

冬小麦覆被农田地表多层非均质混合电磁散射模型研究

曹培¹ 王道伟¹ 林明壮¹ 李凭阳¹ 韩文霆^{1,2}

(1. 西北农林科技大学机械与电子工程学院, 陕西杨凌 712100;

2. 西北农林科技大学中国旱区节水农业研究院, 陕西杨凌 712100)

摘要: 冬小麦种植区域分布广泛,为监测与评估其生长信息和生长环境,本文通过引入三相混合介质模型表征植被层,引入高斯随机粗糙面表征农田粗糙地表,构建了一种冬小麦覆被农田地表的多层非均质混合电磁散射模型。首先分别对比本文提出的多层非均质混合模型与水云模型、Oh模型在冬小麦拔节期及孕穗期的后向散射系数预测结果,对本模型的有效性进行分析和验证;随后,通过分析该模型等效介电常数,并求解其电磁散射及辐射传输方程,获取植被生长信息、植被含水率及土壤粗糙度等因素对覆被农田地表等效介电常数和雷达后向散射系数的影响规律。结果表明,本文提出的多层非均质混合模型与水云模型及 Oh 模型预测结果有较好的一致性,同时与双弥散模型获得的小麦层等效介电常数 R^2 分别为 0.981 7、0.992 2、0.986 3、0.971 1,同样具有较好的一致性;此外,本文提出的模型对拔节期、孕穗期小麦含水率的预测结果与实际测量值的均方根误差分别为 0.88%、4.65%,该模型能够较好地模拟覆被农田地表电磁散射特征,为后续无人机微波反演冬小麦生长及土壤水分信息提供坚实理论基础。

关键词: 冬小麦; 覆被农田; 地表电磁散射; 混合介质模型; 高斯随机粗糙面; 等效介电常数

中图分类号: TP7 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2023)11-0169-11

OSID:



Electromagnetic Scattering Model of Farmland Surface Covered with Winter Wheat

CAO Pei¹ WANG Daowei¹ LIN Mingzhuang¹ LI Pingyang¹ HAN Wenting^{1,2}

(1. College of Mechanical and Electronic Engineering, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China

2. Institute of Water-saving Agriculture in Arid Areas of China, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: In order to monitor and evaluate the growth information and environment of winter wheat, a multilayer non-homogeneous hybrid electromagnetic scattering model was constructed for winter wheat overlaying farmland surface by introducing a three-phase mixed-media model to characterize the vegetation layer and a Gaussian random roughness surface to characterize the rough surface of the farmland. Firstly, the validity of the model was analyzed and verified by comparing the backward scattering coefficient prediction results of the proposed multilayer non-homogeneous hybrid model with those of the water cloud model and the Oh model in the nodulation and tasseling stages of winter wheat. Subsequently, the model equivalent dielectric constant was analyzed and the electromagnetic scattering and radiative transfer equations were solved to obtain the effects of the vegetation growth information, the water content of vegetation and the soil roughness on the surface of the covered farmland. The effect of factors such as vegetation growth information, vegetation water content and soil roughness on the surface equivalent dielectric constant and radar backscattering coefficient of the covered farmland was obtained. The results showed that the multilayer non-homogeneous hybrid model proposed was in good agreement with the prediction results of the water cloud model and the Oh model, and in good agreement with the equivalent dielectric constant R^2 of the wheat layer obtained by the double dispersion model with the values of 0.981 7, 0.992 2, 0.986 3, 0.971 1, respectively. Moreover, the R^2 of the model proposed for the prediction results of the water content of the wheat at the stage of pulling out and the stage of spiking were the same as the actual measurement values, and the R^2 of the predicted results were the same as the

收稿日期: 2023-05-04 修回日期: 2023-08-29

基金项目: 国家自然科学基金项目(32301698)、陕西省重点研发计划项目(2023-YBNY-221)和国家重点研发计划项目(2022YFD1900802)

作者简介: 曹培(1989—),女,讲师,博士,主要从事农情信息获取研究,E-mail: caopei2020@nwfau.edu.cn

predicted results of the model. The RSME of the prediction results and the actual measured values were 0.88% and 4.65%, respectively, and the model can better simulate the electromagnetic scattering characteristics of the surface of the overlying farmland, which provided a solid theoretical basis for the subsequent UAV microwave inversion of winter wheat growth and soil moisture information.

Key words: winter wheat; covered farmland; surface electromagnetic scattering; mixed-medium model; Gaussian random rough surface; equivalent dielectric constant

0 引言

冬小麦作为我国重要的主粮作物,种植区域分布全国各省(市、自治区),对其生长信息和生长环境的监测与评估在保障我国粮食安全方面具有决定性意义^[1-2]。无人机遥感凭借运载便利、灵活性高、作业周期短、数据分辨率高等优势为作物生长及环境信息的大面积、高精度监测提供了有效手段^[3-5]。尤其是机载微波雷达,其后向散射系数对低矮植被尺寸具有敏感性^[6],并具备一定穿透性,能够直接获取携带土壤信息的回波信号,为冬小麦生长及环境信息监测提供新思路。为充分利用无人机及微波雷达在覆被农田土壤水分监测方面的优势,作者所在研究团队开发了基于无人机微波雷达的系列产品及其成像算法^[7-8],为微波雷达在近地条件下获取农田信息奠定坚实基础。但无人机微波遥感数据的时空分辨率、雷达参数、各散射组分与雷达波长的相干性特征等因素都与卫星遥感有较大差异^[9-10],覆被农田非均质特性对电磁散射的影响尤为显著。特别是对于不同地域、不同品种、不同生育期的冬小麦而言,其种植区域土壤含水率等农田地表信息,以及冠层结构、覆盖度、株高、生物量等作物生长信息方面具有显著差异。同时冬小麦作为典型的低矮农作物,对其电磁散射机理的研究可以为棉花、大豆等多种作物的生长及环境信息监测提供重要理论依据^[11-12]。目前一些专家学者已经对作物在不同波段、不同雷达参数下的电磁散射机理和辐射传输模型开展了研究,例如 HE 等^[12]将麦穗作为散射组分进行密歇根微波冠层散射模型(Michigan microwave canopy scattering, MIMICS)改进,以提高冬小麦生长

参数反演精度,MONSIVAIS-HUERTERO 等^[13]构建并评估了一种基于物候的相干散射模型,计算不同生育期玉米在 L 波段的后向散射系数变化规律,从而分析土壤水分、玉米冠层结构以及物候变化对模型的综合影响。但现有研究在如何尽可能模拟作物实际形态的同时降低模型计算复杂程度,如何在作物生长后期叶片相干作用显著时分析各散射组分的构成,如何对不同品种、不同长势的作物进行模型泛化等方面仍待研究。

基于此,本文将植被层看作冬小麦冠层包裹空气组成的多孔材料,又将冬小麦冠层本身看作干物质与水分组成的混合物,从而将覆被农田地表抽象为三相非均质混合介质构成的随机模型。通过引入该模型表征植被层,引入高斯随机粗糙面表征农田地表,构建一种冬小麦覆被农田地表的多层非均质混合电磁散射模型,分析植被层等效介电常数并求解其电磁散射及辐射传输方程,获取植被生长信息、含水率及土壤粗糙度对等效介电常数和雷达后向散射系数的影响规律,以期为无人机微波雷达监测冬小麦生长及环境信息提供理论基础。

1 模型构建

由于发芽期、出叶期及分蘖前期冬小麦覆盖度较低,植被层对雷达后向散射系数影响较小,可以基本等同于裸土情况,因此本文对这几个时期暂不考虑。针对其他不同生育期的冬小麦,构建非均质介质多层混合模型示意图如图 1 所示,图中植被层栅格表征干物质、水和空气的随机分布状态。其中图 1a 表示分蘖后期至孕穗期覆被农田混合模型,其中 h_1 为微波穿透土壤层厚度, h_2 为冬小麦冠层等效光学厚度;

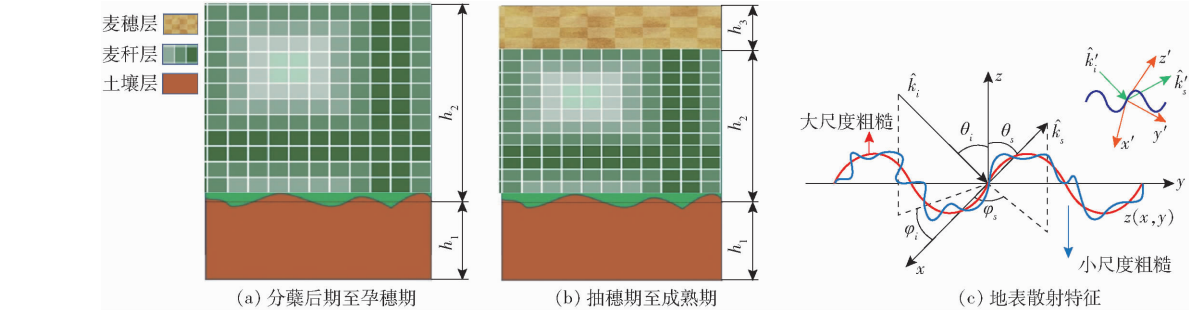


图 1 不同生育期冬小麦多层混合模型示意图

Fig. 1 Schematics of multi-layer mixed model of winter wheat at different growth stages

图 1b 表示抽穗期至成熟期覆被农田混合模型,由于此时麦穗开始成长,而麦穗与麦秆存在较大差异,令其单独作为一层,用 h_3 表示麦穗部分等效光学厚度;图 1c 表示覆被农田散射模型中的地表散射特征。

1.1 植被层三相混合介质模型构建

植被层可看作冬小麦冠层包裹空气组成的多孔材料,由于植被层含水率对雷达回波反演土壤水分有较大干扰,因此将冬小麦冠层本身看作干物质与水分组成的混合物。这种由干物质、水分以及空气共同组成的三相非均质混合介质,各组分体积占比不均、颗粒粒径不等、分布形态各异、介电常数不同,对应小麦不同生育期,上述差异更加显著。这种介质参数随机、非均质分布的状态导致其电磁传输特性的直接求解极为困难^[14-15],因此,要分析植被层的电磁传输特性,必须求解该非均质混合介质模型的等效介电常数,用等效介电常数反映微观结构的综合效应和宏观表征。本文在随机分布模型的基础上,建立三相复合材料等效介电常数模型,采用有限元法,使用基于体积加权平均的方法计算植物三相混合模型的介电常数^[15-16]。

对于构成复合材料的三相电介质,总电磁响应等于各个单元对整体体积贡献之和,在复合材料 z 向施加外加电场,可计算得到每个单元上的单元电场强度和单元电通密度,根据体积加权平均原理, z 向的平均电场强度 E_z 和电通密度 D_z 为

$$E_z = \frac{E_{z1}V_1 + E_{z2}V_2 + \cdots + E_{zn}V_n}{V_1 + V_2 + \cdots + V_n} = \frac{\sum_{i=1}^n E_{zi}V_i}{V} \quad (1)$$

$$D_z = \frac{D_{z1}V_1 + D_{z2}V_2 + \cdots + D_{zn}V_n}{V_1 + V_2 + \cdots + V_n} = \frac{\sum_{i=1}^n D_{zi}V_i}{V} \quad (2)$$

式中 E_{zi} ——第 i 个单元电场强度

D_{zi} ——第 i 个单元电通密度

V_i ——第 i 个单元体积

根据电介质电场强度与电通密度的关系得

$$\varepsilon_{rz} = \frac{1}{\varepsilon_0} \frac{D_z}{E_z} = \frac{1}{\varepsilon_0} \frac{\sum_{i=1}^n D_{zi}V_i}{\sum_{i=1}^n E_{zi}V_i} \quad (3)$$

式中 ε_{rz} ——植物三相混合模型 z 向等效相对介电常数

ε_0 ——真空介电常数

由 z 向平均电场强度和电通密度即可求得植物三相混合模型 z 向的等效相对介电常数 ε_{rz} 。同理可求出 x 向和 y 向的等效相对介电常数 ε_{rx} 和 ε_{ry} 。

本文建立的三相混合介质模型以随机分布模型为基础,不同色块表示不同成分,每个分散相视为各向同性材料,在外加电场的激励下,分散相的大小、比例、分布不同使得等效电场强度和等效电通密度不同,从而影响总的相对介电常数。图 2 为按不同的分散相比例建立的植物三相混合介质模型,图中 f 表示水分占比, g 表示干物质占比, k 表示空气占比。

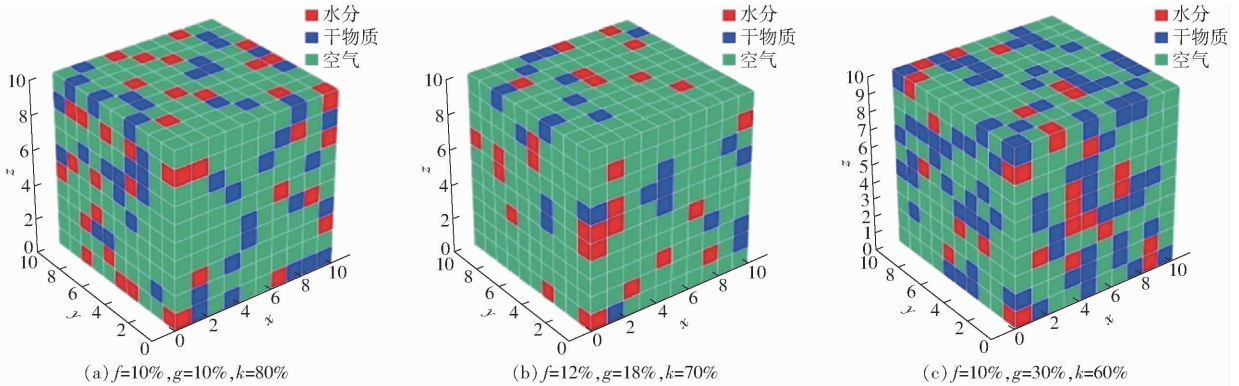


图 2 不同体积分数的植物三相混合材料结构

Fig. 2 Three-phase mixed material structure of plants with different volume fractions

为准确计算该模型等效介电常数,数值计算中将每种比例生成的模型计算 10 次,取其平均值作为最终结果。表 1 为选取不同比例的计算结果。根据计算结果,当水分占比为 12%、干物质占比为 18%、空气占比为 70% 时,结果偏差最大,为 1.68%。可以看出,采用体积加权平均法计算复合材料等效介电常数,结果稳定性较高。

1.2 农田地表二维随机粗糙面模型建立

本文建立的二维随机粗糙面散射如图 3 所示,

采用线性滤波法^[17]构建呈高斯分布的随机粗糙面,分别在 x 、 y 方向上取 M 和 N 个离散点,采样间隔分别是 Δx 和 Δy ,因此任意一点坐标 $x_m = m\Delta x, y_n = n\Delta y$,粗糙面主要指标为相关长度 l 和均方根高度 δ ,则随机粗糙面各处高度分布为

$$h(x_m, y_n) = \frac{1}{L_x L_y} \sum_{m=-\frac{M}{2}}^{\frac{M}{2}} \sum_{n=-\frac{N}{2}}^{\frac{N}{2}} F(p_m, p_n) \cdot \exp(i(p_m x_m + p_n y_n)) \quad (4)$$

表 1 不同随机分布模型计算结果

Tab.1 Settlement results of different random distribution models

实验序号	分散相比例		
	$f=10\%,g=$	$f=12\%,g=$	$f=10\%,g=$
	$10\%,k=80\%$	$18\%,k=70\%$	$30\%,k=60\%$
1	1.357 6	1.775 4	1.894 6
2	1.358 0	1.782 9	1.915 3
3	1.354 1	1.819 9	1.903 6
4	1.338 9	1.822 6	1.937 3
5	1.345 1	1.782 5	1.925 3
6	1.344 7	1.808 9	1.882 6
7	1.345 6	1.780 3	1.932 7
8	1.347 3	1.779 8	1.925 9
9	1.342 9	1.793 9	1.894 5
10	1.342 2	1.827 6	1.918 7
平均值	1.347 6	1.797 3	1.913 1
最大偏差/%	0.77	1.68	1.59

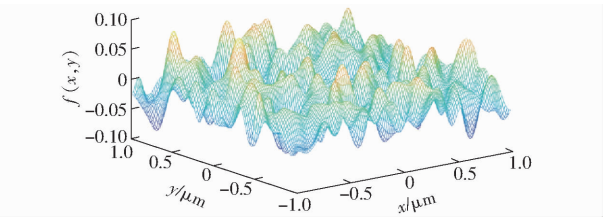


图 3 二维高斯分布随机粗糙面

Fig.3 Two-dimensional Gaussian distribution random rough surfaces

其中 $F(p_m,p_n)=2\pi\sqrt{S(p_m,p_n)L_xL_y}N(0,1)$ (5)

$$S(p_m,p_n)=\delta^2\frac{l_xl_y}{4\pi}\exp\left(-\frac{k_m^2l_x^2+k_n^2l_y^2}{4}\right)$$
 (6)

$$k_m=\frac{2\pi m}{L_x}$$
 (7)

$$k_n=\frac{2\pi n}{L_y}$$
 (8)

$$p_m=\pi m/L_x\quad p_n=\pi n/L_y$$

式中 $L_x、L_y$ ——粗糙面在 $x、y$ 方向长度

$F(p_m,p_n)$ ——傅里叶系数

$N(0,1)$ ——均值为 0、方差为 1 的正态分布函数

l_x ——二维随机粗糙界面在 x 方向的相关长度

l_y ——二维随机粗糙界面在 y 方向的相关长度

$n、m$ ——0~ $N、0\sim M$ 区间内的任意正整数

k_m —— x 方向波数

k_n —— y 方向波数

根据式(4)~(8)可生成 $M=N=128、L_x=L_y=3\mu\text{m}、\delta=0.1\mu\text{m}$ 的随机粗糙面,如图 3 所示。

设入射电磁波为

$$\boldsymbol{E}^i=\boldsymbol{q}_iE_0\mathrm{e}^{\mathrm{i}k_0\boldsymbol{k}_i\cdot\boldsymbol{r}}$$
其中 $k_0=2\pi/\lambda$

式中 $\boldsymbol{q}_i$ ——入射波的垂直极化矢量或水平极化矢量

E_0 ——电场初始值

$\boldsymbol{k}_i$ ——入射波的传播矢量

k_0 ——空气中的波数

λ ——波长

$\boldsymbol{r}$ ——观测点矢量

由惠更斯-菲涅耳原理^[18]可得,介质中散射场可表示为

$$\boldsymbol{E}^s(\boldsymbol{r})=\int_A\mathrm{d}\boldsymbol{\rho}'(\mathrm{i}\omega\mu_0\boldsymbol{G}(\boldsymbol{r},\boldsymbol{r}')[\boldsymbol{n}\times\boldsymbol{H}(\boldsymbol{r}')]+\nabla\times\boldsymbol{G}(\boldsymbol{r},\boldsymbol{r}')[\boldsymbol{n}\times\boldsymbol{E}(\boldsymbol{r}')])$$
 (9)

其中 $\boldsymbol{\rho}=x'\boldsymbol{x}+y'\boldsymbol{y}$

式中 $x'、y'$ ——平面内一点 x 轴和 y 轴坐标

$\boldsymbol{\rho}$ ——目标亮区内任何一点的径向方向矢量

$\boldsymbol{x}、\boldsymbol{y}$ —— x 轴和 y 轴方向向量

μ_0 ——真空磁导率

A ——电磁波照射到目标的面积

ω ——角频率

$\boldsymbol{r}'$ ——源点矢量,是目标上任意一点

$\boldsymbol{G}(\boldsymbol{r},\boldsymbol{r}')$ ——格林函数

$\boldsymbol{H}(\boldsymbol{r}')$ ——源点磁场

$\boldsymbol{E}(\boldsymbol{r}')$ ——源点电场

$\boldsymbol{n}$ —— $\boldsymbol{r}'$ 在空间中的法矢量

当观测点在远区时,格林函数可以表示为

$$\boldsymbol{G}(\boldsymbol{r},\boldsymbol{r}')=(\boldsymbol{I}-k_s\boldsymbol{k}_s)\frac{\exp(\mathrm{i}k_i\boldsymbol{r})}{4\pi\boldsymbol{r}}\exp(-\mathrm{i}k_s\boldsymbol{r}')$$
 (10)

式中 $\boldsymbol{I}$ ——单位并矢

$\boldsymbol{k}_s$ ——电磁波经散射后传播方向的单位矢量

经过一阶切平面物理光学的近似,散射场 $\boldsymbol{E}^s$ 表达式为

$$\boldsymbol{E}^s(\boldsymbol{r})=\frac{\mathrm{i}k_0\mathrm{e}^{\mathrm{i}k_0\boldsymbol{r}}}{4\pi\boldsymbol{r}}E_0(\boldsymbol{I}-\boldsymbol{k}_s\boldsymbol{k}_s)\boldsymbol{F}_q(0,0)I_0$$
 (11)

其中
$$I_0=\int_A\mathrm{e}^{\mathrm{i}k_0(\boldsymbol{k}_i-\boldsymbol{k}_s)\cdot\boldsymbol{r}}\mathrm{d}\boldsymbol{\rho}$$

粗糙面的散射系数是相干散射系数 σ_{cpq}^s 和非相干散射系数 σ_{ipq}^s 之和。高斯面的相干散射系数表达式为^[19]

$$\sigma_{cpq}^s=\frac{k_0^2}{4\pi}|\int_{pq}|^2|I_0|^2=4\pi\cos\theta_i|R_{q0}|^2\mathrm{e}^{-4k_s^2\sigma^2\cos^2\theta_i}\delta\cdot(\cos\theta_i-\cos\theta_s)\delta(\varphi_i-\varphi_s)\delta_{pq}$$
 (12)

$$\langle|I_0|^2\rangle=|\langle I_0\rangle|^2+D_I$$

其中

$$D_l = \pi l^2 \exp(-\sigma^2 k_{dz}^2) \sum_{m=1}^{\infty} \frac{(k_{dz}^2 \sigma^2)^m}{m! m} \exp\left(-\frac{(k_{dx}^2 k_{ds}^2) l^2}{4m}\right) \quad (13)$$

式中 $\langle \cdot \rangle$ ——系统平均计算符

θ_i ——入射角 θ_s ——散射角

φ_i ——入射波在 xoy 面投影与 x 轴夹角

φ_s ——散射波在 xoy 面投影与 x 轴夹角

σ ——雷达散射系数

R_{q0} ——地面的 Fresnel 反射系数^[20], q 取 v, h

非相干散射系数定义为

$$\sigma_{ipq}^s = \frac{k_0^2}{4\pi} |f_{pq}|^2 D_l \quad (14)$$

式(14)中下标 p, q 为 v 或 h , 分别表示散射波和入射波的极化单位方向矢量, 则不同极化方式时 f_{pq} 表达式为

$$f_{vv} = [-(1 + R_{v0}) \cos \theta_s + (1 - R_{v0}) \cos \theta_i] \cos(\varphi_s - \varphi_i) = \mathbf{v}_s \mathbf{F}_v(0, 0) \quad (15)$$

$$f_{hv} = [(1 + R_{v0}) - (1 - R_{v0}) \cos \theta_i \cos \theta_s] \sin(\varphi_s - \varphi_i) = \mathbf{h}_s \mathbf{F}_v(0, 0) \quad (16)$$

$$f_{vh} = [(1 - R_{v0}) \cos \theta_i \cos \theta_s - (1 + R_{v0})] \sin(\varphi_s - \varphi_i) = \mathbf{v}_s \mathbf{F}_h(0, 0) \quad (17)$$

$$f_{hh} = [(1 - R_{v0}) \cos \theta_i - (1 - R_{h0}) \cos \theta_s] \cos(\varphi_s - \varphi_i) = \mathbf{h}_s \mathbf{F}_h(0, 0) \quad (18)$$

式中 $\mathbf{h}_s, \mathbf{v}_s$ ——水平方向和垂直方向的单位矢量

1.3 冬小麦覆被农田多层混合模型建立

小麦生长过程中含水率、覆盖度、植被高度等均发生变化^[21]。干物质、水分和空气介电常数不同,

$$\bar{\mathbf{P}}(\mathbf{r}, \hat{\mathbf{s}}, \hat{\mathbf{s}}') = \begin{bmatrix} \langle |F_{vv}|^2 \rangle & \langle |F_{vh}|^2 \rangle & \text{Re} \langle F_{vv} F_{vh}^* \rangle & -\text{Im} \langle F_{vv} F_{vh}^* \rangle \\ \langle |F_{hv}|^2 \rangle & \langle |F_{hh}|^2 \rangle & \text{Re} \langle F_{hv} F_{hh}^* \rangle & -\text{Im} \langle F_{hv} F_{hh}^* \rangle \\ 2\text{Re} \langle F_{vv} F_{hv}^* \rangle & 2\text{Re} \langle F_{vh} F_{hh}^* \rangle & \text{Re} \langle F_{vv} F_{hh}^* + F_{vh} F_{hv}^* \rangle & -\text{Im} \langle F_{vv} F_{hh}^* - F_{vh} F_{hv}^* \rangle \\ 2\text{Im} \langle F_{vv} F_{hv}^* \rangle & 2\text{Im} \langle F_{vh} F_{hh}^* \rangle & \text{Im} \langle F_{vv} F_{hh}^* + F_{vh} F_{hv}^* \rangle & \text{Re} \langle F_{vv} F_{hh}^* - F_{vh} F_{hv}^* \rangle \end{bmatrix} \quad (20)$$

式中 Re ——实部 Im ——虚部

$*$ ——数的共轭

F_{pq} ——散射粒子的前向散射矩阵的元素, p, q 为 v, h

消光矩阵表示辐射强度的衰减和吸收, 由光学定理可得消光矩阵表示为

$$\bar{\mathbf{K}}_e(\theta_i, \varphi_i) = \frac{2\pi}{k_0} n_0 \cdot$$

$$\begin{bmatrix} 2\text{Im} \langle F_{vv} \rangle & 0 & \text{Im} \langle F_{vh} \rangle & -\text{Re} \langle F_{vh} \rangle \\ 0 & 2\text{Im} \langle F_{hh} \rangle & \text{Im} \langle F_{hv} \rangle & \text{Re} \langle F_{hv} \rangle \\ 2\text{Im} \langle F_{hv} \rangle & 2\text{Im} \langle F_{vh} \rangle & \text{Im} \langle F_{vv} + F_{hh} \rangle & \text{Re} \langle F_{vv} - F_{hh} \rangle \\ 2\text{Re} \langle F_{hv} \rangle & 2\text{Im} \langle F_{vh} \rangle & \text{Re} \langle F_{hh} - F_{vv} \rangle & \text{Im} \langle F_{vv} + F_{hh} \rangle \end{bmatrix} \quad (21)$$

空间占比不同, 分布形态各异, 使植被层电磁传输特性的求解有较大困难。本文建立非均质混合电磁散射模型, 将抽穗期以前的小麦层以三相混合介质模型模拟, 求解出小麦层等效介电常数, 小麦层下的土壤假设为随机粗糙面, 采用高斯随机粗糙面近似方法^[22]进行散射求解。运用矢量辐射传输方程^[23]的零阶解和一阶迭代解研究粗糙地面多层混合植被的后向散射系数。

对于抽穗期以后的小麦, 因为仅在小麦层的上层出现麦穗, 先计算不含小麦穗的麦层散射系数, 即以麦秆层和土壤层建立双层混合散射模型, 并以此为小麦穗的下垫面, 并计算小麦穗和该下垫面组成的双层混合散射模型。也就是使用两次双层非均质混合电磁散射模型, 得到小麦总的后向散射系数。

1.4 冬小麦覆被农田多层混合模型散射系数

在电磁波散射中, 根据能量守恒定律, 辐射强度 I 满足方程

$$\frac{dI(\mathbf{r}, \hat{\mathbf{s}})}{ds} = -\bar{\mathbf{K}}_e I(\mathbf{r}, \hat{\mathbf{s}}) + \int_{4\pi} d\Omega' \bar{\mathbf{P}}(\mathbf{r}, \hat{\mathbf{s}}, \hat{\mathbf{s}}') I(\mathbf{r}, \hat{\mathbf{s}}') \quad (19)$$

式(19)包含电磁波在介质中发生的散射、接收以及介质物质的吸收。等号右边第 1 项表示辐射强度在传播过程中单位体积内强度的衰减, $\bar{\mathbf{K}}_e$ 称为消光矩阵^[24], 可由光学定理求解。第 2 项表示各个方向的多次散射的综合影响, $\bar{\mathbf{P}}(\mathbf{r}, \hat{\mathbf{s}}, \hat{\mathbf{s}}')$ 为相矩阵, 可以通过 Stokes 矩阵在单位体积内求平均值得到。

Stokes 矩阵用散射振幅矩阵^[25-26]表示为

$$\begin{bmatrix} \text{Re} \langle F_{vv} F_{vh}^* \rangle & -\text{Im} \langle F_{vv} F_{vh}^* \rangle \\ \text{Re} \langle F_{hv} F_{hh}^* \rangle & -\text{Im} \langle F_{hv} F_{hh}^* \rangle \\ \text{Re} \langle F_{vv} F_{hh}^* + F_{vh} F_{hv}^* \rangle & -\text{Im} \langle F_{vv} F_{hh}^* - F_{vh} F_{hv}^* \rangle \\ \text{Im} \langle F_{vv} F_{hh}^* + F_{vh} F_{hv}^* \rangle & \text{Re} \langle F_{vv} F_{hh}^* - F_{vh} F_{hv}^* \rangle \end{bmatrix} \quad (20)$$

式中 n_0 ——介质折射率

相矩阵表示其他方向散射能量转移的散射方向使其增强的部分, 地表粗糙面相矩阵表示为

$$\bar{\mathbf{G}}(\mathbf{k}_s, \mathbf{k}_i) = \begin{bmatrix} \langle |S_{vv}|^2 \rangle & \langle |S_{vh}|^2 \rangle & \text{Re} \langle S_{vv} S_{vh}^* \rangle & -\text{Im} \langle S_{vv} S_{vh}^* \rangle \\ \langle |S_{hv}|^2 \rangle & \langle |S_{hh}|^2 \rangle & \text{Re} \langle S_{hv} S_{hh}^* \rangle & -\text{Im} \langle S_{hv} S_{hh}^* \rangle \\ 2\text{Re} \langle S_{vv} S_{hv}^* \rangle & 2\text{Re} \langle S_{vh} S_{hh}^* \rangle & \text{Re} \langle S_{vv} S_{hh}^* + S_{vh} S_{hv}^* \rangle & -\text{Im} \langle S_{vv} S_{hh}^* - S_{vh} S_{hv}^* \rangle \\ 2\text{Im} \langle S_{vv} S_{hv}^* \rangle & 2\text{Im} \langle S_{vh} S_{hh}^* \rangle & \text{Im} \langle S_{vv} S_{hh}^* + S_{vh} S_{hv}^* \rangle & \text{Re} \langle S_{vv} S_{hh}^* - S_{vh} S_{hv}^* \rangle \end{bmatrix} \quad (22)$$

$$S_{pq} S_{mn}^* = \frac{A k_0}{16\pi^2 \langle |I_0|^2 \rangle} f_{pq} f_{mn}^*$$

式中 f_{pq}, f_{mn} ——地面的散射振幅, p, q 为 h 或 v ; m, n 为 h 或 v

获得地面散射特征以后,求解消光矩阵和相矩阵,代入边界条件,即可计算出辐射传输方程的解,进而可获得散射系数。

电磁波在分层介质边界上发生反射和折射现象,如图 4 所示,满足一定边界条件,用 $I(\theta, \varphi, z)$ 和 $I(\pi - \theta, \varphi, z)$ 表示电磁波经边界散射后向上和向下传播的辐射强度,则矢量传输方程表示为

$$\begin{aligned} \cos\theta \frac{dI(\theta, \varphi, z)}{dz} &= -\overline{\overline{K}}_e(\theta)I(\theta, \varphi, z) + \\ S(\theta, \varphi, z) \cos\theta \frac{dI(\theta, \varphi, z)}{dz} &= \\ -\overline{\overline{K}}_e(\pi - \theta)I(\pi - \theta, \varphi, z) + S(\pi - \theta, \varphi, z) \end{aligned} \quad (23)$$

式中 θ ——散射角
 φ ——散射波在 xoy 面投影与 x 轴夹角
 z —— z 轴的坐标
 $S(\theta, \varphi, z)$ 和 $S(\pi - \theta, \varphi, z)$ 表示源函数,表达式为

$$\begin{aligned} S(\theta, \varphi, z) = & \int_0^{2\pi} d\varphi' \int_0^{2\pi} \sin\theta' d\theta' [\overline{\overline{P}}(\theta, \varphi, \theta', \varphi')I(\theta, \varphi, z) + \\ & \overline{\overline{P}}(\pi - \theta, \varphi, \theta', \varphi')I(\pi - \theta, \varphi, z)] \end{aligned} \quad (24)$$

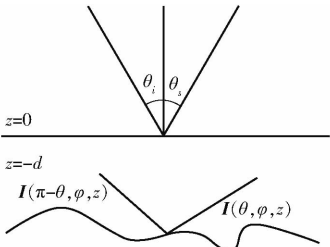


图 4 辐射强度传播示意图

Fig. 4 Schematic of radiation intensity propagation

将方程表示为积分方程形式

$$\begin{aligned} I(\theta, \varphi, z) &= I^0(\theta, \varphi, z) + \sum_{n=1}^{\infty} I^n(\theta, \varphi, z) = \\ \exp(-\overline{\overline{K}}_e(\theta)(z+d)\sec\theta)I(\theta, \varphi, -d) + & \\ \sum_{n=1}^{\infty} \int_{-d}^z dz' \exp(-\overline{\overline{K}}_e(\theta)(z-z')\sec\theta)S^n(\theta, \varphi, z) \sec\theta \end{aligned} \quad (25)$$

式中 d ——植被层高度

I^n 为 VRT 方程的 n 阶散射解,源函数表达式为

$$\begin{aligned} S^n(\theta, \varphi, z') = & \int_0^{2\pi} d\varphi' \int_0^{2\pi} \sin\theta' d\theta' [\overline{\overline{P}}(\theta, \varphi, \theta', \varphi')I^{n-1}(\theta', \varphi', z) + \\ & \overline{\overline{P}}(\theta, \varphi, \pi - \theta', \varphi')I^{n-1}(\pi - \theta', \varphi', z)] \end{aligned} \quad (26)$$

当源项为零,方程的零阶解为

$$I^0(\theta, \varphi, z) = \exp(-\overline{\overline{K}}_e(\theta)(z+d)\sec\theta)I^0(\theta, \varphi, -d) \quad (27)$$

$$I^0(\pi - \theta, \varphi, z) = \exp(\overline{\overline{K}}_e(\pi - \theta)z\sec\theta)I^0(\pi - \theta, \varphi, 0) \quad (28)$$

其中 $I(\pi - \theta, \varphi, 0)$ 和 $I(\theta, \varphi, -d)$ 可由边界条件得到。

$$\begin{aligned} \text{设入射电磁波辐射强度为 } I_0^i, \text{ 满足边界条件} \\ I(\pi - \theta, \varphi, 0) = I_0^i \delta(\cos\theta - \cos\theta_i) \delta(\varphi - \varphi_i) \end{aligned} \quad (29)$$

$$\begin{aligned} I(\theta, \varphi, -d) = & \int_0^{\frac{\pi}{2}} d\theta' \sin\theta' \int_0^{2\pi} d\varphi' \overline{\overline{G}}(\theta, \varphi, \theta', \varphi') \cdot \\ & I(\pi - \theta', \varphi', -d) \end{aligned} \quad (30)$$

代入边界条件可得零阶散射解为

$$\begin{aligned} I^0(\pi - \theta, \varphi, -d) = & \exp(-\overline{\overline{K}}_e(\theta)d\sec\theta)I_0^i \delta(\cos\theta - \cos\theta_i) \delta(\varphi - \varphi_i) \end{aligned} \quad (31)$$

$$\begin{aligned} I^0(\theta, \varphi, z) = \exp(-\overline{\overline{K}}_e(\theta)(z+d)\sec\theta) \cdot \\ \exp(-\overline{\overline{K}}_e(\theta_i)d\sec\theta_i) \cdot \\ \overline{\overline{G}}(\theta, \varphi, \pi - \theta_i, \pi - \varphi_i)I_0^i \end{aligned} \quad (32)$$

则空气中零阶散射强度为

$$\begin{aligned} I^0(\theta_s, \varphi_s, 0) = \exp(-\overline{\overline{K}}_e(\theta_s)d\sec\theta_s + \\ \overline{\overline{K}}_e(\theta_i)d\sec\theta_i) \overline{\overline{G}}(\theta_s, \varphi_s, \pi - \theta_i, \varphi_i)I_0^i \end{aligned} \quad (33)$$

由地面双站散射系数和 VRT 方程的零阶解可得地面后向散射系数为

$$\sigma_{pq}^g(k_s, k_i) = L_p(\theta_s) \sigma_{pq}^s(\theta_s, \varphi_s, \theta_i, \varphi_i) L_q(\theta_i) \quad (34)$$

其中 $L_q(\theta_i) = \exp(\overline{\overline{K}}_e(\theta_i)d\sec\theta_i)$
 $\sigma_{pq}^s = |S_{pq}|^2$ 为地面的双站散射系数, $L_q(\theta_i)$ 为 q 极化波在入射方向穿过等效模型时的衰减因子。

植被层散射系数为

$$\begin{aligned} \sigma_{pq}^c(k_s, k_i) = 4\pi P_{pq}(\theta_s, \varphi_s; \pi - \theta_i, \varphi_i) \cdot \\ \frac{1 - L_p(\theta_s)L_q(\theta_i)}{\overline{\overline{K}}_e(\theta_s)\sec\theta_s + \overline{\overline{K}}_e(\theta_i)\sec\theta_i} \end{aligned} \quad (36)$$

植被层与地面层的相互作用散射系数为

$$\sigma_{pq}^{gc} = d\sec\theta_i \overline{\overline{P}}(\theta_i, \pi + \varphi_i; \theta_i, \varphi_i) \sigma_{cpq}^s L_p^2(\theta_i) \quad (37)$$

式中 σ_{cpq}^s ——地面层相干散射系数
则通过矢量辐射传输方程求解的多层混合植被散射模型的总散射系数为

$$\sigma_{pq} = \sigma_{pq}^c + 2\sigma_{pq}^{gc} + \sigma_{pq}^g \quad (38)$$

2 实验与数据

2.1 实验

2023 年 3 月在陕西省杨凌区西北农林科技大学中国旱区节水农业研究院实验地 (34°17'48"N, 108°04'06"E) 开展实验。该地区属于大陆性季风型半湿润气候, 年平均气温 12.9℃, 年均降水量

635.1 mm,平均日照时数 2 163.8 h,无霜期 211 d。分别选择拔节前期及孕穗期小麦进行地面数据采集,采样区如图 5 所示,小麦行距 20 cm。采样区 1 面积为 23 m×27 m,选取 6 个样点,每个样点为 2 m×2 m,样点间距为 7 m;采样区 2 面积为 9.6 m×5.8 m,选取 3 个样点,每个样点为 1 m×1 m,样点间距 2 m;采样区 3 面积为 9.4 m×5.5 m,选取 3 个样点,每个样点为 1 m×1 m,间距 2 m。

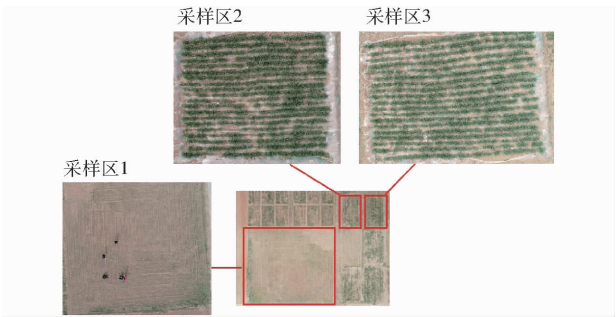


图 5 拔节期小麦采样区域遥感图像

Fig. 5 Remote sensing image of wheat sampling area during jointing stage

主要测取小麦的几何尺寸参数、麦层高度、粒子浓度和土壤粗糙度。其中,几何参数测量使用游标卡尺和卷尺,多株取样、多次测量取平均值;麦层高度取 4 个边角高度和中间位置高度的平均值;粒子浓度的测量是通过测取单位面积内的墩株数、每墩的小麦株数、每株小麦上的小麦叶数等一系列参数换算而得,通过多次测量求取平均值。土壤粗糙度测量使用针式粗糙度测量板获取,为使均方根高度和相关长度的值稳定,多次测量取平均值,并设置采样长度为 10 m。图中,编号 1、2、3 的 3 块农田处于同一生育期,且采样时间相同,但采样区域为冬小麦节水灌溉对照实验区,返青期灌溉量存在差异,从而导致 3 块农田小麦生长状态存在差异。

将采集的小麦样本测量几何尺寸参数后按照采样点分装进信封袋,做好标记,用电子天平测量质量记录数据。将信封袋放入干燥箱中 105℃ 恒温 0.5 h 杀青,然后 75℃ 干燥 6~7 h 取出测质量,记录数据并继续 75℃ 干燥,每 0.5 h 取出测量质量直至达到恒质量,记录数据。图 6 为实验测量过程中部分测量环节。

2.2 数据

测量的小麦参数主要包括拔节期和孕穗期麦秆高度、直径、秆密度以及麦秆质量含水率;叶片参数主要包括长度、宽度、厚度和叶片质量含水率;地表参数主要测得土壤相关长度、均方根高度、体积含水率,具体实验数据如表 2 所示。表中秆密度指的是小麦层中垂直方向上单位面积内小麦秆数量,单位:



图 6 拔节期小麦参数测量

Fig. 6 Measurement of wheat parameters at jointing stage

个/m²,含义为单位面积内小麦秆的个数;叶密度是指单位面积内小麦叶片数量,单位:个/m²,含义为单位面积内小麦叶个数。

表 2 小麦实验参数

Tab. 2 Wheat experimental parameters

参数	拔节期	孕穗期
秆含水率/%	78.1	89.7
秆长/m	0.03	0.455
秆直径/m	0.003	0.004 6
秆密度/(个·m ⁻²)	169	298
叶含水率/%	65	88.3
叶长/m	0.09	0.229
叶宽/m	0.004	0.017 5
叶厚/m	0.000 2	0.000 3
叶密度/(个·m ⁻²)	508	1 490
土壤含水率/%	14	27.4
土壤均方根高度/m	0.038	0.022
土壤相关长度/m	0.436	0.352
植被高度/m	0.21	0.521

3 结果与分析

3.1 模型验证

为验证本文模型准确性,选取经典的水云模型和 Oh 模型^[27-28]进行对比分析。

3.1.1 水云模型

水云模型是最经典的基于遥感数据反演土壤水分方法之一,具有快速、非破坏性、无需大量野外调查等优点。水云模型建立的基础是假设植被层是水平均匀的云层,并且仅考虑单散射,忽略植被层与地表面间的多次散射。水云模型中仅考虑的变量是植被含水率、土壤含水率和入射角,其表达式为

σ_{pq} = σ^c_{pq} + T²σ^g_{pq} (39)

其中 σ^c_{pq} = A₁M_v(1 - T²)cosθ_i (40)

T² = exp(- 2B₁M_ssecθ_i) (41)

式中 M_v——植被含水率
T²——雷达波穿过植被的双层衰减因子

A_1, B_1 ——取决于植被类型的参数^[27],分别取 0.001 8 和 0.138 0

3.1.2 Oh 模型

Oh 模型是另一种经典的遥感反演土壤水分模型,利用不同粗糙度和土壤水分的微波散射数据,基于后向散射系数 σ_{vh}^0 、同极化比 p 、交叉极化比 q 、均方根高度 s 、土壤介电常数 ε 等参数建立的经验模型,该模型的适用条件为: $0.04\text{ cm}^3/\text{cm}^3 \leq m_v \leq 0.291\text{ cm}^3/\text{cm}^3, 0.13 \leq k_1 \leq 6.98, -10^\circ \leq \theta \leq 70^\circ$ 。

Oh 模型经验公式为

$$\sigma_{vh}^0 = 0.11 m_v^{0.7} (\cos \theta)^{2.2} (1 - \exp(-0.32 (k_1 \delta)^{1.8}))$$

(42)

$$p = \frac{\sigma_{hh}}{\sigma_{vv}} = 1 - \frac{2\theta}{\pi} \exp(0.35 m_v^{-0.65}) \exp(-(0.4 (k_1 \delta)^{1.4}))$$

(43)

$$q = \frac{\sigma_{vh}}{\sigma_{vv}} = 0.095 (0.13 + \sin(1.5\theta))^{1.4} (1 - \exp(-1.3 (k_1 \delta)^{0.9}))$$

(44)

式中 m_v ——土壤体积含水率, cm^3/cm^3
 k_1 ——自由空间波数, cm^{-1}

3.1.3 随机模型验证

文献[25-28]研究结果表明,Oh 模型多用于裸土繁衍,水云模型多用于植被覆盖地表反演。本研究中拔节期小麦植被覆盖度较低,因此选用拔节期小麦和 Oh 模型对比,选取孕穗期小麦和水云模型对比。

以土壤含水率为自变量,水云模型、Oh 模型和随机模型得出的后向散射系数为因变量,所得对比结果如图 7 所示。

从图 7 中可以看出,随机模型与 Oh 模型及水云模型具有较好的一致性,其后向散射系数与 Oh 模型后向散射系数相近,最大相差 1.167 dB;与水云模型后向散射系数最大相差 3.037 dB。

以不同土壤含水率条件下水云模型、Oh 模型的后向散射系数为自变量,以孕穗期和拔节期冬小麦对应的土壤含水率下随机模型对后向散射系数的预测值作为因变量,对比 3 种不同模型对土壤含水率的预测结果,如图 8 所示。

从图 8 中可以看出,随机模型在小麦拔节期所得后向散射系数预测结果与 Oh 模型预测结果的 R^2 为 0.972 1, RMSE 为 0.656 1 dB,孕穗期所得后向散射系数预测结果与水云模型预测值的 R^2 为 0.803 6, RMSE 为 1.433 1 dB。拔节期小麦与 Oh 模型相关性较高,预测效果较好。孕穗期小麦与水云模型的相关度略低。

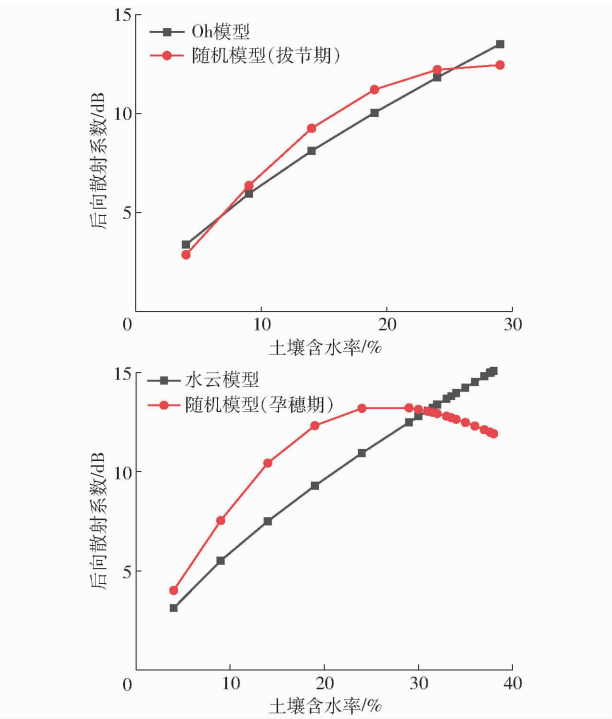


图 7 随机模型正确性验证结果
Fig. 7 Random model validation results

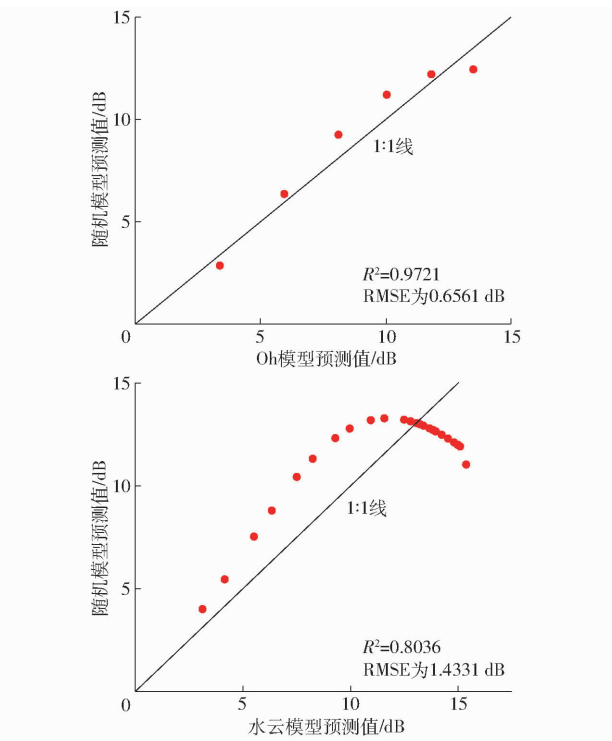


图 8 模型准确性验证
Fig. 8 Model accuracy validation

分析误差原因主要在于,水云模型假定植被层是一个均匀的散射体,将农作物的反射分为体散射和衰减后的表面散射,随机模型求出小麦层等效介电常数后将小麦层看作均匀介质,均匀介质的性质在空间中是均匀分布的,没有明显的不均匀性或障碍物,波通常以直线传播而不会发生体散射,因此随机模型忽略了体散射,与水云模型的相关性有所下降。拔节期小

麦覆盖度较低,植被层对后向散射系数影响较小,因此随机模型和 Oh 模型相关性较高。

在土壤水分偏大时随机模型后向散射系数下降。土壤水分偏大会导致土壤中的水分分布更加均匀,在雷达信号穿过土壤时会发生多次散射,导致信号的能量分散和衰减。同时,土壤水分偏大会增加土壤的介电常数,从而导致雷达信号在土壤中传播时发生相干衰减,相干衰减会使信号的相位和能量发生变化,进

而使后向散射系数的计算结果降低。

综上所述,本文设计的随机模型与 Oh 模型及水云模型具有较好的一致性,对于植被覆盖度较低和较高水平都有比较好的预测结果。

3.2 冬小麦生长信息对等效介电常数影响规律分析

分别采用本文提出的多层非均质混合模型及双弥散模型,分析不同生育期小麦的生长参数对作物层等效介电常数的影响规律,如图 9 所示。

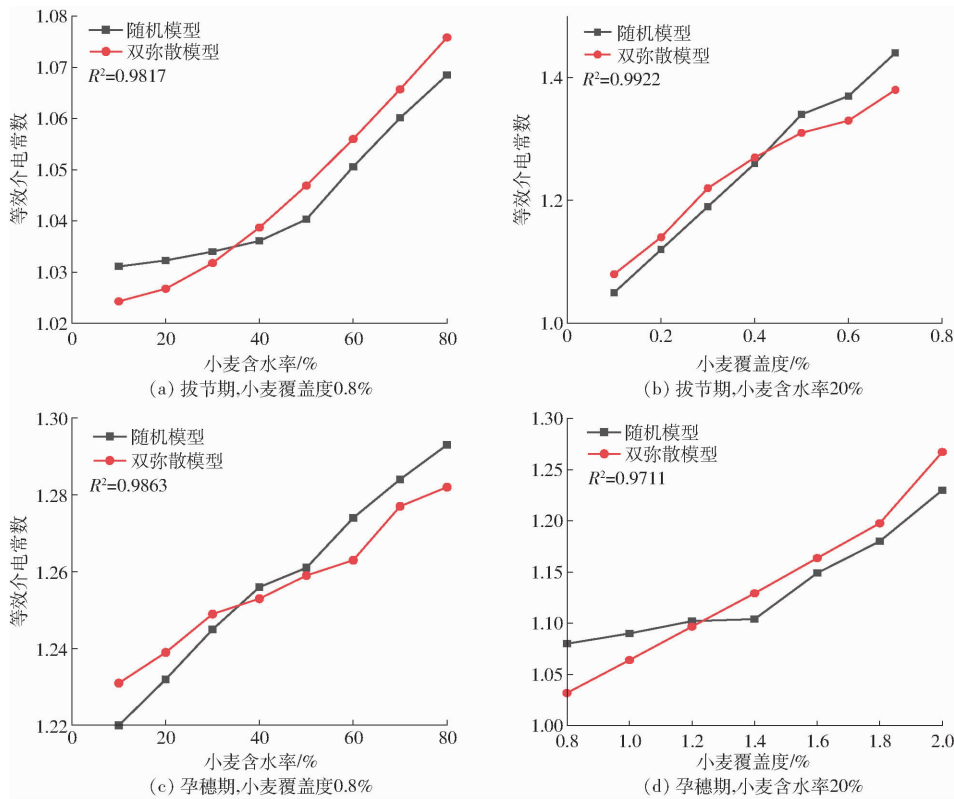


图 9 冬小麦生长信息对等效介电常数影响

Fig. 9 Influence of winter wheat growth information on equivalent dielectric constant of vegetation layer

由图 9 可知,当小麦覆盖度不变时,随着小麦含水率的增加,三相混合介质模型的等效介电常数也增加;随着小麦的生长,干物质积累,小麦的相对含水率不断减小,植物覆盖度增加,三相混合介质模型等效介电常数也增加。当小麦处于拔节期时,在小麦覆盖度为 0.8% 时建立小麦含水率与等效介电常数的关系,同时在水分率为 20% 时建立小麦覆盖度与等效介电常数的关系,并将分析结果与双弥散模型比较,结果表明,随小麦含水率和小麦覆盖度的变化,小麦层等效介电常数与双弥散模型的 R^2 分别为 0.981 7、0.992 2,二者相关性很高。在孕穗期时,同样建立模型求取决定系数 R^2 分别为 0.986 3、0.971 1,二者相关性很高,因此本文设计的随机模型能够较好地描述小麦生长过程中植被层介电常数的变化规律。

3.3 冬小麦生长信息对雷达后向散射系数影响规律回归分析

采用多层非均质混合电磁散射模型分析不同生

育期小麦的生长参数对雷达后向散射系数的影响规律,如图 10 所示。

由图 10 可以看出,随着小麦的生长,干物质积累,小麦质量含水率逐渐降低,垂直极化下的地表后向散射系数逐渐升高;同时,随着小麦的生长,叶片、麦秆体积增大,小麦覆盖度增大,此时,由于麦叶属于窄叶,对后向散射的影响中吸收作用大于散射作用,小麦的后向散射系数逐渐减小。因此当含水率或者小麦覆盖度相同时,孕穗期小麦的雷达后向散射系数小于拔节期,实验测量结果与前人研究结果^[26]一致。

3.4 土壤粗糙度对雷达后向散射系数影响规律回归分析

采用多层非均质混合电磁散射模型,分析不同极化条件下土壤粗糙度对雷达后向散射系数的影响规律,如图 11 所示。

由图 11 可以看出,土壤相关长度越小、均方根

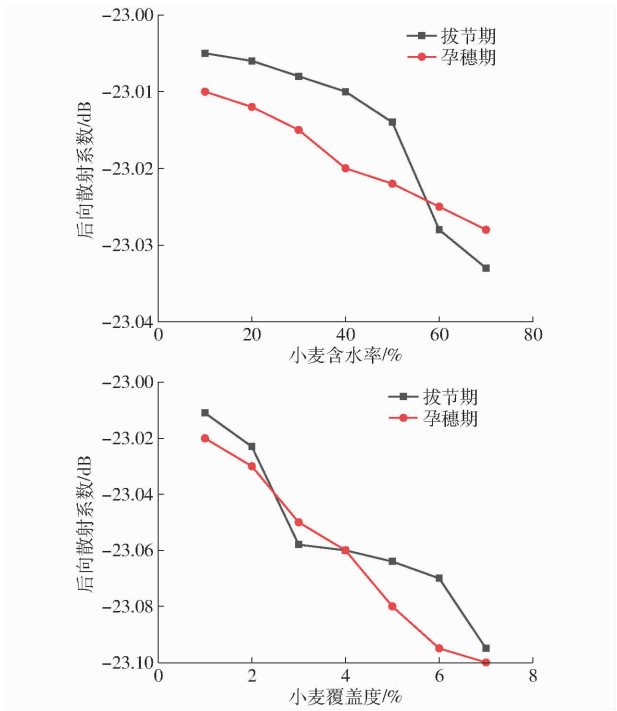


图 10 冬小麦生长信息对雷达后向散射系数影响
Fig. 10 Influence of winter wheat growth information on radar backscatter coefficient

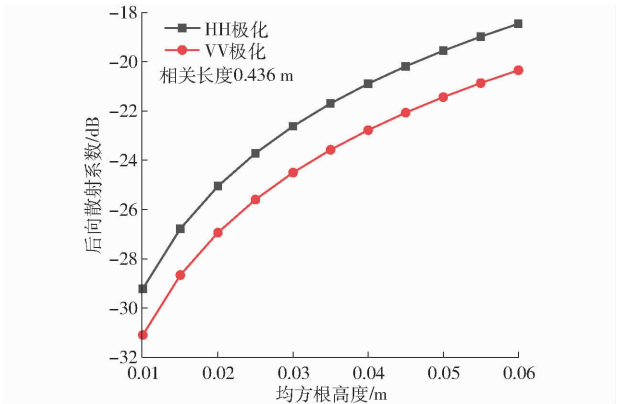


图 11 土壤粗糙度对后向散射系数影响规律
Fig. 11 Influence of soil roughness on backscatter coefficient

高度越大,土壤粗糙程度越高,土壤粗糙面对后向散射能量分布的影响越大。同时,随着土壤粗糙度的增大,雷达后向散射系数不断增大,且 HH 极化下的雷达后向散射系数比 VV 极化下的雷达后向散射系数大,这是由于 HH 极化下的雷达回波对高度变化更敏感导致的。

3.5 植被含水率预测模型建立

根据多层非均质混合电磁散射模型获取的雷达后向散射系数预测小麦含水率,并与不同生育期小麦含水率的实际测量结果相比较,分析模型的预测效果,结果及雷达参数如图 12 所示。

根据模型求得的后向散射系数预测小麦含水率并与实际测量结果相比较,拟合结果如图 12 所示。

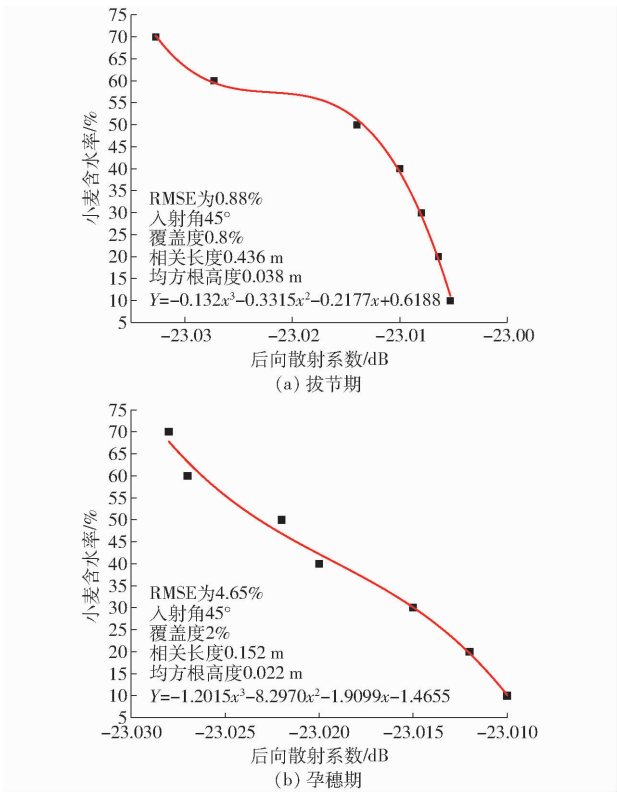


图 12 小麦含水率预测模型
Fig. 12 Prediction model for wheat moisture content

在雷达微波入射角为 45°、土壤相关长度为 0.436 m、均方根高度为 0.038 m、小麦覆盖度为 0.8% 的情况下,求得拔节期小麦含水率预测值与实际测量值的均方根误差 (Root mean square error, RMSE) 为 0.88%。在雷达微波入射角为 45°、土壤相关长度为 0.152 m、均方根高度为 0.022 m、小麦覆盖度为 2% 的情况下,求得孕穗期小麦含水率预测值与实际测量值的 RMSE 为 4.65%。由此可以看出,本文提出的多层非均质混合模型对植被含水率的预测结果与实际测量植被含水率的相关性很高,模型预测效果较好。

4 结束语

以随机模型为基础,利用三相混合介质模型表征植被层,同时引入高斯随机粗糙面表征农田粗糙地表,构建了一种冬小麦覆被农田地表的多层非均质混合电磁散射模型,通过分析植被层等效介电常数,并求解其电磁散射及辐射传输方程,可获得植被生长信息、植被含水率及土壤粗糙度等因素对等效介电常数和雷达后向散射系数等特征的影响规律。对比分析结果说明本文设计的随机模型与 Oh 及水云模型具有较好的一致性,对于植被覆盖度较低和较高水平都有比较好的预测结果。通过数值计算,比较本文设计的多层非均质混合电磁散射模型以及双弥散模型对拔节期、孕穗期小麦等效介电常数的模拟结果,可看出

随拔节期小麦含水率和覆盖度的变化,本文提出的多层非均质混合模型与双弥散模型获得的小麦层等效介电常数模拟结果的决定系数 R^2 分别为 0.981 7、0.992 2,随孕穗期小麦含水率和覆盖度的变化决定系数 R^2 分别为 0.986 3、0.971 1,二者具有较好的一致性。此外,本文提出的模型对拔节期、孕穗期小麦含水率的预测结果与实际测量值的均方根误差 RMSE 分别为 0.88%、4.65%,该模型能够较好地模拟覆被农田地表电磁散射特征,可为后续无人机微波反演冬小麦生长及土壤水分信息提供坚实理论基础。

参 考 文 献

[1] 王鹏新,王婕,田惠仁,等. 基于遥感多参数和门控循环单元网络的冬小麦单产估测[J]. 农业机械学报, 2022,53(9): 207 – 216.
WANG Pengxin, WANG Jie, TIAN Huiren, et al. Yield estimation of winter wheat based on multiple remotely sensed parameters and gated recurrent unit neural network[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(9):207 – 216. (in Chinese)

[2] 黄健熙,赵剑桥,汪雪森,等. 基于遥感和积温的冬小麦生育期提取方法[J]. 农业机械学报, 2019,50(2):169 – 176.
HUANG Jianxi, ZHAO Jianqiao, WANG Xuemiao, et al. Extraction method of growth stages of winter wheat based on accumulated temperature and remote sensing data[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(2):169 – 176. (in Chinese)

[3] 鲁向晖,杨宝城,张海娜,等. 基于无人机多光谱遥感的矮林芳樟叶片精油产量反演[J]. 农业机械学报, 2023,54(4): 191 – 197, 213.
LU Xianghui, YANG Baocheng, ZHANG Haina, et al. Inversion of leaf essential oil yield of *Cinnamomum camphora* based on UAV multi-spectral remote sensing[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(4):191 – 197, 213. (in Chinese)

[4] 陶惠林,冯海宽,杨贵军,等. 基于无人机成像高光谱影像的冬小麦 LAI 估测[J]. 农业机械学报, 2020,51(1):176 – 187.
TAO Huilin, FENG Haikuan, YANG Guijun, et al. Leaf area index estimation of winter wheat based on UAV imaging hyperspectral imagery[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(1):176 – 187. (in Chinese)

[5] YUE J, FENG H, YANG G, et al. A comparison of regression techniques for estimation of above-ground winter wheat biomass using near-surface spectroscopy[J]. Remote Sensing, 2018,10(1):66.

[6] 顾兴健,刘子儒,任守纲,等. 基于注意力机制和边缘感知的田埂提取模型[J]. 农业机械学报, 2023,54(4):1 – 13.
GU Xingjian, LIU Ziru, REN Shougang, et al. Ridge extraction model based on attention mechanism and edge perception[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(4):1 – 13. (in Chinese)

[7] CAO P, WANG D, LI P, et al. Construction and algorithm research of UAV airborne microwave radar imaging system[C]// 2022 2nd International Conference on Electronic Information Technology and Smart Agriculture, 2022.

[8] 郭交,白清源,郭文川. 基于超宽带雷达和多光谱数据融合的土壤含水率检测[J]. 农业机械学报, 2021,52(9): 241 – 249.
GUO Jiao, BAI Qingyuan, GUO Wenchuan. Monitoring method of soil moisture based on ultra-wide band radar and multispectral data[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(9): 241 – 249. (in Chinese)

[9] 何思远,朱凌昆,刘进,等. 雷达目标散射中心正向自动化建模方法研究与实现[J]. 系统工程与电子技术, 2021, 43(10):2706 – 2717.
HE Siyuan, ZHU Lingkun, LIU Jin, et al. Research and implementation of forward automatic modeling method for radar target scattering center[J]. Systems Engineering and Electronics, 2021, 43(10):2706 – 2717. (in Chinese)

[10] 李欣雪,徐殿双,唐东成,等. 小麦电磁散射研究经验模型建立[J]. 移动通信, 2018,42(5):44 – 49, 54.
LI Xinxue, XU Dianshuang, TANG Dongcheng, et al. Establishment of an empirical model for the study of wheat electromagnetic scattering[J]. Mobile Communications, 2018, 42(5):44 – 49, 54. (in Chinese)

[11] 郑晓萌,张德海,赵瑾,等. 固定指向型微波辐射计辐射传输模型分析[J]. 固体电子学研究与进展, 2023,43(1):27 – 33.
ZHENG Xiaomeng, ZHANG Dehai, ZHAO Jin, et al. Radiative transfer model analysis of fixed-beam pointing microwave radiometer[J]. Research & Progress of SSE, 2023, 43(1):27 – 33. (in Chinese)

[12] HE L, TONG L, CHEN Y, et al. Multiple layers backscatter model of wheat for S band[J]. Journal of the University of Electronic Science and Technology of China, 2016, 45(5):785 – 790.

[13] MONSIVAIS-HUERTERO A, LIU P, JUDGE J. Phenology-based backscattering model for corn at L-band[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2018, 56(9):4989 – 5005.

[14] CUN H, WANG Y, FENG Y, et al. Chebyshev collocation spectral method for vector radiative transfer equation and its applications in two-layered media[J]. Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer, 2020, 243:106822.

[15] 曲宝龙,王丽芳. 两相复合材料等效介电常数数值计算[J]. 功能材料, 2016, 47(1):1172 – 1176.
QU Baolong, WANG Lifang. Numerical simulation for effective permittivity of two-phase composites[J]. Journal of Functional Materials, 2016, 47(1):1172 – 1176. (in Chinese)

[16] KANG J, CHEN X, TAO Y, et al. Optimal transportation particle filter for linear filtering systems with correlated noises[J]. Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2022, 58(6):5190 – 5203.

[19] LIU S, QI L, QIN H, et al. Path aggregation network for instance segmentation[C] // Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2018: 8759 – 8768.

[20] WOO S, PARK J, LEE J Y, et al. CBAM:convolutional block attention module[C] // Proceedings of the 2018 European Conference on Computer Vision,2018;3 – 19.

[21] TAN M, PANG R, LE Q V. EfficientDet: scalable and efficient object detection[C] // IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2020:10778 – 10787.

[22] MAO Keyang, KUN Yu, ZHANG Chi, et al. Dense aspp for semantic segmentation in street scenes[C] // Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), 2018: 3684 – 3692.

[23] WANG Fei, JIANG Mengqing, QIAN Chen, et al. Residual attention network for image classification[C] // Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition(CVPR), 2017: 3156 – 3164.

[24] YU Changqian, GAO Changxin, WANG Jingbo, et al. BiSeNet: bilateral segmentation network for real-time semantic segmentation[J]. International Journal of Computer Vision, 2021,129(11): 3051 – 3068.

[25] ZHAO Ting, WU Xiangqian. Pyramid feature attention network for saliency detection [C] // Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition(CVPR),2019: 3085 – 3094.

[26] LIN T Y, GOYAL P, GIRSHICK R. Focal loss for dense object detection[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2020, 42(2): 318 – 327.

(上接第 179 页)

[17] 牟媛,吴振森,赵豪,等. 粗糙金属和介质目标的太赫兹散射特性分析[J]. 雷达学报, 2018,7(1):83 – 90.
MOU Yuan, WU Zhensen, ZHAO Hao, et al. The terahertz scattering analysis of rough metallic and dielectric targets[J]. Journal of Radars,2018,7(1):83 – 90. (in Chinese)

[18] MAREK G, PER M, SPYROS S. Breaking of Huygens-Fresnel principle in inhomogeneous Tomonaga-Luttinger liquids[J]. Journal of Physics A: Mathematical and Theoretical,2022,55(5): 107616.

[19] 陈先冠,冯利平,白慧卿,等. 小麦模型算法集成平台构建与算法比较[J]. 农业机械学报, 2022,53(6):237 – 249.
CHEN Xianguan, FENG Liping, BAI Huiqing, et al. Establishment of wheat model algorithms integration platform and algorithm comparison[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(6): 237 – 249. (in Chinese)

[20] WANG B, WANG W, FAN J, et al. Modeling of bistatic scattering from an underwater non-penetrable target using a Kirchhoff approximation method[J]. Defence Technology,2022,18(7):1097 – 1106.

[21] PHILIPP H, CHRISTIAN B, ANDRE L, et al. Analytical solution for the single scattered radiance of two-layered turbid media in the spatial frequency domain. Part 2: vector radiative transfer equation [J]. Optics Communications, 2023, 535 (3): 129354.

[22] KUSTOVA V, KONOSHONKIN V, TIMOFEEV N, et al. Extinction matrix of atmospheric ice crystals with their preferred spatial orientation for the visible and IR regions[J]. Atmospheric and Oceanic Optics,2019,32(2):117 – 123.

[23] IGNATIOS A, JULES C, ANTHONY G. More on massive gravitino scattering amplitudes and the unitarity cutoff of the new Fayet-Iliopoulos terms[J]. Journal of High Energy Physics,2023,2023(4):4002.

[24] WANG E, CARCIONE J, BA J, et al. Reflection and transmission of plane elastic waves at an interface between two double-porosity media: effect of local fluid flow[J]. Surveys in Geophysics,2020,41(2):283 – 322.

[25] 黄波. 基于矢量辐射传输理论的小麦微波散射特性研究[D]. 成都:电子科技大学, 2014.

[26] 郭交,刘健,宁纪锋,等. 基于 Sentinel 多源数据的农田地表土壤水分反演模型构建与验证[J]. 农业工程学报, 2019, 35(14): 71 – 78.
GUO Jiao, LIU Jian, NING Jifeng, et al. Construction and validation of soil moisture retrieval model in farmland based on Sentinel multi-source data[J]. Transactions of the CSAE, 2019, 35(14): 71 – 78. (in Chinese)

[27] 刘丽标. 含草地粗糙面与目标复合电磁散射研究[D]. 西安:西安电子科技大学,2020.

[28] BINDLISH R, BARROS A P. Parameterization of vegetation backscatter in radar-based, soil moisture estimation[J]. Remote Sensing of Environment,2001,76(1): 130 – 137.