属性差别的特点,把麦穗作为独立的一层,进行多层后向散射建模。本文利用AIEM模型模拟随机粗糙地表后向散射<sup>[11]</sup>,使用消光矩阵和相矩阵计算能量衰减和方向变化,利用Mueller矩阵对方程进行解析。

## 1 模型构建

模型构建中,小麦冠层被分为麦穗层、麦秆叶层和土壤层。最上层的麦穗简化为椭圆散射粒子,中间层的麦秆和麦叶分别简化为有限长圆柱体和椭圆盘,麦叶设为均匀分布在第二层空间里,土壤层设为随机粗糙面。

小麦含穗生长期冠层散射机理如图1所示,图中, $M_1$ 为麦穗层直接后向散射项; $M_2$ 为土壤随机粗糙面直接后向散射; $M_3$ 为麦穗层-土壤层-麦秆叶层-麦穗层耦合散射项; $M_4$ 为麦穗层-麦秆叶层-土壤层-麦秆叶层-麦穗层耦合后向散射项; $M_5$ 为麦秆叶层-土壤层-麦穗层耦合后向散射项。边界条件: $Z=0$ 作为空气和麦穗的分界面; $Z=-h$ 作为麦穗和麦秆叶的分界面; $Z=-d$ 作为麦秆叶层和土壤随机粗糙面的分界面。在消光矩阵和相矩阵中都引入一个竖直方向上的变量,描述非均匀分布的非球形散射粒子层的全极化散射。

$$\bar{k}_e(\theta, \varphi) = \frac{4\pi}{k} n_0 \text{Im}[\hat{p} \times \bar{S}(\theta, \phi; \theta, \phi) \times \hat{p}] =$$

$$\frac{2p}{k} n_0 \begin{bmatrix} 2\text{Im} \langle S_{vv}^0 \rangle & 0 & \text{Im} \langle S_{vh}^0 \rangle & -\text{Re} \langle S_{vh}^0 \rangle \\ 0 & 2\text{Im} \langle S_{hh}^0 \rangle & \text{Im} \langle S_{hv}^0 \rangle & \text{Re} \langle S_{hv}^0 \rangle \\ 2\text{Im} \langle S_{hv}^0 \rangle & 2\text{Im} \langle S_{vh}^0 \rangle & \text{Im} \langle S_{vv}^0 + S_{hh}^0 \rangle & \text{Re} \langle S_{vv}^0 - S_{hh}^0 \rangle \\ 2\text{Re} \langle S_{hv}^0 \rangle & -2\text{Re} \langle S_{vh}^0 \rangle & \text{Re} \langle S_{hh}^0 - S_{vv}^0 \rangle & \text{Im} \langle S_{vv}^0 + S_{hh}^0 \rangle \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中,  $S_{pq}^0$  ( $p, q = v, h$ ) 为散射粒子的前向散射矩阵  $\bar{S}_0 = \bar{S}(\theta, \phi; \theta, \phi)$  的元素,  $v$  表示垂直极化,  $h$  表示水

平极化。不同类型的散射粒子的消光矩阵形式有一定差别:对称性最强的球形粒子,其消光矩阵为常

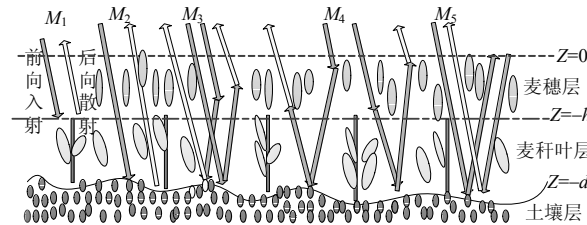


图1 小麦含穗生长期冠层散射机理

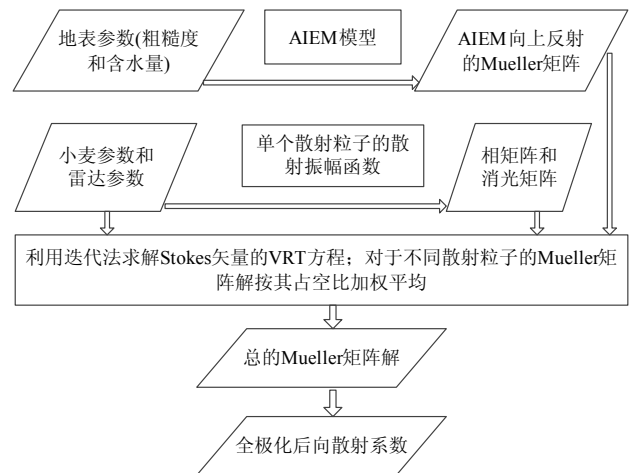


图2 模型解析计算流程图

鉴于主动微波遥感可以忽略热辐射项,则矢量辐射传输方程可表示为:

$$\frac{d\mathbf{I}(r, \hat{s})}{ds} = -\bar{k}_e(\hat{s}) \cdot \mathbf{I}(r, \hat{s}) + \int d\hat{s}' \bar{P}(\hat{s}, \hat{s}') \cdot \mathbf{I}(r, \hat{s}') \quad (1)$$

式中,  $\mathbf{I}(r, \hat{s})$  描述了电磁波强度(斯托克斯强度)的散射、吸收和多次散射的传播过程;  $\bar{k}_e$  为消光矩阵,表示  $\mathbf{I}(r, \hat{s})$  的衰减;  $\bar{P}(\hat{s}, \hat{s}')$  为相矩阵,表示多次散射从方向  $(\theta', \phi')$  传递到  $(\theta, \phi)$  的过程<sup>[3]</sup>。消光矩阵为:

平极化。不同类型的散射粒子的消光矩阵形式有一定差别:对称性最强的球形粒子,其消光矩阵为常

数; 水平方位均匀取向的, 为对角矩阵; 非均匀取向的为非对角矩阵。用式(2)计算消光矩阵, 要求  $\bar{\mathbf{S}}$  足够精确。

$$\bar{\mathbf{P}}(\theta, \phi; \theta', \phi') = \begin{bmatrix} \langle |\mathbf{S}_{vv}|^2 \rangle & \langle |\mathbf{S}_{vh}|^2 \rangle & \text{Re} \langle \mathbf{S}_{vv} \mathbf{S}_{vh}^* \rangle & -\text{Im} \langle \mathbf{S}_{vv} \mathbf{S}_{vh}^* \rangle \\ \langle |\mathbf{S}_{hv}|^2 \rangle & \langle |\mathbf{S}_{hh}|^2 \rangle & \text{Re} \langle \mathbf{S}_{hv} \mathbf{S}_{hh}^* \rangle & -\text{Im} \langle \mathbf{S}_{hv} \mathbf{S}_{hh}^* \rangle \\ 2\text{Re} \langle \mathbf{S}_{vv} \mathbf{S}_{hv}^* \rangle & 2\text{Re} \langle \mathbf{S}_{vh} \mathbf{S}_{hh}^* \rangle & \text{Re} \langle \mathbf{S}_{vv} \mathbf{S}_{hh}^* + \mathbf{S}_{vh} \mathbf{S}_{hv}^* \rangle & -\text{Im} \langle \mathbf{S}_{vv} \mathbf{S}_{hh}^* - \mathbf{S}_{vh} \mathbf{S}_{hv}^* \rangle \\ 2\text{Im} \langle \mathbf{S}_{vv} \mathbf{S}_{hv}^* \rangle & 2\text{Im} \langle \mathbf{S}_{vh} \mathbf{S}_{hh}^* \rangle & \text{Im} \langle \mathbf{S}_{vv} \mathbf{S}_{hh}^* + \mathbf{S}_{vh} \mathbf{S}_{hv}^* \rangle & \text{Re} \langle \mathbf{S}_{vv} \mathbf{S}_{hh}^* - \mathbf{S}_{vh} \mathbf{S}_{hv}^* \rangle \end{bmatrix} \quad (3)$$

根据矢量辐射传输理论可得到:

$$\theta \frac{d}{dz} \mathbf{I}_r^+(\theta, \phi, z) = -\mathbf{K}_r^+(\theta, \phi) \cdot \mathbf{I}_r^+(\theta, \phi, z) + \mathbf{F}_r^+(\theta, \phi, z) \quad (4)$$

$$-\theta \frac{d}{dz} \mathbf{I}_r^-(\theta, \phi, z) = -\mathbf{K}_r^-(\theta, \phi) \cdot \mathbf{I}_r^-(\theta, \phi, z) + \mathbf{F}_r^-(\theta, \phi, z) \quad (5)$$

式中,  $\mathbf{I}_r^+(\theta, \phi, z)$ 、 $\mathbf{I}_r^-(\theta, \phi, z)$  分别表示Stokes矢量的上行及下行强度;  $\mathbf{K}_r^{\pm}$  表示小麦层的消光矩阵;  $\mathbf{F}_r^+(\theta, \phi, z)$  和  $\mathbf{F}_r^-(\theta, \phi, z)$  表示Stokes矢量强度自  $(\theta, \phi)$  散射至  $(-\theta, \phi)$  方向的能量, 即表示散射源函数, 有:

$$\mathbf{F}_r^+(\theta, \phi, z) = \frac{1}{\theta} \left[ \int_0^{2\pi} \int_0^1 P_r(\theta, \phi; \theta', \phi') \mathbf{I}_r^+(\theta', \phi', z) d\theta' d\phi' + \int_0^{2\pi} \int_0^1 P_r(\theta, \phi; -\theta', \phi') \mathbf{I}_r^-(\theta', \phi', z) d\theta' d\phi' \right] \quad (6)$$

$$\mathbf{F}_r^-(\theta, \phi, z) = \frac{1}{\theta} \left[ \int_0^{2\pi} \int_0^1 P_r(-\theta, \phi; \theta', \phi') \mathbf{I}_r^+(\theta', \phi', z) d\theta' d\phi' + \int_0^{2\pi} \int_0^1 P_r(-\theta, \phi; -\theta', \phi') \mathbf{I}_r^-(\theta', \phi', z) d\theta' d\phi' \right] \quad (7)$$

空气层和小麦层的边界条件  $\mathbf{I}_r^-(\theta, \phi, z=0)$ 、小麦层和土壤粗糙面的边界条件  $\mathbf{I}_r^+(\theta, \phi, z=-h)$  为:

$$\mathbf{I}_r^-(\theta, \phi, z=0) = I_0 \delta(\theta - \theta_0) \delta(\phi - \phi_0) \quad (8)$$

$$\mathbf{I}_r^+(\theta, \phi, z=-h) = \mathbf{R}_w(\theta) \mathbf{I}_r^-(\theta, \phi, z=-h) \quad (9)$$

式中,  $I_0$  为入射Stokes矢量;  $\delta$  表示冲击函数;  $\mathbf{R}_w$  为Mueller矩阵。

利用迭代法求解并带入边界条件可以得到后向散射求解公式为:

$$\mathbf{I}_r^{\text{bs}}(\theta_0, \phi_0) = \mathbf{I}_r^+(\theta_0, \phi_0 \pm \pi, z=0) = \mathbf{T}(\theta_0, \phi_0) I_0 \quad (10)$$

式中,

$$\mathbf{T}(\theta_0, \phi_0) = \frac{1}{\theta_0} \mathbf{QD}_r(\theta_0, \phi_0 \pm \pi; -h/\theta_0) \mathbf{Q}^{-1} \mathbf{R}_w(\theta_0, \phi_0 \pm \pi) \mathbf{QA}_1 \mathbf{Q}^{-1} \times \mathbf{R}_w(\theta_0, \phi_0) \mathbf{D}_r(\theta_0, \phi_0; -h/\theta_0) \mathbf{Q}^{-1} + \frac{1}{\theta_0} \mathbf{QD}_r(\theta_0, \phi_0 \pm \pi; -h/\theta_0) \mathbf{Q}^{-1} \mathbf{R}_w(\theta_0, \phi_0 \pm \pi) \mathbf{QA}_2 \mathbf{Q}^{-1} +$$

相矩阵  $\bar{\mathbf{P}}(\hat{s}, \hat{s}')$  描述散射能量从  $(\theta', \phi')$  转移到  $(\theta, \phi)$  的转移矩阵, 有:

$$\frac{1}{\theta_0} \mathbf{QA}_3 \mathbf{Q}^{-1} \mathbf{R}_w(\theta_0, \phi_0) \mathbf{QD}_r(\theta_0, \phi_0; -h/\theta_0) \mathbf{Q}^{-1} + \frac{1}{\theta_0} \mathbf{QA}_4 \mathbf{Q}^{-1} + \mathbf{QA}_5 \mathbf{Q}^{-1} \quad (11)$$

式中,  $\mathbf{Q}$  表示特征值组成的消光矩阵,  $\mathbf{Q}^{-1}$  表示其逆矩阵;  $\mathbf{D}_r$  表示与特征值相关的对角矩阵, 有:

$$\mathbf{D}_r(\theta, \phi; -z/\theta)_{(i,i)} = \exp[-\lambda_i(\theta, \phi)z/\theta] \quad (12)$$

$$A_1 = \int_{-h}^0 \mathbf{D}_r(-\theta, \phi; -(z'+h)/\theta) \mathbf{Q}^{-1} \mathbf{P}_r(-\theta, \phi; \theta_0, \phi_0) \times \mathbf{QD}_r(\theta_0, \phi_0; -(z'+h)/\theta_0) dz' \quad (13)$$

$$A_2 = \int_{-h}^0 \mathbf{D}_r(-\theta, \phi; -(z'+h)/\theta) \mathbf{Q}^{-1} \mathbf{P}_r(-\theta, \phi; -\theta_0, \phi_0) \times \mathbf{QD}_r(-\theta_0, \phi_0; z'/\theta_0) dz' \quad (14)$$

$$A_3 = \int_{-h}^0 \mathbf{D}_r(\theta, \phi; z'/\theta) \mathbf{Q}^{-1} \mathbf{P}_r(\theta, \phi; \theta_0, \phi_0) \times \mathbf{QD}_r(\theta_0, \phi_0; -(z'+h)/\theta_0) dz' \quad (15)$$

$$A_4 = \int_{-h}^0 \mathbf{D}_r(\theta, \phi; z'/\theta) \mathbf{Q}^{-1} \mathbf{P}_r(\theta, \phi; -\theta_0, \phi_0) \times \mathbf{QD}_r(-\theta_0, \phi_0; z'/\theta_0) dz' \quad (16)$$

$$A_5 = \mathbf{D}_r(\theta, \phi; -h/\theta) \mathbf{Q}^{-1} \mathbf{R}_w(\theta, \phi; -\theta_0, \phi_0) \times \mathbf{QD}_r(-\theta_0, \phi_0; -h/\theta_0) \quad (17)$$

通过求解可以获得小麦4个极化的后向散射系数为:

$$\begin{cases} \sigma_{VV}^0 = 4\pi\theta_0 [\mathbf{T}]_{11} \\ \sigma_{HH}^0 = 4\pi\theta_0 [\mathbf{T}]_{22} \\ \sigma_{VH}^0 = 4\pi\theta_0 [\mathbf{T}]_{12} \\ \sigma_{HV}^0 = 4\pi\theta_0 [\mathbf{T}]_{21} \end{cases} \quad (18)$$

在对微波散射进行研究时, 通常采用dB作为散射强度的单位, 其转换通常对散射系数值取对数, 有:

$$\sigma_{pq} = 10 \lg \sigma_{pq}^0 \quad (19)$$

式中, p 表示发射极化; q 表示接收极化。

## 2 实验与数据

### 2.1 实验介绍

本文选取的实验地点位于四川省成都市邛崃前进镇, 是电子科技大学所属的川西实验场(北纬  $30^\circ 24' 22.29''$ , 东经  $103^\circ 32' 15.97''$ )。该实验场位于成

都平原西南部,地势平缓,海拔约483 m,占地约30 000 m<sup>2</sup>,主要种植农作物有小麦、水稻、玉米和油菜。冬小麦的种植生长时间为每年的11月份到次年的5月份共约200天。本文研究选取的生长期为小麦灌浆期和成熟期,如图3所示。测量所使用的陆基散射系统主要有升降平台、控制计算机、散射计和收发天线几部分组成。升降机最大升起高度为15 m,通过计算机控制升降机上的伺服转台,使得收发天线可以在水平和垂直方向调整,满足俯仰角0~90°和方位角0~360°之间的自由转动。散射计采用调频连续波(FM-CW)制式,每个频段采用不同的散射计,共有L、S、C和X波段4个散射计。

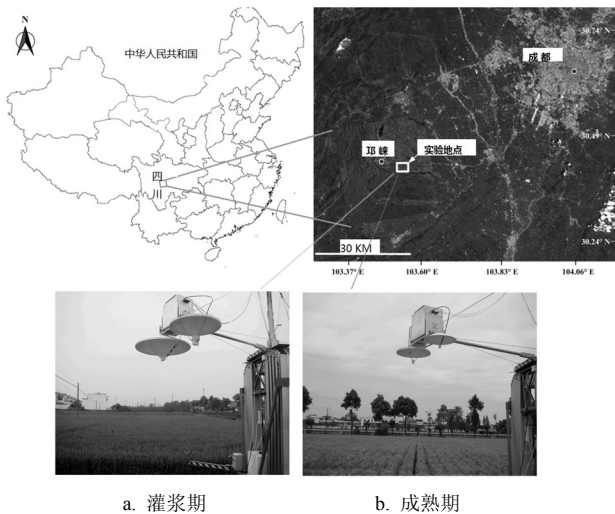


图3 实验地点和生长期

本文选取2011年测量的小麦S波段散射数据及地表参数,S波段中心频率为3.1 GHz,带宽为0.8 GHz。本文研究选取的入射角为22~52°,规避了测量过程中小入射角对冠层后向散射的干扰,避免了大入射角状态下田埂和树木对测量的影响。本文通过实测数据对AIEM模型进行了修正,使之能更好地模拟土壤随机粗糙面的后向散射系数。

## 2.2 数据介绍

本文选取小麦生长期中的测量时间为灌浆期2011-04-12和成熟期2011-05-08。粗糙度的测量采用自制的粗糙度板进行均方根高度和相关长度的计算。土壤含水量采用TDR300进行测量。对比小麦生长期两个阶段,如表1所示。差别最大的是小麦含水量和土壤含水量,成熟期的小麦含水量迅速减少,由绿色失水变为黄色。成熟期测量期间,由于雨水的原因,造成土壤含水量急剧增大,趋于饱和状态。表1中列举了模型构建考虑的各种参量。土壤的参数和小麦冠层的参数对后向散射系数影响较大,实验

中小麦参数值采用30个独立样本进行平均,散射计测量后向散射系数首先采用内外部定标进行数据校正,然后采用两轮数据平均的方法来保障数据的准确性和精度。

表1 模型所需实测数据

数据参数	灌浆期	成熟期
叶厚/m	0.000 45	0.000 32
叶宽/m	0.0213	0.0206
叶长/m	0.232	0.221
叶含水量/%	80.1	25.4
秆长/m	0.621	0.615
秆直径/m	0.004 5	0.004 3
秆含水量/%	78.3	21.1
叶密度/m <sup>-2</sup>	2050	2180
小麦层厚度/m	0.815	0.765
穗长/m	0.102	0.145
穗直径/m	0.010 2	0.009 6
穗含水量/%	76.2	22.7
穗密度/m <sup>-2</sup>	452	469
土壤相关长度/cm	15.26	15.26
土壤粗糙度/cm	2.12	2.12
土壤含水量/%	26.7	42.1

## 3 结果与分析

本文构建的小麦S波段多层后向散射模型由5项散射贡献构成总后向散射,其中最主要的是土壤后向散射和小麦冠层体散射,其他3项散射作为散射项的补充,解析过程中对消光矩阵和相矩阵进行了简化。理论上,交叉极化(VH和HV)形成机制来源于由茎秆和土壤之间的散射,本文采用两者的平均值作为VH的后向散射值进行模型结果分析。

### 3.1 小麦灌浆期模拟结果分析

图4显示了小麦S波段后向散射系数在灌浆期的多极化(HH,VV,VH)模拟值与实测值随入射角的变化规律。图中HH极化曲线模拟值与实测值在小角度吻合较好,40°之后实测值趋于变大,模拟值依然减小,可能的原因是模型中简化了消光矩阵和相矩阵造成了散射项的遗漏。VV极化曲线与HH类似,土壤散射占据主导地位的小角度入射角,VV极化由于垂直结构的小麦形态造成的衰减使散射值小于HH极化,40°入射角之后实测与模拟值差距变大,麦穗的散射作用强于HH极化。VH极化模拟值与实测值吻合较好。针对HH、VV和VH的均方根误差(RMSE)分别为2.23、2.82和1.85 dB。灌浆期属于生长最茂盛,生物量最大,含水量最高和体散射最强的小麦生长阶段,模型对交叉极化(VH)模拟效果较好,对水平极化(HH)的模拟效果优于垂直极化(VV),各个极化

的均方根误差都在系统误差允许范围3 dB之内, 对 多层模型模拟结果验证表明灌浆期模拟结果较好。

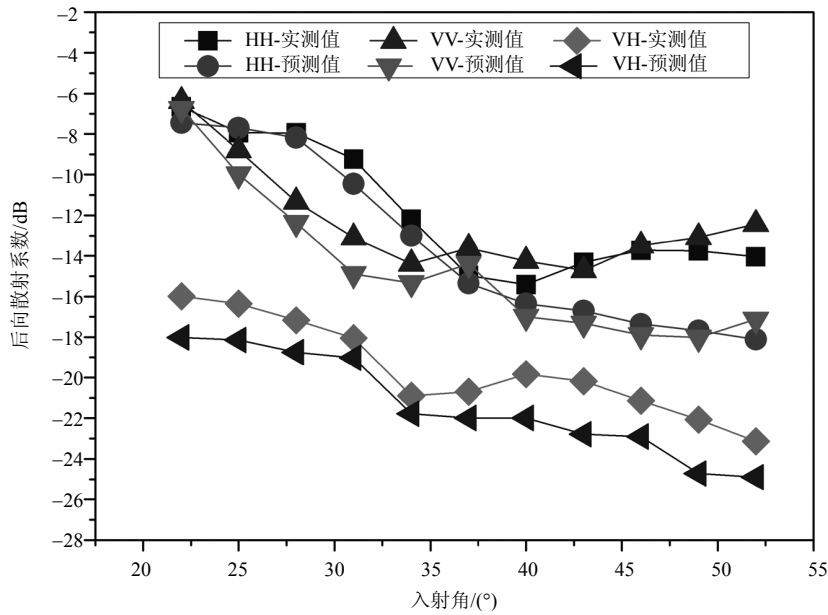


图4 灌浆期小麦后向散射模拟和实测数据

### 3.2 小麦成熟期模拟结果分析

多极化(HH,VV,VH)模拟值与实测值随入射角的变化规律。

图5显示了小麦S波段后向散射系数在成熟期的

变化规律。

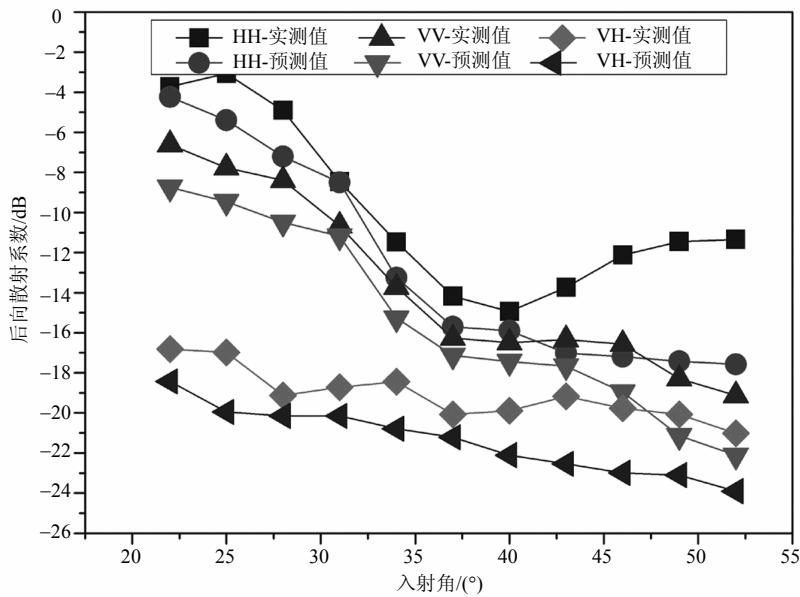


图5 成熟期小麦后向散射模拟和实测数据

HH极化测量结果在40°入射角之后上升趋势明显, 两次测量的平均结果依然保持相同的曲线走势, 该极化的RMSE为3.3 dB, 处于3 dB误差范围外。针对VV和VH, RMSE分别为1.92 dB和2.44 dB, 都在误差范围内。成熟期时, 小麦水分含量迅速减小使得微波穿透性更好, 土壤的含水量对后向散射系数影响变大。HH极化实测和模拟结果都大于VV极化, 由于土壤含水量趋于饱和, 对交叉极化影响较大, 这样造成交叉极化的均方根误差较大。

### 3.3 模型分析

模型采用三层散射模型模拟计算有麦穗的小麦后向散射系数。对于土壤粗糙面, 利用AIEM来模拟粗糙面后向散射, 由于小麦冠层简化的穗、秆和叶尺寸与10 cm的S波段波长处于同一数量级, 因此会造成微波与植被相互作用十分复杂。模型对小麦叶在垂直方向上的长度分量以及叶倾角的分布都采用均匀分布, 解析过程中对消光矩阵和相矩阵进行了简化, 利用AIEM模拟粗糙面散射以及土壤含水量的

统计值与照射面积的有效值的不同都会对后向散射系数造成影响,影响模型构建的精度。下一步的研究工作需要考虑麦穗的粒子浓度、麦叶长度及叶倾角的分布。

## 4 结束语

本文对小麦有穗的生长期进行了研究,针对麦穗与麦秆叶的不同,把生长于小麦冠层顶部的麦穗作为单独的一层进行微波散射建模。根据矢量辐射传输理论,本文对小麦后向散射系数进行了公式推导及计算流程分析,结合S波段小麦灌浆期和成熟期实测后向散射系数及测量的地表参数,对小麦多层后向散射模型的模拟结果进行了验证。比较两个生长阶段不同极化的均方根误差,证明灌浆期各极化模拟效果较好,成熟期垂直极化和交叉极化模拟效果较好。鉴于麦穗与麦秆和麦叶散射特性的不同,麦穗对于小麦生长期建模的作用不容忽视。本文对小麦微波散射机理、小麦生长状态评估、小麦估产反演等都有较好的参考价值。

### 参 考 文 献

- [1] 中华人民共和国国家统计局. 中华人民共和国2014年国民经济和社会发展统计公报[EB/OL]. (2015-02-26). [http://www.stats.gov.cn/tjsj/zxfb/201502/t20150226\\_685799.html](http://www.stats.gov.cn/tjsj/zxfb/201502/t20150226_685799.html). National Bureau of Statistics of the People's Republic of China. The People's Republic of China national economic and social development statistical bulletin in 2014[EB/OL]. (2015-02-26). [http://www.stats.gov.cn/tjsj/zxfb/201502/t20150226\\_685799.html](http://www.stats.gov.cn/tjsj/zxfb/201502/t20150226_685799.html).
- [2] ULABY F T, MOORE R K, FUNG A K. Microwave remote sensing: Active and passive. Volume 2: Radar remote sensing and surface scattering and emission Theory[M]. Delham, MA: Artech House, 1982.
- [3] 金亚秋, 刘鹏, 叶红霞. 随机粗糙面与目标复合散射数值模拟理论与方法[M]. 北京: 科学出版社, 2008. JIN Ya-qiu, LIU Peng, YE Hong-xia. Theory and method of numerical simulation of composite scattering from the object and randomly rough surface[M]. Beijing: Science Press, 2008.
- [4] TSANG L, DING K H. Polarimetric signatures of a layer of random nonspherical discrete scatterers overlying a homogeneous half-space based on first-and second-order vector radiative transfer theory[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1991, 29(2): 242-253.
- [5] ULABY F T, SARABANDI K, MCDONALD K, et al. Michigan microwave canopy scattering model[J]. International Journal of Remote Sensing, 1990, 11(7): 1223-1253.
- [6] TOURE A, THOMSON K P B, EDWARDS G, 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): 41-67.
- [7] JIA Ming-quan, TONG Ling, ZHANG Yuan-zhi, et al. Multitemporal radar backscattering measurement and modeling of rice fields using a multi-frequency(L, S, C and X) scatterometer[J]. International Journal of Remote Sensing, 2014, 35(4): 1253-1271.
- [8] PICARD G, LE T T, MATTIA F. Understanding C-band radar backscatter from wheat canopy using a multiple-scattering coherent model[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2003, 41(7): 1583-1591.
- [9] 贾明权, 童玲, 陈彦. 水稻后向散射的模拟, 验证及参数敏感性分析[J]. 电子科技大学学报, 2013, 42(6): 895-899. JIA Ming-quan, TONG Ling, CHEN Yan. Rice backscattering simulation, verification and parameter sensitivity analysis[J]. Journal of University of Electronic Science and Technology of China, 2013, 42(6): 895-899.
- [10] HE Lei, TONG Ling, CHEN Yan, et al. Adaptation of MIMICS model of wheat at multi-band (L,S,C,X)[C]// International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Milan, Italy: IEEE, 2015.
- [11] CHEN K S, WU T D, TSANG L, et al. Emission of rough surfaces calculated by the integral equation method with comparison to three-dimensional moment method simulations[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2003, 41: 90-101.
- [12] 金亚秋. 空间微波遥感数据验证理论与方法[M]. 北京: 科学技术出版社, 2005. JIN Ya-qiu. Theory and method for data validation of space-borne microwave remote sensing[M]. Beijing: Science Prwess, 2005.

编辑 漆蓉