

# BJT 有源集成天线设计\*

侯 猛<sup>1</sup> 褚庆昕<sup>2</sup>

(1. 西安电子科技大学电子工程学院, 西安 710071, 2. 华南理工大学电子与信息学院, 广州 510640;)

**摘要:** 本文提出了利用微带天线的宽带输入阻抗模型进行有源集成天线的设计方法。该方法用微带天线的输入阻抗模型和有源电路一起组成 AIA 电路, 并应用谐波平衡法进行电路分析, 得到 AIA 的谐波特性和阻抗模型的端口电压, 端口电压作为微带天线的激励源可以用来计算天线的辐射场, 进一步得到微带天线的方向图和辐射功率。应用于双极晶体管 (BJT) AIA 的结果表明, 该方法可以简单有效的进行有源集成天线设计。

**关键词:** 有源集成天线, 设计方法, 微带天线, 输入阻抗模型

## Design of BJT Active Integrated Antenna

HOU Meng<sup>1</sup> and CHU Qing-xin<sup>2</sup>

1. School of Electronic Engineering, Xidian University, Xi'an 710071

2. College of Electronic and Information Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510640

**Abstract:** A design procedure of an active integrated antenna (AIA) is given based on the wide-band input impedance model of a microstrip antenna to predict the radiation performance and the harmonic components of the AIA. The wide-band model of the microstrip antenna is calculated from its cavity model. Then it is loaded in a Bi-Junction transistor (BJT) active circuit to form a BJT AIA. The harmonic balance analysis is applied to calculate the frequency spectrum of the AIA and the voltage across the impedance model. Finally, the voltage is put on the input port of the microstrip antenna as an exciting source to calculate its radial electromagnetic fields, direction patterns and radiation powers. The measurement results show the efficiency of the procedure.

**Key words:** Active integrated antenna, design procedure, microstrip antenna, wide-band model.

### 1 引言

随着微波集成电路 (MIC) 和空间功率合成技术的日益成熟, 有源集成天线 (AIA) 受到了广泛的关注 [1][2]。振荡型 AIA 是由能产生振荡信号的有源电路和连接在输出端口的天线共同组成。由于天线具有复杂的输入阻抗, 必须考虑具有辐射特性的天线对非线性有源电路影响, 这一点对于振荡型有源集成天线的设计非常重要 [1]。最好的办法就是将天线放在电路中进行电路的非线性分析, 同时得到有源集成天线的电路特性和天线的辐射特性。目前的商用软件中, 天线和有源电路尚不能放在同一软件环境下进行分析。应用 FDTD 算法的 AIA 辅助设计 [3][4], 虽然可以解决问题, 但需要长时间的计算, 且电路建模复杂。本文根据微带天线的输入阻抗宽带模型 [5][6] 满足谐波分析要求的特点, 提出了基于微带天线宽带模型的有源集成天线设计方法。首先, 根据微带天线的腔体模理论 [5] 计算出微带天线的宽带模型, 将其作为有源电路的输出端和有源电路共同构成有源集成天线; 然后, 应用非线性电路的谐波平衡法分析电路的频谱特性和阻抗模型的端口电压; 最后, 利用阻抗模型的端口电压作为微带天线的激励源, 计算出天线的辐射场, 进而得到 AIA 的方向图和辐射功率。应用这个方法, 设计了一个 2.4GHz BJT AIA, 实验结果证明了该方法的有效性。

\*基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 60171011)

\*侯 猛 (1979-) 男 山东人 西安电子科技大学电子工程学院硕士研究生

## 2 微带天线的宽带输入阻抗模型

对于图 1 所示的矩形微带天线，由腔体模理论可以得到输入阻抗公式为[5][6]

$$Z_{in} = \sum_{m,n=0}^{\infty} \frac{1}{j\omega C_{mn} + 1/j\omega L_{mn} + G_{mn}(\omega)} \quad (1)$$

其中，

$$C_{mn} = 1/\alpha_{mn}, \quad L_{mn} = \alpha_{mn}/\omega^2, \quad G_{mn}(\omega) = \omega\delta_{eff}/\alpha_{mn},$$

$$\alpha_{mn} = \frac{\mu_0 h v^2}{\epsilon_r} \phi_{mn}^2(x', y') J_0^2\left(\frac{m\pi d}{2W}\right),$$

$$\delta_{eff} = \frac{120\pi\lambda_0 h G_r}{\epsilon_r W L (1 - 3.4\sqrt{\epsilon_r} - 1 h/\lambda_0)} + \frac{1}{\pi h} \sqrt{\frac{\lambda_0}{120\sigma}} + \delta.$$

介质基片的介电常数  $\epsilon_r = 2.62$ ，厚度  $h = 1.0mm$ 。由腔体模理论计算得到工作频率为  $2.4GHz$  的矩形微带天线长度的设计初值为  $L_{a0} = 38.57mm$ 。宽度  $W$  的选取对天线的工作频率影响很小，主要影响天线的方向图和输入阻抗。按照经验公式， $1 < W_a/L_a < 2$ ，选取  $W_a = 45.0mm$ 。对这样尺寸的天线利用 Ensemble 软件进行模拟，天线的最终尺寸： $W_a = 45.0mm$ 、 $L_a = 38.0mm$ ，工作频率

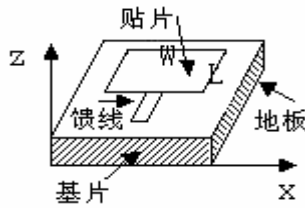


图 1 矩形微带天线

Fig.1 Rectangular microstrip antenna

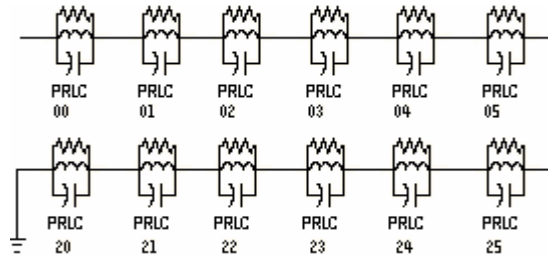


图 2 矩形微带天线的宽带输入阻抗模型

Fig.2 Wide-model of rectangular microstrip antenna

$f_r = 2.405GHz$ 。将天线的最终尺寸代入到 (1) 得到天线的阻抗模型，如图 2 所示。图 3、4 给出了阻抗模型和 Ensemble 软件两种方法得到的天线的输入阻抗的结果比较，可以看出，在工作频率  $f_r$  处，由阻抗模型得到的输入阻抗和软件的模拟结果基本上一致；由于高次模的影响，阻抗模型所计算的输入阻抗在非主模情况下，与软件计算的结果偏差较大。

## 3 有源集成天线设计和方针

### 3.1 有源电路设计

振荡型有源集成天线的有源电路部分采用双端口振荡器的 S 参数分析法[7]。双端口振荡器的 S 参数分析法是在特定直流工作点下测试指定频率的 S 参数为基础，有选择的改变电路结构，使电路满足起振和稳定振荡条件。由网络参数定义可以得到

$$\Gamma_{in} = \frac{b_1}{a_1} = S_{11} + \frac{S_{12}S_{21}\Gamma_L}{1 - S_{22}\Gamma_L} \quad (2)$$

$$\Gamma_{out} = \frac{b_2}{a_2} = S_{22} + \frac{S_{12}S_{21}\Gamma_g}{1 - S_{11}\Gamma_g} \quad (3)$$

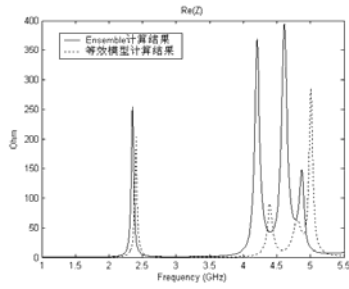


图 3 矩形微带天线输入阻抗（实部）  
Fig.3 The impedance of rectangular microstrip antenna (real part)

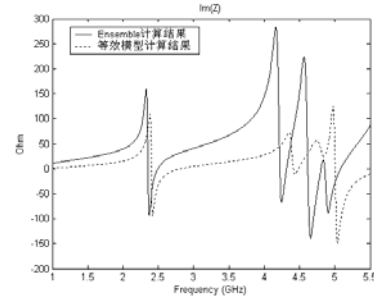


图 4 矩形微带天线输入阻抗（虚部）  
Fig.3 The impedance of rectangular microstrip antenna (image part)

对振荡器来说，为了产生振荡，两端口的反射系数  $\Gamma_{in}$ ， $\Gamma_{out}$  必须都大于 1，而稳定系数  $k$  必须小于 1。振荡条件用 S 参数可表示如下

$$k = \frac{1 - |S_{11}|^2 - |S_{22}|^2 + |D|^2}{2|S_{12}S_{21}|} < 1 \quad (4)$$

$$\Gamma_{in}\Gamma_g = 1$$

$$\Gamma_{out}\Gamma_L = 1$$

其中， $D = S_{11}S_{22} - S_{12}S_{21}$ 。

BJT 有源电路的结构如图 6 所示。BJT (Agilent AT 42035) 采用共射极接地，其典型直流工作特性为：

$V_{CE} = 8.0V$ ， $I_C = 35.0mA$ 。电路偏置电压为  $12V$ ，偏置电阻分别为  $R_c = 51\Omega$ ， $R_b = 25.0K\Omega$ ，

$R_e = 51\Omega$ 。此时电路的直流工作特性  $V_{CE} = 8.06V$ ， $I_C = 37.7mA$ ，符合 BJT 工作要求。在上述直流工作点下，有源器件的双端口 S 参数为

$$S_{11} = 0.702\angle -75.7^\circ, \quad S_{12} = 0.209\angle 46.8^\circ$$

$$S_{21} = 0.927\angle 100.9^\circ, \quad S_{22} = 0.206\angle -125.8^\circ$$

计算得到  $k = 1.208 > 1$ ，说明此时电路不能起振。为了满足起振条件 (4)，也就是能在有源电路的输出端口产生负阻，在基极和射极之间并联一反馈电容  $C_f$ ，考虑到实际器件的选取以及模拟结果， $C_f = 1.0pF$ 。另外，为了增大反馈和对高频开路，在偏置电阻和基极、集电极之间分别串联一电感  $L_g = 100.0nH$ 。在增加反馈的情况下，得到  $k = 0.502 < 1$ ，电路满足起振条件。为了实现高频信号对电源旁路，在电源正极加一电容  $C_v = 100.0pF$  接地。在 BJT 的基极接一开路微带线，起到振荡器的谐振网络作用，同时又可以微调电路的谐振频率。按照振荡器的设计原理[7]，开路微带线的取值  $L_o = 20.0mm$ ，开路微带线的宽度  $W_o = 5.0mm$ 。最后，有源电路在  $2.4GHz$  时的输出阻抗  $Z_{out} = -107.5 - j*174.3$ ，端口反射参数  $\Gamma_{out} = 1.28\angle -23.8^\circ$ 。

### 3.2 AIA 设计、仿真和实验

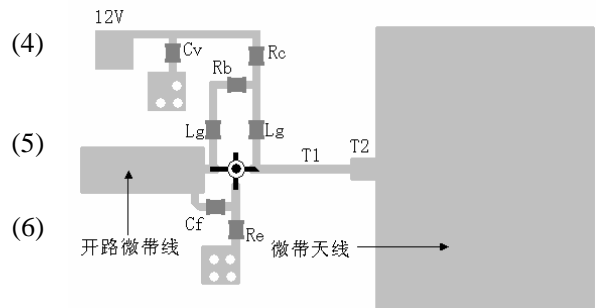


图 6 BJT 有源集成天线  
Fig.6 BJT AIA

### 3.2.1 AIA 设计、仿真

2.4GHz BJT AIA 结构如图 6 所示。为了使连接天线后的阶梯阻抗变换器端口的输入阻抗  $Z_L$  与振荡电路的输出阻抗  $Z_{out}$  满足稳定振荡条件 (6)，通过计算和软件模拟，T1、T2 的宽度和长度分别为  $W_{T10} = 1.0mm$ ， $L_{T10} = 24.48mm$ ， $L_{T20} = 10.24mm$  和  $W_{T20} = 2.72mm$  时  $Z_L = 101.8 + j*174.8$ ，可以满足稳定振荡条件。经过软件模拟调整，最终选取阶梯阻抗变换器的尺寸： $W_{T1} = 1.0mm$ ， $L_{T1} = 24.0mm$ ， $W_{T2} = 2.72mm$ ， $L_{T2} = 10.0mm$ 。应用 ADS 软件的谐波平衡分析得到 AIA 电路的频谱特性，如图 7 所示。基波频率在 2.405GHz，微带天线端口电压  $V_{out}(dB) = 15.157$ ，二次谐波和三次谐波时端口电压分别为  $V_{out}(dB) = -8.249$  和  $V_{out}(dB) = -13.513$ 。

### 3.2.2 AIA 实验结果

图 8 给出了 BJT 有源集成天线的测量结果。可以看出，所设计的有源集成天线的工作频率 2.4006GHz，满足设计要求。

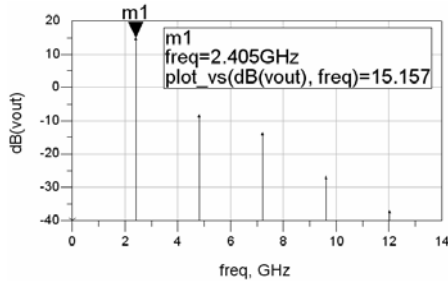


图 7 BJT 有源集成天线谐波特性

Fig.7 The HB character of BJT AIA

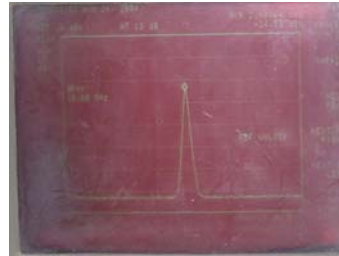


图 8 BJT AIA 测量结果

Fig. 8 The measurement results of BJT AIA

## 4 结论

本文提出了基于微带天线输入阻抗宽带模型的有源集成天线设计方法。并通过设计一 2.4GHz BJT 有源集成天线说明了该方法的有效性。文中给出了所设计 AIA 的频谱特性以及各个谐波频率点的辐射方向图。矩形微带天线在 AIA 中产生的二次以及三次谐波分量太大以至于很难满足现行电路系统对电磁干扰的需要，寻找能够抑制谐波的天线将成为今后的一个研究方向。

### 参考文献

- [1] J. Lin and T. Itoh, "Active Integrated Antennas," IEEE Trans. Microwave Theory Tech., Vol.42, No.12 pp.2186-2194, Dec. 1994
- [2] J. A. Navarro and K. Chang, Integrated Active antennas and Spatial Power Combining .New York: Wiley, 1996
- [3] 胡小娟，褚庆昕，“微带有源天线的 FDTD 分析，”西安电子科技大学学报，第 29 卷，第 3 期，pp. 360-362，2002 年 6 月。
- [4] 艾宝强，褚庆昕，雷振亚，“基于 FDTD 算法的有源集成天线设计，”电波科学学报，第 5 期。2004。
- [5] Ramesh Garg ,Prakash Bhartia, Inder Bahl and Apisak Ittipiboon, *Microstrip Antenna Design Handbook*, Artech House, Boston London.
- [6] Richards, W. F., Y. T. Lo, and D. D. Harrison, "An Improved Theory for Microstrip Antennas and Applications," IEEE Trans. Antennas Propagt., Vol, AP-29 pp.38-46, Jan.1981
- [7] 费元春等《微波固态频率源---理论、设计与应用》，国防工业出版社，1994

## 射频和天线设计培训课程推荐

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,致力并专注于微波、射频、天线设计研发人才的培养;我们于 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。

易迪拓培训课程列表: <http://www.edatop.com/peixun/rfe/129.html>



### 射频工程师养成培训课程套装

该套装精选了射频专业基础培训课程、射频仿真设计培训课程和射频电路测量培训课程三个类别共 30 门视频培训课程和 3 本图书教材;旨在引领学员全面学习一个射频工程师需要熟悉、理解和掌握的专业知识和研发设计能力。通过套装的学习,能够让学员完全达到和胜任一个合格的射频工程师的要求...

课程网址: <http://www.edatop.com/peixun/rfe/110.html>

### ADS 学习培训课程套装

该套装是迄今国内最全面、最权威的 ADS 培训教程,共包含 10 门 ADS 学习培训课程。课程是由具有多年 ADS 使用经验的微波射频与通信系统设计领域资深专家讲解,并多结合设计实例,由浅入深、详细而又全面地讲解了 ADS 在微波射频电路设计、通信系统设计和电磁仿真设计方面的内容。能让您在最短的时间内学会使用 ADS,迅速提升个人技术能力,把 ADS 真正应用到实际研发工作中去,成为 ADS 设计专家...



课程网址: <http://www.edatop.com/peixun/ads/13.html>



### HFSS 学习培训课程套装

该套课程套装包含了本站全部 HFSS 培训课程,是迄今国内最全面、最专业的 HFSS 培训教程套装,可以帮助您从零开始,全面深入学习 HFSS 的各项功能和在多个方面的工程应用。购买套装,更可超值赠送 3 个月免费学习答疑,随时解答您学习过程中遇到的棘手问题,让您的 HFSS 学习更加轻松顺畅...

课程网址: <http://www.edatop.com/peixun/hfss/11.html>

## CST 学习培训课程套装

该培训套装由易迪拓培训联合微波 EDA 网共同推出,是最全面、系统、专业的 CST 微波工作室培训课程套装,所有课程都由经验丰富的专家授课,视频教学,可以帮助您从零开始,全面系统地学习 CST 微波工作的各项功能及其在微波射频、天线设计等领域的设计应用。且购买该套装,还可超值赠送 3 个月免费学习答疑...

课程网址: <http://www.edatop.com/peixun/cst/24.html>



## 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,可以帮助您快速学习掌握如何使用 HFSS 设计天线,让天线设计不再难...

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



### 我们的课程优势:

- ※ 成立于 2004 年,10 多年丰富的行业经验,
- ※ 一直致力并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
- ※ 经验丰富的一线资深工程师讲授,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>