

一种分析微带贴片天线的辛时域有限差分方法

李民权, 吴先良

(1. 安徽大学计算智能与信号处理教育部重点实验室, 安徽合肥 230039;
2. 安徽大学光电信息获取与控制教育部重点实验室, 安徽合肥 230039)

摘 要: 文中研究了在时间上采用 5 级 4 阶差分、空间上采用 4 阶差分的高阶辛时域有限差分 (SFDTD) 数值方法, 给出其三维差分公式. 将吸收边界条件应用于微带天线的计算中, 计算了微带贴片天线的回波损耗及输入阻抗等. 计算结果证明, 该方法的精确性和正确性.

关键词: 微带贴片天线; 辛时域有限差分; 高阶算法; 数值计算

中图分类号: TN820 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2006) 12A-2544-03

An SFDTD Algorithm for the Analysis of Microstrip Patch Antennas

LI Min-quan

(1. Key Laboratory of Intelligent Computation and Signal Processing of Ministry of Education, Anhui University, Hefei, Anhui 230039, China;
2. Key Laboratory of Opto-electronic Information Acquisition and Manipulation of Ministry of Education, Anhui University, Hefei, Anhui 230039, China)

Abstract: In this paper, a high order symplectic finite difference time domain schemes is constructed for Hamilton system, a three-dimensional fifth-stage fourth-order formula of iterative algorithm is proposed. The Return loss and Input impedance of microstrip antenna be calculated using Symplectic finite difference time domain method (SFDTD) and absorbing boundary condition. Calculating results have shown that the SFDTD method is accurate and effective.

Key words: microstrip patch antennas; SFDTD; high order method; numerical analysis

1 引言

微带天线由于其低剖面, 重量轻, 价格便宜, 可以制成多种功能的共形天线, 可集成在设备内部等优点, 已在通信和雷达系统中得到广泛应用. 微带天线的分析基本上是求解天线在周围空间建立的电磁场, 进而求得方向图、增益和输入阻抗等特性指标. 分析微带天线的基本理论大致有: 传输线模型 (TLM)、空腔模型 (CM)、积分方程法 (IEM). TLM 方法是把微带天线的分析简化为一维的传输线问题. 微带线是一种开放线路, 它利用端缝辐射的概念分析辐射机理. CM 理论发展到基于二维边值问题的求解. 将微带贴片与接地板之间的空间看成四周为磁壁, 上下为电壁的谐振腔或者是漏波空腔. 天线辐射场由空腔四周的等效磁流得到. IEM 方法可计入第三维的变化, 以开放空间的格林函数为基础. 随计算机技术的迅速发展, 微带天线的数值计算方法有了越来越广泛的应用. 特别是时域数值计算方法越来越受到重视, 在很多方面显示出独特的优越性. 然而传统的一些高阶差分方法不能保证相空间体积不变和总能量不变, 所以在电磁场计算中会出现场量的耗散现象. 本文给出一种基于辛几何理论的时域有限差分法——辛时域有限差分方法 (SFDTD). 该方法保持了 Hamilton 系

统的基本特征, 保证系统随时间的演化永远是辛变换演进, 从而确保了该数值方法的对称和守恒.

2 三维辛时域有限差分法

Maxwell 方程在无源空间表示为:

$$\begin{cases} \nabla \times \mathbf{H} = \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \\ \nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \end{cases} \quad (1)$$

其中, $\mathbf{D} = \epsilon \mathbf{E}$, $\mathbf{B} = \mu \mathbf{H}$, \mathbf{E} 和 \mathbf{H} 分别为电场强度和磁场强度, ϵ 、 μ 分别为介质的介电常数和磁导率. 将上式写成矩阵形式:

$$\frac{\partial}{\partial t} \begin{pmatrix} \mathbf{D} \\ \mathbf{B} \end{pmatrix} = \mathbf{M} \begin{pmatrix} \mathbf{D} \\ \mathbf{B} \end{pmatrix} = (\mathbf{U} + \mathbf{V}) \begin{pmatrix} \mathbf{D} \\ \mathbf{B} \end{pmatrix} \quad (2)$$

其中, $\mathbf{M} = \begin{pmatrix} \{0\} & -\mathbf{R} \\ \mathbf{R} & \{0\} \end{pmatrix}$
 $\mathbf{U} = \begin{pmatrix} \{0\}_{3 \times 3} & -\mathbf{R} \\ \{0\}_{3 \times 3} & \{0\}_{3 \times 3} \end{pmatrix}$
 $\mathbf{V} = \begin{pmatrix} \{0\}_{3 \times 3} & \{0\}_{3 \times 3} \\ \mathbf{R} & \{0\}_{3 \times 3} \end{pmatrix}$
而 \mathbf{R} 表示 3 维旋度算子:

$$R = \begin{pmatrix} 0 & -\frac{\partial}{\partial z} & \frac{\partial}{\partial y} \\ \frac{\partial}{\partial z} & 0 & -\frac{\partial}{\partial x} \\ -\frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial x} & 0 \end{pmatrix}$$

在时间上,利用辛算法离散,时间在 $[0, t]$ 内,方程(2)的解可表示为:

$$\begin{pmatrix} D \\ B \end{pmatrix} (t) = \exp(tM) \begin{pmatrix} D \\ B \end{pmatrix} \quad (3)$$

由于算子 U 与算子 V 不可交换,即 $UV \neq VU$. 借助辛积分传播子技术^[3,4]进行近似:

$$\exp(tM) = \prod_{l=1}^m \exp(d_l tV) \exp(c_l tU) + O((t)^{n+1}) \quad (4)$$

由于 $U^2=0, V^2=0$, 于是,

$$\begin{cases} \exp(tU) = I_6 + tU \\ \exp(tV) = I_6 + tV \end{cases} \quad (5)$$

式中, I_6 为 6 阶单位矩阵.

于是式(4)可表示为:

$$\exp(tM) = \prod_{l=1}^m (I_6 + d_l tV) (I_6 + c_l tU) + O((t)^{n+1}) \quad (6)$$

其中, c_l, d_l 为传播子系数^[3,5], m, n 分别为近似的级数与阶数.

空间方向的四阶精度离散格式为:

$$\begin{aligned} \frac{\partial^4 f^n(i, j, k)}{\partial x^4} &= \frac{9}{8} \frac{f^n(i + \frac{1}{2}, j, k) - f^n(i - \frac{1}{2}, j, k)}{x} \\ &\quad - \frac{1}{24} \frac{f^n(i + \frac{3}{2}, j, k) - f^n(i - \frac{3}{2}, j, k)}{x} \end{aligned} \quad (7)$$

利用式(7)离散旋度算子 R . 为简便起见,记 m 级 n 阶辛算法结合 4 阶空间离散格式所构的算法为 SFDDID($m; n, 4$). 为了克服电场与磁场幅度的差异,引入归一化电场 $E_p = \sqrt{\frac{\epsilon_0}{\mu_0}} E$. 在 SFDDID(5;4,4) 算法中,从上一时间步到下一时间步,共要经过 5 次迭代,归一化电场的 x 分量 E_{px} 的第次迭代格式为:

$$\begin{aligned} E_{px}^{n+1/5}(i + \frac{1}{2}, j, k) &= E_{px}^{n+(l-1)/5}(i + \frac{1}{2}, j, k) + \frac{1}{r} \{ 1 \times \\ & [H_z^{n+(l-1)/5}(i + \frac{1}{2}, j + \frac{1}{2}, k) - H_z^{n+(l-1)/5}(i + \frac{1}{2}, j - \frac{1}{2}, k) \\ & - H_y^{n+(l-1)/5}(i + \frac{1}{2}, j, k + \frac{1}{2}) + H_y^{n+(l-1)/5}(i + \frac{1}{2}, j, k - \frac{1}{2})] + \\ & 2 \times [H_z^{n+(l-1)/5}(i + \frac{1}{2}, j + \frac{3}{2}, k) - H_z^{n+(l-1)/5}(i + \frac{1}{2}, j - \frac{3}{2}, k) - \\ & H_y^{n+(l-1)/5}(i + \frac{1}{2}, j, k + \frac{3}{2}) + H_y^{n+(l-1)/5}(i + \frac{1}{2}, j, k - \frac{3}{2})] \} \end{aligned} \quad (8)$$

$$r_1 = \frac{9}{8} D_l \times \frac{t}{\sqrt{\mu_0 \epsilon_0}}, \quad r_2 = \frac{-1}{24} D_l \times \frac{t}{\sqrt{\mu_0 \epsilon_0}}$$

磁场 x 分量 H_x 的第 l 次迭代格式为:

$$H_x^{n+1/5}(i, j + \frac{1}{2}, k + \frac{1}{2}) = H_x^{n+(l-1)/5}(i, j + \frac{1}{2}, k + \frac{1}{2}) + r_1$$

$$\begin{aligned} & \times [E_{py}^{n+(l-1)/5}(i, j + \frac{1}{2}, k + 1) - E_{py}^{n+(l-1)/5}(i, j + \frac{1}{2}, k) - \\ & E_{pz}^{n+(l-1)/5}(i, j + 1, k + \frac{1}{2}) - E_{pz}^{n+(l-1)/5}(i, j, k + \frac{1}{2})] + \\ & [E_{py}^{n+(l-1)/5}(i, j + \frac{1}{2}, k + 2) - E_{py}^{n+(l-1)/5}(i, j + \frac{1}{2}, k - 1) - \\ & E_{pz}^{n+(l-1)/5}(i, j + 2, k + \frac{1}{2}) + E_{pz}^{n+(l-1)/5}(i, j - 1, k + \frac{1}{2})] \quad (9) \\ r_1 &= \frac{9}{8} C_l \times \frac{t}{\sqrt{\mu_0 \epsilon_0}}, \quad r_2 = \frac{-1}{24} C_l \times \frac{t}{\sqrt{\mu_0 \epsilon_0}} \end{aligned}$$

其中, $\epsilon_r = \epsilon_r(\omega)$, ϵ_r 为点 $(i + \frac{1}{2}, j, k)$ 处的相对介电常数,若传播系数满足对称关系: $C_l = C_{6-l} (0 < l < 5 + 1)$, $D_l = D_{5-l} (0 < l < 5)$, $D_5 = 0$, 则场值每时间步的迭代次数可由 5 次降为 4 次.

根据已求电磁场,对其进行傅氏变换,得到参考面上频域入射电场和反射电场. 于是天线的参数就可以进一步确定. 如:

$$s_{11} = 20 \log_{10} \frac{E_{ref}(f)}{E_{in}(f)} = 20 \log_{10} \frac{E_{total}(f) - E_{in}(f)}{E_{in}(f)} \quad (10)$$

$$Z_{in} = Z_0 \frac{1 - s_{11} e^{2j\beta L}}{1 - s_{11} e^{2j\beta L}} \quad (11)$$

其中 K 是波数, L 为天线边缘到参考面的距离. Z_0 为微带线的特征阻抗.

3 微带贴片天线计算

采用上述方法,对文献[6]所给天线进行计算,文献中天线的结构及尺寸如图 1 所示. 对图 1 所示微带贴片天线进行分析计算.

微带贴片的长边

为 x 轴,短边为 y 轴,厚度方向选为 z 轴,微带馈电线沿正 y 方向. 介质基片的相对介电常数为 2.33,损耗角正切为 0.0012、厚度为 0.787 毫米. 对图 1 所示的矩形微带天线进行 SFDDID 仿真分析,取空间步长分别为

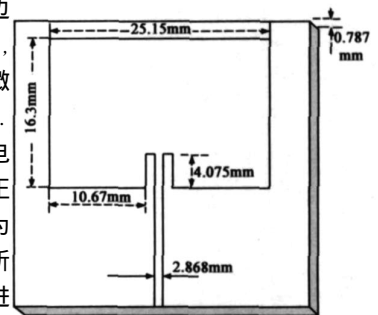


图 1 天线结构图

$x = 0.2625\text{mm}$, $y = 0.762\text{mm}$, $z = 0.4075\text{mm}$, 时间步长取为 $\Delta t = x/2c$. 匹配层数为 8 层. 激励源采用高斯脉冲 $E_z = e^{-\left(\frac{t-t_0}{T}\right)^2}$, 微带线馈电. 其中脉冲参数为 $T = 8\text{ps}$, $t_0 = 3T$. 入

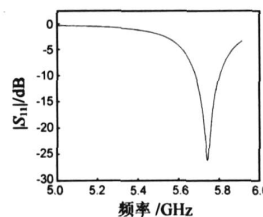


图 2 回波损耗

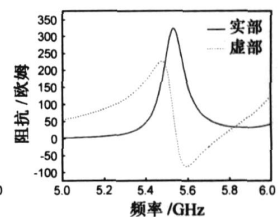


图 3 输入阻抗图

射端口面取在匹配层内 $4y$ 处,参考面取在离贴片边缘 $10y$.微带线长度取 $35y$.采用 SFDID 方法,对文献[6]所给天线进行计算仿真,所得微带天线的回波损耗、输入阻抗如图 2,3 所示.

4 结论

本文从 Maxwell 方程出发,给出了一种 5 级 4 阶,空间 4 阶的高阶 SFDID 方法,研究了一种微带贴片天线,并对其进行了数值分析.由结果可知,SFDID 方法的计算结果与文献的计算和测量结果非常接近,证明该方法的正确性和准确性.该方法及计算结果对于天线优化设计及电磁计算具有一定的参考作用.

参考文献:

- [1] 崔俊海,钟顺时.一种新型小型化微带天线的全波分析[J].电子学报,2002,30(6):910-912.
Cui Jun-hai, Zhong Shun-shi. Full-wave analysis of a novel miniaturized microstrip antenna [J]. Acta Electronica Sinica, 2002,30(6):910-912. (in Chinese)
- [2] Gao S C, Li L W, Yeo T S, et al. Low cost dual linearly-polarized microstrip patch array [A]. IEEE Proceedings-Microwaves, Antennas Propagation [C]. Moscow, Russia: 2001, 148:21-25.
- [3] Hirono T, Wayne Lui, Seki S, Yokhikuni Y. A three-dimensional fourth-order finite-difference time-domain scheme using a symplectic integrator propagator [J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. 2001, 49(9):1640-1648.
- [4] Forest E, Ruth R D. Fourth-order symplectic integration [J]. Physica D, 1990, 43(1):105-117.
- [5] Anderson N, Arthurs A M. Helicity and variational principles for Maxwell's equations [J]. Int J Electron. 1983, 54:861-864.
- [6] Qian Z H, Chen R S. FDTD analysis of microstrip jpatch antenna covered by plasma sheath [A]. Progress In Electromagnetics Research [C]. Hangzhou, China: 2005 PIER 52, 173-183.
- [7] Zhao A P, Juntunen J, Rasanen A V. An efficient FDTD algorithm for the analysis of microstrip patch antennas printed on a general anisotropic dielectric substrate [J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 1999 47(7) Part 1:1142-1146.
- [8] D M Sheen, Sami M Ali, Jin Au Kong. Application of the three-dimensional finite-difference time-domain method to the analysis of planar microstrip circuits [J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. 1990, 38(7), 849-856.

作者简介:

李民权 男,1968年生,安徽大学电子科学与技术学院博士研究生,主要研究方向:天馈技术及电磁散射与目标识别.

E-mail:limq@ahu.edu.cn