

# 基于非独立模型的相邻树干散射特性分析<sup>①</sup>

殷小敏, 陈华杰

(杭州电子科技大学 通信信息传输与融合技术国防重点学科实验室, 杭州 310018)

**摘要:** 由于树干是有耗媒质, 所以其散射特性极为复杂, 而在较为稠密的丛林中, 相邻树干之间更会产生二次散射, 这时研究相邻树干的散射特性对目标的识别与跟踪有重要意义, 因此本文构建非独立模型以研究树干的散射特性. 即用有限长介质圆柱模拟实际树干, 建立相邻两树干的散射模型, 通过计算其电磁散射特性研究两树干之间的二次散射; 文中介绍了仿真时的激励源, 边界条件的选取及建模和仿真过程; 给出了两树干不同距离下散射波幅值的变化, 入射波不同角度入射引起的 RCS 起伏, 并跟独立树干的幅值及 RCS 变化进行对比, 得到感兴趣的散射特性.

**关键词:** 非独立模型; 电磁散射; 树干; RCS; 幅值

## Adjacent Tree Trunks Scattering Characteristics Analysis Based on the Non-independent Model

YIN Xiao-Min, CHEN Hua-Jie

(Key Laboratory of Fundamental Science for National Defense-Communication Information Transmission and Fusion Technology, Hangzhou Dianzi University, Hangzhou 310018, China)

**Abstract:** In this paper, the non-independent model is constructed to study the scattering characteristic of the adjacent tree, which is particularly well adapted to the two tree trunks' characteristic because of the complexity of the scatter. And in the dense forest, the characteristic of the adjacent trees is more important. The finite-length multi-layer dielectric cylinder was used to model the trunk, and the electromagnetic scattering model for two adjacent trunks was analyzed. This paper presented the excitation source, the ABC, the modeling and simulation's process, then it provided the amplitude's change according to the different distance between the two adjacent trunks and the RCS fluctuation because of the different incident angle. At last, the comparison between the two trunks and the single trunk was given.

**Key words:** non-independent model; electromagnetic scattering; tree trunk; RCS; amplitude

### 1 引言

在现代战争中, 由于作战双方希望自己的武器不被对方的可见光、红外和大多数现有探测雷达发现, 所以会将其隐蔽在丛林或地下. 尤其在森林覆盖的地区, 更容易隐蔽, 不利于发现目标. 此情况下, 穿透叶簇超宽带雷达应运而生. FOPEN SAR 具有超强的穿透能力同时, 由于其极宽的带宽, 又蕴含丰富的频谱信息; 能够穿透叶簇并有较高的距离向和方位向分辨率, 因此对地形、地物及丛林隐蔽目标的研究极为有利.

然而, 由于树干是一种非均匀介质, 所以树干具

有散射能力(根据散射的定义: 当入射波在媒介中遇到一个粗糙表面、一群障碍物或大量随机分布的不匀体时, 方向无规则改变的现象); 所以在目标回波信息中混有大量的树干杂波, 形成了许多虚假的雷达目标, 严重干扰目标检测; 这使得叶簇遮蔽下目标识别与跟踪极为困难. 因此分析不同位置下树干散射回波的幅值、相位的变化及其 RCS 随入射角度的变化(后文中将这些变化简称为树干的散射特性), 并掌握这一系列变化对于目标跟踪和识别造成的影响十分必要. 美国陆军研究实验室 ARL 和杜克大学运用矩量法计算

<sup>①</sup> 收稿时间:2012-06-22;收到修改稿时间:2012-08-14

了树干的散射特性<sup>[1,2]</sup>; Ulaby<sup>[3]</sup>教授建立的 MIMICS1 模型, 以及改进型 MIMICS2 模型, Chuah<sup>[4]</sup>建立的多成分组成的森林模型, 将树干描述为有限长介质圆柱, 基于单个散射体的散射特性, 用矢量辐射传输方法和基于光子碰撞 Monte-Carlo 方法研究其电磁散射问题但是以上的研究方法均建立在单独树干模型的基础上, 然而实际当森林较为稠密时, 树干之间相距较近, 此时两树干处于相互作用的区域(见本文 2.1), 要分析的不再是单单一颗树, 而是整个丛林区的树干散射特性; 要更彻底的分析树与树之间的相互作用, 即树干与树干的复合散射问题, 因此基于单独树干进行研究的独立散射模型已经不适用. 此时研究丛林中相邻树干之间的相互作用变的尤为重要, 所以本文将介绍如何建立非独立模型并进行分析.

## 2 非独立模型的建立

### 2.1 非独立模型分析

由于整个丛林的分布复杂, 且根据文献[5]知, 在雷达图像中丛林区域将呈现出一个一个的树干亮点; 同时考虑电磁波与目标作用的散射机理: a)电磁波直接入射到目标上产生的后向回波; b)入射波入射到目标上, 经目标反射作用到另一目标上得到的回波, 即二次散射, 如图 1 所示.

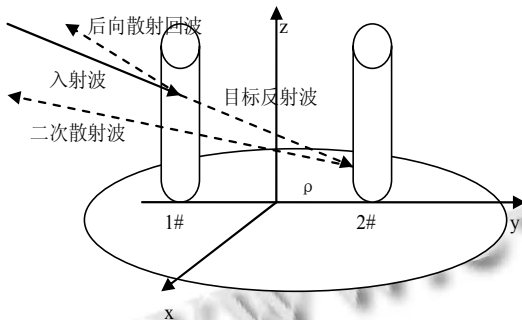


图 1 非独立树干模型

所以本文将用有限长介质圆柱模拟实际树干, 采用时域有限差分算法(FDTD)<sup>[6,7]</sup>分析相邻两树干间的电磁散射特性.

建立如图 1 所示模型, 假设相邻两树干为有限长的介质圆柱, 树干中心分别为(0, -ρ,0)和(0, ρ, 0), 用 1# 和 2#表示; 当两树干满足<sup>[8]</sup>:

$$\frac{2a^2}{\lambda} < \beta \leq \frac{L^2}{\lambda}$$

则会造成二次散射作用, 其中  $\beta = 2\rho$ ,  $L$  为独立模型时介质圆柱长度,  $a$  表示介电常数; 则根据互易定理, 包括树干之间二次作用在内的散射场<sup>[9]</sup>可表示为:

$$\hat{p} \cdot E_1^S = \int v_1 J_1 \cdot E_{e2} dv$$

其中  $E_1^S$  为树干 1#的一次散射场和树干 2#的二次散射场之和,  $J_1$  为树干 2#不存在时入射平面波在树干 1#上产生的题电流.  $E_{e2}$  为树干 1#不存在时, 由处于远区的单位电流源产生的总场,  $\hat{p}$  为极化方向. 于是可以推知

$$\hat{p} \cdot E_1^S = \frac{e^{jk_0 r_0}}{r_0} \hat{p} \cdot S(\hat{k}_i, \hat{k}_s) \cdot \hat{q} + \frac{e^{jk_0 r_0}}{r_0 \sin^2 \theta_s} e^{-jk_0 k_s \cdot \rho} H_0^1(k_0 \sin \theta_s \rho) \cdot \left\{ \left[ \sum_{m=-\infty}^{\infty} A_m^s e^{jm} \right] [S_{L1}(\hat{k}_i, \hat{k}_1) \cdot \hat{q}] \cdot \hat{z} - \left[ \sum_{m=-\infty}^{\infty} B_m^s e^{jm} \right] [\hat{k}_1 \times S_{L1}(\hat{k}_i, \hat{k}_1) \cdot \hat{q}] \cdot \hat{z} \right\}$$

同理可以得到  $\hat{p} \cdot E_2^S$  的表达式. 其中  $\hat{k}_1 = \sin \theta_s \hat{x} + \cos \theta_s \hat{z}$ ,  $\theta$  为入射波与树干之间角度.  $S(\hat{k}_i, \hat{k}_s)$  为树干的散射幅度矩阵.

### 2.2 非独立模型仿真模型建立

由以上数据关系, 又根据时域有限差分算法, 建立仿真计算模型; 计算网格空间划分为总场区和散射场区<sup>[10]</sup>, 如图 2 所示.

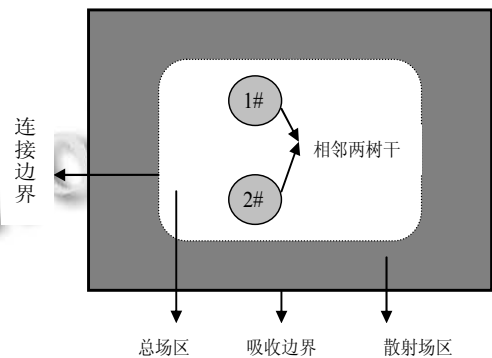


图 2 非独立模型建模平面图

树干位于总场区, 边界对于散射场是透明的, 外向散射波可以自由进入散射场区, 本文感兴趣的即为散射区内场值变化; 而总场区只存在入射波, 因此平面波可以认为是由连接边界产生的, 所以激励源引入到总场区是在连接边界上进行的.

#### 1) 引入激励源

因为本文是要研究宽带信号散射问题, 这样宽带问题的激励源一般是时间冲激函数形式的宽频带波

源, 如高斯脉冲, 升余弦脉冲, 微分高斯脉冲, 调制高斯脉冲等. 所以本文在研究树干散射问题时采用的是高斯脉冲源<sup>[11]</sup>. 高斯脉冲函数的时域波形为:

$$E_i(t) = \exp\left(-\frac{4\pi(t-t_0)^2}{\tau^2}\right)$$

其中,  $\tau$  为常数, 决定了高斯脉冲的宽度. 脉冲峰值出现在  $t = t_0$  时刻, 经过傅里叶变换后其频谱特性为:

$$E_i(f) = \frac{\tau}{2} \exp\left(-j2\pi ft_0 - \frac{\pi f^2 \tau^2}{4}\right)$$

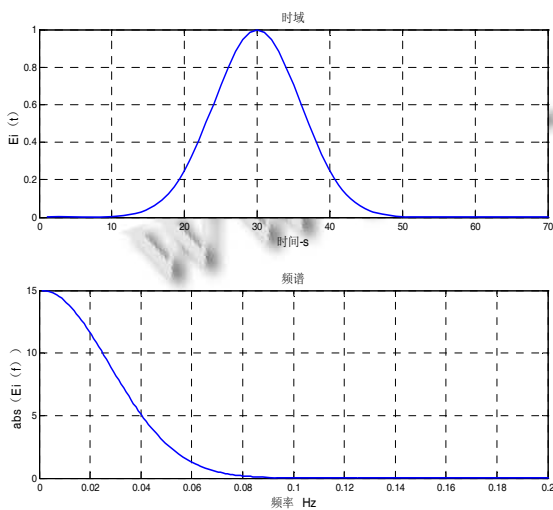


图 3 高斯脉冲及其频谱

### 2) 确定吸收边界条件

由于散射体的散射都是在无限大空间进行的, 因此需要对无限大空间进行有效截断, 以有限空间来模拟散射体在无限大空间的散射特性. 由此引入对无限大空间实现有效截断的吸收边界的概念, 即 ABC(Absorbing Boundary Conditions). 由 Berenger 提出的 PML(Perfectly Matched Layer), 即理想匹配层吸收边界条件, 它能有效吸收均匀无耗介质中的传输波, 而且与入射角无关, 精确度较高. 但是因为其对于有耗介质不能对其凋落波进行很好的吸收, 所以在此基础上选用由 Jiayuan Fang 和 Zhonghua Wu 通过修正 Maxwell 方程提出的适用于截断有耗媒质的理想匹配层吸收边界条件, 即 GPML<sup>[12]</sup>.

在运用 FDTD 方法计算得到有限区域的电磁场特

性之后, 运用等效原理便可获得远区的散射场.

## 3 仿真过程及结果

### 1) 仿真

根据目标的几何和物理参数, 按照 FDTD 要求进行网格化离散, 简称为建模, 每一个网格包含几何尺寸、电磁参数等信息. 建模过程如图 3:

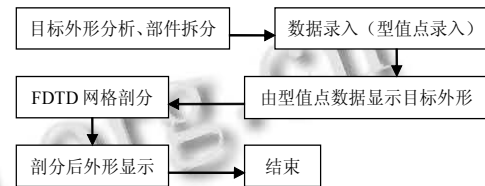


图 4 仿真过程流程图

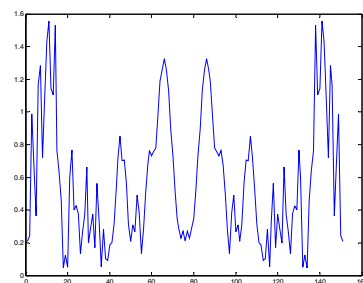
建立如图 4 所示坐标系, 则二维目标区域可表示为:

$$\begin{cases} x^2 + (y \pm (r + \rho))^2 \leq r^2 \\ -r \leq x \leq r \\ \rho \leq y \leq 2r + \rho \text{ or } -2r - \rho \leq y \leq -\rho \end{cases}$$

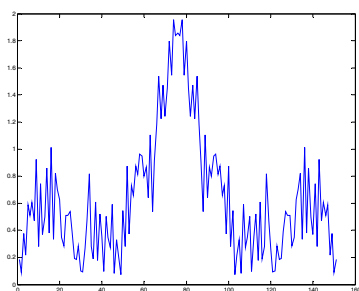
其中,  $r$  为介质圆柱半径; 建模时, 通过判断计算区域中网格是否满足上式来确定网格是否位于目标上.

建立了目标的离散模型后应用 FDTD 程序计算目标近场. 在确定建模时的各相关数据后, 程序结束得到目标近场的各个分量信息(幅值和相位); 并单独输出外推数据面上各切向场分量值, 利用惠更斯原理便可以外推远区场. 这样就得到了对入射波长归一化后的雷达散射截面(RCS).

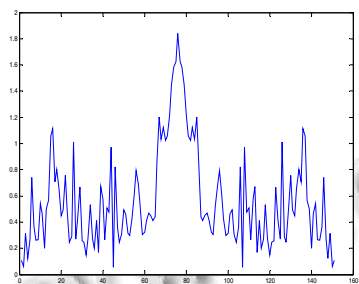
### 2) 实验结果



(a)相邻两树干相距 r 时幅值变化

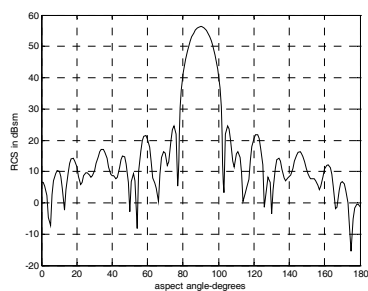


(b)单独树干幅值变化

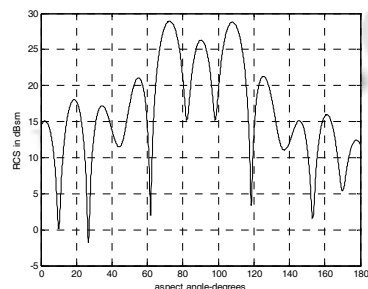


(c)相邻两树干之间距离扩大为 3r 后的幅值变化

图 5 幅值变化



(a)相邻两树干相互作用 RCS



(b)单独树干 RCS

图 6 不同入射角度下 RCS 变化

#### 4 小结

本文介绍了运用 FDTD 计算树干宽带电磁散射特性的方法和步骤,认为树干之间的二次散射作用<sup>[13]</sup>是

叶簇遮蔽环境下不可忽视的噪声形式,并对其进行了仿真;用有限长介质圆柱模拟树干,求解了单独树干和相邻树干的电磁散射场,并得到相邻树干二次散射的近似解析表达式,进而研究了其电磁散射模型,并通过与文献 8 中数据对比及本文实验对比得知:

1) 将结果与文献 8 对比可发现结论相同, X 波段时,当较小距离时相邻树干间二次散射作用不可忽视.

2) 当入射波照射到树干上后形成散射场,单棵树时散射波幅值达到最大后逐渐减弱,能量变低,但是相邻的两棵树因为二次散射作用,形成多个峰值点,波的能量延续时间更长,极易在跟踪目标时造成干扰.

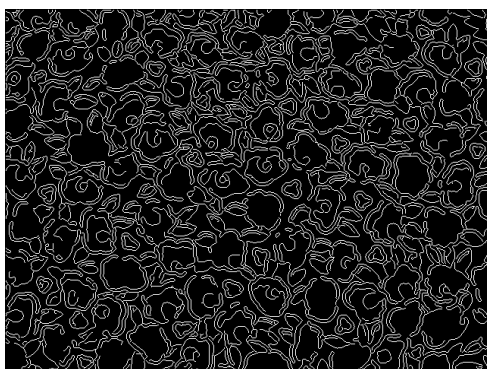
3) 由图 6 可以看出,相邻两棵树因为二次散射作用,在一定入射角度范围内 RCS 起伏较大,此时散射功率较大,对于目标的跟踪和识别影响很大.

4) 两树干相距不同距离时,造成的二次散射作用不同,由图 5(a)与(c)对比可知,随着距离变大幅值变化将趋近于图 5(b),所以在丛林中,树干之间距离在一定范围内二次散射作用不可忽略.

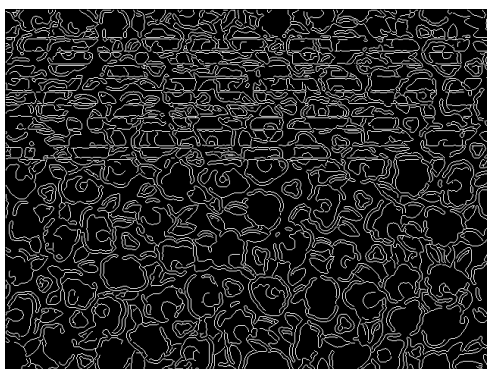
#### 参考文献

- 1 江长荫,王被德.机载与星载雷达的电波传播大气折误差修正.中国科学(E 辑),2001,31(1):19-27.
- 2 Bean BR. Tropospheric refraction, in Advance Radio Research, 1964,100.
- 3 Ulaby FT, Sarabandi K, MacDonald K, Whitt M, Dobson MC. Michigan microwave canopy scattering model. Int. J. Remote Sensing, 1990,11(7):1223-1253.
- 4 Chuah HT. A radar backscatter model for forest stands. Waves in Random Media, 1992,2(1):7-12.
- 5 方学立,梁甸农.超宽带合成孔径雷达树干杂波的统计特性分析.系统工程与电子技术,2005,27(7):1154-1156,1195.
- 6 Yee KS. Numerical solution of initial boundary value problems involving Maxwell equations in isotropic media. IEEE Trans. Antennas Propagation, May 1966,AP-14(3):302-307.
- 7 葛德彪,阎玉波.电磁波时域有限差分算法.西安:西安电子科技大学出版社,2002.
- 8 王显德,傅君眉,等.粗糙地面上相邻两树干电磁散射模型.电波科学学报,1999,14(3):268-273.
- 9 Sarabandi K, Poatin PF. Eletromagnetic Scattering form Two

(下转第 185 页)



(a)模板图像的强度图像



(b)待测图像的强度图像

图 5 对图像提取边缘和直线特征后的结果



图 6 检测结果

#### 4 结语

由于 Hough 变换是把直线上点的坐标转换到过点的直线的系数域, 结合共面直线相交的关系, 使直线的提取问题转换为计数问题, 利用 Hough 变换的这个性质并结合互相关系数的计算进行实验, 较好地完成了对数码印花飞线的检测. 但该方法还仅处在实验模拟阶段, 开发可工业化生产的数码印花织物表面常见疵点实时检测是下一步的研究方向.

#### 参考文献

- 1 周旭东, 李艳梅. 数码印花技术应用. 上海纺织科技, 2003, 31(3):39-41.
- 2 Gonzalez RC, Woods RE. Image Processing. 2nd ed., 阮秋琦, 阮宇智等译. 北京: 电子工业出版社, 2003. 476-477.
- 3 冯晓锋, 余金伟. Hough 变换在零件形位误差检测中的应用. 机械科学与技术, 2011, 30(6):957-959.
- 4 Tsai D, Lin C, Chen J. The evaluation of normalized cross correlations for defect detection. Pattern Recognition Letter, 2003(24):2525-2535.
- 5 潘如如, 高卫东, 钱欣欣, 张晓婷. 基于互相关的印花织物疵点检测. 纺织学报, 2010, 31(12):134-138.

(上接第 164 页)

- Adjacent Objects. IEEE Trans. Antennas Propagation, 1999, 47(4):510-516.
- 10 谭怀英. VHF/UHF 波段树干超宽带散射特性和建模方法研究. 长沙: 国防科技大学, 2001.
  - 11 黄纪军. FOPEN SAR 地面目标散射特性分析及检测研究. 长沙: 国防科技大学, 2005.
  - 12 Feng JY, Wu ZH. Generalized Perfectly Matched Layer An

Extension of Berenger's Perfectly Matched Layer Boundary Condition. IEEE MG-WL, 1995, 5:451-453.

- 13 Karam MA, Fung AK. Electromagnetic scattering from a layer of finite-length, randomly oriented dielectric circular over a rough interface with application to vegetation. Int. J. Remote Sensing, 1988, 9(6):1109-1134.