

# 有源集成天线的时域有限差分法分析

胡小娟, 褚庆昕

(西安电子科技大学 电子工程学院 陕西 西安 710071)

**摘要:** 将有源器件 Gunn 管的非线性集中模型直接编入时域有限差分算法, 分析了有源天线的时域瞬态响应, 计算结果基本上和实验结果吻合, 为有源天线的分析设计提供了一条新的途径.

**关键词:** 有源集成天线; 时域有限差分法; 非线性集中模型

**中图分类号:** TN828.4    **文献标识码:** A    **文章编号:** 1001-240X(2002)03-0360-03

## FDTD analysis of an active integrated antenna

HU Xiao-juan, CHU Qing-xin

(School of Electronic Engineering, Xidian Univ., Xi'an 710071, China)

**Abstract:** Transient responses of an active integrated antenna are analyzed by the FDTD algorithm incorporating the nonlinear lumped model of the Gunn diode. The analysis results are in good agreement with the measured ones. This method provides a new approach for the analysis and design of the active antennas.

**Key Words:** active integrated antenna; FDTD method; nonlinear lumped model

时域有限差分法(FDTD)<sup>[1]</sup>以其算法的简单性、灵活性和普适性在与波相关的问题中都得到了应用<sup>[2]</sup>, 这种方法直接源于时域 Maxwell 方程的离散化, 非常适合于包含非线性器件的微波有源电路的瞬态分析. 非线性器件的时域模型简单而直接, 而在频域建模就非常棘手. 利用 FDTD 方法分析微波有源电路除了基本的 FDTD 算法外, 还有两个方面的问题, 其一, 如何将有源器件模型编入 FDTD 算法中. 通常, 有源器件的尺寸比波长小得多, 可以将有源器件作为集总模型处理. 集总模型作为等效电流源或等效电压源编入 FDTD 算法中<sup>[2,3]</sup>; 其二, 如何有效地计算与 FDTD 方程相耦合的集总模型方程, 既要省时又要保证算法稳定. 算法的不稳定是微波有源电路 FDTD 模拟中常遇到的问题. 常用的方法有直接电路解法、状态方程法以及利用 SPICE 软件求解法<sup>[2,3]</sup>.

微波有源集成天线将有源电路与天线单元直接集成, 因而体积小、重量轻、成本低、结构紧凑, 在移动通信、相控阵和空间功率合成等领域有着广泛的应用前景. 文中利用 FDTD 法分析了图 1 所示的由 Gunn 二极管和微带天线组成的有源集成天线. 采用电流源将 Gunn 管编入 FDTD 算法, 在处理集总模型方程时采用了更为简单直接的方法<sup>[4]</sup>, 避免了文献[5]中需要求解矩阵方程的复杂算法.

## 1 分 析

有源天线的结构如图 1 所示. 有源器件 Gunn 二极管的等效电路如图 2 所示, 其中恒流源  $I(V_s) = -G_1 V_s + G_3 V_s^3$ . 对于不包含 Gunn 二极管的区域, 采用基本的 FDTD 算法<sup>[1]</sup>, 在 Gunn 二极管的区域, 设 Gunn 管沿  $z$  轴放置, 假设流过 Gunn 管的电流为  $I_d$ , 根据扩展 FDTD 公式<sup>[2,3]</sup>, 在 Maxwell 方程的右边加一集总电流密度  $J_L = I_d/(\Delta x \Delta y)$ , 便可把 Gunn 二极管编入 FDTD 的计算中, 于是, 扩展 FDTD 公式中 Gunn 二极管区域的电场迭代式为

收稿日期 2001-07-13

基金项目 国家自然科学基金资助项目(60171011); 国家部委重点实验室资助项目

作者简介 胡小娟(1977-), 女, 西安电子科技大学硕士研究生.

万方数据

$$E_z \Big|_{i,j,k}^{n+1} = E_z \Big|_{i,j,k}^n + \frac{\Delta t}{\epsilon} \nabla \times \boldsymbol{H} \Big|_{i,j,k}^{n+1/2} - \frac{\Delta t}{\epsilon \Delta x \Delta y} I_d^{n+1/2} \quad (1)$$

通过 Gunn 二极管的电流  $I_d$  ,二极管两端的电压  $V_z(t)$  以及恒流源  $F(V_s)$  两端的电压  $V_s$  满足

$$\begin{aligned} C \cdot (dV_s/dt) + F(V_s) &= -I_d \quad (2) \\ RI_d &= V_s + V_z(t) \quad (3) \end{aligned}$$

对式 (2) 采用中心差分公式离散 ,得

$$\alpha (V_s^{n+1} - V_s^n)/\Delta t + F(V_s^{n+1/2}) = -I_d^{n+1/2} \quad (4)$$

为了使电压落在整数步上 ,对  $F(V_s^{n+1/2})$  在  $V_s^n$  点采用 Taylor 级数展开 :

$$F(V_s^{n+1/2}) = F(V_s^n) + \dot{F}(V_s^n) (V_s^{n+1/2} - V_s^n) \quad (5)$$

式中  $\dot{F}(V_s^n)$  表示导数 ,为了避免算法的不稳定性 ,再采用时间平均近似  $V_s^{n+1/2} = (V_s^{n+1} + V_s^n)/2$  ,可得

$$F(V_s^{n+1/2}) = F(V_s^n) + \dot{F}(V_s^n) (V_s^{n+1} - V_s^n)/2 \quad (6)$$

将式 (6) 代入式 (4) ,得到  $V_s^n$  的迭代公式为

$$V_s^{n+1} = V_s^n - [I_d^{n+1/2} + F(V_s^n)]/[C/\Delta t + \dot{F}(V_s^n)/2] \quad (7)$$

对式 (3) 中电流采用时间平均近似  $I_d^n = [I_d^{n+1/2} + I_d^{n-1/2}]/2$  ,则得到  $I_d$  的迭代公式

$$I_d^{n+1/2} = -I_d^{n-1/2} + (V_s^n + V_z^n)/R \quad (8)$$

由于二极管沿  $z$  轴跨接微带导带和接地板之间 ,由 Ampere 定理可知电压等于电场的积分 ,所以电场分量  $E_z$  与二极管两端电压之间的关系为

$$V_z^n = \Delta z \sum_{k=0}^{z_d} E_z \Big|_{x,y,k}^n \quad (9)$$

其中  $x,y$  为 Gunn 二极管所在的  $x$  和  $y$  轴上的坐标 , $z_d$  为 Gunn 二极管沿  $z$  向所占的网格数 .这样 ,给定电场、磁场、电流  $I_d$  和电压  $V_s$  的初始值后 ,利用 FDTD 公式以及式 (7)~(9) 就可以求出天线的场分布和 Gunn 二极管电压和电流 .

2 计算结果

Gunn 二极管的参数为  $R = 1.0 \Omega$  , $C = 0.2 \text{ pF}$  , $G_1 = 0.0252 \Omega^{-1}$  , $G_3 = 0.0265 \Omega^{-1}$  [5] .在 FDTD 计算中 ,网格  $\Delta x, \Delta y, \Delta z$  为互不相等的常数 ,一般为小于最小波长的  $1/20$  , $\Delta t$  的选择满足稳定性条件  $c_{\max} \Delta t < (1/$

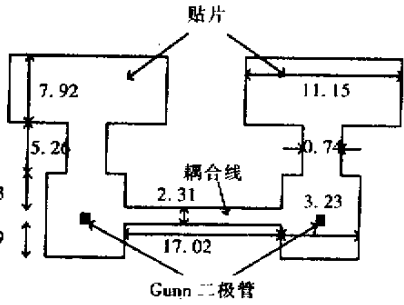


图 1 有源天线的实际电路 (单位为 mm)

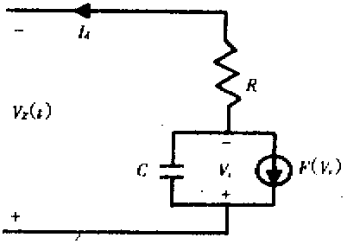


图 2 Gunn 二极管的等效电路

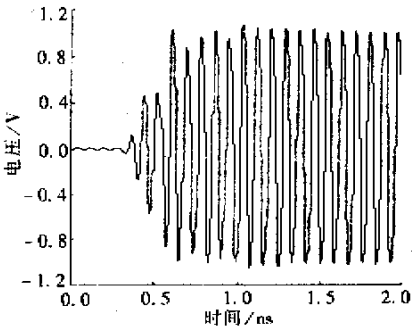


图 3 有源天线中 Gunn 二极管两端的瞬态电压

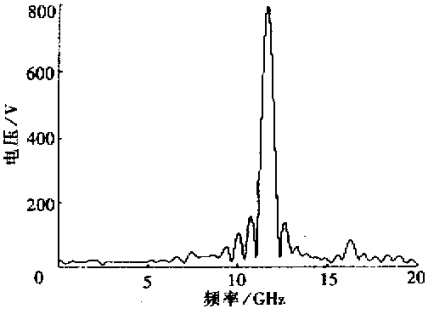


图 4 有源天线中 Gunn 二极管两端电压的频谱图

$\Delta x^2 + 1/\Delta y^2 + 1/\Delta z^2)^{1/2}$  其中  $c_{\max}$  为工作模的最大相速值.截断边界使用一阶 Mur 吸收边界条件<sup>[2]</sup>.

在初始时刻,空间所有的场分量为零, $V_s^0 = 10^{-5}$ ,这相当于在 Gunn 二极管的两端加一噪声电压.图 3 给出了根据以上分析方法计算得到的 Gunn 二极管两端的电压  $V_z$ .

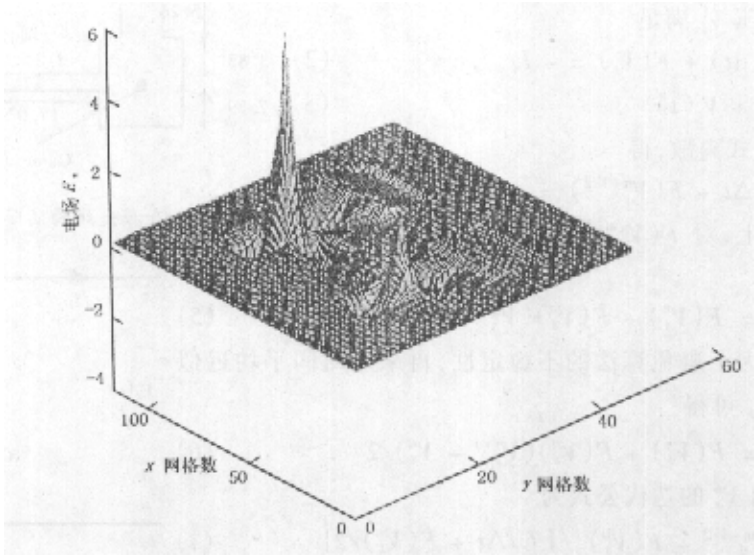


图 5  $t = 0.2\text{ ns}$  时微带导带下电场的分布图

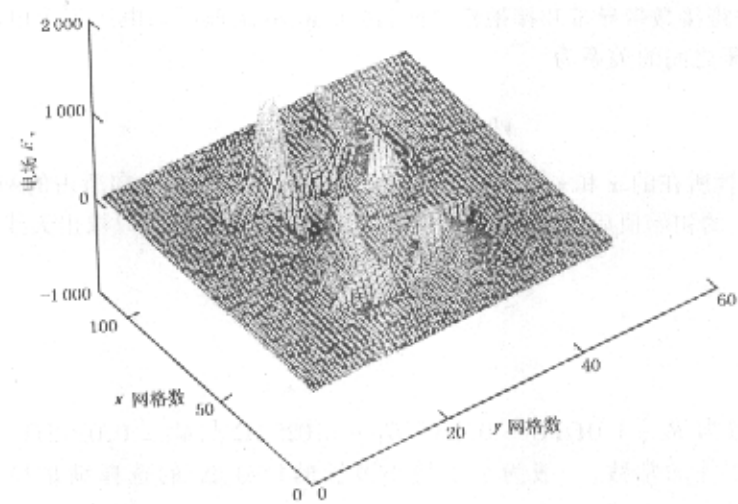


图 6  $t = 0.6\text{ ns}$  时微带导带下电场的分布图

通过对瞬态电压的 Fourier 变换,可以得到有源天线的谐振频率为 11.67 GHz,如图 4 所示,文献[5]中的计算结果是 12.4 GHz,实验测量结果为 11.8 GHz,比较可知,文中的计算结果更接近实验结果.图 5,图 6 给出了微带下电场  $E_z$  分量在 3 个不同时刻的分布图.通过这些分布图可以对有源天线的工作机理和模式有更直观的认识.

3 结 论

将有源器件 Gunn 二极管的时域集中模型编入时域有限差分算法,分析了有源天线的时域和频域特性.  
万方数据 (下转第 391 页)

[ 2 ] Agrawal R , Srikant R. Fast Algorithms for Mining Association Rules[ A ]. Proc of the 20th Int'l Conference on Very Large Database [ C ]. Chile : Santiago , 1994. 487-499.

[ 3 ] Savasere A , Omiecinski e , Navathe S. An Efficient Algorithm for Mining Association Rules in Large Databases[ A ]. Proc of the VLDB Conference[ C ]. Switzerland : Zurich , 1995. 432-443.

[ 4 ] Srikant R , Agrawal R. Mining Quantitative Association Rules in Large Relational Tables[ J ]. ACM SIGMOD Issues , 1996 , 25( 2 ) : 1-12.

[ 5 ] Kuok C M , Fu A , Wong M H. Mining Fuzzy Association Rules in Database[ A ]. Proc of the ACM Sixth International Conference on Information and Knowledge Managemen[ C ]. Nevada : Las Vegas , 1997. 10-14.

[ 6 ] Lu Jian-jiang , Song Zi-lin , Yuan Zhen. Prediction Method fo Normal Association Rules[ A ]. 16th World Computer Congress 2000 , Proc of Conference on Intelligent Information Processing[ C ]. China : Beijing. 2000. 512-515.

[ 7 ] Li De-yi , Di Kai-chang , Li De-ren , et al. Mining Association Rules with Linguistic Cloud Models[ J ]. 软件学报 , 2000 , 11( 2 ) : 143-158.

[ 8 ] 陆建江 , 钱祖平 , 宋自林 . 正态云关联规则在预测中的应用[ J ]. 计算机研究与发展 , 2000 , 37( 11 ) : 1317-1320.

[ 9 ] Hathaway R J , Davenport J W , Bezdek J C. Relational Dual of the C-Means Algorithm[ J ]. Pattern Recognition , 1989 , 22( 2 ) : 205-212.

[ 10 ] Frigui H , Krishnapuram R. Clustering by Competitive Agglomeration[ J ]. Pattern Recognition , 1997 , 30( 7 ) : 1109-1119.

[ 11 ] Inmon W H. Building the Data Warehouse[ M ]. The Unite States of America : Publishing by John Wiley & Sons , Inc , 1996.

[ 12 ] 何新贵 . 模糊数据库系统[ M ]. 北京 : 清华大学出版社 , 1994.

( 编辑 : 齐淑娟 )

( 上接第 362 页 )

得到了与实验结果吻合良好的结果.通过所获得的三维时域场分布 ,对 有源天线的工作机理和模式有了更直观的认识.

参考文献 :

[ 1 ] Yee K S. Numerical Solution of Initial Boundary Value Problems Involving Maxwell's Equations in Isotropic Media[ J ]. IEEE Trans on Antennas and Propagat. 1966 , 14( 5 ) : 302-307.

[ 2 ] Taflove A. The Finite-Difference Time-Domain Method , Computational Electrodynamics[ M ]. Borwood : Artech House , 2000.

[ 3 ] Taflove A. Advances in Computational Electrodynamics : the Finite-Difference Time-Domain Method[ M ]. Borwood : Artech House , 1998.

[ 4 ] 褚庆昕 . MIC 介质振荡器的 FDTD 分析[ J ]. 电子学报 , 2000 , 28( 4 ) : 139-141.

[ 5 ] Toland B , Lin J , Itoh T. FDTD Analysis of an Active Antenna[ J ]. IEEE Microwave and Guided Wave Lett , 1993 , 3( 11 ) : 423-425.

( 编辑 : 齐淑娟 )

## 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>