

百例成才系列丛书

微波射频 电路设计与 仿真 100 例

❖ 牛纲 编著

基于ADS2008+Ansi



电子工业出版社

PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

<http://www.phei.com.cn>

百例成才系列丛书

微波射频电路设计与仿真 100 例

牛 纲 编著

電子工業出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京 • BEIJING

内 容 简 介

本书以微波仿真设计 EDA 软件 ADS、HFSS 等为基础,结合工程设计实践,例举了 100 个射频电路设计实例。从工程设计仿真实践角度出发,覆盖了射频有源器件设计、无源器件设计、射频收发信机设计等主要方向,书中实例丰富翔实,并且在例举的实例中详细介绍了设计仿真全过程。通过本书读者可以学习到射频电路的常见器件及其设计仿真方法,以及工程设计思路和技巧。

本书可以作为射频工程师工程设计的学习资料,也可以作为大专院校相关专业学生的辅助学习教材。

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。
版权所有,侵权必究。

图书在版编目(CIP)数据

微波射频电路设计与仿真 100 例 / 牛纲编著. —北京:电子工业出版社, 2011.9

(百例成才系列丛书)

ISBN 978-7-121-14555-1

I. ①微… II. ①牛… III. ①微波电路: 射频电路—电路设计 IV. ①TN710.02

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 183738 号

策划编辑:王敬栋(wangjd@phei.com.cn)

责任编辑:刘真平

印 刷:北京丰源印刷厂

装 订:三河市鹏成印业有限公司

出版发行:电子工业出版社

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编:100036

开 本:787×1092 1/16 印张:14.75 字数:377.6 千字

印 次:2011 年 9 月第 1 次印刷

印 数:4 000 册 定价:39.00 元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题,请向购买书店调换。若书店售缺,请与本社发行部联系,联系及邮购电话:(010) 88254888。

质量投诉请发邮件至 zlts@phei.com.cn, 盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

服务热线:(010) 88258888。

序 言

微波射频电路是任何无线设备都不可缺少的重要组成部分，在现代通信、雷达、导航和电子对抗技术中，特别近几年来，随着通信技术的飞速发展和军事装备需求的日益增加，对微波射频电路的需求量也日趋提高。伴随着计算机辅助设计（CAD）技术的成熟和在工程应用中的广泛使用，射频设计师面临着如何熟练利用 CAD 软件来仿真设计满足工程需求的微波电路的挑战。

微波射频电路通常分为微波无源电路、微波有源电路或者是两者的结合。微波无源电路一般由各种传输线、各种无源器件、各种半导体控制器件等组成，如滤波器、限幅器、移相器、开关、衰减器、隔离器、功分器和耦合器等。微波有源电路一般由传输线、无源器件、各种半导体有源器件等组成，如低噪声放大器、功放、频率源、混频器、倍频器和检波器等。随着微波单片集成电路（MMIC）和数字技术的高速发展，微波电路也引入了诸如各种微波单片集成电路，A/D、D/A 变换器，DDS 器件等。微波系统一般由各种功能的微波无源和有源电路、控制电路，甚至包括软件在内的复杂电路构成。因此，设计微波电路和系统，就要求设计师既要熟练掌握对相关微波设计软件的使用，又要对各射频微波电路、各种数字电路等具有扎实的理论基础，并且具有丰富的工程实践经验。因而，广大微波射频电路设计师迫切需要一本能全面介绍微波射频电路和系统仿真设计方面的参考书。

本文作者一直从事微波射频电路和系统的设计开发工作，具有深厚的理论基础和丰富的工程经验。借助目前国际上流行的微波 CAD 设计软件，先后完成了多种微波电路和系统的研制、设计工作，并应用于各种实际系统工程中。

本文作者集多年的工作学习经验之大成，奉献给广大读者的是经过作者精心编写的杰作。本书几乎涵盖了所有微波射频电路（除电真空器件外，如速调管、行波管等）的仿真设计，对相关设计软件进行了深入浅出的介绍，针对各种微波射频电路的设计，结合工程实际介绍了具体仿真设计步骤和方法，图文并茂，数据翔实，对广大微波射频电路设计人员，以及射频系统设计师等相关专业的工程技术人员，都具有一定的指导价值。

能如此全面地反映当今射频电路仿真设计，并结合工程实践的著作在国内都很少见。该书的出版，能满足微波设计工程师对射频微波电路及系统仿真的需求，也弥补了广大微波射频电路设计师多年来寻觅未果的遗憾，因此本人力荐该书早日出版，以飨翘首期盼的广大读者。

於洪标

前 言

随着无线通信技术的发展，射频 EDA 仿真软件已经成为射频电路研发人员的必备设计工具，其中以 ADS、HFSS 等设计仿真软件为主。在射频器件设计方面，EDA 仿真软件的应用和射频电路实践经验成为了射频工程师最重要的技能，很多年轻工程师正因为缺乏相关的经验和设计仿真技能而苦恼，而国内又缺少能够实践和在工程设计应用方面指导工程师进行实践设计操作的书籍。为此编者花了一年的时间，精心编写此书，以射频 EDA 仿真软件结合工程设计经验，为读者介绍了 100 个射频电路设计实例，能够指导工程师进行射频电路的实践设计。

本书共 12 章。第 1 章介绍了射频无源器件工程设计和仿真软件 HFSS，射频有源器件工程设计和仿真软件 ADS，以及射频系统工程设计。第 2 章介绍了射频放大器的设计，其中例举了 LNA、PA、毫米波放大器等器件的设计实例。第 3 章介绍了频率源的设计，其中包括 VCO、DRO、PLL、DDS 等器件的设计过程。第 4 章介绍了混频器的设计，其中包括二极管混频器、三极管混频器、单平衡混频器、双平衡混频器等器件的设计。第 5 章开始介绍滤波器、双工器、多工器等器件的设计，例举了各类形式的滤波器，以及同轴双工器、波导双工器、LC 多工器等器件的设计。第 6 章介绍了功率分配器（简称功分器）的设计，包括电桥功分器、威尔金森功分器等器件的设计。第 7 章介绍了耦合器的设计，包括兰格耦合器、分支线型耦合器等器件的设计。第 8 章介绍了功率衰减器的设计，包括电调衰减器及波导衰减器等器件的设计。第 9 章介绍了微波开关的设计，包括 PIN 型微波开关、同轴微波开关等器件的设计。第 10 章介绍了一些其他常用微波器件的设计，包括匹配电路、检波电路、隔离器等器件的设计实例。第 11 章介绍了射频系统发射机的设计，介绍了射频发射机系统的设计仿真实例。第 12 章介绍了射频系统接收机的设计，讲述了射频系统接收机的设计过程和仿真实例。

本书设计实例涵盖了常用射频电路设计的所有方面，实例都从工程实践入手，具有非常强的实践指导意义。

本书由高级射频工程师牛纲编著。参加本书编写的还有牛勇、雷宝童、赵淑凤、党群、李志刚、林彬、冉兴程、宁金梅、牛步林、牛艳、李亚娥、史加庆、李娟娥和常林刚。在本书的编写过程中，於洪标教授给予了大力支持和指导，并感谢高级射频工程师刘松林提供的部分资料和对书稿提出的宝贵意见。

由于作者水平有限，书中错误在所难免，希望各位同行批评指正。

目 录

第 1 章 射频电路设计与主要仿真软件简介	1
1.1 无源器件工程设计和仿真软件 HFSS 介绍	1
1.2 有源器件工程设计和仿真软件 ADS 介绍	2
1.3 微波系统工程设计介绍	4
第 2 章 射频放大器的设计	6
2.1 低噪声放大器技术及一般设计方法	6
实例 1: 基于 AT-41511 的低噪声放大器设计	6
实例 2: C 波段低噪声放大器设计	10
实例 3: 毫米波低噪声放大器设计	15
实例 4: C 波段放大器设计	18
2.2 普通放大器的技术及一般设计方法	20
实例 5: L 波段放大器	20
实例 6: 中频 MF 放大器设计	21
2.3 功率放大器技术及一般设计方法	22
实例 7: 900MHz 功放设计	22
实例 8: 毫米波功放设计	30
实例 9: 高频 HF 功放设计	32
2.4 功放预失真技术及设计方法	35
实例 10: 二极管预失真线性化功放的设计	35
2.5 Doherty 功放技术及设计方法	38
实例 11: 一种 Doherty 功放的设计	39
第 3 章 频率源的设计	42
3.1 VCO 技术及振荡器一般设计方法	42
实例 12: 200MHz VCO 的设计	43
实例 13: 一种 900MHz 振荡器的设计	45
实例 14: 1 800MHz VCO 的设计	46
3.2 PLL 技术及设计	49
实例 15: 用 ADISimPLL 设计 3GHz 点频锁相环	50
实例 16: 用 ADS 设计 880~915MHz 的 PLL	53
3.3 双环频率合成器的设计	58
实例 17: 一种改善相噪的 900MHz 双环频率源设计	58
3.4 介质振荡器技术及设计	60
实例 18: 一种 10.5GHz 介质振荡器的设计	60
实例 19: 一种 9GHz 介质振荡器的设计	64
3.5 DDS 频率源技术及设计	66

	实例 20: DDS 频率源的设计	66
	实例 21: DDS+PLL 频率源的设计	68
第 4 章	混频器的设计	72
4.1	单端混频器设计	72
	实例 22: 二极管混频器的设计	72
	实例 23: 三极管混频器的设计	74
4.2	单平衡混频器设计	77
	实例 24: 二极管单平衡混频器的设计	77
4.3	双平衡混频器技术	81
	实例 25: 二极管双平衡混频器的设计	81
4.4	基于 RFIC/MMIC 的混频电路设计	82
	实例 26: 一种 U 波段混频电路的设计	82
	实例 27: 一种毫米波混频电路的设计	83
第 5 章	微波滤波器、双工器和多工器设计	85
5.1	波导滤波器的设计	85
	实例 28: 一种 K 波段波导滤波器的设计	85
	实例 29: 一种 KU 波段圆腔双模滤波器的设计	88
5.2	介质滤波器的设计	90
	实例 30: 一种 L 波段介质滤波器的设计	90
5.3	微带滤波器的设计	94
	实例 31: 平行耦合微带滤波器设计	94
	实例 32: 发夹形微带滤波器设计	96
	实例 33: 交指微带滤波器设计	98
	实例 34: 微带低通滤波器的设计	99
	实例 35: 微带高通滤波器的设计	100
	实例 36: 毫米波微带滤波器的设计	102
	实例 37: 交叉耦合微带滤波器的设计	104
	实例 38: 一种新型混合耦合微带滤波器的设计	106
5.4	同轴腔体滤波器的设计	108
	实例 39: 900MHz 同轴滤波器的设计	108
	实例 40: 四腔同轴交叉耦合滤波器的设计	110
	实例 41: 三腔同轴交叉耦合滤波器的设计	112
	实例 42: 交指滤波器的设计	114
5.5	螺旋滤波器的设计	117
	实例 43: 350MHz 螺旋滤波器的设计	117
	实例 44: 800MHz 螺旋滤波器的设计	120
5.6	LC 滤波器的设计	122
	实例 45: LC 低通滤波器的设计	122
	实例 46: LC 高通滤波器的设计	124

实例 47: LC 带通滤波器的设计	126
实例 48: LC 加极点带通滤波器的设计	128
实例 49: 一种新型高性能 LC 带通滤波器的设计	130
实例 50: 大功率 LC 滤波器的设计	132
5.7 双工器的设计	133
实例 51: 腔体双工器的设计	133
实例 52: 交叉耦合同轴双工器的设计	135
实例 53: 波导双工器的设计	137
实例 54: LC 双工器的设计	138
5.8 射频多工器的设计	140
实例 55: 同轴多工器的设计	140
实例 56: LC 多工器的设计	140
第 6 章 功率分配器的设计	143
6.1 电抗功分器的设计	143
实例 57: 二功分电抗功分器的设计	143
实例 58: 三功分电抗功分器的设计	145
实例 59: 四功分电抗功分器的设计	146
6.2 环形桥功分器和威尔金森功分器的设计	148
实例 60: 2GHz 环形桥功分器设计	148
实例 61: 威尔金森功分器的设计	150
6.3 波导功分器和一种新型功分器的设计	151
实例 62: 一种新型大功率同轴腔体功分器设计	151
实例 63: 波导功分器的设计	153
第 7 章 耦合器的设计	156
实例 64: 兰格耦合器的设计	156
实例 65: 宽带腔体式电桥的设计	158
实例 66: 微带分支线型耦合器的设计	159
实例 67: 波导分支线型耦合器的设计	161
实例 68: 一种新型毫米波波导窄边耦合器的设计	162
实例 69: 波导定向耦合器的设计	163
实例 70: 一种新型同轴高方向性定向耦合器的设计	165
第 8 章 功率衰减器的设计	168
8.1 电阻衰减器的设计	168
实例 71: T 形电阻衰减器的设计	168
实例 72: Π 形电阻衰减器的设计	169
8.2 波导衰减器的设计	170
实例 73: 一种 K 波段波导衰减器的设计	170
8.3 PIN 二极管电调衰减器的设计	172
实例 74: 一种 PIN 二极管电调衰减器的设计	172

第 9 章 微波开关的设计	175
9.1 PIN 二极管微波开关的设计	175
实例 75: 一种 PIN 二极管微波开关的设计	175
9.2 同轴微波开关的设计	176
实例 76: SPDT 同轴微波开关的设计	176
实例 77: DPDT 同轴微波开关的设计	178
9.3 波导微波开关的设计	180
实例 78: 一种波导微波开关的设计	180
第 10 章 其他常用微波器件的设计	183
10.1 匹配电路的设计	183
实例 79: LC 匹配电路的设计	183
实例 80: 电阻匹配电路的设计	185
实例 81: 微带单支节匹配电路的设计	185
实例 82: 微带双支节匹配电路的设计	187
实例 83: 微带 1/4 波长匹配电路的设计	188
实例 84: 波导螺钉匹配的设计	190
10.2 隔离器与环形器的设计	192
实例 85: 一种微带隔离器的设计	192
实例 86: 一种波导隔离器的设计	195
10.3 检波器的设计	198
实例 87: 二极管检波器的设计	198
实例 88: 一种毫米波检波器的设计	199
10.4 倍频器的设计	200
实例 89: MMIC 放大倍频器的设计	200
实例 90: 一种二极管倍频器的设计	201
10.5 调幅电路移相器的设计	205
实例 91: 二极管环形调幅电路设计	205
实例 92: 一种 PIN 移相器的设计	205
第 11 章 射频系统发射机的设计	208
实例 93: 发射信道设计和包络仿真	208
实例 94: 一次变频方案发射机的设计	214
实例 95: 二次变频方案发射机的设计	215
实例 96: 一种 KU 发射机的设计	216
第 12 章 射频系统接收机的设计	218
实例 97: 一种超外差接收机的设计	218
实例 98: 一种零—中频接收机的设计	219
实例 99: 一种低—中频接收机的设计	223
实例 100: 接收信道设计及接收误码率仿真	224

第 1 章 射频电路设计与主要仿真软件简介

1.1 无源器件工程设计和仿真软件 HFSS 介绍

微波无源器件主要以各种微波传输线为基础,通过不同的方法设计出具有耦合、功分、滤波和衰减等微波特性的器件。对于不同微波特性的无源器件,所设计的方法是不一样的;对于同样微波特性的无源器件,选用的传输线类型不一样,设计方法也不一样,比如波导滤波器和微带线滤波器的设计方法就有很大差别。所以,对于微波无源器件的设计,首先要充分了解不同类型微波传输线的特点,熟悉每种传输线对微波信号的基本计算方法;其次,要针对不同微波特性的微波器件,熟悉它们的基本设计方法。

无源器件以电磁场计算为理论基础,在选定了传输线类型后设计出具体的微波器件,然后需要在软件中进行模拟仿真,提高设计的准确度,减少后续的修改调试时间。对于微波无源器件的仿真,目前仿真软件主要有 CST 和 Ansoft HFSS 等。本书主要以 Ansoft HFSS 为仿真软件。

Ansoft HFSS 的功能非常强大,是 Ansoft 公司推出的三维电磁仿真软件;HFSS 提供了简洁直观的用户设计界面,精确自适应的场解器,拥有空前电性能分析能力的功能强大的后处理器,能计算任意形状三维无源结构的 S 参数和全波电磁场。Ansoft HFSS 充分利用了如自动匹配网格产生及加密、切线向矢量有限元、ALPS (Adaptive Lanczos Pade Sweep) 和模式-节点转换 (Mode-node) 等先进技术,从而使工程师们可利用有限元法 (FEM) 在自己的计算机上对任意形状的三维无源结构进行电磁场仿真。HFSS 自动计算多个自适应的解决方案,采用高阶基函数、对称性和周期边界等方法,从而节省计算时间和内存,进一步加大求解问题的规模并加速求解的速度,直到满足用户指定的收敛要求值。其基于 MAXWELL 方程的场求解方案能精确预测所有高频性能,如散射、模式转换、材料和辐射引起的损耗等。

Ansoft HFSS 的自适应网格加密技术使 FEM 方法得以实用化。初始网格 (将几何子分为四面体单元) 的产生是以几何结构形状为基础的,利用初始网格可以快速解算并提供场解信息,以区分出高场强或大梯度的场分布区域。然后只在需要的区域将网格加密细化,其迭代法求解技术节省计算资源并获得最大精确度。必要时,还可方便地使用人工网格化来引导优化加速网格细化匹配的解决方案。

Ansoft HFSS 采用高效的计算机虚拟模型取代费时费力的“cut-and-try”试验方法,能够快速精确地计算出无源器件的电磁特性,得到 S 参数、传播特性、高功率击穿特性,优化部件的性能指标,并进行容差分析,可大大缩短设计周期。仿真分析诸如天线、微波转换器、发射设备、波导器件、射频滤波器和任意三维非连续性等复杂问题,已简单化成只需画结构图,定义材料性能,设置端口和边界条件。HFSS 自动产生场求解方案、端口特性和 S 参数。其 S 参数结果可输出到通用的线性和非线性电路仿真器中使用。

HFSS 软件拥有强大的天线设计功能，它可以计算天线参量，如增益、方向性、远场方向图剖面、远场 3D 图和 3dB 带宽；绘制极化特性，包括球形场分量、圆极化场分量、Ludwig 第三定义场分量和轴比。使用 HFSS，可以计算：

- ① 基本电磁场数值解和开边界问题，近远场辐射问题；
- ② 端口特征阻抗和传输常数；
- ③ S 参数和相应端口阻抗的归一化 S 参数；
- ④ 结构的本征模或谐振解。

而且，由 Ansoft HFSS 和 Ansoft Designer 构成的 Ansoft 高频解决方案，是目前唯一以物理原型为基础的高频设计解决方案，提供了从系统到电路直至部件级的快速而精确的设计手段，覆盖了高频设计的所有环节，这里只介绍它的无源器件仿真功能。

1.2 有源器件工程设计和仿真软件 ADS 介绍

微波有源器件主要包括放大器、有源混频器和频率源等器件。主要以晶体管、场效应管、SiGe 管等为基础搭建的微波器件，对于有源器件设计，我们需要熟悉晶体管、场效应管、SiGe 管的特性，了解其直流工作点和交流特性，熟悉常见 RFIC 厂家的有源芯片，熟悉常见电路的搭建。

传统有源器件的设计仿真软件往往缺乏全面的技术来开发完整的系统，现可以通过 ADS 来仿真所搭建的电路。ADS 功能十分强大，包含时域电路仿真（SPICE-like Simulation）、频域电路仿真（Harmonic Balance、Linear Analysis）、三维电磁仿真（EM Simulation）、通信系统仿真（Communication System Simulation）和数字信号处理仿真设计（DSP），如图 1-1 所示。同时，Agilent 公司和多家半导体厂商合作建立 ADS Design Kit 及 Model File 供设计人员使用。使用者可以利用 ADS Design Kit 及软件仿真功能进行通信系统的设计、规划与评估，以及 MMIC/RFIC、模拟与数字电路设计。

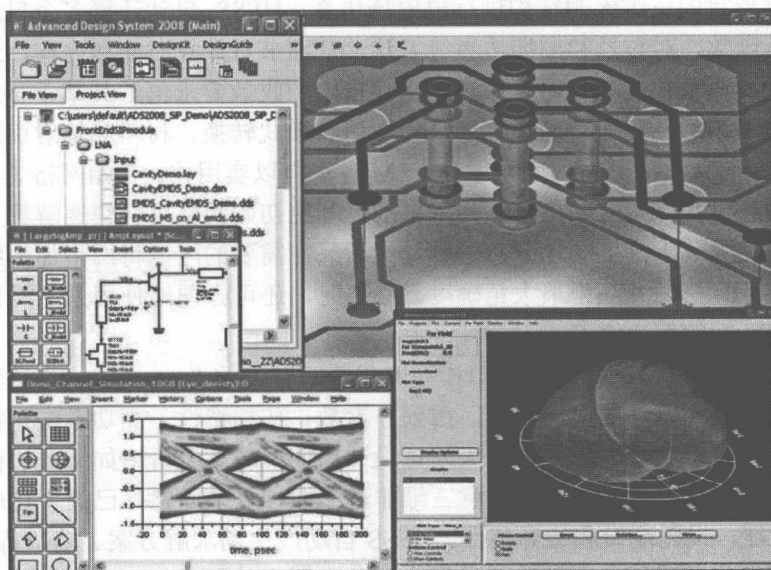


图 1-1 仿真模型

为了降低信号在封装、印制电路板、连接器和背板中的损伤（如衰减、反射和串扰），须进行器件损伤仿真，如图 1-2 所示，可以很直观地反映出高速数字芯片 I/O 引脚逐渐开始使用精密的信号处理技术（例如，预加重、自适应均衡和时钟数据恢复锁相环）。要想充分发挥新的 I/O 功能，信号完整性工程师需要精确的 IC 模型，以便在 EDA 工具中进行系统仿真。当任何一级仿真结果不理想时，都必须回到原理图中重新进行优化，并再次进行仿真，直到仿真结果满意为止，这样可以保证实际电路与仿真电路的一致性。

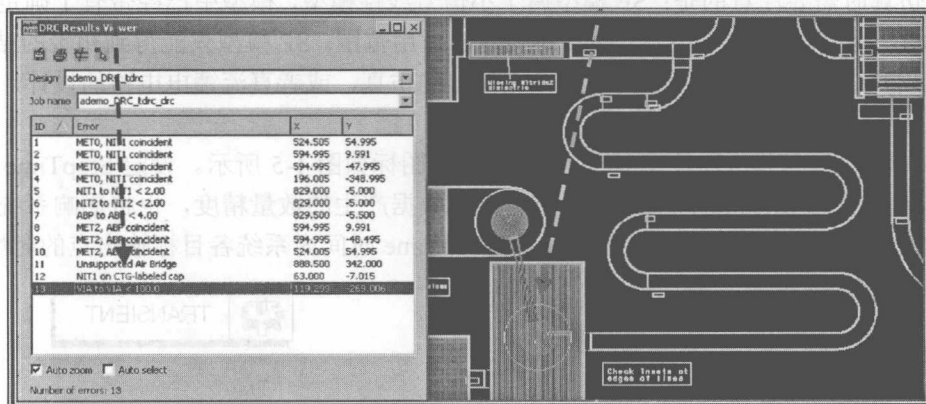


图 1-2 器件损伤仿真

为了完成一个成功的设计，设计者必须考虑系统中射频部分的干扰。不同于传统的射频模块分析，ADS 软件不再是简单地用表格的方式计算出射频系统增益和功率预算，而是对射频器件级进行深入的仿真分析，从而尽可能早地发现问题所在。工程师现在利用 ADS 软件可以精确分析系统中的噪声、阻抗、互调、隔离、谐波等对系统的影响，如图 1-3 所示。

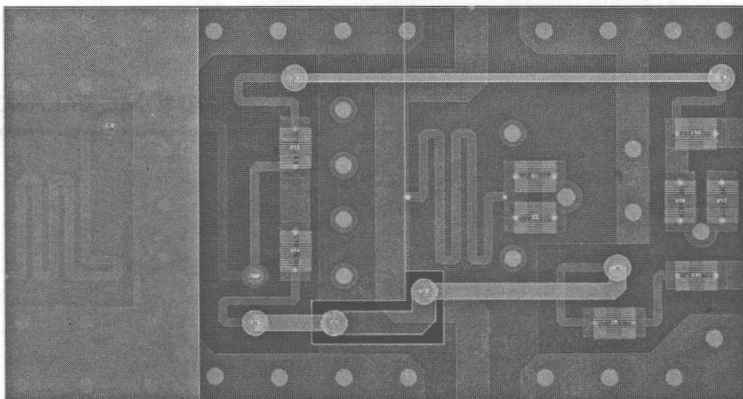


图 1-3 子电路仿真模型

ADS 可以为电路设计者提供进行模拟、射频与微波等电路和通信系统设计的仿真分析方法，其提供的仿真分析方法大致可以分为时域仿真、频域仿真、系统仿真和电磁仿真。对于初学者，熟悉 ADS 各种分析控件的使用可以使系统仿真分析更完善。与其他仿真软件不同，ADS 需要调用不同的分析控件加入仿真界面。理解、掌握这些方法很有用处，下面介绍几类

常用的 ADS 仿真分析控件。

S 参数分析：S 参数表征的系统特性如下。

S21、S31 是传输参数，反映传输损耗；S11、S22、S33 分别是输入、输出端口的反射系数；S23 反映了两个输出端口之间的隔离度。

S 参数分析控件在 ADS 仿真界面的图标如图 1-4 所示。设定起始、终止 (Start、Stop) 扫描频率可以得到系统在设定频率范围内的频域增益响应曲线。仿真结果体现了系统的频带选择性。仿真时需要注意的是：SP 模型属于小信号线性模型，模型中已经带有了确定的直流工作点和在一定范围内的 S 参数，仿真时要注意适用范围。SP 模型只能得到初步的结果，对于某些应用来说已经足够，但不能用来做大信号的仿真，或者直流馈电电路的设计，不能直接生成版图。

瞬态分析：瞬态分析控件在 ADS 仿真界面的图标如图 1-5 所示。设定 StopTime 将控制时域仿真的时间范围，MaxTimeStep 决定了后台数据产生的数量精度，也将影响系统完成仿真所需的时间。仿真完成后，可以得到在 0~StopTime 时间内系统各目标输出点的时域图像。

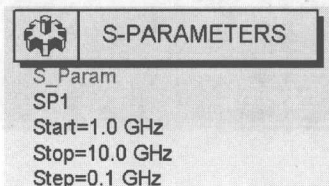


图 1-4 S 参数分析控件在 ADS 仿真界面的图标



图 1-5 瞬态分析控件在 ADS 仿真界面的图标

交流分析：交流分析控件在 ADS 仿真界面的图标如图 1-6 所示。交流分析可以设定目标交流源参数的变化范围，同时完成系统预测增益预算分析。

谐波平衡分析：谐波平衡分析控件在 ADS 仿真界面的图标如图 1-7 所示。设定谐波个数 (Order) 可以观察系统离散频率幅度分布情况。



图 1-6 交流分析控件在 ADS 仿真界面的图标

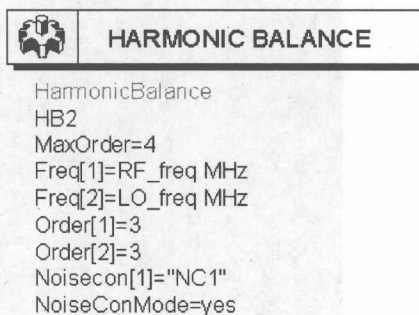


图 1-7 谐波平衡分析控件在 ADS 仿真界面的图标

1.3 微波系统工程设计介绍

如果要完成微波系统功能，需要定义系统指标，仿真后将各功能模块连接。如果在过程中发现指标难以实现或者很复杂等问题，就要为各模块使用 ADS 优化分配性能指标，使用

ADS 完成系统仿真。整个过程是一个传递过程，如图 1-8 所示。

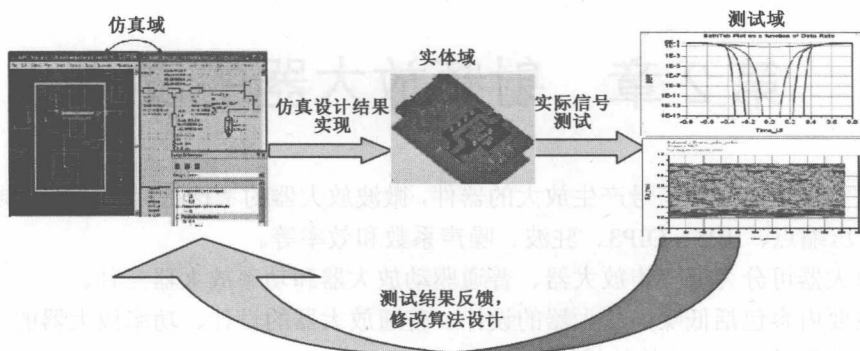


图 1-8 设计传递过程

微波系统主要包括发射机和接收机等。微波系统主要将各类微波器件根据需要设计的系统来进行组合搭建。在微波系统中涉及的微波器件种类很多，这就需要了解各类微波器件的特性。一个好的系统设计者必须要有良好的微波器件知识基础，这样才能规划设计好整个系统，合理地分配指标，综合考虑器件与系统的关系。在此基础上，还需要有系统设计的方法及思路，熟悉各类器件对系统指标的影响和器件之间的相互影响。

采用 ADS 自顶至底的设计和自底至顶的验证方法，将系统设计和验证时间降到最少，如图 1-9 所示。它具有 DSP、RF 和 EM 协同仿真能力，从而能在系统级设计中高效率地分配和优化系统性能。完成系统建模后，就可用实际 RE 和 DSP 电路设计替代行为模型，加上大量的经过验证的 DSP，模拟射频行为级模型使得设计流程十分顺畅。发射机有一次变频和二次变频等方案。同样，接收机有零中频、低中频、二次变频和数字中频等方案，评估它们对系统性能的影响。不同的方案要根据实际设计来选取。在有风险时，设计系统可以通过 ADS 的系统仿真功能来验证设计系统的正确性。

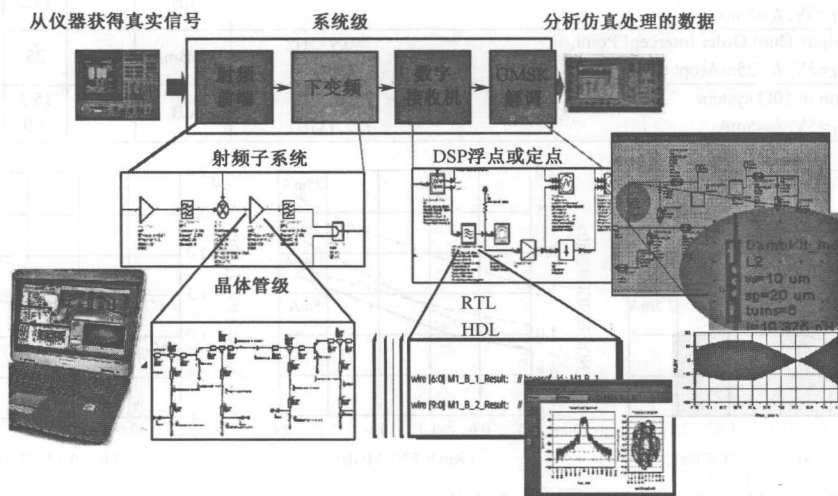


图 1-9 自顶至底设计流程

第2章 射频放大器的设计

微波放大器是对微波信号产生放大的器件，微波放大器的考核指标主要包括频率、带宽、增益、1dB 压缩点、IIP3、OIP3、驻波、噪声系数和效率等。

微波放大器可分为低噪声放大器、普通驱动放大器和功率放大器三种。

本章主要内容包括低噪声放大器的设计、普通放大器的设计、功率放大器的设计、预失真功放的设计和 Doherty 功放的设计。

2.1 低噪声放大器技术及一般设计方法

实例 1: 基于 AT-41511 的低噪声放大器设计

AT-41511 是 Agilent 公司的一款 NPN 型三极管，主要工作频带为 800MHz~2.6GHz，其主要指标如图 2-1 所示。

Characterization Information, $T_A=25^\circ\text{C}$

Symbol	Parameters and Test Conditions	Units	AT-41511		AT-41533	
			Min	Typ	Min	Typ
NF	Noise Figure $V_{CE}=5\text{V}, I_C=5\text{mA}$	$f=0.9\text{ GHz}$		1.0		1.0
		$f=2.4\text{ GHz}$		1.7		1.6
G_A	Associated Gain $V_{CE}=5\text{V}, I_C=5\text{mA}$	$f=0.9\text{ GHz}$		15.5		14.5
		$f=2.4\text{ GHz}$		11		9
$P_{1\text{dB}}$	Power at 1dB Gain Compression(opt tuning) $V_{CE}=5\text{V}, I_C=5\text{mA}$	$f=0.9\text{ GHz}$		14.5		14.5
$G_{1\text{dB}}$	Gain at 1dB Gain Compression(opt tuning) $V_{CE}=5\text{V}, I_C=5\text{mA}$	$f=0.9\text{ GHz}$		17.5		14.5
IP_3	Output Third Order Intercept Point, $V_{CE}=5\text{V}, I_C=25\text{mA}$ (opt tuning)	$f=0.9\text{ GHz}$		25		25
$ S_{21E} ^2$	Gain in 50 Ω system $V_{CE}=5\text{V}, I_C=5\text{mA}$	$f=0.9\text{ GHz}$	13.5	15.5	10.8	12.8
		$f=2.4\text{ GHz}$		7.9		5.2

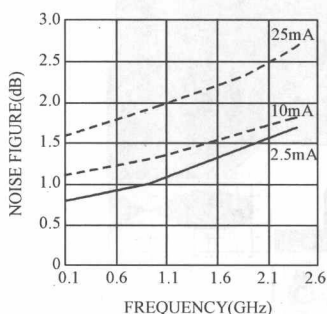


Figure 1. AT-41511 and AT-41533 Minimum Noise Figure vs. Frequency and Current at $V_{CE}=2.7\text{V}$.

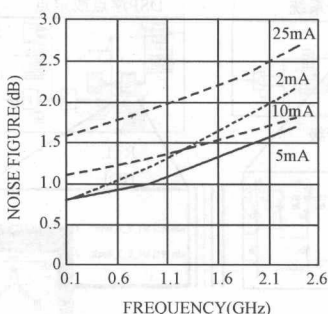


Figure 2. AT-41511 and AT-41533 Minimum Noise Figure vs. Frequency and Current at $V_{CE}=5\text{V}$.

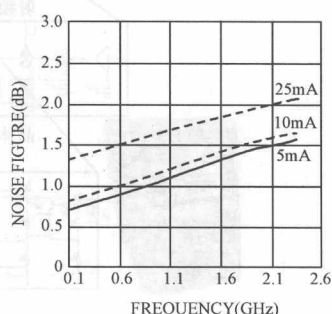


Figure 3. AT-41511 and AT-41533 Minimum Noise Figure vs. Frequency and Current at $V_{CE}=8\text{V}$.

图 2-1 AT-41511 低噪声放大器主要指标

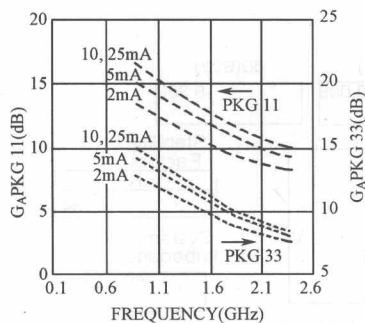


Figure 4. AT-41511 and AT-41533 Associated Gain vs. Frequency and Current at $V_{CE}=2.7V$

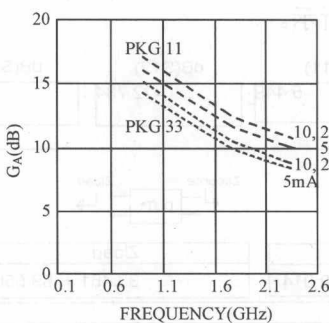


Figure 5. AT-41511 and AT-41533 Associated Gain vs. Frequency and Current at $V_{CE}=5V$

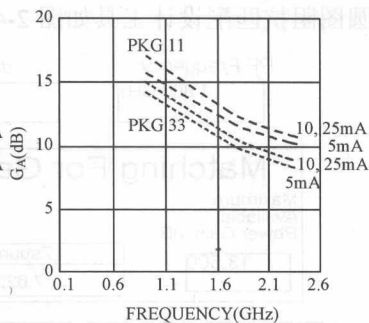


Figure 6. AT-41511 and AT-41533 Associated Gain vs. Frequency and Current at $V_{CE}=8V$

图 2-1 AT-41511 低噪声放大器主要指标 (续)

可以看出在 1.5~1.7GHz 频段内, V_{CE} 为 2.7V 时, AT-41511 单级增益 12.5dB, NF 为 1.4dB。由于单级增益比较小, 通过两级 AT-41511 级联来提高增益。其中第一级 AT-41511 按照最小噪声系数匹配, 第二级 AT-41511 按照最大增益匹配。下面介绍设计仿真过程。

(1) 打开 ADS 2008, 在原理图中选择 DesignGuide-Amplifier 中的 S-Parameter Simulations, 单击 S-Params, Noise Fig, Gain, Stability, Circles, and Group Delay 模板, 该模板可以同时仿真低噪声放的 S 参数、噪声系数、增益、稳定性等。选择模板后在元件库中选择晶体管参数 sp_hp_AT-41511; 为了提高放大电路的稳定性, 可以在输出端与地之间并联 500Ω 电阻, 如图 2-2 所示。

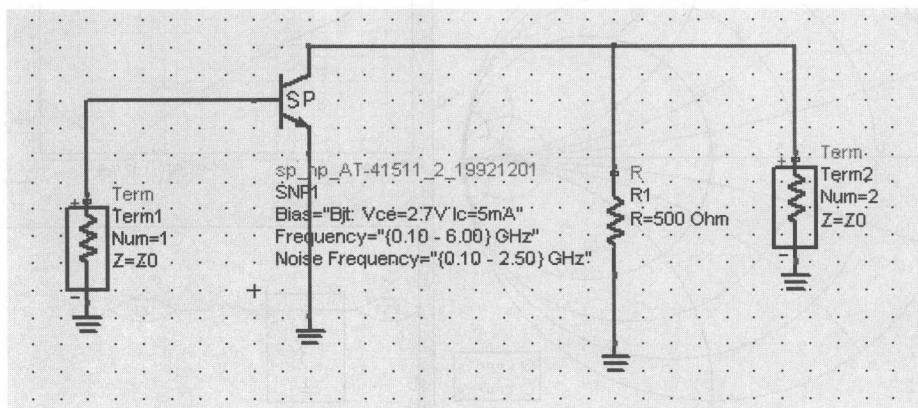


图 2-2 AT-41511 低噪声放大器 S 参数设计模板

单击【Simulate】按钮进行仿真, 仿真结果如图 2-3 所示。

仿真结果中 Matching For Gain 是最大增益时的输入、输出阻抗, Matching For Noise Figure 是最小噪声时的输入、输出阻抗。这样可以得到第一级的输入、输出阻抗和第二级的输入、输出阻抗。

(2) 根据仿真的最小噪声系数时的输入、输出阻抗值, 在 ADS 2008 中选择 smith 圆图工具设计第一级放大器的输入、输出阻抗匹配电路; 根据仿真的最大增益时的输入、输出阻抗值, 在 ADS 2008 中选择 smith 圆图工具设计第二级放大器的输入、输出阻抗匹配电路。smith

圆图阻抗匹配设计工具如图 2-4 所示。

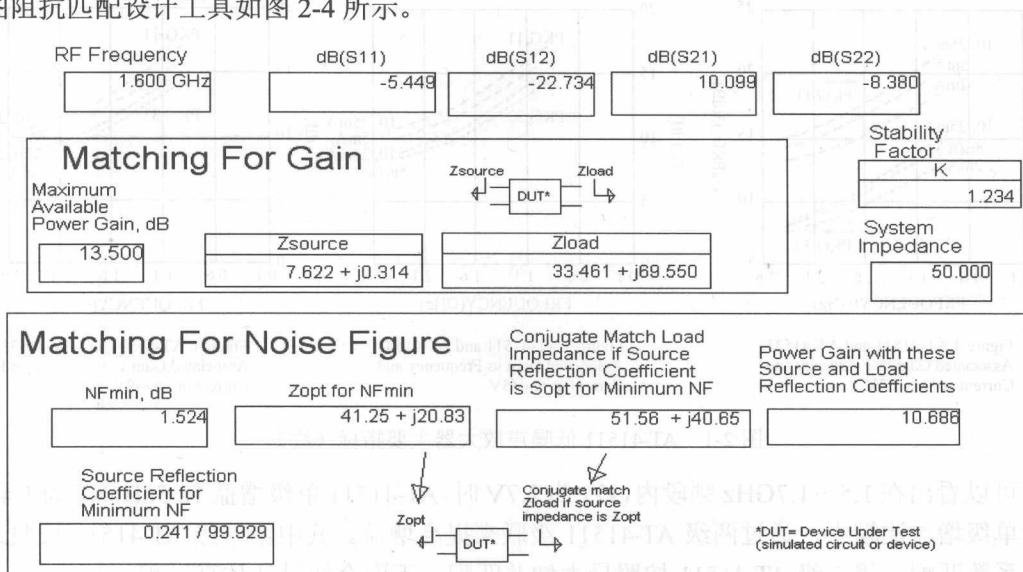


图 2-3 S 参数、K、GAIN 以及最佳 NF 匹配阻抗仿真结果

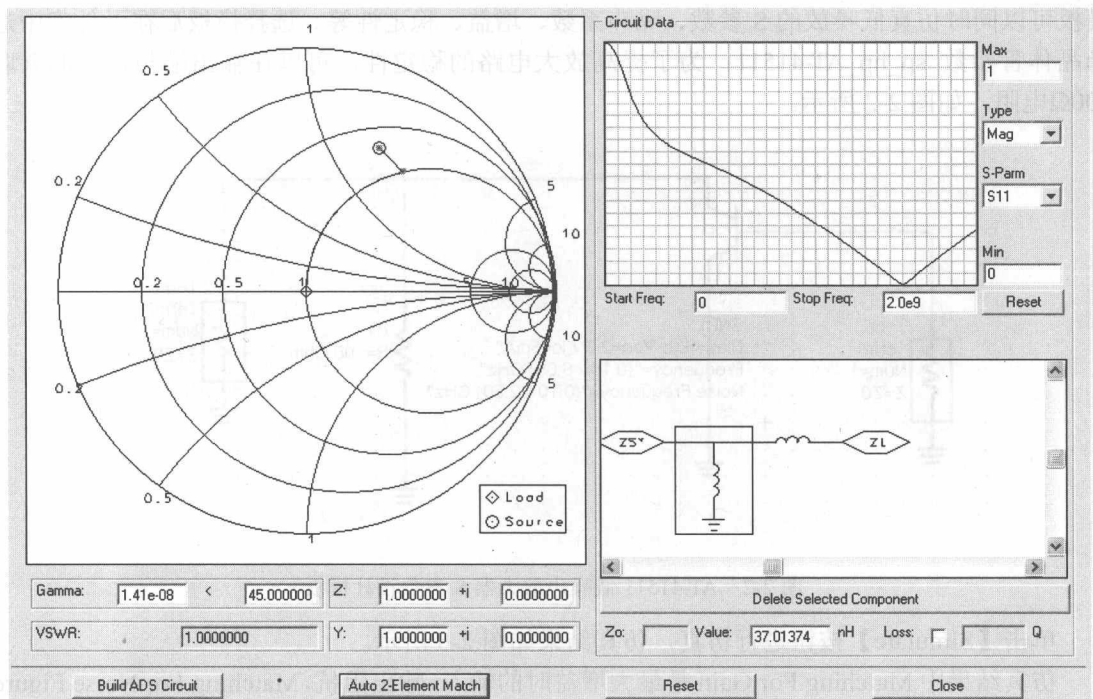


图 2-4 smith 圆图阻抗匹配设计工具

smith 圆图阻抗匹配设计工具计算得到了匹配电路的形式和电感、电容值。

(3) 根据 smith 圆图阻抗匹配设计工具计算结果搭建两级 AT-41511 级联放大电路，调整第一级的输出匹配和第二级的输入匹配，来优化两级 AT-41511 之间的驻波，优化后得到两级