

# VHF/ UHF 波段树干超宽带散射特性研究

谭怀英<sup>1</sup>, 刘克成<sup>2</sup>, 尹家贤<sup>2</sup>, 梁甸农<sup>2</sup>

(1. 空军第二研究所, 北京 100085, 2. 国防科技大学电子科学与工程学院, 湖南长沙 410073)

**摘 要:** 本文用时域方法研究了树干的超宽带散射特性. 由于树干及地面均为色散有耗媒质, 因此树干散射特性是复杂的频率函数. 时域有限差分算法 (FDTD) 尤其适合于此类具有色散特性的超宽带散射特性研究. 运用 FDTD 算法建立起树干散射模型后, 经过计算, 可以得到整个时域过程的散射, 对时域散射场进行快速傅立叶变换 (FFT), 则可获取全部感兴趣的超宽带频域特性. 相对于矩量法 (MOM) 而言, FDTD 能更方便快捷地为叶簇穿透 (FOPEN) 检测目标提供全面的时频信息.

**关键词:** 叶簇穿透; FDTD; 超宽带

**中图分类号:** TN011 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2003) 03-0448-04

## FDTD Modeling of Tree-Trunk Scattering at VHF/ UHF

TAN Huai-ying<sup>1</sup>, LIU Ke-cheng<sup>2</sup>, YIN Jia-xian<sup>2</sup>, LIANG Dian-nong<sup>2</sup>

(1. Air Force Second Institute, Beijing 100085; 2. School of Electronic Science and Engineering, NUDT, Changsha, Hunan 410073, China)

**Abstract:** This paper presents our global approach to model Ultra Wideband (UWB) FOPEN (Foliage Penetration). In this approach, we consider plane wave scattering (in time domain) from the tree trunks above the soil. The time-domain scattering is computed via FDTD method, which is particularly well adapted to frequency-dependent soil. Then with a Fast Fourier Transform (FFT), the FDTD result is transformed to the frequency domain. Thus, we may have rich information for applicability to the FOPEN detection need.

**Key words:** Foliage Penetration; FDTD; ultra-wide band

## 1 引言

对 VHF/ UHF 波段而言, 叶簇可以认为是“透明”的. 因而在军事应用上, 工作在该波段的 SAR 雷达适用于检测叶簇遮蔽下的目标. 美国军事研究实验室 (ARL) 对此作了十余年研究, 研制出了叶簇超宽带雷达系统 (FOPEN SAR), 并开展了几次大规模实验, 获取了丰富的研究资料. 研究表明, 尽管叶簇是透明的, 然而树干对入射信号并不透明, 会产生很强烈的散射, 散射信息混杂在目标信号中, 形成虚警, 对目标检测造成严重干扰. 因此研究树干的散射特性, 以便在接收信号中将其分离出来, 这在叶簇穿透研究中是一个关键课题.

从电磁学的角度讲, 研究树干的散射特性有两类方法: 频域法和时域法.

频域法是从频域积分方程出发, 通过矩量法 (MOM) 逐频求解. 由于在超宽带范围内, 树干和地面的散射都具有色散性, 因而处理起来比较复杂, 通常采用复镜像的概念来简化地面的影响. 但是复镜像的求取和矩量法所需的阻抗矩阵计算都是十分烦琐和耗时的, 而且复镜像的概念仅适用于处理规则面, 如平面或柱面, 无法解决起伏地面情况. 同时对超宽带

频带内任一频率都必须逐点计算, 工作量很大. 可见对处理超宽带问题而言, 矩量法存在很大的局限性.

相对于频域法, 时域法在处理超宽带问题时体现了明显的优势. 目前时域法中应用较多的是从微分方程出发的时域有限差分法 (FDTD). 只要建立起包含树干和地面在内的适当的时域散射模型, 就可得到树干散射的整个时域过程信息. 对时域散射场作快速傅立叶变换 (FFT), 就能一次性获取全部感兴趣的超宽带频域信息. 因而该法简单、直接, 并且能缩减内存, 减少计算时间.

当然, 运用 FDTD 算法对地面上树干模型进行仿真建模, 存在着一些尚未解决的难点:

首先, 根据 FDTD 算法理论, 为了计算树干的散射场, 需要在计算空间内引入激励源, 激励源的引入是在包围树干的封闭面上进行的. 就本模型而言, 该激励源构成比较复杂, 在土壤上方, 雷达直接入射波和土壤的反射波共同激励树干, 而在土壤下方, 树干只受土壤透射波的作用. 为此, 该激励源不象通常的激励源, 可以通过解析或迭代方式求解后直接引入. 因为除了直接入射波外, 土壤的散射波在开始都是未知的, 无法直接在总散场连接界面上执行嵌入操作, 因此, 要获取树干

的散射特性,必须先解决土壤的散射计算问题.

其次,在求解出树干的近区散射场后,需要进行近远场变换,以获取感兴趣的远区时域场散射特性.根据时域近远场变换原理,对于均匀介质空间中的散射体,只需在近区选取包围散射体的封闭源面,对该源面上的等效电流源和磁流源作近远场变换,即可求解出远区散射场.而在本模型中,作为散射体的树干深入土壤,树干处于自由空间和有耗色散土壤共同构成的复杂背景中,无法在某一均匀介质空间中选取包围树干的封闭源面用于近远场时域计算,因而也就难于按照通常的思路求解出树干的远区时域场特性.

针对以上难点,文章的第二部分就应用 FDTD 算法计算树干的超宽带散射特性提出了四步走的思路,该思路的可靠性在文章第三部分给予了验证,本文第四部分给出了树干散射模型的仿真结果,文章最后进行总结,得出了相关结论.

### 2 树干超宽带散射的 FDTD 算法建模

在文章的本部分中,将给出运用 FDTD 算法计算地面上树干超宽带散射特性的计算思路.由于本模型的复杂性,仿真时对于经典的 FDTD 算法运用作了灵活变更.

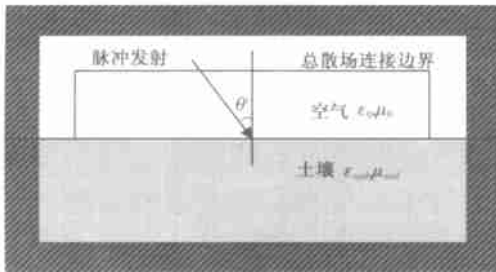


图 1 二维 FDTD 空间:计算土壤散射场

该思路具体体现为以下四个步骤:

(1)在二维 FDTD 计算空间中,求解土壤的散射场,为步骤(2)计算树干散射提供激励源.由于地面为无限大半平面,入射波的引入是在位于土壤上方的一半平面上进行的(见图 1),而非经典 FDTD 算法中的封闭源面.因此入射波不是无限的,而是有限的平面波源,在吸收边界和内部计算域的连接面上会存在入射波不连续性,导致误差产生.为减小该误差的影响,二维 FDTD 计算空间被扩大,远远超过步骤(2)中三维 FDTD 计算树干散射时所需空间,以使边缘处的扰动场不会影响三维计算.

入射波通常选取为高斯脉冲:

$$f(t) = \exp\left[-\frac{(t-t_0)^2}{2}\right] \quad (1)$$

其中,  $\tau$  为半脉冲宽度,  $f(t)$  可以为 TE 模(当考虑 HH 极化时)或 TH 模(当考虑 VV 极化时).

(2)进行三维 FDTD 计算,求解树干的近区散射场.见图 2.如前所述,树干的激励源包括脉冲直接入射和土壤散射两部分.在步骤(1)中已通过二维 FDTD 计算求解出了土壤散射,因此,可以在包围树干的封闭面上引入树干的激励源:即土壤上方,由脉冲直接入射和土壤反射构成激励,下方只有土

壤透射波单独作用.由于土壤是有耗媒质,在 FDTD 算法中,采取 GPML (Generalized Perfectly Matched Layer) 吸收边界,变更的麦克斯韦耳方程组如下:

$$\nabla_s \times E = -j \mu_0 H, \nabla_s \times H = j E \quad (2)$$

其中

$$= 0 \cdot [r - j / (\sigma)] \quad (3)$$

$$\nabla_s = a_x \frac{1}{S_x} \frac{\partial}{\partial x} + a_y \frac{1}{S_y} \frac{\partial}{\partial y} + a_z \frac{1}{S_z} \frac{\partial}{\partial z} \quad (4)$$

$S_x, S_y, S_z$  为复数.引入辅助场

$$\partial E'_x / \partial t = E_x, \partial E'_y / \partial t = E_y, \partial E'_z / \partial t = E_z \quad (5)$$

经过三维 FDTD 计算,即可获取树干的近区散射场.

(3)在土壤上方选取一包围树干的半封闭源面,而非全封闭源面(见图 3),对其上的等效电流源、磁流源进行近远场变换,求解树干远区散射场.

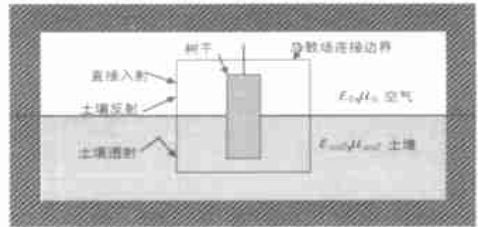


图 2 三维 FDTD 空间:在包围树干的封面上加入直接入射波和土壤散射波共同构成的复合激励源,计算树干时域近区散射场.

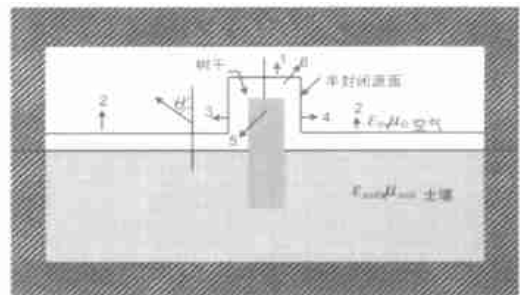


图 3 三维空间:对土壤上方包围树干的半封闭源面上的等效电流源和磁流源进行远场变换,计算树干时域远区散射场近远场变换计算公式如下:

$$E_s = -\frac{1}{4\pi} \int_s ((1) - (2) - (3)) ds \quad (6)$$

其中

$$(1) = \mu \frac{1}{|r-r'|} \frac{\partial}{\partial t} [n \times H(r', t')] \quad (7a)$$

$$(2) = \left[ n \times \frac{\partial}{\partial t} E(r', t') \right] \times \frac{(r-r')}{c|r-r'|^2} \quad (7b)$$

$$(3) = \left[ n \cdot \frac{\partial}{\partial t} E(r', t') \right] \cdot \frac{(r-r')}{c|r-r'|^2} \quad (7c)$$

$s$  是半封闭的积分源面,由图 3 中的 1,2,3,4,5,6 面构成.

在文章的第三部分,给了树干远区散射场时域计算结果.

(4)对步骤(3)的树干远区散射场时域计算结果进行快速傅立叶变换(FFT),即可获得感兴趣的树干超宽带频域散射特性.

### 3 可靠性分析

文章第二部分给出了运用 FDID 求解土壤上树干超宽带散射特性的计算思路. 步骤(3)中提出:在土壤上方选取一包围树干的半封闭源面替代封闭源面,对其上的等效电流、磁流源进行近远场变换,求解树干远区散射场.为说明该思路的可靠性,本部分将给出一经典的 FDID 模型加以验证.

验证模型如图 4 所示,是位于无限大导体平板上方的单极子.根据镜像原理,该验证模型等价于图 5 所示的位于自由空间的整长度电振子.运用 FDID 算法极易求解图 5 所示等价模型的远区雷达散射截面(RCS),其解比较精确,可作为参考标准.对于图 4 的验证模型,则按照算法思想步骤(3)所述,选取位于无限大导体平板上方包围单极子的一半封闭源面替代封闭源面,对其上的等效电流、磁流源进行近远场变换,求解单极子的远区散射场.

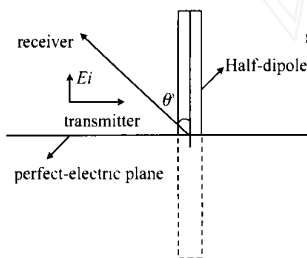


图 4 验证模型:位于无限大导体平板上方的单极子

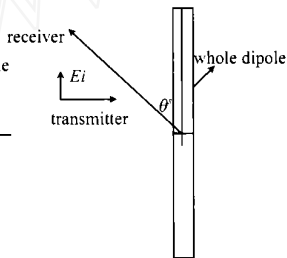


图 5 验证模型:位于自由空间的整长度电振子

在图 6 中,给出了图 4,图 5 模型按上述思想求解的远区散射场计算结果,其中纵坐标值是  $\nu\nu$  通道的双站 RCS.

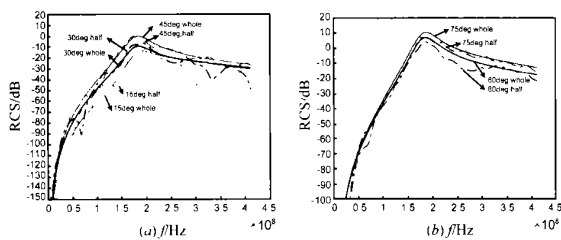


图 6 验证模型与等价模型的远区双站 RCS 计算值对照: 散射角变化范围  $15^\circ \sim 75^\circ$  (a)  $15^\circ \sim 45^\circ$ ; (b)  $60^\circ \sim 75^\circ$

理论上说,图 4 和图 5 模型应该具有完全相同的远区双站 RCS,即曲线应完全吻合.但是由于 PC 机的内存限制,二者有一定偏差,这是正常的.而且根据分析,接收角越小,所需内存越小,二者曲线吻合程度越好.然而由图 6 可见,在极小角度时,即接收角在  $15^\circ$  度时,反而比  $30^\circ$  度和  $45^\circ$  度的吻合程度差,其原因有待进一步研究.

考虑到 PC 机内存限制所带来的误差,总的来看,在包围散射体的半封闭源面上进行时域近远场变换求解远区散射场是可行的.为此,文章下一部分给出了按照该思路求解地面上树干远区时域散射场的仿真结果.

### 4 数值结果与讨论

文章第三部分阐述了运用 FDID 求解土壤上树干模型超

宽带特性的计算思路的可行性.下文将按照第二部分给出的 4 个步骤求解树干的远区雷达散射截面.

图 7 给出了按照步骤(1)计算出的土壤散射场时域响应.图 8 和图 9 则分别给出了按步骤(3)和步骤(4)计算出的树干远区散射场时域和频域响应.

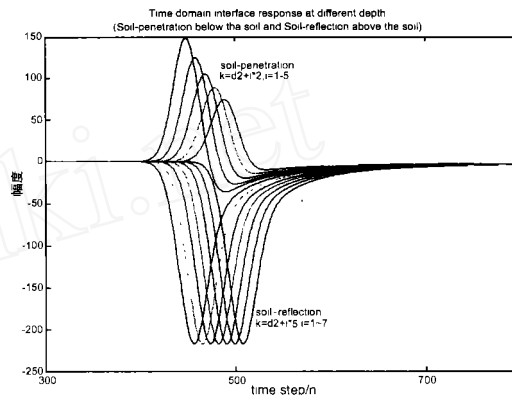


图 7 土壤时域脉冲响应:土壤上方的反射波在任何位置都具有相同的响应,而在土壤下方的透射波随深度增加幅值递减.

图 7 中,二维 FDID 计算空间大小选取为  $y \times z = 1500 \times 66$  (网格数),远大于三维网格计算空间,以减小边缘扰动场的干扰.土壤介电常数和导电率分别为  $\epsilon_r = 6.0, \sigma = 0.05$ ,考虑 HH 极化,入射波为 TE 模,其形式为

$$E_x(d1 - 1) = \exp\left[-\frac{(t - t_0)^2}{2}\right]$$

其中,  $t_0 = 20$ ,  $t = s/2c$ ,  $s = \sqrt{40}$ ,  $t_0 = 6$ .图 7 给出的是土壤散射电场值.由图可知:土壤上方的反射波在任何位置都具有相同的响应,而在土壤下方,由于土壤为有耗媒质,不同深度的透射波有幅值上的差别,并且深度越深,衰减越大,幅值越小.

图 8 给出了雷达收发为 HH 极化时树干的时域后向散射特性.三维 FDID 计算空间大小选取为  $x \times y \times z = 100 \times 300 \times 66$ ,土壤参数选取同图 7,分析时考虑了三种不同类型的树干,“树 1”高度为 1 米,直径为 0.1 米,“树 2”直径同“树 1”,高度为 1.75 米,“树 3”高度同“树 2”,直径为 0.2 米,三种树干的介电常数和导电率都是一致的,均为  $\epsilon_r = 16.0, \sigma = 0.1$ .

由图 8 可以看出,远区后向散射特性受树干高度和直径变化的影响.后向散射响应的幅值随树干高度的增加作线性增长,频率响应函数不发生改变,而树直径的改变则会使后向散射的频率响应函数发生非线性改变.同时计算结果表明,只要入射脉冲足够窄,在时域散射波形中,可以分辨出树干的直接散射波与树干和地面形成的二面角产生的二次散射回波(其峰值更大),而这样的结果在频域法计算法中是观察不到的.

图 9 是对树干的时域后向散射场作 FFT 后得到的频域后向散射特性.土壤和树干参数选择同图 8,考虑不同极化.值得注意的是,除了最低的小部分频段外,在大部分频段, $\nu\nu$  极化方式收发的远区 RCS 均小于 HH 极化时的 RCS 值,这一结

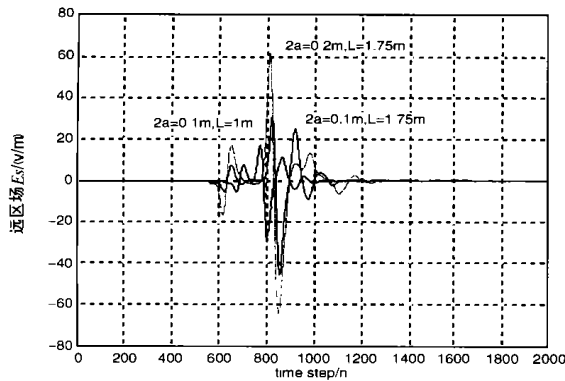


图 8 树干时域远区散射场响应:受树干尺寸,即高度和真径变化的影响

果同 Duke 大学的研究结果是一致的.该现象的产生源于布鲁斯特效应.因为土壤和树干均为有耗媒质,在 VV 极化情况下在一定角度辐射场会被强烈吸收,反射回波减少,远区 RCS 幅值降低,在 RCS 曲线中出现凹谷.而 HH 极化时反射系数随反射角度增加呈单调上升趋势,不会产生 VV 极化时的布鲁斯特角效应.通过分析该现象,我们可以设想:运用 VV 极化方式收发信号,由于树干远区 RCS 较小,对目标回波信号干扰小,也许更有利于目标检测.

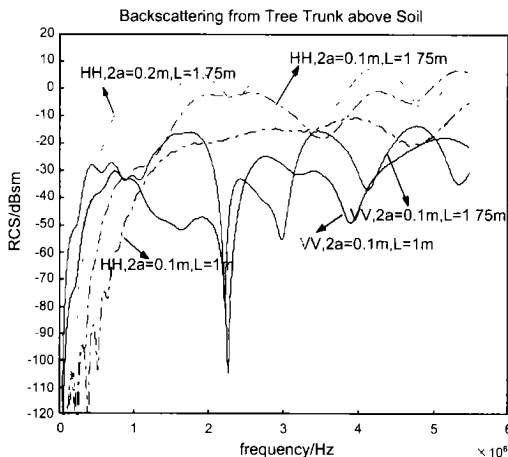


图 9 改变极化方式和树干尺寸导致不同的树干远区 RCS 值

上述数值计算结果表明:(1)对于地面上树干的简化研究模型,即位于无限大电介质半空间的电介质圆柱,由于散射体为有耗色散媒质,因此该模型的远区散射场特性是依赖于频率的函数,具有超宽带色散特性;(2)即使在 VHF 低频段,树干高度和直径的一定选取组合也会导致强烈的后向散射回波,甚至会淹没目标信息;(3)布鲁斯特效应提示我们:在 FOPEN 雷达收发方式中选取 VV 极化,也许比 HH 极化更利于目标检测.

## 5 结论

由此可见,地面上树干具有复杂的远区后向散射特性:不仅依赖于频率,极化方式,土壤特性,而且还与树干自身的参

数,即介电常数和树干尺寸有关.即使在 VHF 频段,由于树干和土壤形成的二面角效应,也会导致强烈回波,造成对目标信息的干扰.

在影响树干散射特性的因素中,频率扮演着最为重要的角色.因为土壤和树干均为有耗色散媒质,其散射特性是频率的函数,因此需要进行宽频带研究.就宽频带特性研究算法而言,时域有限差分法相对于矩量法具备更大的优势:占用内存更少,计算速度更快,计算复杂程度更低.尤为重要的是,时域有限差分法能提供矩量法无法获取的丰富的时域散射特性,对计算出的时域远区散射场只需进行快速傅立叶变换,便可一次性获取整个宽频带散射特性(而矩量法需对宽频带的每个频点进行逐点计算,耗费大量计算时间).因此,运用时域有限差分法,能更加全面地研究树干杂波的超宽带特性,从而能更好地滤除掉树干杂波,满足目标检测的要求.

总之,叶簇穿透研究的前景是广阔的,而研究树干的超宽带散射特性则是其中一项比较关键的课题.不管是运用时域有限差分算法,还是矩量算法,其目的都是为了给出树干散射的更为全面丰富的信息.而就目前研究状况而言,成果还相当有限,需要展开进一步的研究工作.

## 参考文献:

- [1] S Rouvier, P Borderies. Ultra wide band electromagnetic scattering of a fractal profile[J]. Radio Science, 1997, 32(2): 285 - 293
- [2] Toru Uno, Yiwei He, Saburo Adachi. Perfectly matched layer absorbing boundary condition for dispersive medium[J]. IEEE Microwave and Guided Wave Letters, 1997, 7(9): 264 - 266
- [3] F L Teixeira, W C Chew. Perfectly matched layer and piecewise-linear recursive convolution for the FDID solution of the 3D dispersive half-space problem[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 1998, 34(5): 2747 - 2750.
- [4] Anders Sullivan, Jiangqi He, Norbert Geng, Lawrence Carin. Phenomenological modeling for FOPEN SAR: tree-trunk scattering on flat terrain and with concealed targets[J]. SPIE, 1999, 3721: 224 - 234.
- [5] Lam Nguyen, Ravinder Kapoor, David Wong, Jeffrey Sichina. Ultra-wideband radar target discrimination utilizing an advanced feature set[J]. SPIE, 1998, 3370: 289 - 306.
- [6] Weng Cho Chew, Jiar-Ming Jin, Cai-Cheng Lu, Eric Michielssen, Jiming M Song. Fast solution methods in electromagnetics[J]. IEEE Trans AP, 1997, 45(3): 533 - 543.
- [7] Jiayuan Fang. Generalized perfectly matched layer for the absorption of propagating and evanescent waves in lossless and lossy media[J]. IEEE Trans on MTT, 1996, 44(12): 2216 - 2222.
- [8] M. Saillard. Electromagnetic scattering from bounded or infinite subsurface bodies[J]. Radio Science, 1997, 32(4): 1347 - 1359

## 作者简介:

谭怀英 女, 1973 出生于重庆, 博士, 现在空军第二研究所工作, 主要从事电磁场、信号处理, 以及雷达方面的研究工作.

刘克成 男, 1937 出生于扬州, 国防科技大学教授, 出版专著三部, 主要研究领域: 电磁场数值计算及天线技术.