

一种渐变开槽的波导缝隙天线的 CFDTD 分析

佟 浩 徐晓文 何 芒

北京理工大学 电子工程系

tong_hao@263.net

摘要: 本文基于一种局部网格渐变的共形 FDTD 技术 (Conformal Finite-Difference Time-Domain) 分析了一种新型的渐变开缝的波导缝隙天线。通过对不规则缝隙边缘进行精确的数值建模, 仔细分析得到了缝隙发生渐变以及不同形状的渐变缝隙的近场特性参数。通过结果对比, 说明了 CFDTD 在分析这类复杂形状物体边缘时所具有的简单有效的特点。

关键词: CFDTD 波导缝隙天线 渐变缝隙

一、引言

波导缝隙天线的单元形式是多种多样的。从波导形式上说有方波导, 圆波导以及脊形波导, 在共形天线中, 还有特殊形式的波导。从开缝形式上说, 常用的可以分为宽边开缝、窄边开缝。宽边开缝又包括宽边纵缝(包括圆头纵缝)、偏置斜缝即复合缝, 以及宽边的偏置交叉缝等形式。

对波导缝隙辐射问题的研究, 自 Stevenson 提出缝隙阻抗理论开始, 到 R.W.Lyon 和 A.J.Sangstor 提出的 Galerkin 法, 经历准静态法、变分法和矩量法的缝隙分析理论已经趋于完善。矩量法分析缝隙天线的过程, 是求解用格林函数方法在电磁场边值条件下推导出的一组耦合积分方程, 从而得到缝隙上下表面的切向场。矩量法在分析波导缝隙天线上面的难易程度, 取决于格林函数技术、具体的缝隙形状以及边值条件, 对于复杂的缝隙形状, 使用矩量法分析将很复杂。

时域有限差分 (FDTD) 飞速发展, 尤其是随着近些年一些共形算法的提出, 使得 FDTD 在分析一些具有复杂边缘的物体上面显示出它的灵活有效的特点。本文采用了一种基于局部网格渐变的 CFDTD (conformal-FDTD) 方法, 对具有渐变开缝形状的波导裂缝天线做了精确的建模分析。

二、基于局部网格渐变的 CFDTD 技术及数值模型的建立

1 基于局部网格渐变的 FDTD 共形算法

阶梯近似 (staircase approximation) 用来描述曲边物体时, 由于其方法所决定, 一方面, 即使网格尺寸取得很小时仍然无法消除引入的误差; 另一方面, 随着网格的细化, 所需要的计算机内存和计算时间都会成倍的增加。

为了改善阶梯近似存在的缺点而又不引入复杂的非正交曲线坐标系, 在文献[4]中使用了一种围线路径积分的所谓 CP-FDTD (contour-path FDTD), 它只对单个 Yee 网格的局部作改变, 以模拟任意曲边形状的物体。但是, 由于采用了最近邻居场借代 (nearest neighborhood borrowing) 的办法, 虽然有多篇文献提出过改进的方法, 但是其在算法本质上是不稳定的。

文献[1][2]中, S.Dey, Raj Mittra 等人提出了如下的 CFDTD 方法(见图 1 ○—金属谐振腔外部, ●—金属谐振腔内部, 黑线部分为 1/4 金属谐振腔边缘), 这种方法在非变形网格区域, 电场和磁场采用普通的 FDTD 迭代格式, 在变形区域部分, 电场 E 的迭代格式仍然保持不变, 磁场 H 的迭代格式作以下修改:

$$H_z^{n+1/2}(i, j, k) = H_z^{n-1/2}(i, j, k) + \frac{\Delta t}{\mu \times \text{Area}(i, j, k)} \times \left[\begin{array}{l} E_x^n(i, j, k) \times l_x(i, j, k) \\ -E_x^n(i, j-1, k) \times l_x(i, j-1, k) \\ -E_y^n(i, j, k) \times l_y(i, j, k) \\ +E_y^n(i-1, j, k) \times l_y(i-1, j, k) \end{array} \right]$$

l_x, l_y 表示其所在变形网格处金属内部的长度。 $\text{Area}(i, j, k)$ 表示相应变形网格的面积。

这样一种共形网格的方法，既可以准确的描述物体边缘形状，又避免了借用邻居场所带来的数值不稳定，同时保留了传统 FDTD 简单紧凑的迭代格式，方便使用统一的 UPML 来编写程序。文中采用这样的共形网格的方法对较复杂的缝隙形状进行了建模分析。

2 模型建立、波源设置及吸收边界

本文采用图 1 所示的模型，波导外部 6 个面采用 10 层 PML 吸收边界来模拟外部空间，可达到很好的效果。波导两端头一直插入至与 PML 层底部相接。

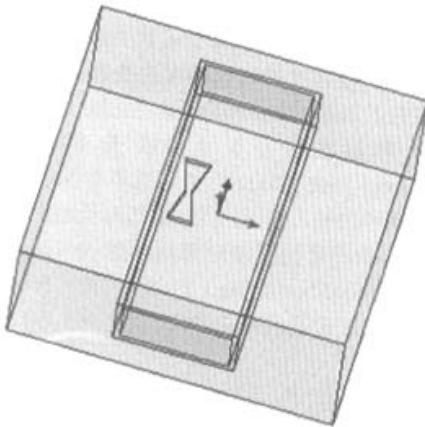


图 1

激励源采用无内阻型电流源，又称穿透式电流源。这种激励源的加载是直接将源信号加到电场当中，相比用强迫源和总场-散射场体系，使用起来比较方便。即：

$$E_z^{n+1}(i, j, k) = g(n\Delta t) + \frac{\Delta t}{\epsilon_z(i, j, k)}$$

$$\times \left[\begin{array}{l} \frac{H_y^{n+1/2}(i+1, j, k) - H_y^{n+1/2}(i, j, k)}{\Delta x(i)} \\ - \frac{H_x^{n+1/2}(i+1, j, k) - H_x^{n+1/2}(i, j, k)}{\Delta y(i)} \end{array} \right]$$

其中 $g(n\Delta t)$ 为激励函数，为保证波导的主模传输， $g(n\Delta t)$ 采用了时间和空间双调制的高斯脉冲：

$$g(n\Delta t) = \sin\left(\frac{\pi x}{a}\right) \times \sin(2\pi f_0 t) \exp\left[-\left(\frac{t-t_0}{\tau}\right)^2\right]$$

波导横截面为正弦分布，调节 f_0, t_0, τ 可以控制 Gauss 脉冲的频谱分布。

这种源的入射波是激励函数叠加在电场上，入射波并不等于激励函数，在时域波形响应上会长于强迫源激励和总场-散射场的情况。

三、实用波导宽边圆头纵缝的分析比较

由于工程实用上的波导纵向开缝的天线，端头都是机床铣出来的圆头形。而对缝隙的理论分析中，为了使积分方程简单，往往采用方头缝近似，近似的方式一般采用等面积近似和等周长近似两种方法。图 2 中用 CFDTD 对圆头缝隙进行了数值分析，并以圆头缝隙为准，比较了对其作等面积和等周长等效所得到的方头缝隙的 S 参数。从中可以看出用两种方头缝来等效圆头缝时结果的差异。作为比较，图中对比了 Ansoft HFSS 的计算结果。

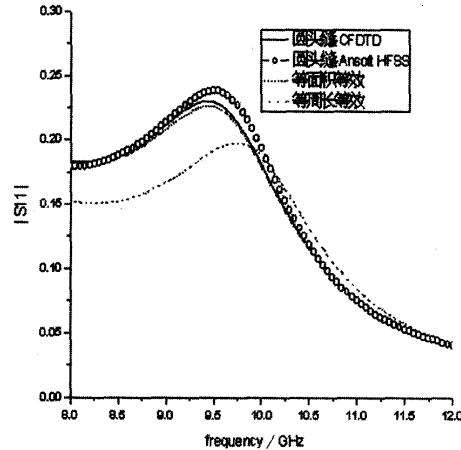


图 2

圆头缝隙长度为 $\lambda_0/2=15.7851$ mm, 缝隙中心偏离波导中心 6.35 mm, 本文选用的波导均为 WR-90 标准 X 波段矩形波导管, 内截面尺寸 22.86mm×10.16mm, 波导壁厚为 1.27mm。

四、对线性渐变(Linear-Tapered)缝隙的分析

随着直边缝隙的两边沿着某一角度逐渐张开时, 缝隙天线的谐振频率、缝隙的谐振长度、S 参数等一些近场参数都会随之发生改变。图 3 给出了同缝长 (15.7851mm)、不同张角的 S 参数曲线(在张角为 9.2deg 时给出了 Ansoft HFSS 结果对比)。

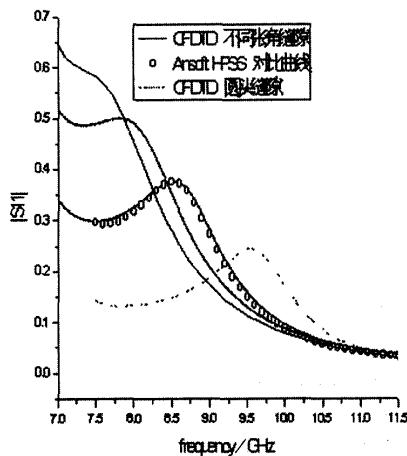


图 3

图 4 给出了在同一谐振频率的条件下, 不同张角缝隙近场 S 参数的区别, 同时在表 1 给出了这种情况下不同张角的缝隙谐振长度的变化。

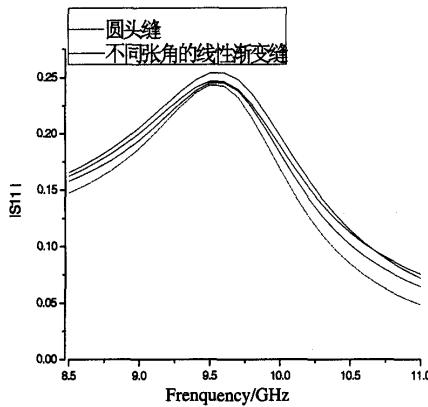


图 4

图 3 中可以看出, 相比同长度的圆头缝隙, 随着张开角度的增加, 线变缝隙的谐振频率出现比较剧烈的下偏, 张角越大, 频偏也越大。表 1 表明, 张角越大在同一谐振频率上的谐振长度越短。另外, 从图 4 中渐变缝和圆头缝 S11 的比较来看, 随张角加大, 天线的带宽将有所增加。

表 1

	缝隙张角 / (°)	谐振长度 / mm	谐振频率 / GHz
圆头缝隙	0.00	15.78	9.53
渐变缝隙	9.20	13.75	9.53
渐变缝隙	18.28	12.75	9.53
渐变缝隙	27.14	11.96	9.53

五、外延锥形(Vivaldi)开缝形状分析对比

相比上面的线性锥形渐变缝隙, 图 5 所示的是一种非线性的外延锥形形状缝隙, 可以用分析线性渐变类似的方法来分析。

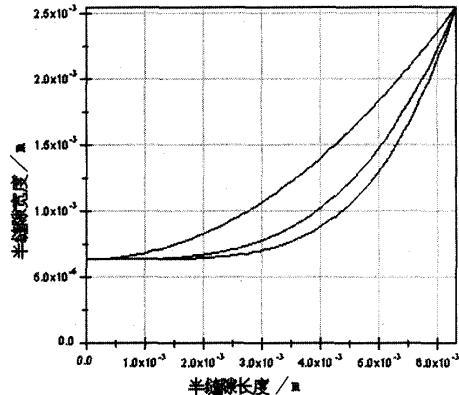


图 5

图 6 中, 对比了如图 5 所示的不同曲率形状的缝隙, 在缝隙长度和缝隙端头宽度相等的情况下近场参数的差异。随着缝隙曲率的增加, 谐振频率会略有上偏, 但是相比缝隙张角变化的影响, 敏感程度要小。

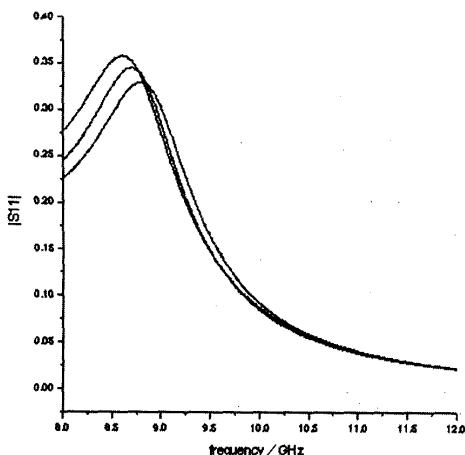


图 6

六、结论

本文对一种新型的渐变形状的波导开缝天线通过精确数值建模，分析了其近场特性。通过以上对复杂形状物体边缘的分析可以看出，CFDTD 在分析这一类问题时，相比矩量法具其特有的优势。而且由于采用了局部网格渐变，程序上可以方便地对传统的 FDTD 作修改来实现，从而避免了采用非正交曲线坐标系等一些较复杂方法。

需要说明的是，这种方法在变形网格面积过小 ($<1.5\%$) 或者非常狭细的情况下，将出现算法上面的不稳定，但是都可以通过恰当得选择网格划分和尺寸来加以避免，从而体现其优点。

参考文献

- [1] S Dey, R Mittra and S Chebolu. "A technique for implementing the FDTD algorithm on a nonorthogonal grid," *Microwave Opt. Technol. Lett.*, vol. 14, no. 4, pp. 213-215, Mar. 1997.
- [2] S Dey and R Mittra, "A locally conformal finite-difference time-domain (FDTD) algorithm for modeling three-dimensional perfectly conducting objects," *IEEE Microwave Guided Wave Lett.*, vol. 7, pp. 273-275, Sept. 1997.
- [3] W Yu and R Mittra, "A conformal FDTD software package modeling antennas and microstrip circuit components," *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, vol. 42, pp. 28-39, Oct. 2000.
- [4] T G Jurgens and A Taflove. "Three-dimensional contour FDTD modeling of scattering from single and multiple bodies," *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, vol. 41, pp. 1703-1708, Dec. 1993.
- [5] 李龙, 张玉, 梁昌洪. 波导宽边缝隙天线的改进共形 FDTD 分析. *电子学报*, 2003, 31 (6)
- [6] 梁宏宇, 冯正和, 杨弃疾. 矩形波导宽边偏置交叉缝研究. *电波科学学报*, 1998-9, 13 (3)
- [7] A. P. Zhao and Antti V. Raisanen, "Application of a simple and Efficient Sourcee Excitation Technique to the FDTD Analysis of Waveguide and Microstrip Circuits", *IEEE Trans Microwave Theory and Techniques*, vol44, No.9, sep. 1996
- [8] 付云起, 袁乃昌, 张国华. 渐变开槽相控阵天线的 FDTD 分析. *电波科学学报*, 第 16 卷第 3 期, 2001 年 9 月

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)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)由数名来自于研发第一线的资深工程师发起成立，一直致力于专注于微波、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)，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>