

# 大尺寸天线的 FDTD 仿真

陈鹏, 刘大刚, 祝大军

(电子科技大学 物理电子学院 四川 成都 610054)

**摘要:**在三维 Yee 网格模型以及蛙跳模型基础上,分析了使用 FDTD 方法对天线的计算,重点讨论了非均匀网格技术和近远场转换原理,同时还研究了激励源以及吸收边界条件的具体实现办法。最后,以大尺寸喇叭天线为例,用理论和实验结果验证了计算方法的正确性,解决了大尺寸天线的 FDTD 仿真问题。

**关键词:**时域有限差分法(FDTD);近远场转换;非均匀网格;大尺寸天线;吸收边界条件

中图分类号:TN82

文献标识码:B

文章编号:1004-373X(2007)17-032-03

## FDTD Simulation of Great Dimension Antenna

CHEN Peng, LIU Dagang, ZHU Dajun

(School of Physical Electronics, University of Electronic Science &amp; Technology of China, Chengdu, 610054, China)

**Abstract:** Great dimension aperture antennas such as horn antennas are very important in the HPW research. These antennas generally used to be sources for other antennas. Using FDTD to simulate great caliber antenna is based on near-far field transform and no uniform mesh grid. At last, the results of simulation and experiment are given. The results can prove that using this method to simulate great dimension aperture antennas is feasible.

**Keywords:** FDTD; far to field transformation; no uniform mesh grid; great dimension antenna; absorbing boundary condition

随着高速大容量计算机技术的快速发展,计算机粒子模拟技术得到了更广泛的研究,目前国外有 Magic 等成熟的商业软件。但 Magic 软件还不能实现对天线的模拟,同时天线又是发射高功率微波必不可少的器件。目前,也有 CST, HFSS 等商业软件可以对天线进行仿真,这类软件的缺点是网格划分小而且不能人为调整局部网格大小,导致天线的尺寸不能太大。所以,研究如何实现对大尺寸高功率微波天线的仿真就非常重要。本文通过重点分析非均匀网格和近远场转换技术,实现了对大尺寸天线的 FDTD 仿真。

## 1 FDTD 法计算天线基本原理

### 1.1 3D Yee 网格模型和蛙跳模型

图 1 为三维 Yee 网格模型<sup>[1]</sup>,在模型中根据坐标方向的不同将磁场和电场放在全网格点或半网格点上,这样,每个磁场矢量都由 4 个电场矢量环绕,而每个电场矢量也都由 4 个磁场矢量环绕的 Yee 网格模型。

图 2 是三维模拟的时间离散模型(蛙跳模型)。即在每个网格点上各场分量的新值依赖于该点在前一时间步长时刻的值及该点周围临近点上另一场分量早半个时间步长时刻的值。

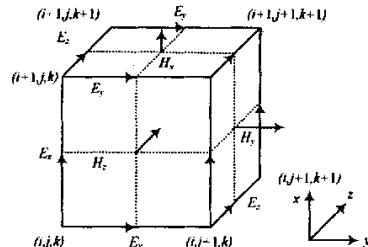


图 1 三维 Yee 网格模型

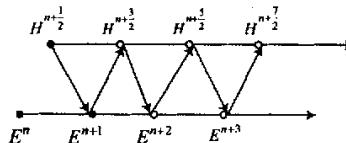


图 2 蛙跳模型

### 1.2 三维场算法

根据图 1 和图 2 所示的空间和时间模型,用中心差分来表示函数对时间和空间的偏导,则麦克斯韦旋度方程通过离散后可以简化为我们熟知的差分方程。但对大尺寸器件,采用全局细网格时将使计算量非常庞大。根据稳定性条件网格小,  $\Delta t$  也会很小,又带来了计算时间长的问题。所以此处采用渐变非均匀网格。根据麦克斯韦积分方程可以得到非均匀网格的差分格式<sup>[2]</sup>:

收稿日期:2007-04-10

基金项目:国家 863 计划项目资助课题(2004AA832101)

$$\begin{aligned}
 & \frac{(H_x)_{i+1/2,j+1/2,k}^{n+1/2} - (H_x)_{i+1/2,j+1/2,k}^{n-1/2}}{\Delta t} \\
 & = \frac{(E_x)_{i+1/2,j+1/2,k}^n - (E_x)_{i+1/2,k}^n - (E_y)_{i+1/2,j+1/2,k}^n - (E_y)_{i+1/2,k}^n}{\Delta y_i \mu_{i+1/2,j+1/2,k}} \\
 & \frac{(E_x)_{i,j,k+1/2}^{n+1} - (E_x)_{i,j,k+1/2}^n}{\Delta t} \\
 & = \frac{(H_x)_{i,j-1/2,k+1/2}^{n+1/2} - (H_x)_{i,j+1/2,k+1/2}^{n+1/2}}{h_x \epsilon_{i,j,k+1/2}} \\
 & \frac{(H_y)_{i+1/2,j,k+1/2}^{n+1/2} - (H_y)_{i-1/2,j,k+1/2}^{n+1/2}}{h_x \epsilon_{i,j,k+1/2}}
 \end{aligned}$$

式中,  $\Delta y_i$  和  $\Delta x_i$  就是  $x$  和  $y$  方向变化的网格步长,  $h_x$  和  $h_y$  为辅助网格中各网格点之间的边长, 其值为:

$$h_x = \frac{\Delta x_i + \Delta x_{i-1}}{2} \quad h_y = \frac{\Delta y_i + \Delta y_{i-1}}{2}$$

其余几个分量也具有相似形式。

CST 等商业软件也采用渐变非均匀网格, 但在模拟大尺寸器件尤其是尺寸精度比较高的器件时误差较大。最主要的原因在于相关软件不能人为调整局部网格大小。本文中考虑到了上述问题, 采用了 Pade 算法<sup>[1]</sup>。首先保证器件边界附近为细网格, 同时将器件根据结构复杂程度划分不同部分, 对器件的各个部分根据需要设置不同的网格大小。这样就可以使器件边界附近为细网格, 远离边界的地方为粗网格, 而且复杂部分为细网格, 简单部分为粗网格, 各部分网格大小相对比较独立, 可以为器件准确建模。

Pade 算法可以简单由下式表示:

$$XNHG(IN) = XNFG(IN-1) + \frac{AL \times FINT}{1 + BL \times FINT}$$

其中,  $XNHG(IN)$  表示第  $IN$  个半网格点,  $XNFG(IN)$  表示第  $IN$  个全网格点,  $FINT$  表示区域中当前网格点。  $AL$  和  $BL$  分别由下式给出:

$$AL = DL$$

$$BL = (DL \times INTN - DS) / (DS \times INTN)$$

其中,  $DL$  为第一个网格大小,  $DS$  为区域全长,  $INTN$  为区域网格数量。同理, 对于全网格点的值可以用类似方法得到。所以, 只要我们可以确定区域内全长、网格数量和第一个网格大小, 就可以在此区域内自动划分非均匀网格。此种方法可以有效解决大尺寸器件的网格划分问题。

为了得到稳定数值解,  $\Delta t$  必须满足:

$$\Delta t \leq \frac{1}{c \sqrt{1/\Delta x^2 + 1/\Delta y^2 + 1/\Delta z^2}}$$

对于非均匀网格, 网格步长取最小值。同时在设置非均匀网格大小时要注意网格尺寸不能变化太快, 为了避免由于数值色散造成的伪折射误差, 在全局网格中还必须满足  $0.5 \Delta x_{i+1} \leq \Delta x_i \leq 2 \Delta x_{i+1}$ 。

### 1.3 近远场转换

通常, 近远场转换有两类: 时域近远场转换和频域近远场转换。由于要节省计算时间, 所以这里采取频域转

换。频域转换不需要在每个时间步中进行, 可以采用数据后处理的办法, 后处理的计算时间相对于迭代计算时间来说可以忽略不计, 可以节省计算时间。

不管用哪种转换, 要获得远场的辐射场则必须都要应用等效原理<sup>[4]</sup>。对等效原理不再赘述, 下面仅以二维 TE 波为例研究如何实现近远场转换。

对于二维 TE 波存在  $E_x$ ,  $E_y$  和  $H_z$  分量, 则相应的等效电、磁流分量就可以求出。等效原理如图 3 所示。

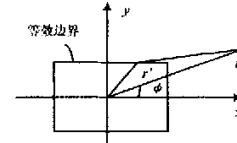


图 3 存储边界外推远场(二维)

以右等效边为例:

$$J_y = -H_z \quad J_m = -E_x$$

则相应的电流矩和磁流矩可以离散化为:

$$f_y = \Delta y \sum (-H_z(i, j_0) \exp(jk_j \Delta y \sin \varphi)) \times$$

$$\exp(jk_i \Delta x \cos \varphi)$$

$$f_m = \Delta y \sum (-E_x(i_0, j) \exp(jk_i \Delta x \cos \varphi)) \times$$

$$\exp(jk_j \Delta y \sin \varphi)$$

同时由等效原理可以得到远场磁场为:

$$H_z = -jkA_z - j\omega \epsilon F_z$$

利用电流矩和磁流矩可以得到:

$$H_z = -\frac{\exp(-jkr)}{2\sqrt{2\pi kr}} jk \left( \frac{f_m}{Z} + f_p \right)$$

将离散化的磁流矩和电流矩代入上式, 并利用直角坐标和柱坐标的变换, 最终可以得到远场离散后的表达式:

$$H_z = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{jk}{2\pi r}} \exp(-jkr) (-f_p \sin \varphi + f_m \cos \varphi + \frac{1}{Z} f_m)$$

其中  $Z = \sqrt{\mu/\epsilon}$  为波阻抗。

对于其他 3 个等效边同理求出相应的磁流矩和电流矩就可以求出相应的远场, 将 4 个远场进行叠加就可以求出总辐射场。

对于三维问题, 总共有 6 个等效面, 按照上述原理分别求出每个等效面的等效电流和等效磁流, 将每个面的辐射远场叠加也可以求出远区辐射总场。

吸收边界条件采用 Gedney 完全匹配层(PML)模型来实现。激励源采用调制高斯波, 此种激励源的频谱既有比较好的平滑性同时也不包括直流成分。为了克服强迫激励源引起虚假反射, 在激励脉冲几乎衰减为零, 来自结构的反射波到达源点之前, 将激励去掉, 激励源网格点场值的刷新换用标准 FDTD 公式据仿真的频谱范围和脉冲宽度。

### 2 模拟验证

以一个大口径喇叭天线为例进行天线模拟, 其结构如

图4所示。其中 $D_1$ 为50 mm,  $D_2$ 为85.142 mm,  $D_3$ 为207 mm,  $D_4$ 为400 mm。天线为轴对称结构,长600 mm,三段长度: $L_1$ 为144.89 mm,  $L_2$ 为155.11 mm,  $L_3$ 为300 mm。喇叭天线通过圆波导馈电。仿真与实验和理论推导时,远场位于距离天线6 m远的球面上。

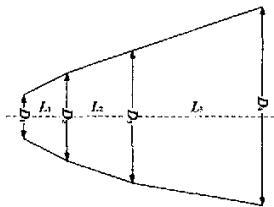


图4 天线结构图

由于天线尺寸比较大,调整网格后远区电场仿真辐射与理论值和实验值对比如图5、图6和图7所示(频率9.3 GHz)。

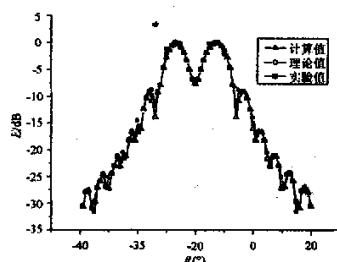


图5 H面结果比较

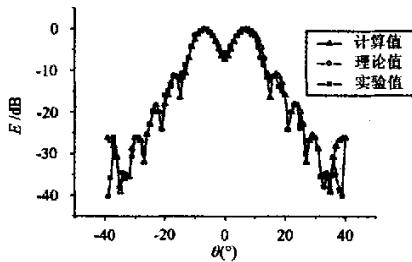


图6 E面结果比较

从图5、图6和图7对天线仿真值、理论值和实验值对比结果来看,当取大角度时误差加大,主要由于在局部地区网格比较大造成。虽然如此,辐射图主瓣结果比较好,辐射图旁瓣的影响也是比较小的。

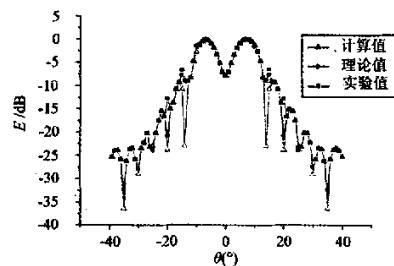


图7 45°结果比较图

### 3 结语

本文使用FDTD方法实现天线的计算,并对激励源、吸收边界条件、划分网格以及近远场转换等技术进行了介绍。通过与理论和实验结果的对比可以发现,利用FDTD方法计算天线的方案是可行的,尤其是大尺寸天线的计算,可以实现HFSS等软件无法完成的任务。

### 参 考 文 献

- [1] Yee K S. Numerical Solution of Initial Boundary Value Problems Involving Maxwell Equation in Isotropic Media[J]. IEEE Trans. Antennas Propagate., 1966, AP-14(3): 302-307.
- [2] Madsen N K, Ziolkowski R W. Numerical solutions of Maxwell's Equations in the Time Domain Using Irregular Non-orthogonal Grids[J]. Wave Motion, 1988, 10: 583-596.
- [3] Bandyopadhyay B, LamBa S S. Time-domain Pade Approximation and Modal-pade Method for Multivariable System [J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems, 1987, 34(1): 91-94.
- [4] 吕英华.计算电磁学的数值方法[M].北京:清华大学出版社, 2006.

作者简介 陈鹏 男,1982年出生,在读研究生。主要从事计算电磁学方面的研究。

## 瑞萨、日立参展国际光电信息技术博览会

近日,第二届中国(长春)国际光电信息技术博览会(COITE)在中国的汽车城吉林省长春市国际会展中心隆重召开。在汽车电子全球市场份额名列前茅的株式会社瑞萨科技,与共同开发汽车导航/ITS系统的日立制作所一同参展,集中展示了其在全球拥有良好业绩(市场份额约为60%)的汽车导航产品SoC(SH-Navi系列)。此次参加COITE,不仅以集中了高端汽

车导航产品中必需性能于一体的单芯片SoC(SH-Navi)为中心进行展示,还展示了采用了该系列第一代产品SH-Navi1(SH7770)、第二代产品SH-Navi2V(SH7774)的最尖端图像识别处理及3D图画影像的技术平台及样品。除展出系列导航产品SoC之外,瑞萨还在COITE上介绍了其与中国政府合作建设的ITS系统。

(摘自《中国电子报》)

## 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](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>