

# 共形时域有限差分法在不同形状微带贴片 天线特性分析中的应用

路占波<sup>1</sup>, 张 安<sup>1</sup>, 侯新宇<sup>1</sup>, 章传芳<sup>2</sup>

(1. 西北工业大学, 陕西 西安 710072; 2. 中航雷达与电子设备研究院, 江苏 无锡 214063)

**摘 要:**应用共形时域有限差分法(CFDTD)对不同形状微带贴片天线的特性进行了有效的分析。为了提高计算精度,对天线激励源、导体贴片等组成部分进行了预处理。通过对时域结果的傅立叶变换,得到与频率有关的天线特性参数。实际制作并测试了五角形和椭圆形贴片微带天线的反射损耗和辐射场方向图,并与CFDTD仿真结果进行了比较。结果吻合良好,表明该方法对复杂微带天线的分析非常有效。

**关 键 词:**共形时域有限差分,微带贴片天线,反射损耗,辐射场方向图

中图分类号:TN82

文献标识码:A

文章编号:1000-2758(2007)02-0235-04

微带贴片天线在通信领域具有广泛的应用<sup>[1]</sup>。矩形和圆形微带贴片天线具有相对简单的结构,因此大量研究论文对其进行了深入的研究。为了适应复杂的应用,微带天线贴片的几何形状需采用其它形式。如在某些阵列设计中,为了采用单一馈电得到圆极化的方向图,五角形或椭圆形的微带天线便特别有用。本文针对五角形和椭圆形贴片天线的反射损耗及辐射方向图特性进行分析。全波频域法在解决某些简单的有关不连续性问题方面取得了一定的成功<sup>[2]</sup>,但对于典型微带电路(包括微带天线)的分析却存在较大的困难。CFDTD方法作为一种全波时域法<sup>[3]</sup>,可以在一次计算中仿真整个结构,灵活处理不同类型的微带电路。还可使用宽带脉冲作为激励源,通过对时域结果的傅立叶变换以获得宽频带范围内的频域参数计算结果<sup>[4]</sup>。

## 1 理论分析方法

### 1.1 FDTD 公式

通过把麦克斯韦旋度方程在空间和时间上离散化处理,形成FDTD方法的差分公式,这在以前的许多文献中早已叙述过<sup>[5]</sup>,在此不再赘述。但大部分

差分公式中由于存在1/2空间步,不便于计算机的处理,文献[4]对其进行了一定的修改,表示如下

$$H_{xi,j,k}^{n+1/2} = H_{xi,j,k}^{n-1/2} + \frac{\Delta t}{\mu \Delta x} (E_{yi,j,k}^n - E_{yi,j,k-1}^n) - \frac{\Delta t}{\mu \Delta y} (E_{zi,j,k}^n - E_{zi,j-1,k}^n) \quad (1)$$

$$H_{yi,j,k}^{n+1/2} = H_{yi,j,k}^{n-1/2} + \frac{\Delta t}{\mu \Delta x} (E_{xi,j,k}^n - E_{xi,j,k-1}^n) - \frac{\Delta t}{\mu \Delta z} (E_{zi,j,k}^n - E_{zi,j-1,k}^n) \quad (2)$$

$$H_{zi,j,k}^{n+1/2} = H_{zi,j,k}^{n-1/2} + \frac{\Delta t}{\mu \Delta y} (E_{xi,j,k}^n - E_{xi,j,k-1}^n) - \frac{\Delta t}{\mu \Delta x} (E_{yi,j,k}^n - E_{yi,j-1,k}^n) \quad (3)$$

$$E_{xi,j,k}^{n+1} = E_{xi,j,k}^n + \frac{\Delta t}{\epsilon \Delta y} (H_{yi,j+1,k}^{n+1/2} - H_{yi,j,k}^{n+1/2}) - \frac{\Delta t}{\epsilon \Delta z} (H_{zi,j,k+1}^{n+1/2} - H_{zi,j,k}^{n+1/2}) \quad (4)$$

$$E_{yi,j,k}^{n+1} = E_{yi,j,k}^n + \frac{\Delta t}{\epsilon \Delta x} (H_{xi,i+1,j,k}^{n+1/2} - H_{xi,i,j,k}^{n+1/2}) - \frac{\Delta t}{\epsilon \Delta z} (H_{zi,i,j,k+1}^{n+1/2} - H_{zi,i,j,k}^{n+1/2}) \quad (5)$$

$$E_{zi,j,k}^{n+1} = E_{zi,j,k}^n + \frac{\Delta t}{\epsilon \Delta x} (H_{xi,i+1,j,k}^{n+1/2} - H_{xi,i,j,k}^{n+1/2}) - \frac{\Delta t}{\epsilon \Delta y} (H_{yi,i,j,k+1}^{n+1/2} - H_{yi,i,j,k}^{n+1/2}) \quad (6)$$

式中,场分量的下标*i, j, k*分别表示在*x, y, z*方向上

收稿日期:2006-05-18

作者简介:路占波(1976—),西北工业大学博士生,主要从事电磁理论、天线方面的研究。

的节点数,上标  $n$  表示时间步,电场  $E$  和磁场  $H$  时间上交替计算,介电常数和磁导率的选择取决于每个场分量的位置。对于介质和空气界面处的场分量,介电常数取 2 种介质的平均值  $(\epsilon_0 + \epsilon_1)/2$ ,其处理的有效性在文献[5]中已做了解释。

由于方程的中心差分近似,在空间和时间上的误差是二阶的,对最大时间步  $\Delta t$  的选取要受到有限差分方程的稳定性条件限制。限制条件如下

$$\Delta t \leq \frac{1}{V_{\max}} \left( \frac{1}{\Delta x^2} + \frac{1}{\Delta y^2} + \frac{1}{\Delta z^2} \right)^{-1/2} \quad (7)$$

式中,  $V_{\max}$  是电磁波在计算域内传播的最大速度。

### 1.2 导体的处理(CFDTD 公式)

微带天线由良导体地板、介质基片和其上的导体贴片组成,为了便于分析,假定导体是零厚度的良导体,其上的电场切向分量为零,同时,为了提高计算精度,在微带贴片边缘处的网格采用共形网格处理<sup>[3]</sup>,如图 1 所示。

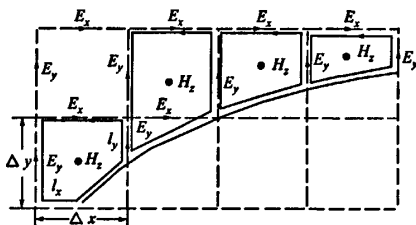


图 1 导体边缘处共形网格结构

其 CFDTD 公式如(8)式所示。在此仅写出  $H_x$  分量(其它类同)。

$$H_{x+1/2,j+1/2,k}^{n+1/2} = H_{x+1/2,j+1/2,k}^{n-1/2} + \frac{\Delta t}{\mu S(i,j,k)} \cdot [E_{x+1/2,j+1,k}^{n+1/2} l_x(i,j,k) - E_{x+1/2,j,k}^{n+1/2} l_x(i,j,k) - E_{x+1/2,j+1/2,k}^{n+1/2} l_y(i+1,j,k) + E_{x+1/2,j+1/2,k}^{n+1/2} l_y(i,j,k)] \quad (8)$$

式中,  $S(i,j,k)$  为共形网格面积,  $l_x$  和  $l_y$  为曲面共形处变形网格  $(i,j,k)$  中除金属以外的网格棱边的长度。当  $l_x = \Delta x$  和  $l_y = \Delta y$  时,  $S(i,j,k) = \Delta x \Delta y$ , 网格即为规则网格。

### 1.3 激励源的处理

由于高斯脉冲的频谱也是高斯函数,可提供从直流到所要求的截断频率的较宽频域信息(通过调整脉冲宽度来实现)。因此,将其作为激励源。其函数如下

$$E_i(t) = \exp(-4\pi(t - t_0)^2/T^2) \quad (9)$$

式中,  $T$  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。

为了仿真电压源激励,需要在激励源所在的平面上施以磁壁,这样,该平面上仅有电场的 2 个切向分量,磁场的切向分量为零,(磁壁外面相距  $1/2$  空间步的  $H_{\text{tan}}$  与磁壁里面相距  $1/2$  空间的  $H_{\text{tan}}$  幅度相等,相位相反),这样,源平面上的切向电场分量很容易通过有限差分方程来计算,对高斯脉冲有较小的影响,如源平面采用电壁,则将使高斯脉冲发生大的变形,具体的缘由分析见文献[4]。

### 1.4 吸收边界

由于计算机只能计算有限区域的场,为了仿真无界空间中场的传播,需在计算域的边界设置吸收边界条件,以防止电磁波的反射。可采用 Mur 一阶和二阶近似吸收边界条件。为了更好地吸收外行波,采用 Berenger 完全匹配层(PML)<sup>[6]</sup>。

### 1.5 与频率有关的参数的计算

通过 FDTD 方法得到其微带电路的暂态结果以后,与频率有关的散射矩阵系数很容易计算得到。

$$[V]^r = [S][V]^i \quad (10)$$

式中,  $[V]^r$  和  $[V]^i$  分别是反射和入射电压矢量,  $[S]$  是散射矩阵。为了完成计算,仿真过程中,要记录馈电端口处每个时间步的电场值。正如文献[4]中所说,当考虑基本模的传播时,假定场值与电压成正比(通过对垂直电场的数值积分很容易得到)。为了得到散射参数  $S_{11}(\omega)$ , 入射和反射波形必须知道。FDTD 仿真计算的是入射和反射波的和。为了得到入射波,从入射和反射波的总和中减去入射波,得到端口 1 的反射波。其它端口将仅仅记录传输波形,不需要这种计算。散射参数  $S_{jk}$  可通过暂态波形的傅立叶变换得到。

$$S_{jk}(\omega) = F\{V_j(t)\}/F\{V_k(t)\} \quad (11)$$

## 2 数值仿真结果

### 2.1 五角形微带贴片天线的仿真

五角形微带贴片天线的尺寸结构如图 2 所示,介质基片厚度为 1.59 mm,  $\epsilon_r$  为 2.55。空间步长  $\Delta x = 0.4$  mm,  $\Delta y = 0.4$  mm,  $\Delta z = 0.2$  mm,整个计算域的网格数取为  $200 \times 200 \times 75$ 。在涉及到贴片边缘处场的计算时,采用共形网格,在空气与介质分界面处,介电常数取两者的平均值,以减少计算误差。采用同轴线馈电。使用高斯脉冲激励。馈电点选在如图所示的边缘上。时间步  $\Delta t = 0.5$  ps,高斯脉冲宽度  $T = 30$  ps,  $t_0$  取  $3T$ ,仿真执行 9 000 步。完成后,对时

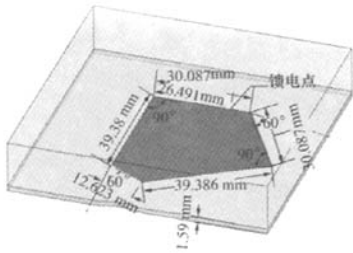


图 2 五角形微带贴片天线结构

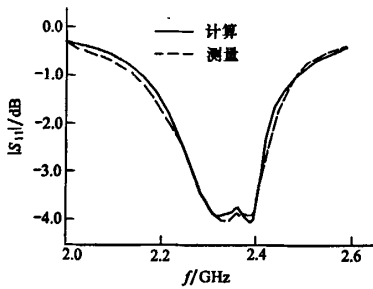


图 3 五角形微带天线的反射损耗

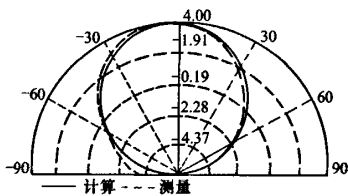


图 4 五角形微带天线的辐射方向图( $\Phi=90^\circ$ 处)

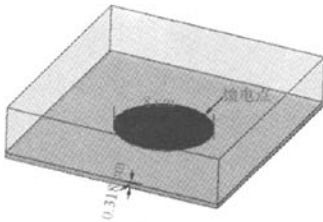


图 5 椭圆形微带天线的结构

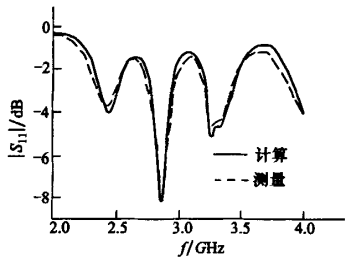


图 6 椭圆形微带天线的反射损耗

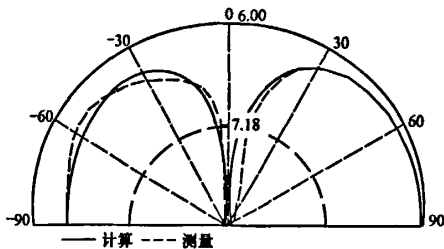


图 7 椭圆形微带天线的辐射方向图( $\Phi=90^\circ$ 处)

域结果进行一定的处理和傅立叶变换,可得到天线的反射损耗曲线,如图 3 所示。从图中可看出,其谐振频率为 2.39 GHz。经近场到远场的转换处理<sup>[3]</sup>,可得到谐振频率处的辐射方向图,如图 4 所示(在  $\Phi=90^\circ$  处)。与实测结果进行比较,匹配较好。

2.2 椭圆形微带贴片的仿真

椭圆形微带天线的尺寸结构如图 5 所示。长轴尺寸为 8 cm,短轴与长轴之比为 0.976,介质基片厚度为 3.18 mm, $\epsilon_r$  为 2.41,馈电点选在与长轴夹角为  $45^\circ$  的边缘处(直线  $y=x$  与椭圆边缘的交点),空间和时间步长的选取,激励源的选取和对贴片边缘的处理都分别同上,仿真执行 8 000 步,完成后,对时域结果进行一定的处理和傅立叶变换,可得到天线的反射损耗曲线,如图 6 所示,从图中可看出,其谐振频率发生在  $f=2.86$  GHz 处。然后,经近场到远场的转换处理,可得到谐振频率处的辐射方向图,如图 7 所示。可看出,计算与实测结果匹配较好。

3 结 论

从不同的分析结果来看,该算法可有效地应用于不同形状微带贴片天线的特性分析。该算法可以在一次计算中仿真整个结构,通过采用宽带脉冲作为激励源,来获得宽频带范围内频域参数的计算结果。表明该方法是一种解决任意复杂微带结构的行之有效的办法。

## 参考文献:

- [1] Bahl I J, Bhartia P. Microstrip Antenna. Norwood, Massachusetts: Artech House Inc, 1980
- [2] Katehi P B, Alexopoulos N C. Frequency Dependent Characteristics of Microstrip Discontinuities in Millimeter-Wave Integrated Circuits. IEEE Trans on Microwave Theory and Techniques, 1985, 33(10): 1029~1035
- [3] 葛德彪, 闫玉波. 电磁波时域有限差分方法. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2002
- [4] Sheen D M, Sami M A. Application of the Three Dimensional Finite Difference Time Domain Method to the Analysis of Planar Microstrip Circuits. IEEE Trans on Microwave Theory and Techniques, 1990, 38(7) ,849~857
- [5] Zhang X, Mei K K. Time Domain Finite Difference Approach to the Calculation of the Frequency Dependent Characteristics of Microstrip Discontinuities. IEEE Trans on Microwave Theory and Techniques, 1988, 36(12): 1775~1787
- [6] Berenger J P. Three Dimensional Perfectly Matched Layer for the Absorption of Electromagnetic Waves. Computer Physics, 1996, 127(2), 363~369

## Applying CFDTD(Conformal Finite Difference Time Domain) Method to Analyzing Microstrip Patch Antenna with Complicated Patch Shape

Lu Zhanbo<sup>1</sup>, Zhang An<sup>1</sup>, Hou Xinyu<sup>1</sup>, Zhang Chuanfang<sup>2</sup>

( 1. Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China )  
( 2. Radar and Avionics Institute of AVIC, Wuxi 214063, China )

**Abstract:** Aim. Most theoretical papers on microstrip patch antenna have been concerned with rectangular or circular patch, but more complicated patches such as pentagon and ellipse have appeared in some important applications. We now apply CFDTD (conformal finite difference time domain) method to theoretically analyzing microstrip patch antenna whose patch shape is more complicated. Section 1 in the full paper introduces theoretical analysis. In subsection 1. 1, we point out that eqs. (1) through (6), taken from Ref. 4 authored by D. M. Sheen et al, are FDTD(finite difference time domain) formulas convenient for computer processing. Subsection 1. 2 presents CFDTD formulas derived by us for treating the conductor portion of microstrip antenna; the formulas are three in number and eq. (8) in the full paper gives only CFDTD formula for the Hz component. Subsection 1. 3 describes the treatment of excitation in order to acquire results in broad frequency range. Subsection 1. 4 describes the treatment of absorbing boundary conditions. Subsection 1. 5 explains how to transform data in time-domain into data in frequency-domain. Section 2 gives two simulation examples for testing accuracy of the above-mentioned theoretical methods. Subsections 2. 1 and 2. 2 deal with pentagonal patch antenna and elliptical one respectively. Return-loss simulation results are given in Fig. 3 (pentagonal patch) and Fig. 6 (elliptical patch). Radiation pattern simulation results are given in Fig. 4 (pentagonal patch) and Fig. 7 (elliptical patch). Theoretical analysis in section 1 and simulated results in section 2 show that the method is an efficient tool for modeling complicated microstrip structure.

**Key words:** CFDTD(conformal finite difference time domain), microstrip patch antenna, return loss, radiation pattern

## 如何学习天线设计

天线设计理论晦涩高深, 让许多工程师望而却步, 然而实际工程或实际工作中在设计天线时却很少用到这些高深晦涩的理论。实际上, 我们只需要懂得最基本的天线和射频基础知识, 借助于 HFSS、CST 软件或者测试仪器就可以设计出工作性能良好的各类天线。

易迪拓培训([www.edatop.com](http://www.edatop.com))专注于微波射频和天线设计人才的培养, 推出了一系列天线设计培训视频课程。我们的视频培训课程, 化繁为简, 直观易学, 可以帮助您快速学习掌握天线设计的真谛, 让天线设计不再难...



### HFSS 天线设计培训课程套装

套装包含 6 门视频课程和 1 本图书, 课程从基础讲起, 内容由浅入深, 理论介绍和实际操作讲解相结合, 全面系统的讲解了 HFSS 天线设计的全过程。是国内最全面、最专业的 HFSS 天线设计课程, 可以帮助你快速学习掌握如何使用 HFSS 软件进行天线设计, 让天线设计不再难...

课程网址: <http://www.edatop.com/peixun/hfss/122.html>

### CST 天线设计视频培训课程套装

套装包含 5 门视频培训课程, 由经验丰富的专家授课, 旨在帮助您从零开始, 全面系统地学习掌握 CST 微波工作室的功能应用和使用 CST 微波工作室进行天线设计实际过程和具体操作。视频课程, 边操作边讲解, 直观易学; 购买套装同时赠送 3 个月在线答疑, 帮您解答学习中遇到的问题, 让您学习无忧。

详情浏览: <http://www.edatop.com/peixun/cst/127.html>



### 13.56MHz NFC/RFID 线圈天线设计培训课程套装

套装包含 4 门视频培训课程, 培训将 13.56MHz 线圈天线设计原理和仿真设计实践相结合, 全面系统地讲解了 13.56MHz 线圈天线的工作原理、设计方法、设计考量以及使用 HFSS 和 CST 仿真分析线圈天线的具体操作, 同时还介绍了 13.56MHz 线圈天线匹配电路的设计和调试。通过该套课程的学习, 可以帮助您快速学习掌握 13.56MHz 线圈天线及其匹配电路的原理、设计和调试...

详情浏览: <http://www.edatop.com/peixun/antenna/116.html>



## 关于易迪拓培训:

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,一直致力和专注于微波、射频、天线设计研发人才的培养;后于 2006 年整合合并微波 EDA 网([www.mweda.com](http://www.mweda.com)),现已发展成为国内最大的微波射频和天线设计人才培养基地,成功推出多套微波射频以及天线设计经典培训课程和 ADS、HFSS 等专业软件使用培训课程,广受客户好评;并先后与人民邮电出版社、电子工业出版社合作出版了多本专业图书,帮助数万名工程师提升了专业技术能力。客户遍布中兴通讯、研通高频、埃威航电、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。

## 我们的课程优势:

- ※ 成立于 2004 年, 10 多年丰富的行业经验
- ※ 一直专注于微波射频和天线设计工程师的培养,更了解该行业对人才的要求
- ※ 视频课程、既能达到了现场培训的效果,又能免除您舟车劳顿的辛苦,学习工作两不误
- ※ 经验丰富的一线资深工程师主讲,结合实际工程案例,直观、实用、易学

## 联系我们:

- ※ 易迪拓培训官网: <http://www.edatop.com>
- ※ 微波 EDA 网: <http://www.mweda.com>
- ※ 官方淘宝店: <http://shop36920890.taobao.com>