

## The Calculations of Target Coated with Thin Layer Dispersive Medium Using Node-Amendment FDTD \*

MA Yaping, QIN Weiping \*

(Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210003, China)

**Abstract:** The contribution of the dispersive layer of which thickness is thinner than the dimension of FDTD cell, is simulated by modifying the iterative formula of the nodes in the cell, including the dispersive layer. The effective parameters were obtained by averaging electric and magnetic flux density in the cell. By comparison with fine mesh, the calculation results show that the method we utilized can handle thin-layer thickness of the dispersive medium less than that of a cell-size. The radar cross section of metal rectangular bar coated with thin layer Lorentz medium have been obtained as well.

**Key words:** FDTD; dispersive medium thin layer; node amendment act

EEACC:6320

doi:10.3969/j.issn.1005-9490.2013.04.004

## 节点修正 FDTD 法计算薄层色散介质涂覆目标的雷达散射截面 \*

马亚平, 秦卫平 \*

(南京邮电大学, 电子科学与工程学院, 南京 210003)

**摘 要:** 在 FDTD 计算中, 当色散介质薄层厚度小于一个元胞时, 利用将电位移矢量和磁感应强度加权平均的方法, 求出薄层所在元胞的等效参数, 从而在二维 FDTD 中实现了色散介质薄层的节点修正法。通过与细网格的计算结果比较, 证明该方法能处理薄层厚度小于一个元胞的色散介质薄层。计算了金属方柱涂覆薄层洛伦兹介质的雷达散射截面。

**关键词:** 时域有限差分法; 色散介质薄层; 节点修正法; 雷达散射截面

中图分类号: TN957.2

文献标识码: A

文章编号: 1005-9490(2013)04-0447-03

近些年来 FDTD<sup>[1]</sup> 处理色散介质<sup>[2]</sup> 薄层方法的研究受到人们的重视, 在飞行器的强散射中心涂敷吸波材料或将其设计成隐身结构是降低飞行器雷达散射截面, 提高其隐身性能的有效手段。许多微波器件中也都包含有电尺寸小的色散介质薄层, 因而包含色散介质薄层电磁问题的数值模拟引起了研究人员的广泛关注。

1987 年 Yee 提出了亚网格技术, 提高了计算速度, 但亚网格区必须包含整个散射体, 因此有一定的局限性<sup>[3]</sup>; 2003 年文献[4]提出了自由空间中一维色散介质薄层的节点修正法, 但只适用于电色散; 2005 年文献[5]提出利用阻抗边界条件法处理了薄层色散介质问题。2007 年文献[6]利用阻抗边界条件及格林函数方法处理了真空中薄层色散介质的反射和透射问题。2008 年文献[7]利用等效介质参数法处理了有金属衬底的薄层色散介质的频域特性, 随后, 文献[8]提出了磁性铁氧体电磁散射的移位

算子 FDTD 方法。2010 年, 文献[9]提出了一维情况下色散介质混合模型的通用方法。本文将这种算法推广应用到二维 FDTD 中, 以二维 TM 波为例, 采用 PML 吸收边界<sup>[10-11]</sup>, 计算实现涂有色散介质薄层的金属方柱的远场 RCS<sup>[12]</sup>。并将这种结果与细网格比较, 证明这种算法在二维算例中同样具有较好的精度。

### 1 节点的修正

色散介质薄层的介电系数  $\varepsilon$  和导磁系数  $\mu$  随频率变化。以洛伦兹模型为例, 其介电常数和导磁系数可写为

$$\begin{aligned}\varepsilon(\omega) &= \varepsilon_0 \left( \varepsilon_\infty + \sum_{k=1}^P \frac{\beta_{e,k}}{\omega_{0e,k}^2 - \gamma_{e,k}\omega^2 + j\delta_{e,k}\omega} \right) \\ \mu(\omega) &= \mu_0 \left( \mu_\infty + \sum_{k=1}^P \frac{\beta_{m,k}}{\omega_{0m,k}^2 - \gamma_{m,k}\omega^2 + j\delta_{m,k}\omega} \right) \quad (1)\end{aligned}$$

式中:  $P$  为极点数目,  $\varepsilon_\infty$ 、 $\mu_\infty$  为无穷大频率时的相对

项目来源: 国防工业科研项目

收稿日期: 2013-02-28 修改日期: 2013-03-15

介电系数和导磁系数,  $\delta_e$ 、 $\delta_m$  为电阻尼系数和磁阻尼系数,  $\omega_{0e}$ 、 $\omega_{0m}$  为电极点频率和磁极点频率。

入射波为 TM 波, 含有  $E_z$ 、 $H_x$ 、 $H_y$  3 个电磁场分量, 如图 1 所示。图中金属方柱只画出右侧电磁场分量分布。

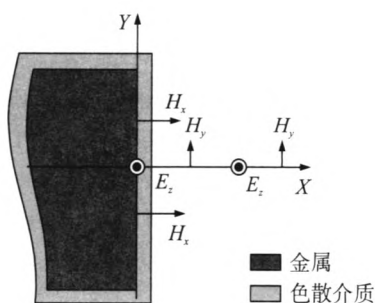


图 1 节点示意图

### 1.1 电场 $E_z$ 分量的修正

假定电场在  $0 < x < 2\Delta x$  区域内是线性分布的, 为了满足  $x=0$  时切向电场为零的边界条件, 设  $E_z(x) = \frac{x}{\Delta x} E_z$ 。

为了获得等效介电系数, 用介电系数  $\varepsilon$  来表示色散介质与导体层相邻元胞处的平均电位移矢量  $D_z$ 。

当介质薄层厚度小于等于元胞尺度的一半时:

$$D_z = \frac{1}{2\Delta x} \int_0^{2\Delta x} \varepsilon(x) \frac{x}{\Delta x} E_z dx = \frac{1}{2\Delta y} \int_0^d \varepsilon_0 \varepsilon_r \frac{x}{\Delta x} E_z dx + \frac{1}{2\Delta y} \int_d^{2\Delta y} \varepsilon_0 \frac{x}{\Delta x} E_z dx = \varepsilon_0 \left[ 1 + \frac{d^2}{4\Delta x^2} (\varepsilon_r - 1) \right] E_z = \varepsilon_0 \varepsilon_{r,ave} E_z \quad (2)$$

其中  $\varepsilon_{r,ave}(d, \varepsilon_r) = 1 + \frac{d^2}{4\Delta x^2} (\varepsilon_r - 1)$ , 当介质薄层厚度大于元胞尺度的一半时

$$D_z = \frac{1}{\Delta x} \int_{\Delta x/2}^{3\Delta x/2} \varepsilon(y) \frac{x}{\Delta x} E_z dx = \frac{1}{\Delta x} \int_{\Delta y/2}^d \varepsilon_0 \varepsilon_r \frac{x}{\Delta x} E_z dx + \frac{1}{\Delta y} \int_d^{3\Delta y/2} \varepsilon_0 \frac{x}{\Delta x} E_z dx = \varepsilon_0 \left[ \frac{9-\varepsilon_r}{8} + \frac{d^2}{2\Delta x^2} (\varepsilon_r - 1) \right] E_z = \varepsilon_0 \varepsilon_{r,ave} E_z \quad (3)$$

其中:

$$\varepsilon_{r,ave}(d, \varepsilon_r) = \frac{9-\varepsilon_r}{8} + \frac{d^2}{2\Delta x^2} (\varepsilon_r - 1)$$

$d$  为介质薄层的厚度,  $\varepsilon_r$  为色散介质的相对介电常数,  $\varepsilon_{r,ave}$  为等效相对介电常数。

### 1.2 磁场节点 $H_x$ 、 $H_y$ 分量的修正

对于磁色散, 无论色散介质薄层处于真空中还是涂在金属表面, 当薄层厚度不足一个元胞时, 磁场采样点的磁感应强度均可以由元胞内介质所占比例的加权平均表示:

$$B = \alpha \mu_0 \mu_r(\omega) H + (1-\alpha) \mu_0 H \quad (4)$$

其中  $(0 \leq \alpha \leq 1)$ , 整理后可得

$$B = \mu_0 \mu'(\omega) H \quad (5)$$

其中  $\mu'(\omega) = \mu_{r,ave} = \alpha(\mu_r - 1) + 1$ 。

## 2 算例

应用节点修正时域有限差分法计算无限长金属方柱四周涂有洛伦兹介质薄层时的雷达散射截面 RCS (Radar Cross Section)。

金属方柱横截面边长  $a = 0.6$  cm, 色散介质薄层厚度为  $d$ , FDTD 元胞尺寸为  $dx = dy = 0.01$  m, 入射波为时弦波  $E_z = \sin(\omega t)$ , 时间步长  $dt = dx/(2c)$ , 洛伦兹介质模型中极点  $P$  取 1, 则  $\beta_m = 4 \times 10^{20}$  rad/s<sup>2</sup>,  $\omega_m = 2 \times 10^{10}$  rad/s,  $\delta_m = 5 \times 10^9$  rad/s,  $\gamma_m = 1$ ,  $\mu_\infty = 1$ ,  $\beta_e = 9 \times 10^{20}$  rad/s<sup>2</sup>,  $\omega_e = 3 \times 10^{10}$  rad/s,  $\delta_e = 5 \times 10^8$  rad/s,  $\gamma_e = 1$ ,  $\varepsilon_\infty = 2$ 。

图 2 为计算所得金属方柱涂覆薄层洛伦兹介质时谐场振幅和相位分布图, 图 3 为不同厚度色散介质薄层的 RCS 与相应细网格对比图, 图 4 为不同厚度色散介质薄层的 RCS 比较。

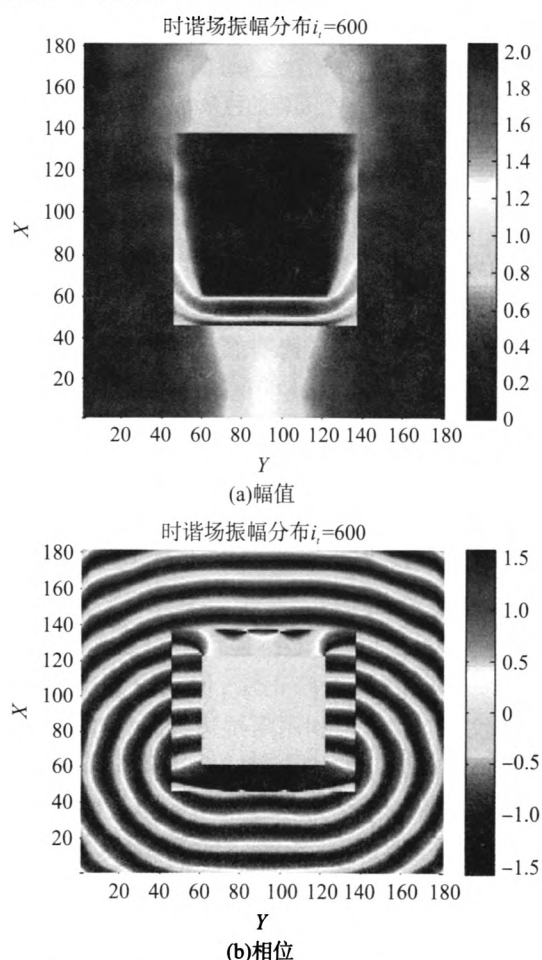


图 2 金属方柱基底的薄层洛伦兹介质时谐场振幅和相位分布图

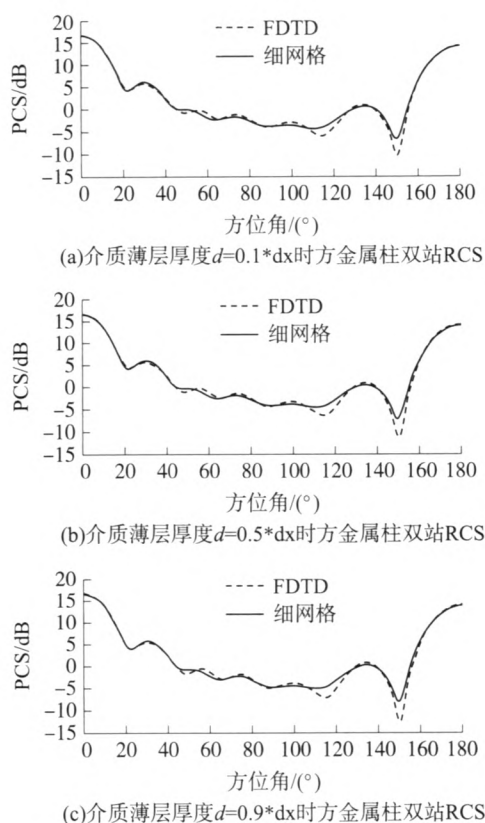


图 3 不同厚度薄层的 RCS 与相应细网格对比图

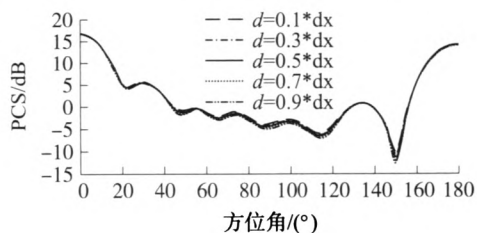


图 4 不同厚度色散介质薄层的 RCS 比较

### 3 结果

(1)由图 2 可以直观的看出,金属内部电场为零,在  $0^\circ$  方向和  $180^\circ$  方向前向散射和后向散射最大;  
 (2)由图 3 可以看出,虽然平均系数法和细网格之间存在一定的误差,但误差在可接受范围之内,因为验证了平均系数法的可行性和正确性;

(3)由图 4 可以看出,随着色散介质厚度的增加,RCS 呈减小的趋势,反映了介质吸波特性和 RCS 的减缩效果。

### 4 结论

本文应用时域有限差分法节点修正技术计算了导体涂覆薄层色散介质的 RCS,给出了在二维 FDTD 中的应用分析,通过与细网格的结果比较分析,此种方法在二维 FDTD 中同样能够获得良好的精度。

#### 参考文献:

- [1] 葛德彪,闫玉波. 电磁波时域有限差分方法[M]. 西安:西安电子科技大学出版社,2005.
- [2] 刘少斌,刘崧,洪伟. 色散介质时域有限差分方法[M]. 北京,科学出版社,2010.
- [3] Kasher J C, Yee K S. A Numerical Example of a Two Dimensional Scattering Problem Using a Subgrid[J]. Applied Computational Electromagnetic Society Journal and Newsletter,1987,2(2):75-102.
- [4] Mikko K Kärkkäinen. Subcell FDTD Modeling of Electrically Thin Dispersive Layers[J]. IEEE Transactions Microwave Theory and Techniques,2003,51(6):1774-1780.
- [5] Mikko K Kärkkäinen. Finite-Difference Time-Domain Modeling of Frequency Selective Surfaces Using Impedance Sheet Conditions[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation,2005,53(9):1174-1180.
- [6] Giulio Antonini, Antonio Orlandi. Time Domain Modeling of Lossy and Dispersive Thin Layers[J]. IEEE Microwave and Wireless Components Letters,2007,17(9):631-633.
- [7] 董宇航,魏兵,李存志. FDTD 模拟金属基底色散介质薄层的节点修正法[J]. 应用光学,2008.
- [8] 王飞,葛德彪,魏兵. 磁化铁氧体电磁散射的移位算子 FDTD 分析[J]. 物理学报,2009,58(7):6356-6362.
- [9] 魏兵,周允,刘艳峰. 色散介质混合模型的通用 FDTD 方法[J]. 微波学报,2010.
- [10] Jean Pierre. Perfectly Matched Layer(PML) for Computational Electromagnetics[J]. Morgan Claypool,2007.
- [11] Cummer S A. A Simple, Nearly Perfectly Matched Layer for General Electromagnetic Media[J]. IEEE Micro Wire LETT, 2003,13(3):128-130.
- [12] Lubbers T J, Tyan D J. A Two-Dimensional Time-Domain Near-Zone to Far-Zone Transformation[J]. IEEE Trans Antennas Propag,1992,AP-40(7):848-851.



秦卫平(1957-),男,工学博士,教授,主要研究射频/微波、毫米波和太赫兹集成电路和功能器件的设计技术及应用,qinwp@njupt.edu.cn。

## 雷达散射截面 ( RCS ) 分析培训课程

易迪拓培训([www.edatop.com](http://www.edatop.com))由数名来自于研发第一线的资深工程师发起成立, 致力和专注于微波、射频、天线设计研发人才的培养, 是国内最大的微波射频和天线设计人才培养基地。客户遍布中兴通讯、研通高频、国人通信等多家国内知名公司, 以及台湾工业技术研究院、永业科技、全一电子等多家台湾地区企业。

雷达散射截面 ( Radar Cross Section, 简称 RCS ) 是雷达隐身技术中最关键的概念, 也是电磁理论研究的重要课题, 使用 HFSS 软件可以很方便的分析计算各种目标物体的 RCS。

由易迪拓培训推出的《HFSS 雷达散射截面分析培训课程套装》是从零讲起, 系统地向您讲授如何使用 HFSS 软件进行雷达散射截面分析的全过程。该套视频课程由专家讲授, 边操作边讲解, 直观易学。

### HFSS 雷达散射截面分析培训课程套装



套装包含两门视频培训课程, 其中: 《两周学会 HFSS》培训课程是作为 HFSS 的入门培训课程, 帮助您在最短的时间内迅速熟悉、掌握 HFSS 的实际操作和工程应用; 《HFSS 雷达散射截面(RCS)分析》培训课程是专门讲授如何使用 HFSS 来分析计算雷达散射截面, 包括雷达散射截面、单站 RCS、双站 RCS 等的定义, 实例讲解使用 HFSS 分析单站 RCS、双站 RCS 和宽频 RCS 的相关设置和实际操作等。视频课程, 专家讲授, 从零讲起, 直观易学...

课程网址: <http://www.edatop.com/peixun/hfss/130.html>

### 更多培训课程:

- **HFSS 培训课程**

网址: <http://www.edatop.com/peixun/hfss/>

- **CST 培训课程**

网址: <http://www.edatop.com/peixun/cst/>

- **天线设计培训课程**

网址: <http://www.edatop.com/peixun/antenna/>