

基于分形结构的植被高阶相干散射模型研究

饶丽婷^{①②} 张晓娟^{*①} 王友成^{①②} 方广有^①

^①(中国科学院电磁辐射与探测技术重点实验室 北京 100190)

^②(中国科学院大学 北京 100049)

摘要: 电磁波低频入射情况下, 植被中散射体独立不相关的假设无效, 此时应考虑散射体之间的相干效应以及近场互作用。该文提出一种基于分形结构的植被高阶相干散射模型, 该模型利用分形理论生成近乎真实植被的3维几何结构, 根据每个散射体的空间位置信息考虑了相干效应, 应用互易定理计算了相邻散射体间高阶互作用, 结合非相干的分层模型中后向散射机制划分方式, 给出了各项散射机制的表达式。与机载合成孔径雷达实验数据对比, 验证了模型的准确性。在针叶林仿真参数下, 分析了各项散射机制对总散射效应的贡献与入射频率、角度、植被结构的关系, 结果表明, 低频入射条件下, 稀疏植被散射模型可进一步简化从而应用于参数反演中。

关键词: 植被; 分形结构; 相干效应; 近场互作用; 后向散射

中图分类号: TP722.6

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2016)10-2502-07

DOI: 10.11999/JEIT160095

High-order Coherent Scattering Model for Vegetation with Fractal Structures

RAO Liting^{①②} ZHANG Xiaojuan^① WANG Youcheng^{①②} FANG Guangyou^①

^①(Key Laboratory of Electromagnetic Radiation and Sensing Technology, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

^②(University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: At low frequency, the assumption of independent scattering of the scatterers in vegetation medium is no longer valid. The coherent effect and near field interactions should be considered. In this paper, a high-order coherent scattering model for vegetation with fractal structure is presented. The fractal theory is employed to generate a realistic 3-D spatial structure of vegetation. The near field interaction between scatterers is formulated using an efficient algorithm based on the reciprocity theorem. For the coherent effect, every scatterer with a deterministic location is taken into account. The main scattering mechanisms are defined in the way of layered vegetation model, allowing better understanding of microwave interaction with trunk-crown structure. Good agreements are obtained from the comparisons of the theoretical predictions with the multifrequency and multipolarization measurement results of boreal forest. Through an extensive ground truth, theoretical analysis of the contribution of the scattering mechanisms for various frequencies, incident angles and vegetation structures is carried out. It is found that under specified conditions the vegetation scattering model can be simplified according to the main contribution scattering mechanism which can be applied to the inversion issue.

Key words: Vegetation; Fractal structures; Coherent effect; Near field interaction; Backscattering

1 引言

地物电磁散射模型是电磁学领域中一个热门课题, 在雷达探测、无线电传播与通信以及农业科学等方面有着广泛的应用^[1-6]。通常情况下, 从微波遥感观测数据中获得地物的特性参数需要首先建立

一个相应的散射模型, 然后应用散射模型反演未知参数^[7-14], 其中, 针对地表植被的散射模型, 主要是以辐射传输理论和修正的 Born 近似方法为基础的离散植被模型^[12-16]。离散植被模型将植被模拟成由随机分布的树干、树枝、树叶、果实等离散散射体组成的介质, 这些离散散射体可由形状规则的几何体比如有限长圆柱、小圆盘、椭球体等来描述^[17]。

早期的植被散射模型, 在建模过程中忽略植被散射体相互作用, 如文献[12]提出的 MIMICS 模型以及在此基础上的改进模型^[13,15]。对于低频入射情

收稿日期: 2016-01-21; 改回日期: 2016-07-01; 网络出版: 2016-09-01

*通信作者: 张晓娟 xjzhang@mail.ie.ac.cn

基金项目: 国家自然科学基金(61172017)

Foundation Item: The National Natural Science Foundation of China (61172017)

况下, 植被间距与波长尺寸相当或者更小, 此时植被属于电稠密植被, 将植被散射体当作是独立不相关的假设不再有效, 需考虑植被散射体之间相干效应以及近场互作用。文献[18]提出了基于矢量辐射传输理论的相位幅度修正模型, 该方法通过天线阵列来考虑散射体之间的相干效应和近场相互作用, 只能修正相同形状和大小的散射体, 对于不同种类散射体之间的相干效应及近场互作用无法考虑。文献[19]和文献[20]相继采用分形树研究植被的相干散射模型, 这些模型中仅考虑了相干效应, 散射机制按照体散射和面散射的角度区分。

因此, 针对电稠密植被, 本文建立了一种植被的高阶相干散射模型, 该模型采用分形结构实现了植被的几何建模。结合非相干的分层模型中散射机制划分方式, 考虑了冠层内散射体直接后向散射、冠层散射体地面一次作用后向散射、树干地面一次作用后向散射、地面直接后向散射等 4 项散射机制, 各项散射机制中根据散射体的几何位置信息准确考虑了相干效应及近场互作用即高阶散射。与合成孔径雷达实测数据对比验证了模型的准确性, 而后根据针叶林仿真参数, 讨论并分析了入射角、频率以及植被结构对各项散射分量的影响。

2 模型原理

2.1 植被几何结构

由于植被的形状复杂并具有随机性, 对其进行精确的几何建模相当困难, 在电磁散射模型中, 通常将植被离散成由有限数目的不同形状规则体构成, 其中树干被模拟成近乎垂直的有限长圆柱体, 树枝被模拟成不同取向及大小的圆柱体, 对于阔叶林, 树叶被模拟成小圆盘, 对于针叶林, 树叶被模拟成针状体。然后采用一定的几何组合方式将离散规则体构成植被, 其中, 一种应用广泛的方式是采用分层建模^[12-13,15], 植被分成冠层、树干层, 在相应的层内离散规则体根据密度均匀分布, 但是这种几何建模方式忽略了植被结构中各个部分之间的相互干涉, 在低频入射时各部分干涉会给总散射带来较大影响, 由几何结构不同产生的相干效应影响很大。

分形结构考虑了自相似的多尺度几何构造, 可产生与实际树木近乎一致的结构。L-系统是丹麦植物学家 Lindenmayer 首次提出的描述树木生长的数学模型^[21], 它用形式语言来描述植物的拓扑结构, 经过有限次数的规则替换, 初始符号被扩展成一个字符序列, 通过对字符序列进行数学构图解释, 从而产生复杂的植物形态。本文采用 L-系统方法随机

生成 3 维植被, 计算机实现分两个过程完成, 方法描述如下

第 1 个过程: 根据起始符号元和替换规则产生目标字符串。

(1) 声明并设置公理、产生式规则;

(2) 声明并设置起始点、初始角、迭代步长以及迭代深度等参数;

(3) 根据产生式重写规则, 将初始形式的每个字符依次替换成新的字符形式;

(4) 反复步骤(3), 直至到达迭代深度为止, 最终生成目标字符串。

第 2 个过程: 解释目标字符串并绘图。

(1) 读取目标字符串中的每个字符;

(2) 根据读到的每个字符执行相应的绘图操作。

2.2 各项散射机制

图 1 是全局坐标系下植被散射模型示意图。假设入射到植被上的电磁波是沿着 k_i 方向传播的平面波, 表示为

$$E_i = E_0^i e^{jk_0 k_i \cdot \tilde{r}} \quad (1)$$

式中, k_0 为数将所构造的分形树离散成具有特定位置、取向、几何尺寸的散射体, 散射体包含表示树干和树枝的圆柱体、表示叶子的针状体或圆盘。为了使各项散射机制易于分析, 借用分层散射模型中散射机制的划分方式^[15], 如图 1 所示。在远区的总后向散射场可以表示为

$$E_s = \frac{e^{jk_0 k_s \cdot \tilde{r}}}{r} \left\{ \sum_{n=1}^N (S_n^b + S_n^{bg}) + \sum_{m=1}^M S_m^{tg} + S^g \right\} E_0^i \quad (2)$$

其中, N 是冠层中总散射体个数, S_n 表示冠层中第 n 个散射体的散射矩阵, M 是总树干个数, S_m 表示第 m 个树干的散射矩阵。式(2)中包含 4 项散射机制: 冠层内散射体直接后向散射 S_n^b , 冠层内散射体地面一次作用后向散射 S_n^{bg} , 树干地面一次作用后向散射 S_m^{tg} , 地面直接后向散射 S^g 。植被散射模型中包含的散射机制示意图如图 2 所示。

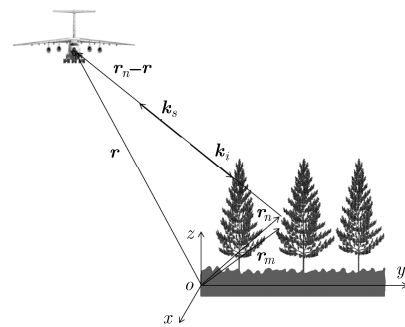


图 1 全局坐标系下植被散射模型示意图

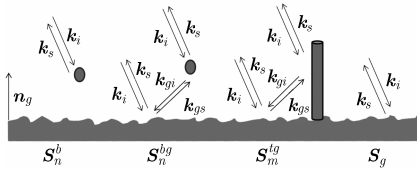


图 2 各项散射机制示意图

以上各项散射机制具体可以表示为

$$\mathbf{S}_n^d = e^{j\phi_1} \mathbf{T}_n^i \mathbf{S}_n^0(\mathbf{k}_s, \mathbf{k}_i) \mathbf{T}_n^s \quad (3)$$

$$\mathbf{S}_n^{bg} = e^{j\phi_2} \mathbf{T}_n^i \mathbf{S}_n^0(\mathbf{k}_{gi}, \mathbf{k}_i) \mathbf{T}_n^r \mathbf{R} \mathbf{T}_n^s + e^{j\phi_3} \mathbf{T}^r \mathbf{R} \mathbf{T}_n^r \mathbf{S}_n^0(\mathbf{k}_s, \mathbf{k}_{gs}) \mathbf{T}_n^s \quad (4)$$

$$\mathbf{S}_m^{tg} = e^{j\phi_2} \mathbf{T}_m^i \mathbf{S}_m^0(\mathbf{k}_{gi}, \mathbf{k}_i) \mathbf{T}_m^r \mathbf{R} \mathbf{T}_m^s + e^{j\phi_3} \mathbf{T}^r \mathbf{R} \mathbf{T}_m^r \mathbf{S}_m^0(\mathbf{k}_s, \mathbf{k}_{gs}) \mathbf{T}_m^s \quad (5)$$

$$\mathbf{S}_g = e^{j\phi_4} \mathbf{T}^i \mathbf{S}_g^0(\mathbf{k}_s, \mathbf{k}_i) \mathbf{T}^s \quad (6)$$

其中, $\mathbf{T}^i$ 表示入射方向传播矩阵, $\mathbf{T}^s$ 表示散射方向传播矩阵, $\mathbf{T}^r$ 表示反射方向传播矩阵, $\mathbf{R}$ 表示地面反射矩阵, $\mathbf{S}^0$ 表示不经历衰减的散射矩阵, ϕ 为散射体在全局坐标系中相移, 各项散射机制中相移分别为

$$\phi_1 = -k_0(\mathbf{k}_i - \mathbf{k}_s) \cdot \tilde{\mathbf{r}}_n \quad (7)$$

$$\phi_{2b} = -k_0(\mathbf{k}_i - \mathbf{k}_s) \cdot \tilde{\mathbf{r}}_n - 2k_0(\tilde{\mathbf{r}}_n \cdot \mathbf{n}_g)(\mathbf{n}_g \cdot \mathbf{k}_i) \quad (8)$$

$$\phi_{3b} = -k_0(\mathbf{k}_i - \mathbf{k}_s) \cdot \tilde{\mathbf{r}}_n + 2k_0(\tilde{\mathbf{r}}_n \cdot \mathbf{n}_g)(\mathbf{n}_g \cdot \mathbf{k}_s) \quad (9)$$

$$\phi_{2t} = -k_0(\mathbf{k}_i - \mathbf{k}_s) \cdot \tilde{\mathbf{r}}_m - 2k_0(\tilde{\mathbf{r}}_m \cdot \mathbf{n}_g)(\mathbf{n}_g \cdot \mathbf{k}_i) \quad (10)$$

$$\phi_{3t} = -k_0(\mathbf{k}_i - \mathbf{k}_s) \cdot \tilde{\mathbf{r}}_m + 2k_0(\tilde{\mathbf{r}}_m \cdot \mathbf{n}_g)(\mathbf{n}_g \cdot \mathbf{k}_s) \quad (11)$$

$$\phi_4 = -k_0(\mathbf{k}_i - \mathbf{k}_s) \cdot \tilde{\mathbf{r}}_g \quad (12)$$

平面电磁波在植被介质中因为散射和吸收会衰减, 根据 Foldy 近似^[16], 将这种衰减效应采用传输矩阵 $\mathbf{T}(s, \mathbf{k})$ 表示为

$$\mathbf{T}(s, \mathbf{k}) = \begin{bmatrix} e^{iM_{vv}s} & 0 \\ 0 & e^{iM_{hh}s} \end{bmatrix} \quad (13)$$

其中, $M_{pq} = (2\pi/k_0)n_0 \langle f_{pq}(\theta_i, \varphi_i, \theta_s, \varphi_s) \rangle$, k_0 是入射波自由空间中的波数, n_0 表示散射体的体密度, p, q 分别表示入射波和散射波的极化方式, $\langle f_{pq}(\theta_i, \varphi_i, \theta_s, \varphi_s) \rangle$ 是散射体的系统平均前向散射矩阵, s 表示电磁波穿透植被层的经历路径的长度。

考虑植被分布在垂直方向上的不均匀性, 计算传输矩阵时, 将植被分成 M 层, 每层厚度为 d_m , $m = 1, 2, \dots, M$, 电磁波沿着传播方向在第 m 层中经历路径为 L_m , 如图 3 所示, 假定分层边界之间无反射或绕射, 在第 m 层中第 n 个散射体经历的传播矩阵分别为

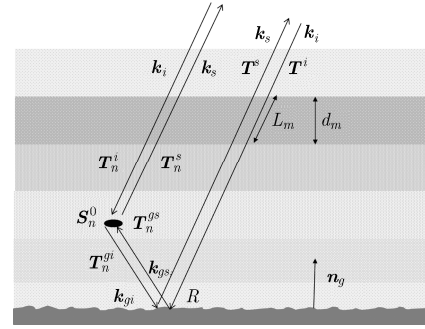


图 3 电磁波在植被中传播模型

$$\mathbf{T}_n^i = \mathbf{T}_m^i(L_{mn}) \mathbf{T}_{m+1}^i(L_{m+1}) \cdots \mathbf{T}_M^i(L_M) \quad (14)$$

$$\mathbf{T}_n^s = \mathbf{T}_m^s(L_{mn}) \mathbf{T}_{m+1}^s(L_{m+1}) \cdots \mathbf{T}_M^s(L_M) \quad (15)$$

$$\mathbf{T}_n^{gi} = \mathbf{T}_m^{gi}(L_{mn}^{gi}) \mathbf{T}_{m-1}^{gi}(L_{m-1}) \cdots \mathbf{T}_1^{gi}(L_1) \quad (16)$$

$$\mathbf{T}_n^{gs} = \mathbf{T}_m^{gs}(L_{mn}^{gs}) \mathbf{T}_{m-1}^{gs}(L_{m-1}) \cdots \mathbf{T}_1^{gs}(L_1) \quad (17)$$

其中, L_{mn} 表示散射体 n 沿着传播方向在第 m 层中经历路径。

本文中地面设定为小尺度起伏的粗糙面, 用一阶小扰动模型来计算地面的散射矩阵。小扰动模型要求粗糙面满足条件: $k_0 H \ll 1$, $k_0^3 H^2 L \ll 1$, $\sqrt{2}H/L < 0.3$, 其中 H , L 为粗糙面的均方根高度和相关长度, 一阶小扰动模型在粗糙面散射特性研究中非常具有代表性, 在很多正向和逆向问题中被采用^[18]。散射机制 $\mathbf{S}_n^{bg}$ 和 $\mathbf{S}_m^{tg}$ 表达式中包含地面反射矩阵, 该矩阵通过斯奈尔反射系数乘以粗糙度修正系数求得

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} r_v \exp(-2H^2 k_0^2 \cos^2 \theta_i) & 0 \\ 0 & r_h \exp(-2H^2 k_0^2 \cos^2 \theta_i) \end{bmatrix} \quad (18)$$

其中 r_v , r_h 分别为垂直极化和水平极化的斯奈尔反射系数, H 为描述地面粗糙度的均方根高度。

各项体散射机制中单个散射体的后向散射包含入射波对散射体的一次作用以及周围散射体对该散射体的作用, 不同类型散射体的散射特性计算方法不同, 根据文献[17]中方法可计算垂直有限长圆柱体、圆盘的散射矩阵, 由于生成的树枝的位置和取向角是随机的, 需进行欧拉角和极化基变换, 求得任意取向散射体的散射矩阵。

对于面积为 A 的植被场景, 归一化的散射系数为

$$\sigma(\mathbf{k}_s, \mathbf{k}_i) = \frac{4\pi}{A} \left\langle \left| \sum_{n=1}^N (\mathbf{S}_n^b + \mathbf{S}_n^{bg}) + \sum_{m=1}^M \mathbf{S}_m^{tg} + \mathbf{S}_g \right|^2 \right\rangle \quad (19)$$

2.3 两相邻散射体间高阶散射

对于电稠密植被, 需要考虑散射体间近场互作用, 下面应用互易定理求解两散射体间二阶散射场。

假设在空间中有两相邻电介质目标, 首先考虑第 1 种情况如图 4(a)所示, 在不考虑目标 2 存在时入射平面波在目标 1 上感应了极化体电流 $\mathbf{J}_1$, 体电流 $\mathbf{J}_1$ 在空间激发电场 $\mathbf{E}_{11}$, 电场 $\mathbf{E}_{11}$ 激发了目标 2 的散射场 $\mathbf{E}_{22}$, 此时将电场 $\mathbf{E}_{11}$ 和散射场 $\mathbf{E}_{22}$ 之和记为 $\mathbf{E}_1$ 。然后考虑第 2 种情况如图 4(b)所示, 在远场观测点 P 点处放置单位点电流源 $\mathbf{J}_e = p\delta(\mathbf{r} - \mathbf{r}_0)$, 单位点电流源极化方向 $\mathbf{p}$ 为散射方向矢量 $\mathbf{k}_s$ 的水平极化矢量 $\mathbf{h}_s$ 或者垂直极化矢量 $\mathbf{v}_s$, 在只有目标 2 存在下单位点电流源在空间激发电场 $\mathbf{E}_{e2}$ 。

应用 Carson 互易原理^[22], 可得

$$\mathbf{p} \cdot \mathbf{E}_1 = \int_{V_1} \mathbf{J}_1 \cdot \mathbf{E}_{e2} d\mathbf{v} \quad (20)$$

同理, 可得

$$\mathbf{p} \cdot \mathbf{E}_2 = \int_{V_2} \mathbf{J}_2 \cdot \mathbf{E}_{e1} d\mathbf{v} \quad (21)$$

其中, $\mathbf{E}_2$ 为由目标 2 的体电流 $\mathbf{J}_2$ 在空间激发的电场 $\mathbf{E}_{21}$ 和目标 1 对 $\mathbf{E}_{21}$ 的散射场 $\mathbf{E}_{12}$ 之和, $\mathbf{E}_{e1}$ 为只存在目标 1 时单位点电流 $\mathbf{J}_e$ 在空间激发的电场。式(19)中由单位点电流源在空间激发的电场 $\mathbf{E}_{e2}$ 可以分解为点电流源直接激发的电场 $\mathbf{E}_{ed}$ 和目标 2 对 $\mathbf{E}_{ed}$ 的散射场 $\mathbf{E}_{e2s}$, 因此可以将式(20)写为

$$\begin{aligned} \mathbf{p} \cdot \mathbf{E}_1 &= \int_{V_1} \mathbf{J}_1 \cdot (\mathbf{E}_{ed} + \mathbf{E}_{e2s}) d\mathbf{v} \\ &= \int_{V_1} \mathbf{J}_1 \cdot \mathbf{E}_{ed} d\mathbf{v} + \int_{V_1} \mathbf{J}_1 \cdot \mathbf{E}_{e2s} d\mathbf{v} \\ &= \mathbf{p} \cdot \mathbf{E}_{11} + \mathbf{p} \cdot \mathbf{E}_{22} \end{aligned} \quad (22)$$

由式(22)可得, 目标 2 的二阶散射场表达式为

$$\mathbf{p} \cdot \mathbf{E}_{22} = \int_{V_1} \mathbf{J}_1 \cdot \mathbf{E}_{e2s} d\mathbf{v} \quad (23)$$

同理, 目标 1 的二阶散射场表达式为

$$\mathbf{p} \cdot \mathbf{E}_{12} = \int_{V_2} \mathbf{J}_2 \cdot \mathbf{E}_{e1s} d\mathbf{v} \quad (24)$$

根据以上可知, 只需知散射体的感应电流及一阶散射场即可计算二阶散射场, 不同形状散射体上感应电流有关公式可参考文献[22]。单个散射体的总后向散射包含入射波对散射体的一次作用以及周围散射体对该散射体的作用, 因此单个散射体未经历衰减的散射矩阵为

$$\mathbf{S}_n^0(\mathbf{k}_s, \mathbf{k}_i) = f_n^0(\mathbf{k}_s, \mathbf{k}_i) + \sum_{u=1}^{N-1} f_{un}(\mathbf{k}_s, \mathbf{k}_{un}) \quad (25)$$

式中, $f_n^0(\mathbf{k}_s, \mathbf{k}_i)$ 为散射体一阶散射矩阵, $f_{un}(\mathbf{k}_s, \mathbf{k}_{un})$ 为在散射体 u 的近场作用下散射体 n 的二阶散射矩阵。

3 模型验证和数值模拟

3.1 实测数据验证

为了验证本文提出的高阶相干散射模型对于植被后向散射系数的模拟精确度, 接下来采用机载合成孔径雷达 AIRSAR 观测数据进行对比。研究区位于加拿大 Albert Prince 国家公园的两个地区不同的针叶林, 分别为树龄较大的短叶松(OJP)和树龄较小的短叶松(YJP), 针叶林的密度、枝干几何参数、介电常数等参数请参阅文献[23], 美国喷气推进实验室的机载 AIRSAR 在 1994 年对两片针叶林进行了数据采集, 选取了 AIRSAR 在 P(0.44 GHz), L(1.24 GHz), C(5.3 GHz)波段的 HH 极化和 VV 极化雷达数据, 在 OJP 区域和 YJP 区域入射角分别为 52° 和 45° 。

模型的仿真散射系数与 AIRSAR 测量散射系数在不同波段、不同极化下的对比结果如图 5 所示, 横轴为模型仿真散射系数, 纵轴为 AIRSAR 测量散射系数, 可以看出, 仿真散射系数与实测值基本吻合, 理论值和实验值最大会出接近 2 dB 的差异, 这是由于植被的几何、物理特性复杂, 实地测量的枝干几何参数、介电常数等参数与真实植被参数存在一定误差。通过对比, 验证了本文提出的散射模型的准确性, 说明该模型可做出较好的预测, 对定量分析、植被参数反演具有一定应用价值。

3.2 数值模拟分析

表 1 是树龄较大的针叶林(OJP)仿真参数, 针叶林的地面设置为均方根高度为 1 cm、介电常数为 7-j 的粗糙面, 冠层层厚为 9 m, 利用分形理论生成树的 3 维几何结构, 分别仿真 L(1.24 GHz), P(0.44 GHz)波段下各项散射机制随着入射角度的变化情况。

表 1 树龄较大的针叶林(OJP)仿真参数

	长度 cm	半径 cm	密度	介电常数
针叶	2.5	0.02	1500.0 m^{-3}	$39-j 6$
主枝	70.0	1.00	7.0 m^{-3}	$39-j 6$
旁枝	30.0	0.40	70.0 m^{-3}	$39-j 6$
树干	1500.0	15.00	0.3 m^{-2}	$39-j 6$

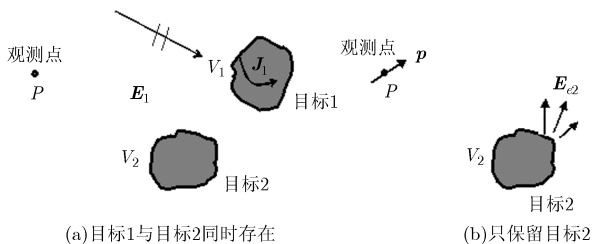


图 4 两相邻目标复合电磁散射示意图

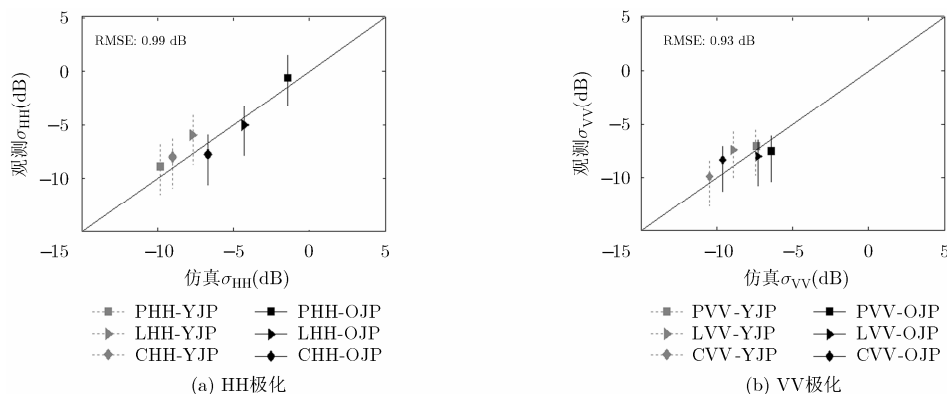


图5 针叶林观测数据与理论模拟结果对比

图6和图7分别给出了L波段、P波段各项散射机制随着入射角度变化曲线,纵坐标为后向散射系数,图中 σ_b 表示冠层散射体直接后向散射, σ_{bg} 表示冠层散射体地面一次作用后向散射, σ_{tg} 表示树干地面一次作用后向散射, σ_g 表示地面后向散射, σ_{To} 表示所有散射机制之和。从图6可看出,L波段下,OJP树种的总后向散射由 $3\sigma_b$, σ_{bg} , σ_{tg} 项共同作用,虽然L波段植被层衰减较大,OJP树种树干粗大,因此树干与地面相互作用的后向散射很强,同时由于植被层衰减的作用,地面后向散射的贡献很小。

观察图7,P波段下,电磁波经历植被层的衰减变小,地面的贡献明显增强。此时电磁波波长更长,冠层中的树枝、树叶等散射体相比波长较小,因此

σ_b, σ_{b2} 对总后向散射贡献很小。而树干仍是电大尺寸的目标,所以总后向散射由树干与地面相互作用项主导。对比图6和图7,不难发现,低频入射下,电磁波穿透性好,地面贡献增强,此外,针对稀疏的高大针叶林,电小尺寸的散射体贡献很小甚至可以忽略,总后向散射贡献较强的项只剩下树干等大尺度散射体,此时,可仅保留主要贡献项简化植被散射模型,进一步应用于参数反演问题中。

4 结论

本文建立了基于分形结构的植被高阶相干散射模型,利用分形理论生成了森林场景的3维几何空间结构,根据散射体的空间位置信息准确考虑了相

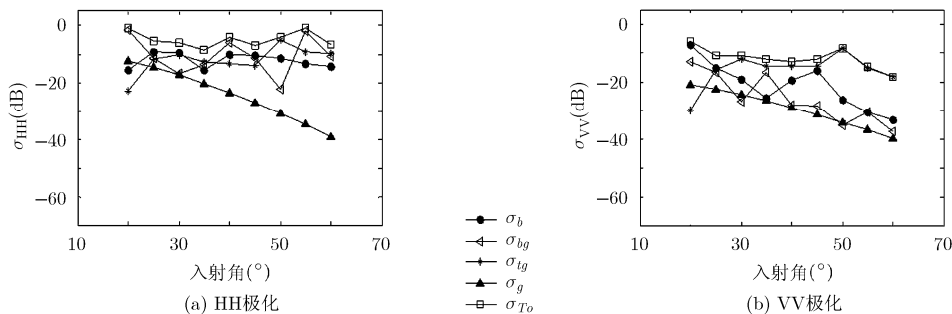


图6 L波段树种OJP各项散射机制随着入射角变化情况

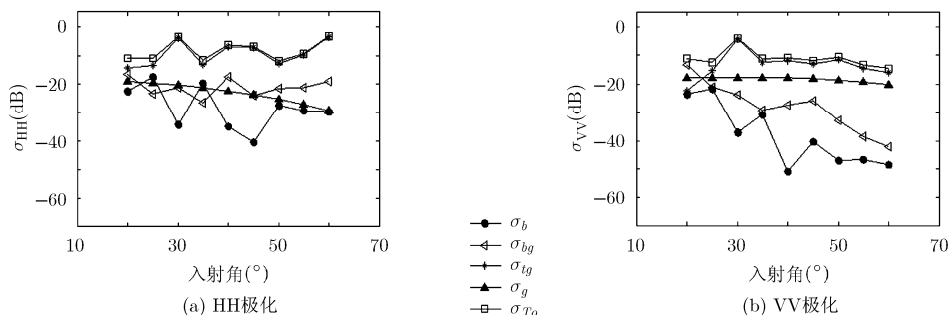


图7 P波段树种OJP各项散射机制随着入射角变化情况

干效应, 并应用互易定理计算了相邻散射体间的高阶散射, 相比于现有的模型, 本文强调了植被结构、相干效应以及近场互作用的重要性, 而且采用了非相干的分层模型散射机制划分方式, 以便于对植被结构中各项散射机制的贡献作用进行分析。与实际测量数据的比较, 验证了本文模型对植被后向散射系数的准确预测, 最后采用针叶林仿真参数, 研究了各项散射机制的贡献与入射频率、入射角、植被结构的关系, 根据结论分析, 在特定条件下, 可将模型进行简化只考虑占主导贡献散射机制项, 从而应用于对反演土壤水分、植被长势调查以及估产等领域中。

参 考 文 献

- [1] KWEON A K and OH Y. Modified water-cloud model with leaf angle parameters for microwave backscattering from agricultural fields[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2015, 53(5): 2802-2809. doi: 10.1109/TGRS.2014.2364914.
- [2] 孙晗伟, 胡程, 曾涛. 一种三维森林场景极化 SAR 数据的快速模拟方法[J]. *电子信息学报*, 2012, 34(6): 1297-1304. doi: 10.3724/SP.J.1146.2011.00766.
SUN Hanwei, HU Cheng, and ZENG Tao. A fast method of polarimetric sar data simulation for three-dimension forest stand[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2012, 34(6): 1297-1304. doi: 10.3724/SP.J.1146.2011.00766.
- [3] DANUDIRDJO D and HIROSE A. InSAR image regularization and DEM error correction with fractal surface scattering model[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2015, 53(3): 1427-1439. doi: 10.1109/TGRS.2014.2341254.
- [4] ZHANG Qian and CHAI Linna. A parameterized multiple-scattering model for microwave emission from vegetation[C]. *Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)*, Milan, 2015: 645-648. doi: 10.1109/IGARSS.2015.7325846.
- [5] ZOU Bin, ZHANG Yan, CAO Ning, *et al.* A four-component decomposition model for PolSAR data using asymmetric scattering component[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2015, 8(3): 1051-1061. doi: 10.1109/JSTARS.2014.2380151.
- [6] LIANG Xiaolin, ZHAO Xiongwen, LI Shu, *et al.* A non-stationary geometry-based scattering model for street vehicle-to-vehicle wideband MIMO channels[C]. *Personal, Indoor, and Mobile Radio Communications (PIMRC)*, Hong Kong, 2015: 2239-2243. doi: 10.1109/PIMRC.2015.7343670.
- [7] SURENDAR M, BHATTACHARYA A, *et al.* Development of a snow wetness inversion algorithm using polarimetric scattering power decomposition model[J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2015, 42: 65-75. doi: 10.1016/j.jag.2015.05.010.
- [8] LEE J S, AINSWORTH T L, and WANG Y T. Generalized polarimetric model-based decompositions using incoherent scattering models[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2014, 52(5): 2474-2491. doi: 10.1109/TGRS.2013.2262051
- [9] KUSANO S, TAKAHASHI K, and SATO M. A new decomposition of a POLSAR coherency matrix using a generalized scattering model[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2015, 8(8): 3933-3940. doi: 10.1109/JSTARS.2014.2367540.
- [10] TABATABAEENEJAD A, BURGIN M, DUAN X Y, *et al.* P-band radar retrieval of subsurface soil moisture profile as a second-order polynomial: first airMOSS results[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2015, 53(2): 645-658. doi: 10.1109/TGRS.2014.2326839.
- [11] TABATABAEENEJAD A, BURGIN M, and MOGHADDAM M. Potential of L-band radar for retrieval of canopy and subcanopy parameters of boreal forests[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2012, 50(6): 2150-2160. doi: 10.1109/TGRS.2011.2173349.
- [12] ULABY F T, SARABANDI K, MCDONALD K, *et al.* Michigan microwave canopy scattering model MIMICS[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 1990, 11(7): 1223-1253.
- [13] LIANG P, MOGHADDAM M, *et al.* Radar backscattering model for multilayer mixed-species forests[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2005, 43(11): 2612-2626. doi: 10.1109/TGRS.2005.847909.
- [14] THIRION L, COLIN E, and DAHON C. Capabilities of a forest coherent scattering model applied to radiometry, interferometry, and polarimetry at P- and L-band[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2006, 44(4): 849-862. doi: 10.1109/TGRS.2005.862523.
- [15] BURGIN M, CLEWLEY D, LUCAS R M, *et al.* A generalized radar backscattering model based on wave theory for multilayer multispecies vegetation[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2011, 49(12): 4832-4845. doi: 10.1109/TGRS.2011.2172949.
- [16] TSANG L, KONG J A, and DING K H. *Scattering of Electromagnetic Waves: Theories and Applications*[M]. New York: Wiley, 2000: 101-108.

- [17] KARAM M A, FUNG A K, and Antar Y M. Electromagnetic wave scattering from some vegetation samples[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1988, 26(6): 799–807. doi: 10.1109/36.7711.
- [18] EWE H T and CHUAH H T. Electromagnetic scattering from an electrically dense vegetation medium[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2000, 38(5): 2093–2105. doi: 10.1109/36.868868.
- [19] LIN Y C and 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(1): 440–451. doi:10.1109/36.739083.
- [20] LIU D W, SUN G Q, GUO Z F, *et al.* Three-dimensional coherent radar backscatter model and simulations of scattering phase center of forest canopies[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2010, 48(1): 349–357. doi: 10.1109/TGRS.2009.2024301.
- [21] PRUSINKIEWICZ P and LINDENMAYER A. *The Algorithmic Beauty of Plants*[M]. New York: Springer-Verlag, 1990: 101–107.
- [22] SARABANDI K and POLATIN P F. Electromagnetic scattering from two adjacent objects[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 1994, 42(4): 510–517. doi: 10.1109/8.286219.
- [23] MOGHADDAM M and SAATCHI S. Analysis of scattering mechanisms in SAR imagery over boreal forest: Results from BOREAS'93[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1995, 33(5): 1290–1296. doi: 10.1109/36.469495.
- 饶丽婷: 女, 1989年生, 博士生, 研究方向为复杂媒质中电磁波的传播与散射.
- 张晓娟: 女, 1964年生, 研究员, 研究方向为非均匀媒质电磁散射与逆问题、微波成像新方法及应用、电磁遥感机理、电磁遥感信号处理、电磁遥感系统仿真、天线技术.
- 王友成: 男, 1986年生, 博士生, 研究方向为时域超宽带雷达天线设计及应用研究.
- 方广有: 男, 1963年生, 研究员, 研究方向为超宽带雷达成像理论、方法与技术、月球与深空探测科学载荷技术、探地雷达、地球物理电磁勘探、太赫兹成像等方法与技术.