

文章编号 1005-0388(2005)06-0765-04

基于宽带输入阻抗模型的有源集成天线设计^{*}

褚庆昕¹ 侯 猛^{1,2}

(1. 华南理工大学电子与信息学院, qxchu@scut.edu.cn, 广东 广州 510640;

2. 西安电子科技大学电子工程学院, 陕西 西安 710071)

摘要 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以预测有源集成天线(AIA)的辐射特性和谐波特性。谐波平衡法被用于得到 AIA 的谐波特性和阻抗模型的端口电压。然后端口电压作为激励源计算天线特性。实验结果显示该方法可以简单有效进行有源集成天线设计。

关键词 有源集成天线, 微带天线, 宽带输入阻抗模型, 谐波分析, 辐射特性

中图分类号 TN82 文献标识码 A

Design of active integrated antenna based on wide-band impedance model

CHU Qing-xin¹ HOU Meng^{1,2}

(1. College of Electronic and Information Engineering, South China University of

Technology, qxchu@scut.edu.cn, Guangzhou Guangdong 510640, China;

2. School of Electronic Engineering, Xidian University, Xi'an Shaanxi 710071, China)

Abstract A design procedure of an active integrated antenna (AIA) is presented 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 harmonic balance analysis is applied to calculate the frequency spectrum of the AIA and the voltage across the impedance model. Then, the voltage is put on the input port of the microstrip antenna as an exciting source to calculate its radial fields. The measurement results show the efficiency of the procedure.

Key words active integrated antenna, microstrip antenna, wide-band input impedance model, harmonic analysis, radiation performance

1 引言

有源集成天线(AIA)是将有源电路和无源辐射单元(天线)集成在同一介质板上, 接收或者发射电磁波的装置。随着微波集成电路(MIC)和空间功率合成技术的日益成熟, 有源集成天线受到了广泛的关注^[1,2]。同时, MIC 技术的成熟使得有源集成天线工作在微波波段成为可能, 而应用空间功率合成技术的有源集成天线阵提高了 AIA 阵的空间辐射

功率^[1~3]。按照有源电路的作用, AIA 可以分为三种类型: 振荡型、放大型和频率变换型。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。天线有两种作用: 一是作为电路的一部分, 具有谐振、滤波等作用; 另一种就是作为辐射单元, 具有向空间辐射功率的作用。尽管 AIA 可以看作是在有源电路的输出端用微带天线替代传统的输出负载, 但是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

* 收稿日期: 2004-07-08.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(No. 60171011)

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,对有源电路的分析应用的是电路方法,而对天线应用的是电磁场方法,所以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^[4~8],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^[9,10]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^[9]计算出微带天线的宽带模型,将其作为有源电路的负载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负载的端口电压;最后,将负载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 双极晶体管(BJT)有源集成天线,实验结果证明了该方法的有效性。

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,由腔模理论可以得到输入阻抗公式为^[9,10]

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

其中,

$$C_{mn} = 1/\alpha_{mn}$$

$$L_{mn} = \alpha_{mn}/\omega_{mn}^2$$

$$G_{mn}(\omega) = \omega \delta_{eff}/\alpha_{mn}$$

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

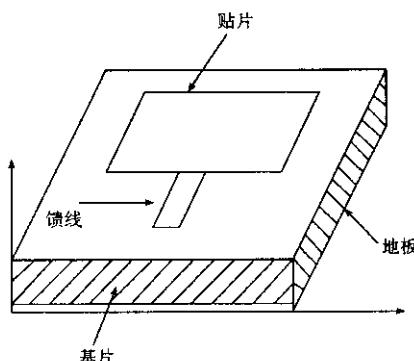


图 1 矩形微带天线

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

介质基片的介电常数 $\epsilon_r = 2.3$, 厚度 $h = 1.0\text{mm}$ 。由腔模理论得到矩形微带天线工作在 TM_{01} 模情况下的设计公式为

$$L = \frac{c}{2f_r \sqrt{\epsilon_r}} - 2\Delta L \quad (2)$$

$$\epsilon_{re} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \begin{cases} (1 + 12h/W)^{-1/2} & , W/h \leq 1 \\ 0.04(1 - W/h)^2 & \\ (1 + 12h/W)^{-1/2}, & W/h \geq 1 \end{cases} \quad (3)$$

$$\Delta L = 0.412h \cdot \frac{\epsilon_{re} + 0.300}{\epsilon_{re} - 0.258} \cdot \frac{W/h + 0.264}{W/h + 0.813} \quad (4)$$

其中, ϵ_{re} 为有效介电常数, ΔL 为修正长度。计算得到微带天线长度的设计初值为 $L_{a0} = 41.07\text{mm}$ 。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 $W_a = 45.0\text{mm}$ 。

对这样尺寸的天线进行模拟, 得到工作频率为 $f_r = 2.37\text{GHz}$, 比设计的频率偏低。这是因为腔模理论的应用范围存在较大的局限性, 只适用于薄介质基片以及矩形、圆形等典型形状的贴片, 且精度不是很高。可以适当减小 L_a , 使其工作频率接近 2.4GHz。天线的最终尺寸: $W_a = 45.0\text{mm}$, $L_a = 40.5\text{mm}$, 工作频率 $f_r = 2.405\text{GHz}$ 。将天线的最终尺寸代入到(1)式得到天线的宽带输入阻抗模型, 如图 2 所示。图 3 给出了宽带输入阻抗模型和由 Ensemble 软件^[11]得到的天线输入阻抗的结果比较, 可以看出, 在工作频率 f_r 处, 由宽带输入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。

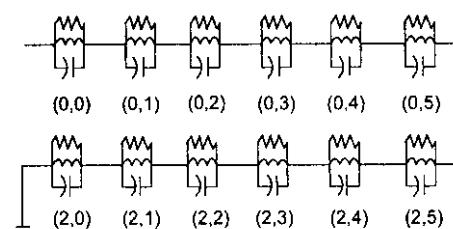


图 2 矩形微带天线的宽带输入

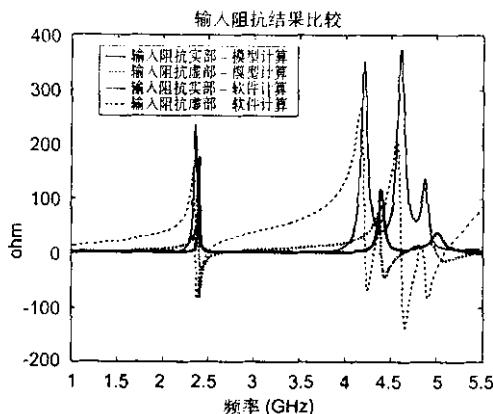


图3 矩形微带天线输入阻抗结果比较

3 有源电路设计

振荡型有源集成天线的有源电路部分设计采用双端口振荡器的S参数分析法。双端口振荡器S参数等效模型如图4所示。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,有选择地改变电路结构,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:

$$\Gamma_{in} = \frac{b_1}{a_1} = S_{11} + \frac{S_{12}S_{21}\Gamma_L}{1 - S_{22}\Gamma_L} \quad (5)$$

$$\Gamma_{out} = \frac{b_2}{a_2} = S_{22} + \frac{S_{12}S_{21}\Gamma_g}{1 - S_{11}\Gamma_g} \quad (6)$$

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

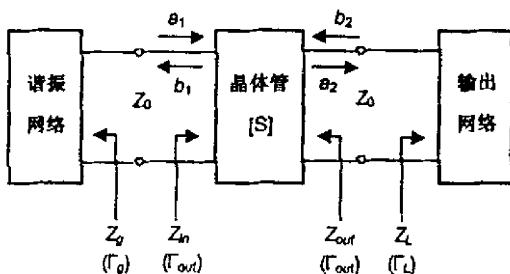


图4 双端口振荡器S参数等效网络

$$k = \frac{1 - |S_{11}|^2 - |S_{22}|^2 + |D|^2}{2 |S_{12}S_{21}|} < 1 \quad (7)$$

$$\Gamma_{in}\Gamma_g = 1 \quad (8)$$

$$\Gamma_{out}\Gamma_L = 1 \quad (9)$$

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

双极晶体管(BJT)有源电路的结构如图5所示。BJT(Agilent AT 420)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

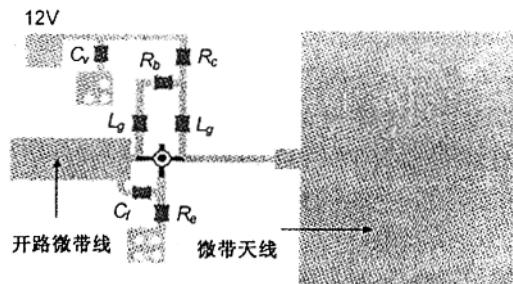


图5 BJT有源集成天

偏置电压为12V,偏置电阻分别为 $R_c = 51.0\Omega, R_b = 25.0K\Omega, R_e = 51.0\Omega$ 。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:

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

$$S_{21} = 0.927 \angle 100.9^\circ, S_{22} = 0.206 \angle -125^\circ$$

计算得到 $k = 1.208 > 1$,说明此时电路不能起振。为了满足起振条件式(7),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^[12],开路微带线的初值选取 $L_o = \lambda_g/4 = 20.6mm$ 。模拟结果显示,开路线的长度的微小改变对振荡电路的输出阻抗影响不大,但宽度变化对有源电路的输出阻抗的影响较大,开路微带线的宽度增大,输出阻抗的实部减小,即负阻增大。为了使振荡型有源集成天线容易起振,取开路微带线的宽度 $W_o = 5.0mm$ 。最后,有源电路在2.4GHz时的输出阻抗 $Z_{out} = -107.5 - j174.3\Omega$,端口反射参数 $\Gamma_{out} = 1.28 \angle -23.8^\circ$ 。

4 AIA设计、仿真及实验结果

2.4GHz BJT AIA结构如图5所示。有源电路和微带天线之间用微带阶梯阻抗变换器连接,改变阻抗变换器的尺寸,可以使AIA电路满足稳定振荡条件。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

振荡条件式(9),通过计算和软件模拟,T₁、T₂ 的宽度和长度分别为 $W_{T10} = 1.0\text{ mm}$, $W_{T10} = 24.48\text{ mm}$, $W_{T20} = 10.24\text{ mm}$ 和 $W_{T20} = 3.0\text{ mm}$ 时 $Z_L = 101.8 + j174.8$,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: $W_{T1} = 1.0\text{ mm}$, $L_{T1} = 24.0\text{ mm}$, $W_{T2} = 3.0\text{ mm}$, $L_{T2} = 10.0\text{ mm}$ 。应用 ADS 软件^[13]的谐波平衡分析得到 AIA 电路的频谱特性,如图 6 所示。基波频率在 2.405GHz,微带天线端口电压 $V_{out}\text{ (dB)} = 15.157$,二次谐波和三次谐波时端口电压分别为 $V_{out}\text{ (dB)} = -8.249$ 和 $V_{out}\text{ (dB)} = -13.513$ 。

实验测量结果显示,所设计的 BJT 有源集成天线工作频率为 2.406GHz,与设计的要求和软件仿真的结果相吻合。

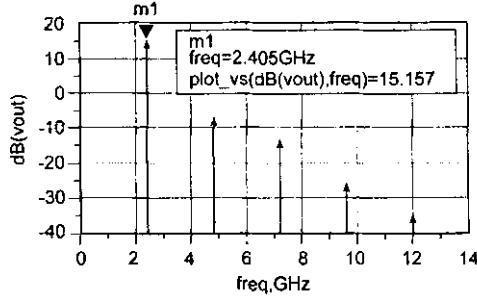


图 6 BJT 有源集成天线谐波特性

5 结论

给出了基于微带天线输入阻抗宽带模型设计有源集成天线的方法,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。设计结果与实验结果和其他软件模拟结果相吻合。

参考文献

- [1] J Lin and T Itoh. Active integrated antennas [J]. IEEE Trans. Microwave Theory Tech., 1994, 42 (12): 2186~2194.
- [2] J A Navarro and K Chang. Integrated Active antennas and Spatial Power Combining [M]. New York: Wiley, 1996.
- [3] 艾宝强,褚庆昕,雷振亚.有源集成天线阵相邻单元耦合的实验确定 [J].西安电子科技大学学报,2004, 31 (5): 732~735.
- [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.
- [5] 艾宝强,褚庆昕,雷振亚.基于 FDTD 算法的有源集成天线设计[J].电波科学学报,2004, 19(6):739~741. B Q Ai, Q X Chu, Z Y Lei. Design of active integrated antenna based on FDTD method[J]. Chinese Journal of Radio Science, 2004, 19(6):739~741.
- [6] Q X Chu, X J Hu, and K T Chan. Models of small microwave devices in FDTD Simulation [J]. IEICE Trans. Electronics, 2003, E86-c(2): 120~125.
- [7] Q X Chu, K F Chan, C H Chan. Parallel FDTD analysis of active integrated antenna array[J]. Microwave and Optical Tech. Lett. 2002, 15(8): 317~319.
- [8] 褚庆昕.微波集成介质振荡器的有限差分模拟[J].电子学报,2000,28(4):139~141.
- [9] Ramesh Garg ,Prakash Bhartia, Inder Bahl, et al.. Microstrip Antenna Design Handbook [M]. Artech House, Boston London, 2001.
- [10] Richards, W F, Y T Lo, et al.. An improved theory for microstrip antennas and applications [J]. IEEE Trans. Antennas Propagat., 1981, AP(29): 38~46.
- [11] Ansoft Ensemble 7.0[M]. Ansoft corporation, 2001.
- [12] 费元春,等.微波固态频率源——理论、设计与应用 [M].国防工业出版社,1994.
- [13] Advanced Design System 2003A[M]. Agilent Technology, 2003.



褚庆昕 (1958—),男,山东人,华南理工大学电信学院教授、博士生导师,射频与无线技术研究所所长,并任中国电子学会高级会员,微波学会委员,IEEE member。研究方向包括射频与微波电路、有源集成天线与空间功率合成和时域计算电磁学。



侯 猛 (1979—),男,山东人,西安电子科技大学硕士研究生。主要研究方向为有源集成天线的设计。

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>