

研究简报

ADI-MRTD 算法在新型非对称 共面波导滤波器中的应用

范木杰¹, 房少军², 李晓明²

(1. 长春师范学院 计算机科学与技术学院, 长春 130032; 2. 大连海事大学 信息技术学院, 辽宁 大连 116026)

摘要: 通过给出交替隐式时域多分辨分析算法(ADI-MRTD)公式, 用完全匹配层(PML)作为ADI-MRTD算法的吸收边界条件, 将其应用到非对称共面波导(ACPW)及超宽带ACPW滤波器. 计算及实验结果表明, ADI-MRTD算法与传统FDTD算法相比, 所需计算的网格数量减少, 节省了计算内存, 计算效率更高, 与FDTD计算结果及测量结果相符.

关键词: 交替隐式时域多分辨分析; 完全匹配层; 非对称共面波导; 滤波器

中图分类号: TN814 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-5489(2011)06-1115-04

Application of ADI-MRTD Method on New ACPW Filter

FAN Mu-jie¹, FANG Shao-jun², LI Xiao-ming²

(1. College of Computer Science and Technology, Changchun Normal University, Changchun 130032, China;

2. School of Information Science and Technology, Dalian Maritime University, Dalian 116026, Liaoning Province, China)

Abstract: The authors presented alternating direction implicit multiresolution time-domain (ADI-MRTD) formulation, and implemented perfect matched layer (PML) as absorbing boundary conditions of ADI-MRTD method. The application of the ADI-MRTD method to the calculations of asymmetrical coplanar waveguide (ACPW) and ultra-wideband ACPW filter. The numerical and measured results show the advantages of ADI-MRTD over conventional FDTD method with respect to memory and mesh requirements and execution time, and the numerical result of ADI-MRTD is in agreement with FDTD and measured result.

Key words: alternating direction implicit multiresolution time-domain (ADI-MRTD); perfect matched layer (PML); asymmetrical coplanar waveguide (ACPW); filter

时域有限差分法(FDTD)是解决电磁场问题的一种有效方法. 但FDTD算法为满足稳定性条件对网格尺寸有一定的要求, 对要计算的空间网络划分密度要求必须足够大, 才能保证不受其数值色散的影响. 而当所需计算的物理尺寸较大时, 需要消耗大量的计算机内存和计算时间. 近年来, 将小波分析运用于电磁场数值计算的方法已引起人们广泛关注, 如Krumpholz等^[1]在求解麦克斯韦方程中运用小波多分辨分析方法, 得到了基于尺寸函数的时域多分辨分析算法(MRTD), MRTD算法具有较好的色散特性, 对计算空间网格尺寸划分的大小优于传统的FDTD算法^[2,4], 节省了计算内存, 并提高了计算速度. 针对传统的MRTD算法稳定性问题, 本文将交替隐式差分格式应用到MRTD算法, 使其成为在时间上具有无条件稳定的交替隐式时域多分辨分析(ADI-MRTD)算法, 有效解决了稳定性条件对网

收稿日期: 2010-11-23.

作者简介: 范木杰(1978—), 女, 汉族, 博士研究生, 从事电磁场数值计算的研究, E-mail: fanmujie@126.com. 通讯作者: 房少军(1957—), 男, 汉族, 博士, 教授, 博士生导师, 从事微波技术与微波通信的研究, E-mail: fangshj@dlmu.edu.cn.

基金项目: 国家自然科学基金(批准号: 60771032).

格划分密度的影响.

在电磁场的辐射和散射计算中,边界是开放的,电磁场将占据无限大的空间,因此,需在截断处设置有效的边界条件,使传输到截断处的波被边界吸收而不产生反射.利用 ADI-MRTD 算法计算电磁问题时,由于小波的复杂性,对吸收边界条件的设置也较复杂^[5-7].本文给出完全匹配层(PML)边界条件在 ADI-MRTD 算法中的应用,并结合摩尔(MUR)和理想电导体(PEC)的边界条件,根据计算模型的特点、场分布和不同边界条件设置吸收边界.

1 ADI-MRTD 算法

在理想介质中,麦克斯韦的旋度方程可表示为

$$\begin{cases} \nabla \times \mathbf{H} = \varepsilon \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t}, \\ \nabla \times \mathbf{E} = -\mu \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial t}. \end{cases} \quad (1)$$

将交替隐式方法应用于传统 MRTD 算法中,对麦克斯韦方程中的电场与磁场分量一个时间步的计算分为两步:从第 k 步到第 $k+1/2$ 步和从第 $k+1/2$ 步到第 $k+1$ 步.从第 n 步到第 $n+1/2$ 时间步的电场与磁场迭代公式为

$$\begin{cases} E_{l+1/2,m,n}^{\phi x} = E_{l+1/2,m,n}^{\phi x} + \frac{\Delta t}{2\varepsilon\Delta y} \sum_{i=L}^{L-1} a(i) {}_k H_{l+1/2,m+i+1/2,n}^{\phi z} - \frac{\Delta t}{2\varepsilon\Delta z} \sum_{i=L}^{L-1} a(i) {}_{k-1/2} H_{l+1/2,m,n+i+1/2}^{\phi y}, \\ H_{l,m+1/2,n+1/2}^{\phi x} = H_{l,m+1/2,n+1/2}^{\phi x} - \frac{\Delta t}{2\mu\Delta y} \sum_{i=L}^{L-1} a(i) {}_k E_{l,m+i,n+1/2}^{\phi z} + \frac{\Delta t}{2\mu\Delta z} \sum_{i=L}^{L-1} a(i) {}_{k-1/2} E_{l,m+1/2,n+i}^{\phi y}, \end{cases} \quad (2)$$

从第 $k+1/2$ 步到第 $k+1$ 步的电场与磁场迭代方程为

$$\begin{cases} E_{l+1/2,m,n}^{\phi x} = E_{l+1/2,m,n}^{\phi x} + \frac{\Delta t}{2\varepsilon\Delta y} \sum_{i=L}^{L-1} a(i) {}_k H_{l+1/2,m+i+1/2,n}^{\phi z} - \frac{\Delta t}{2\varepsilon\Delta z} \sum_{i=L}^{L-1} a(i) {}_{k+1/2} H_{l+1/2,m,n+i+1/2}^{\phi y}, \\ H_{l,m+1/2,n+1/2}^{\phi x} = H_{l,m+1/2,n+1/2}^{\phi x} - \frac{\Delta t}{2\mu\Delta y} \sum_{i=L}^{L-1} a(i) {}_k E_{l,m+i,n+1/2}^{\phi z} + \frac{\Delta t}{2\mu\Delta z} \sum_{i=L}^{L-1} a(i) {}_{k+1/2} E_{l,m+1/2,n+i}^{\phi y}, \end{cases} \quad (3)$$

其中 $a(i)$ 为小波系数,本文采用 Daubechies 小波尺度函数, $a(i)$ 值可参见文献[2].

2 PML 边界条件

以 E_x 和 H_x 为例,将麦克斯韦方程中 E_x 和 H_x 的分量分解为 $E_x = E_{xy} + E_{xz}$, 对其进行差分化处理,可得 PML 媒质中从第 k 步到第 $k+1/2$ 步的差分方程为

$$\begin{cases} E_{l+1/2,m,n}^{\phi xy} = \frac{2\varepsilon - \sigma_y \Delta t}{2\varepsilon + \sigma_y \Delta t} {}_k E_{l+1/2,m,n}^{\phi xy} + \frac{\Delta t}{2\varepsilon + \sigma_y \Delta t} \frac{\Delta t}{\varepsilon\Delta y} \sum_{i=L}^{L-1} a(i) {}_k H_{l+1/2,m+i+1/2,n}^{\phi z}, \\ E_{l+1/2,m,n}^{\phi xz} = \frac{2\varepsilon - \sigma_z \Delta t}{2\varepsilon + \sigma_z \Delta t} {}_k E_{l+1/2,m,n}^{\phi xz} - \frac{\Delta t}{2\varepsilon + \sigma_z \Delta t} \frac{\Delta t}{\varepsilon\Delta z} \sum_{i=L}^{L-1} a(i) {}_{k+1/2} H_{l+1/2,m,n+i+1/2}^{\phi y}. \end{cases} \quad (4)$$

本文 ADI-MRTD 算法基于 Daubechies 小波尺度函数, PML 媒质中沿 r 方向的电导率分布函数为

$$\sigma_i(r) = \int_{m-8}^{m+8} \sigma_{\max} \left(1 - \frac{r}{\delta}\right)^2 \phi(r) dr,$$

其中: δ 为 PML 媒质厚度; $\sigma_{\max} = \frac{m+1}{150\pi\Delta \sqrt{\varepsilon_r}}$ 为最大电导率, m 为电导率分布阶数,一般取 $m=4$, 媒质

外侧为理想导体. 第 k 步到第 $k+1/2$ 步及从第 $k+1/2$ 步到第 $k+1$ 步的其他电场和磁场分量可用类似方法得到.

3 数值验证分析

为验证算法的正确性及优越性,将 ADI-MRTD 算法和 PML 边界条件应用到非对称共面波导(ACPW)及非对称共面波导滤波器的计算中,并与传统 FDTD 算法进行对比.本文要计算的 ACPW 结构如图 1 所示^[8], 其中: $s_1=0.6$ mm; $s_2=0.3$ mm; $w=0.4$ mm; 介质厚度为 h .

分别用 FDTD 及 ADI-MRTD 方法计算 ACPW 的特性阻抗,计算过程中均匀划分网格,设置 4 层 PML 边界,边界壁取 PEC 边界,激励源采用脉冲激励

$$\Psi = \exp\left(-\frac{n\Delta t - 200\Delta t}{100\Delta t}\right)^2,$$

计算结果如图2所示, 计算参数列于表1^[7].

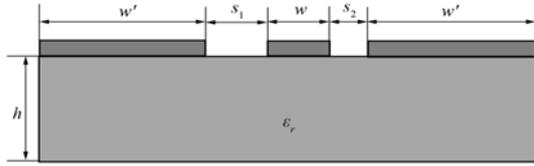


图1 ACPW 结构
Fig.1 Structure of ACPW

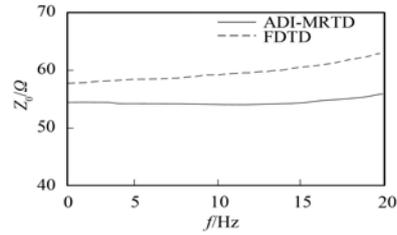


图2 ACPW 特性阻抗计算结果
Fig.2 Calculation results of Z_0 of ACPW

表1 计算参数

Table 1 Calculation parameters

算法	网格数	计算步数	执行时间/s
FDTD	100 × 100 × 120	1 200	833
ADI-MRTD	40 × 40 × 70	1 200	385

由图2和表1可见, ADI-MRTD 算法与传统 FDTD 算法相比, ADI-MRTD 和 FDTD 算法的计算结果相符, 但在相同的计算条件和精度下, ADI-MRTD 可增大网格尺寸, 从而减少计算网格数, 节省了计算内存与时间, 提高了计算效率.

为验证 ADI-MRTD 及 PML 边界条件应用的有效性, 对如图3所示的一种新型 ACPW 结构宽带滤波器进行计算分析^[9]. ACPW 滤波器照片如图4所示.

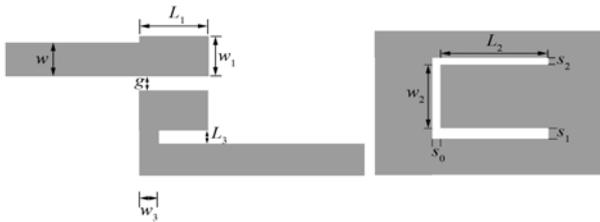


图3 ACPW 滤波器结构
Fig.3 Structure of ACPW filter

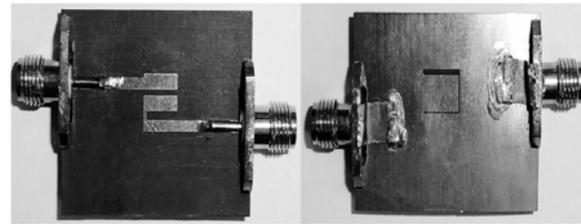


图4 ACPW 滤波器照片
Fig.4 Photograms of ACPW filter

由于 ACPW 中心导带两侧的槽线宽度不同, 因此, 基于 ACPW 设计滤波器时, 可固定一侧槽宽, 同时调节另一侧槽宽, 对滤波器的设计参数进行优化. 本文在设计超宽带 ACPW 滤波器时, 通过调节槽宽可知, s_2 影响高低两个通带边缘特性, s_1 仅影响较低频率的通带边缘. 因此, 先优化 s_2 获得高频端所要求的频率特性, 再优化 s_1 以改善低频端的频率特性. 优化后得到超宽带 ACPW 滤波器的各参数如下:

- $w = 1.23 \text{ mm}, g = 0.4 \text{ mm}, w_1 = 1.7 \text{ mm},$
- $L_1 = 5.7 \text{ mm}, w_2 = 2 \times w_1 + g = 3.8 \text{ mm},$
- $L_2 = 6.8 \text{ mm}, w_3 = 1.0 \text{ mm}, L_3 = 1.8 \text{ mm},$
- $s_0 = 0.1 \text{ mm}, s_1 = 0.3 \text{ mm}, s_2 = 0.6 \text{ mm}.$

滤波器的仿真计算和测试结果如图5所示. 由图5可见, 由于频率较高, 且加工和接头对实际测量值均有一定的影响, 因此测量值与数值计算存在一定的偏差, 但总体趋势相符. 采用 FDTD 和 ADI-MRTD 算法所得仿真计算值一致, 进一步验证了 ADI-MRTD 算法的有效性.

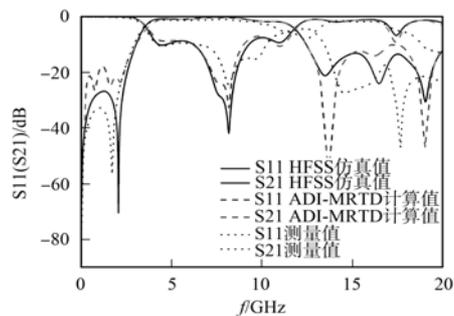


图5 ACPW 滤波器的计算与测量结果
Fig.5 Calculated and measured results of ACPW filter

综上,由 ACPW 的计算结果可知,ADI-MRTD 算法与传统的 FDTD 算法相比,计算网格数量减少,节省了计算内存与计算时间.将 PML 边界条件应用到 ADI-MRTD 算法中,可有效解决复杂尺寸模型的电磁场计算,并验证了该算法的有效性.

参 考 文 献

- [1] Krumpholz M, Katehi L P B. MRTD: New Time-Domain Schemes Based on Multiresolution Analysis [J]. IEEE MTT, 1996, 44(4): 555-571.
- [2] BING Wei-hua, LÜ Wei-dong. Electromagnetism Analysis of Waveguide Aperture Coupling Using the Finite: Difference Time-Domain Method [J]. Journal of Natural Science of Heilongjiang University, 1997, 14(1): 60-64. (邴伟华, 吕卫东. 波导小孔耦合的电磁分析与模拟: 时域有限差分法 [J]. 黑龙江大学自然科学学报, 1997, 14(1): 60-64.)
- [3] WEI Xing-chang, LIANG Chang-hong. Using the MRTD Based on Coifman Scaling Functions to Solve the Problem of Scattering [J]. Acta Electronica Sinica, 2001, 29(12): 1668-1670. (魏兴昌, 梁昌洪. 用基于 Coifman 尺度函数的多分辨时域分析计算电磁散射 [J]. 电子学报, 2001, 29(12): 1668-1670.)
- [4] WANG Shu-zhong. The Algorithm for Computing Connection Coefficients with Daubechies Wavelet [J]. Journal of Natural Science of Heilongjiang University, 2007, 24(3): 403-406. (王树忠. 求基于 Daubechies 小波的关联系数的算法 [J]. 黑龙江大学自然科学学报, 2007, 24(3): 403-406.)
- [5] Sarris C D, Katehi L P B. An Efficient Numerical Interface between FDTD and Haar MRTD: Formulation and Applications [J]. IEEE Trans Microwave Theory Tech, 2003, 51(4): 1146-1156.
- [6] GUO Yi-feng, KONG Fan-min, LI Kang, et al. Implementation and Application of the APML Absorbing Boundary Condition for MRTD Method in Simulation of Planar Waveguide [J]. Journal of Optoelectronics · Laser, 2004, 15(2): 238-241. (郭毅峰, 孔繁敏, 李康, 等. MRTD 算法的 APML 实现及其在光波导仿真中的应用 [J]. 光电子·激光, 2004, 15(2): 238-241.)
- [7] Tentzeris E M, Robertson R L. PML Absorbing Boundary Conditions for the Characterization of Open Microwave Circuit Components Using Multiresolution Time-Domain Techniques (MRTD) [J]. Transactions on Antennas and Propagation, 1999, 47(11): 1709-1715.
- [8] FANG Shao-jun, WANG Bai-suo. A CAD-Oriented Model for Asymmetric Ally Shielded Multilayered CPW [J]. Acta Electronica Sinica, 2002, 30(6): 804-807.
- [9] LI Xiao-ming, FANG Shao-jun, FU Shi-qiang. Ultra-wideband Bandpass Filter Using Hybrid Microstrip/ACPW Structures [C]//3rd IEEE International Symposium on Microwave, Antenna, Propagation and EMC Technologies for Wireless Communications. Beijing: [s. n.], 2009: 1147-1149.