

文章编号 1005-0388(2004)06-0739-04

# 基于 FDTD 算法的有源集成天线设计<sup>\*</sup>

艾宝强 褚庆昕 雷振亚

( 西安电子科技大学 电子工程学院 *qxchu@ns2.xidian.edu.cn* 陕西 西安 710071 )

**摘要** 由于缺乏适合的商业软件对有源集成天线( AIA )进行模拟设计 ,致使设计周期加长和成本升高。为了克服这一缺点 ,利用 FDTD 算法进行了 AIA 模拟和设计 ,仿真结果与实测结果吻合良好 ,证明了 FDTD 算法在 AIA 设计中的有效性。

**关键词** 集成天线 , 有源天线 , FDTD 算法 , 模拟 , 设计

中图分类号 TN82 TM936.12<sup>4</sup> 文献标识码 A

## Design of active integrated antenna based on FDTD method

AI Bao-qiang CHU Qing-xin LEI Zhen-ya

( School of Electronic Engineering , Xidian Univ. ,  
*qxchu@ns2.xidian.edu.cn* , Xi'an Shanxi 710071 , China )

**Abstract** It often takes longer time and more cost to design an active integrated antenna ( AIA ) due to the lack of available commercial software. In order to change this case , FDTD method is recommended as a simulation tool in design of AIA. A good agreement between simulation results and measured data is obtained to verify the feasible of FDTD method in design of AIA.

**Key words** active antenna , integrated antenna , FDTD method , simulation , design

## 1 引言

有源集成天线( AIA )由于具有结构紧凑、重量轻、成本低 ,适合于构成共形天线阵和空间功率合成的特点 ,在雷达、通信以及电子系统中都有着广泛的应用前景。近年来倍受关注。这种天线把有源集成电路与微带天线集成为一体 ,具有射频振荡源和辐射器双重功能 ,既可以产生射频功率又可以辐射电磁波。传统的有源电路设计需要涉及非线性电路方法 ,如传统的商业软件中使用的谐波平衡法。而传统的天线设计需要涉及电磁场模拟方法。目前流行的商业软件只能针对有源电路或天线设计中间的一个 ,并不能有机地将两者放在同一界面下进行。而有源集成天线恰恰是有源电路和天线高度集成的产物 ,两者之间相互影响 ,因此必须作为一个整体进行设计 ,显然现有的商业软件并不适合于 AIA 的模拟与设计。时域有限差分( FDTD )法是基于物理结构

的全波电磁场模拟方法 ,既适合于分析各种无源结构的电磁波相互作用 ,又适合于有源电路的非线性分析 ,因此是 AIA 设计的有力工具。本文利用扩展 FDTD 算法<sup>[1~4]</sup>分析了两种 Gunn AIA ,仿真结果和实测结果吻合良好。以 FDTD 模拟为基础 ,容易设计出满足要求的 AIA。

## 2 包含 GUNN 管有源电路的扩展 FDTD 算法

本文所设计的 AIA 是以体效管( GUNN )为有源器件的 ,GUNN 的等效电路可以由范德堡模型表征<sup>[1]</sup>。利用扩展算法中的等效电流法 ,将 GUNN 看作是纵向只占一个网格的线电流 ,加入到标准的 FDTD 差分格式中  $E_z$  的差分公式为<sup>[3]</sup>

$$V_s^{n+1} = A_1 V_s^n - A_2 F(V_s^n) - A_3 \Delta t (E_z^{n+1} + E_z^n) \quad (1)$$

$$\begin{aligned}
 E_z^{n+1}(i, j, k) = & E_z^n(i, j, k) \frac{\left[ \frac{\varepsilon}{dt} - \frac{1}{2R}(1 - A_3) \right]}{\left[ \frac{\varepsilon}{dt} + \frac{1}{2R}(1 - A_3) \right]} - \\
 & \frac{(1 + A_1)V_s^n - A_2 F(V_s^n)}{2R \Delta t \left[ \frac{\varepsilon}{dt} + \frac{1}{2R}(1 - A_3) \right]} + \\
 & \frac{H_y^{n+1/2}(i + 1/2, j, k) - H_y^{n+1/2}(i - 1/2, j, k)}{\Delta x \left[ \frac{\varepsilon}{dt} + \frac{1}{2R}(1 - A_3) \right]} - \\
 \frac{H_x^{n+1/2}(i, j + 1/2, k) - H_x^{n+1/2}(i, j - 1/2, k)}{\Delta y \left( \frac{\varepsilon}{dt} + \frac{1}{2R}(1 - A_3) \right)} \quad (2)
 \end{aligned}$$

其中,  $R = \frac{R \Delta x \Delta y}{\Delta z}$ ,  $\beta = 2RC + d(1 + RF'(V_s^n))F'$

$(V_s^n) = \frac{dF(V = V_s^n)}{dt}$ ,  $A_1 = \frac{2RC - d(1 - F(V_s^n))}{\beta}$ ,  $A_2 = \frac{2Rdt}{\beta}$ ,  $A_3 = \frac{dt}{\beta}$ 。其他场分量满足标准的 FDTD 公式。为了起振, 设  $V_s^0 = 10^{-12} \text{ V}$ , 相当于噪声或者其他扰动。

### 3 FDTD 扩展算法在 AIA 仿真中的应用

以上述理论为基础, 利用 FDTD 扩展算法模拟了阻抗变换型(图 1)和直接加载型(图 2)两种有源集成天线。GUNN 管参数为  $F(V_s) = -G_1 V_s + G_3 V_s^3$ ,  $R = 1.0 \Omega$ ,  $C = 0.2 \text{ pF}$ ,  $G_1 = 0.02 \Omega^{-1}$ ,  $G_3 = 0.0265 \Omega^{-1} \text{ V}^{-2}$ 。微带参数为  $\varepsilon_r = 2.3$ ,  $h = 2 \text{ mm}$ 。

#### 3.1 直接加载型有源集成天线

几何尺寸为  $a \times b = 11.5 \times 8.5$ ,  $D = 3.5 \text{ mm}$ , 计算域为  $100 \Delta x \times 100 \Delta y \times 5 \Delta z$ , 空间步长为  $\Delta x = \Delta y = 0.5 \text{ mm}$ ,  $\Delta z = 2 \text{ mm}$ , 时间步长  $\Delta t =$

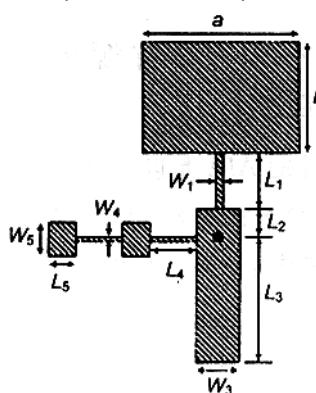


图 1 阻抗变换型有源集成天线

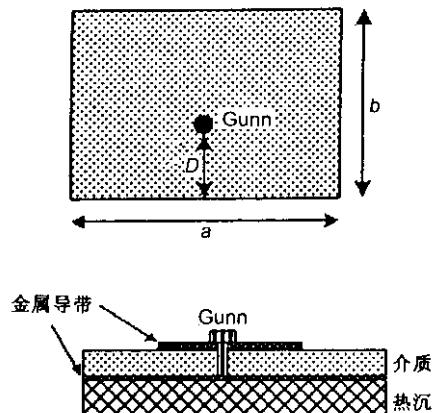


图 2 直接加载型有源天线

0.74ps。模拟的电压波形和频谱分别如图 3 和图 4 所示。模拟的工作频率为 9.69GHz, 与实测结果 9.72GHz 相对误差约为 0.3%。

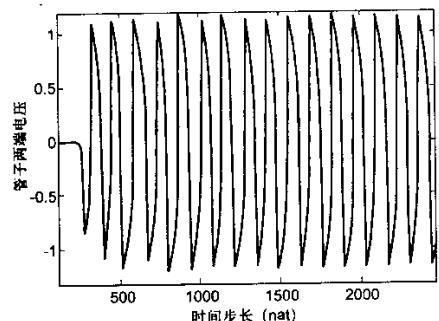


图 3 直接加载型 AIA 管子两端电压波形

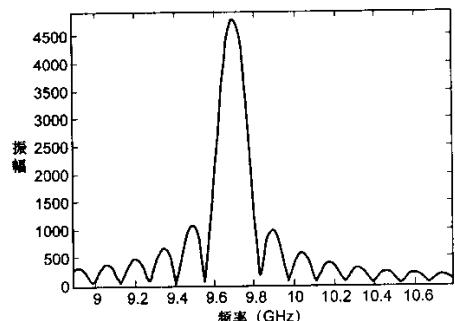


图 4 直接加载天线频谱图

#### 3.2 阻抗变换型有源集成天线

几何尺寸为  $a = 11.5 \text{ mm}$ ,  $b = 8.5 \text{ mm}$ ,  $R_0 = 160 \Omega$ ,  $w_1 = 1 \text{ mm}$ ,  $l_1 = 7.0 \text{ mm}$ ,  $l_2 = 2.5 \text{ mm}$ ,  $l_3 = 11.5 \text{ mm}$ ,  $w_3 = 5 \text{ mm}$ ,  $l_4 = 5.5 \text{ mm}$ ,  $w_4 = 6 \text{ mm}$ ,  $l_5 = 5.0 \text{ mm}$ ,  $w_5 = 2.0 \text{ mm}$ 。计算域为  $160 \Delta x \times 130 \Delta y \times 5 \Delta z$ , 空间步长为  $\Delta x = 0.25 \text{ mm}$ ,  $\Delta y = 0.5 \text{ mm}$ ,  $\Delta z = 2 \text{ mm}$ , 时间步长  $\Delta t =$

0.74ps。模拟电压波形和频谱分别如图5和图6所示,模拟的工作频率为10.15GHz,实测振荡频率为10.12GHz,吻合良好。

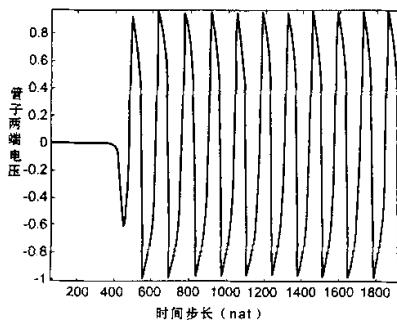


图5 阻抗变换型 AIA 管子两端电压波形

通过上述模拟和实测结果的比较,可以清楚地看出 FDTD 算法对于有源集成天线模拟是非常精确的,证明了 FDTD 算法对于 AIA 仿真的有效性。

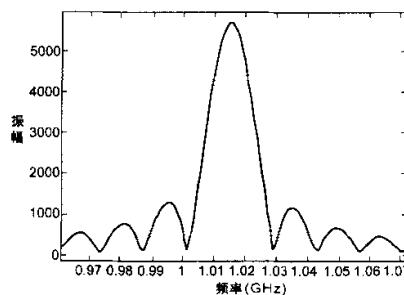


图6 直接加载天线频谱图

## 4 FDTD 扩展算法在 AIA 设计中的应用

在证明了 FDTD 算法对于 AIA 仿真的有效性后, FDTD 法被用于工作频率为 10.0GHz 的 AIA 设计。

### 4.1 直接加载型 AIA 设计

直接加载型 AIA 工作频率是通过改变管子所在位置来实现的,也就是通过改变  $D$  的大小来调整频率,通过 FDTD 扩展算法进行一系列数值实验(如图 7 所示),发现当  $D = 3.0\text{mm}$  时振荡频率为 9.96GHz 靠近设计目标,按此值设计直接加载型 AIA,实测振荡频率为 10.01GHz,吻合良好。

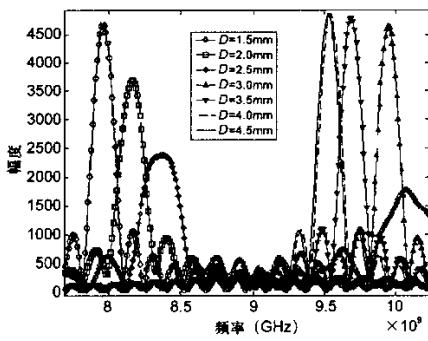


图7 管子在不同位置处的频谱图

### 4.2 阻抗变换型有 AIA 的设计

阻抗变换型 AIA 是通过改变  $l_3$  来进行频率调整的。具有不同  $l_3$  的阻抗变换型 AIA 模拟结果如图 8 所示。可以看出,选取  $l_3 = 12.0\text{mm}$  最合适。模拟

的振荡频率为 9.95GHz,实测结果为 9.99GHz,两者相当吻合。

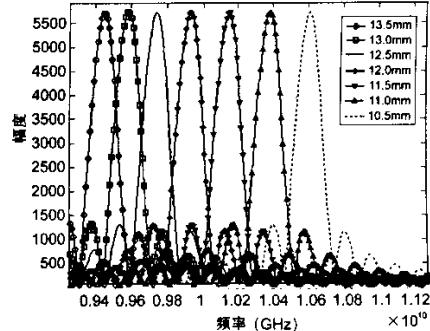


图8  $l_3$  为不同长度值的频谱图

## 5 结论

本文从扩展 FDTD 算法出发,用范德堡模型描述 GUNN 管,用数值实验的方法进行了两种有源集成天线的设计,按仿真结果制作的有源集成天线的工作频率与之吻合良好,证明了扩展 FDTD 算法在有源集成天线辅助设计方面的有效性。

## 参考文献

- [1] B Toland, B Houshmand and T Itoh. Modeling of nonlinear active regions with the FDTD method [J]. IEEE Microwave Guided Wave Lett., 1993, 3(9): 333~335.
- [2] Toland, B, J Lin, B Houshmand, and T Itoh. FDTD analysis of an active antenna [J]. IEEE Microwave and Guided wave letter, 1993, 3(11): 423~425.

(下转第 756 页)

此作者建议在激光测量系统的设计评价中普遍采用LRCS表征目标的激光散射特性。

### 参考文献

- [1] M I Skolnik( ed. ). Radar handbook[ M ]. New York : McGraw-Hill ,1970.
- [2] 顾长青,王 璟. IPO-FDTD 混合法计算三维复杂腔体的RCS[ J ]. 电波科学学报 2003 ,18( 4 ):385 ~ 388.
- C Q Gu, J Wang. Hybrid IPO-FDTD method for the computation of RCS of the three dimensional complex cavities [ J ]. Chinese Journal of Radio science 2003 ,18( 4 ) 385 ~ 388.

(上接第 741 页)

- [3] 褚庆昕. MIC 介质振荡器的 FDTD 分析[ J ]. 电子学报 2000 ,28( 4 ):139 ~ 141.
- [4] 胡小娟,褚庆昕. 微带有源天线的 FDTD 分析[ J ]. 西安电子科技大学学报 2002 ,29( 3 ):360 ~ 362.



艾宝强 (1978 - ),男,河北人,西安电子科技大学电磁场与微波技术专业学士学位硕士研究生。目前从事的研究领域包括有源集成天线阵和空间功率合成技术等。



褚庆昕 (1958 - ),男,山东人,西安电子科技大学电子工程学院副院长、教授、博士生导师。中国电子学会高级会员、中国电子学会微波学会委员会委员、陕西省电子学会理事、陕西省电子学会微波技

- [3] F O Bartell, E L Dereniak, W L Wolfe. The theory and measurement of BRDF and BTDF[ J ]. Proc. SPIE ,1980 ,257 :154 ~ 160.

- [4] 徐根兴主编. 目标和环境的光学特性[ M ]. 北京:宇航出版社,1995.
- [5] 何照才主编. 光学测量系统[ M ]. 北京:国防工业出版社,2002.



高卫 (1970 - ),男,陕西人,1998 年在中国科学院陕西天文台获博士学位,1998 ~ 2000 年在中国科学院上海光学精密机械研究所物理学博士后流动站做博士后研究,现为北京跟踪与通信技术研究所副研究员,主要从事电子对抗试验技术和目标光学特性研究。

术与电波传播分会主任委员,全国电磁场教学与教材指导委员会常务理事,IEEE 会员。已在国内外学术刊物及会议上发表学术论文 70 余篇,获省部级以上科研与教学奖 10 余项。目前从事的研究领域包括时域计算电磁学、高速与微波集成电路的全域建模、射频/微波电路部件与系统、有源集成天线阵和空间功率合成技术等。



雷振亚 (1960 - ),男,陕西人,西安电子科技大学电子工程学院高级工程师,目前从事的研究领域包括射频/微波电路部件与系统等。

## 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>