

ADS射频电路 设计基础与 典型应用 (第2版)

黄玉兰 编著

ADS Annotation on RF Circuit Design:
Fundamentals and Applications (2nd Edition)

 中国工信出版集团

 人民邮电出版社
POSTS & TELECOM PRESS

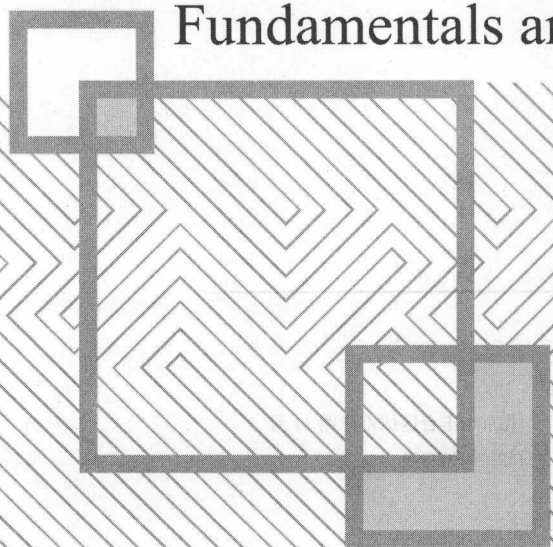
ADS 射频电路

设计基础与

典型应用 (第2版)

黄玉兰 编著

ADS Annotation on RF Circuit Design:
Fundamentals and Applications (2nd Edition)



人民邮电出版社
北京

图书在版编目(CIP)数据

ADS射频电路设计基础与典型应用 / 黄玉兰编著. --
2版. -- 北京: 人民邮电出版社, 2015. 10
ISBN 978-7-115-39175-9

I. ①A… II. ①黄… III. ①射频电路—电路设计
IV. ①TN710.02

中国版本图书馆CIP数据核字(2015)第124030号

内 容 提 要

本书为《ADS 射频电路设计基础与典型应用》第2版, 采用 ADS 2013 进行设计与仿真。全书共有3篇16章内容, 系统地介绍了 ADS 射频电路设计的基础知识与典型应用。ADS 初识篇有3章, 分别为射频电路与 ADS、ADS 主视窗和 ADS 设计仿真视窗, 该篇系统地介绍了 ADS 的界面构成; ADS 使用篇有3章, 分别为 ADS 基本操作、ADS 仿真概述和 ADS 自带的仿真实例, 该篇系统地介绍了 ADS 的使用方法和仿真功能。ADS 设计篇有10章, 分别为匹配网络的设计、定向耦合器的设计、功率分配器的设计、低通滤波器的设计、带通和带阻滤波器的设计、低噪声放大器的设计、功率放大器的设计、振荡器的设计、混频器的设计和射频通信系统级的设计, 该篇给出了利用 ADS 进行设计与仿真的大量实例。书中每章都配有习题, 便于学习。本书有配套的理论教材《射频电路理论与设计(第2版)》, 该书与《ADS 射频电路设计基础与典型应用(第2版)》相辅相成, 架起了射频电路理论与 ADS 射频仿真设计的桥梁。

本书由初识篇、使用篇到设计篇, 循序渐进、全面地介绍了 ADS 射频电路设计与仿真, 适合作为高等院校电子、通信、微电子和集成电路等专业的本科生教材。本书内容丰富, 系统性强, 对从事射频及微波设计的工程师也是一本很好的参考书。

-
- ◆ 编 著 黄玉兰
责任编辑 武恩玉
责任印制 沈 蓉 彭志环
 - ◆ 人民邮电出版社出版发行 北京市丰台区成寿寺路11号
邮编 100164 电子邮件 315@ptpress.com.cn
网址 <http://www.ptpress.com.cn>
大厂聚鑫印刷有限责任公司印刷
 - ◆ 开本: 787×1092 1/16
印张: 31.5
字数: 875千字
-

2015年10月第2版

2015年10月河北第1次印刷

定价: 79.00元

读者服务热线: (010) 81055256 印装质量热线: (010) 81055316
反盗版热线: (010) 81055315

第 2 版前言

本书第 1 版采用的是 ADS 2006 版本。由于 ADS 版本的不断升级，为适应当前射频电路设计的发展和教学要求，故而对第 1 版进行修订。

《ADS 射频电路设计基础与典型应用（第 2 版）》采用 ADS 2013 版本。本书对第 1 版进行了较大的增删和改动：①新增了晶体管芯片资料研读、下载、安装和分析；②新增了功率放大器一章，详细讨论了负载牵引（Load-Pull）和源牵引（Source-Pull）；③改写了低噪声放大器一章，新增了噪声圆分析和增益圆分析，新增了最小噪声放大器设计；④改写了混频器一章，新增了 90° 混合网络设计，新增了变频损耗测量方程和三阶交调点测量方程，新增了测量 1dB 压缩点的多种方法；⑤改写了匹配网络一章，新增了利用 Design Guide 实现匹配网络，新增了利用 Smith 圆图工具考察稳定性圆、等增益圆、等噪声圆和等 Q 值曲线；⑥改写了偏置电路设计的内容，给出了“DC_BJT_T”、“BJT_curve_traver”和“DC_FET_T”的设计模板，并用于低噪声放大器和振荡器的设计；⑦合并三章滤波器内容为二章，通盘考虑集总参数滤波器和分布参数滤波器的设计；⑧合并二章射频系统内容为一章，通盘考虑系统级仿真例程、通信链路预算和超外差式接收机的设计；⑨删除了射频电路基础一章，但《射频电路理论与设计（第 2 版）》是本书配套的理论教材，《射频电路理论与设计（第 2 版）》与本书第 2 版在内容上互动，架起了从射频电路理论到 ADS 射频仿真设计的桥梁。

背景介绍

随着科学技术的不断进步，无线通信系统工作频率的不断提高，目前移动通信、卫星定位、无线局域网、雷达和射频识别等领域，其工作频率都在几百 MHz 到 GHz，这使得在此频率范围内的射频电路应用日趋广泛。现在射频电路的设计越来越复杂，指标要求越来越高，而设计周期却越来越短，可见使用软件工具已经成为射频电路设计的必然趋势。在理解射频电路理论的基础上，结合软件工具进行设计，是通向射频电路设计成功的最佳路线。

ADS (Advanced Design System) 由美国安捷伦 (Agilent) 公司开发，是当前射频和微波电路设计的首选工程软件。它可以支持从模块到系统的设计，能够完成射频和微波电路设计、通信系统设计、射频集成电路 (RFIC) 设计、数字信号处理设计和天线设计。ADS 仿真手段丰富多样，可实现包括时域和频域、模拟和数字、线性和非线性等多种仿真手段，并可进行电磁仿真，从而大大提高复杂电路的设计效率。目前 ADS 已经在国内高校、科研院所和大型

IT 公司中推广使用, 是很值得学习的软件工具。

关于本书

编写本书的初衷有 3 个: 一是系统介绍 ADS 的界面构成, 使初学者少走弯路, 快速入门; 二是系统介绍 ADS 的使用方法和仿真功能, 使读者得到指引和启发, 掌握 ADS 的学习要领; 三是系统给出 ADS 射频电路设计的典型实例, 使读者通过工程实例学会 ADS 射频电路解决方案。

本书每章都附有习题, 这些习题同时也是各章的总结, 读者按照题号顺序做这些习题, 就可以加深对相关理论的理解, 并实现全章所有的设计和仿真。本书设计篇的 10 章内容都是从理论到设计进行讲解, 每个实例的设计都步骤清晰、解释详尽, 便于更改参数后做同类的设计。

本书特色

《ADS 射频电路设计基础与典型应用 (第 2 版)》与配套的理论教材《射频电路理论与设计 (第 2 版)》在多个章节都有互动, 《ADS 射频电路设计基础与典型应用 (第 2 版)》注重仿真设计, 而《射频电路理论与设计 (第 2 版)》注重理论设计, 两本教材形成了系列教材的独有特色。

例如, 《射频电路理论与设计 (第 2 版)》例 7.5、例 7.6、例 7.7 和例 7.8 中的滤波器分别在本书的第 10 章和第 11 章中用 ADS 实现了版图; 《射频电路理论与设计 (第 2 版)》例 8.1、例 8.6、例 8.8、例 9.5 和例 9.9 中的输入稳定性圆、输出稳定性圆, 等增益圆、等噪声圆、等驻波比圆和等 Q 值曲线在本书的第 7 章用 ADS 实现了在 Smith 圆图上画图; 《射频电路理论与设计 (第 2 版)》第 2 章、第 3 章和第 6 章中的集总参数匹配网络、单支节匹配网络、 $\lambda/4$ 阻抗匹配网络和混合匹配网络分别在本书的第 12 章、第 13 章、第 14 章和第 15 章用 ADS 实现了应用; 《射频电路理论与设计 (第 2 版)》第 4 章中的功率分配器和分支定向耦合器分别在本书的第 8 章和第 9 章用 ADS 实现了版图; 《射频电路理论与设计 (第 2 版)》第 9 章和第 11 章中的增益压缩和三阶交调分别在本书的第 13 章和第 15 章用 ADS 实现了仿真曲线; 《射频电路理论与设计 (第 2 版)》第 8 章和第 11 章中的最小噪声放大器和单平衡混频器分别在本书的第 12 章和第 15 章用 ADS 实现了具体设计; 《射频电路理论与设计 (第 2 版)》第 1 章中的射频通信系统在本书的第 16 章用 ADS 实现了超外差式接收机设计和通信链路预算。

本书由黄玉兰教授编著。中国科学院西安光学精密机械研究所、中国科学院大学博士生夏璞协助整理了 Agilent 公司的资料, 并协助完成了本书的 ADS 截图和习题校对工作, 在此表示感谢。本书申报了 2015 年陕西高等教育教学改革研究项目 (题目: 立体化教材群和立体化并行教材呈现方式的研究与实践), 并被纳入西安邮电大学教材建设项目, 受到资助。

由于编者水平有限, 书中难免会有缺点和错误, 敬请广大读者予以指正。(电子函件: huangyulan10@sina.com)。

编者

2015 年 6 月

于西安邮电大学

目 录

第1篇 ADS 初识篇

第1章 射频电路与 ADS	2
1.1 射频概念和射频应用	2
1.2 ADS 概述	4
1.2.1 ADS 设计仿真功能	4
1.2.2 ADS 与其他软件、测量仪器和厂商元件模型的连接	6
1.2.3 ADS 2008 ~ ADS 2013 新增的功能	6
1.3 启动和退出 ADS	7
1.3.1 启动 ADS	7
1.3.2 退出 ADS	9
1.4 ADS 2013 的 4 种工作视窗	10
1.4.1 主视窗	10
1.4.2 原理图视窗	10
1.4.3 数据显示视窗	11
1.4.4 layout 版图视窗	12
习题	13
第2章 ADS 主视窗	14
2.1 工作界面	14
2.2 菜单栏	15
2.2.1 【File】菜单	15
2.2.2 【View】和【Options】菜单	25
2.2.3 【Tools】和【Window】菜单	28
2.2.4 【DesignKits】、【DesignGuide】和【Help】菜单	29
2.3 工具栏	30
2.3.1 工具栏说明	31
2.3.2 工具栏操作举例	31
2.4 文件浏览和管理	33
2.4.1 文件浏览区	33

2.4.2 工作空间浏览和管理	34
习题	36
第3章 ADS 设计仿真视窗	37
3.1 原理图视窗	37
3.1.1 工作界面	37
3.1.2 菜单栏	39
3.1.3 工具栏	40
3.1.4 元件面板列表、元件面板和元件使用记录	43
3.2 Layout 版图视窗	53
3.3 数据显示视窗	54
3.3.1 工作界面	54
3.3.2 菜单栏	55
3.3.3 工具栏	56
3.3.4 数据显示方式	57
习题	59

第2篇 ADS 使用篇

第4章 ADS 基本操作	61
4.1 创建工作空间与原理图	61
4.1.1 创建工作空间	61
4.1.2 创建原理图	62
4.2 设计原理图	63
4.2.1 在原理图视窗搭建电路的基本步骤	63
4.2.2 在原理图视窗中设计一个电路	64
4.3 原理图仿真与结果显示	65
4.3.1 原理图仿真	65
4.3.2 在数据显示视窗显示仿真结果	68
4.4 原理图调谐	69
4.4.1 调谐的设置	69
4.4.2 观察电路调谐的仿真结果	71

4.5 原理图优化	72	第 6 章 ADS 自带的仿真实例	120
4.5.1 不加变量控件的优化设置	72	6.1 直流仿真实例	120
4.5.2 不加变量控件的优化结果	76	6.1.1 单点直流仿真实例	120
4.5.3 带变量控件的优化设置	77	6.1.2 带变量扫描的直流仿真 实例	124
4.5.4 带变量控件的优化结果	79	6.2 交流仿真实例	127
4.6 设计向导	79	6.2.1 交流仿真实例原理图	127
4.6.1 利用设计向导完成原理图	79	6.2.2 交流仿真实例的仿真结果	129
4.6.2 利用设计向导观察仿真 结果	83	6.3 S 参数仿真实例	131
4.6.3 搭建带有子电路的原理图	84	6.3.1 S 参数仿真实例原理图	132
习题	86	6.3.2 S 参数仿真实例的仿真 结果	133
第 5 章 ADS 仿真概述	88	6.4 谐波平衡仿真实例	135
5.1 ADS 仿真功能	88	6.4.1 射频输入恒定的谐波平衡仿真 实例	135
5.1.1 ADS 仿真列表	88	6.4.2 带变量扫描的谐波平衡仿真 实例	136
5.1.2 射频电路模块常用的仿真 方式	89	6.5 增益压缩仿真实例	138
5.2 直流 (DC) 仿真	90	6.5.1 增益压缩仿真实例原理图	139
5.2.1 直流仿真面板	90	6.5.2 增益压缩仿真实例的仿真 结果	141
5.2.2 直流仿真控件参数设置	91	6.6 大信号 S 参数仿真实例	143
5.3 交流 (AC) 仿真	96	6.6.1 大信号 S 参数仿真实例 原理图	143
5.3.1 交流仿真面板	96	6.6.2 大信号 S 参数仿真实例的仿真 结果	144
5.3.2 交流仿真控件参数设置	97	6.7 电路包络仿真实例	145
5.4 S 参数仿真	100	6.7.1 电路包络仿真实例原理图	145
5.4.1 S 参数仿真面板	101	6.7.2 电路包络仿真实例的仿真 结果	147
5.4.2 S 参数仿真控件参数设置	102	6.8 瞬态仿真实例	148
5.5 谐波平衡 (HB) 仿真	105	6.8.1 瞬态仿真实例的原理图	148
5.5.1 谐波平衡仿真面板	106	6.8.2 瞬态仿真实例的仿真结果	149
5.5.2 谐波平衡仿真控件参数 设置	107	习题	150
5.6 大信号 S 参数 (LSSP) 仿真	112	第 3 篇 ADS 设计篇	
5.7 增益压缩 (XDB) 仿真	112	第 7 章 匹配网络的设计	153
5.8 电路包络 (Envelope) 仿真	112	7.1 匹配网络的理论基础	153
5.8.1 电路包络仿真面板	112	7.1.1 匹配网络的目的和选择 标准	153
5.8.2 电路包络仿真控件参数 设置	113		
5.9 瞬态 (Transient) 仿真	115		
5.9.1 瞬态仿真面板	116		
5.9.2 瞬态仿真控件参数设置	116		
习题	119		

7.1.2	集总参数元件匹配网络的设计	153	8.2.1	【LineCalc】的工作界面	186
7.1.3	分布参数元件匹配网络的设计	154	8.2.2	【LineCalc】的使用方法	187
7.1.4	混合参数元件匹配网络的设计	155	8.3	微带分支定向耦合器原理图的设计、仿真与优化	188
7.2	利用史密斯圆图设计匹配网络	156	8.3.1	设计微带分支定向耦合器	188
7.2.1	打开史密斯圆图窗口		8.3.2	微带分支定向耦合器原理图仿真	191
	【Smith Chart Utility】	156	8.3.3	微带分支定向耦合器原理图优化	193
7.2.2	【Smith Chart Utility】窗口的工作界面	157	8.4	微带分支定向耦合器版图的生成与仿真	198
7.2.3	【Smith Chart Utility】窗口的菜单栏和工具栏	157	8.4.1	生成微带分支定向耦合器版图	198
7.2.4	【Smith Chart Utility】窗口的作图区和元件调用面板	158	8.4.2	微带分支定向耦合器版图仿真	200
7.2.5	【Smith Chart Utility】窗口的匹配网络预览及响应区	164	习题		202
7.2.6	利用史密斯圆图设计匹配网络的实例	165	第9章	功率分配器的设计	203
7.3	利用 Design Guide 设计匹配网络	172	9.1	功率分配器理论基础	203
7.3.1	利用 Design Guide 设计单支节匹配网络	172	9.1.1	功率分配器技术指标	203
7.3.2	利用 Design Guide 设计 $\lambda/4$ 阻抗匹配网络	176	9.1.2	窄带功率分配器	204
7.4	利用阻抗匹配工具设计匹配网络	178	9.1.3	宽带功率分配器	206
7.4.1	设计低通匹配网络	178	9.2	功率分配器设计向导	206
7.4.2	利用阻抗匹配工具进行设计	179	9.2.1	设计 3dB 单节功率分配器	206
7.4.3	观察仿真结果	181	9.2.2	设计不等功率分配的单节功率分配器	210
习题		183	9.2.3	设计 3dB 多节功率分配器	212
第8章	定向耦合器的设计	184	9.3	由设计向导得到的功率分配器的实现	214
8.1	定向耦合器的理论基础	184	9.3.1	设计原理图	214
8.1.1	定向耦合器的基本功能和参数指标	184	9.3.2	原理图仿真及显示仿真数据	215
8.1.2	微带分支定向耦合器的散射参数	185	9.3.3	生成版图并仿真	217
8.2	传输线计算工具 LineCalc 简介	186	9.4	功率分配器的设计	222
			9.4.1	设计原理图	222
			9.4.2	原理图优化	225
			9.4.3	生成版图、版图仿真和实验测试	228

习题	230	第 11 章 带通和带阻滤波器的设计	274
第 10 章 低通滤波器的设计	231	11.1 带通和带阻滤波器的理论	
10.1 低通滤波器的理论基础	231	基础	274
10.1.1 理想滤波器的 4 种基本		11.1.1 滤波器的变换	274
类型	231	11.1.2 平行耦合微带线带通	
10.1.2 低通滤波器的响应	232	滤波器	275
10.1.3 集总元件低通滤波器	233	11.1.3 微带短截线带阻滤波器	276
10.1.4 阶梯阻抗低通滤波器	233	11.2 集总参数带通滤波器的设计	276
10.1.5 短截线低通滤波器	234	11.2.1 集总参数带通滤波器	
10.2 集总参数低通滤波器的设计	235	设计向导	277
10.2.1 低通滤波器设计向导	235	11.2.2 设计集总参数带通	
10.2.2 设计集总参数低通		滤波器	279
滤波器	238	11.3 平行耦合微带线带通滤波器的	
10.3 微带线阶梯阻抗低通滤波器的		设计	286
设计	243	11.3.1 设计指标和理论分析	286
10.3.1 设计指标和理论分析	243	11.3.2 平行耦合微带线带通滤波器	
10.3.2 阶梯阻抗低通滤波器原理图		原理图的设计	286
的设计	244	11.3.3 平行耦合微带线带通滤波器	
10.3.3 阶梯阻抗低通滤波器原理图		原理图的优化	291
的优化	247	11.3.4 生成平行耦合微带线带通滤	
10.3.4 群延时、带内驻波比和寄生		波器版图	295
通带仿真	251	11.4 微带短截线带阻滤波器的	
10.3.5 生成阶梯阻抗低通滤波器		设计	299
版图	253	11.4.1 设计指标和理论分析	300
10.4 微带短截线低通滤波器的设计	256	11.4.2 微带短截线带阻滤波器原理	
10.4.1 设计指标和理论分析	257	图的设计	300
10.4.2 微带短截线低通滤波器原理图		11.4.3 微带短截线带阻滤波器原理	
的设计	258	图的优化	305
10.4.3 微带短截线低通滤波器原理图		11.4.4 生成微带短截线带阻滤波器	
的优化	261	版图	308
10.4.4 生成微带短截线低通滤波器		习题	312
版图	264	第 12 章 低噪声放大器的设计	313
10.5 利用设计向导将集总参数滤波器		12.1 低噪声放大器的理论基础	313
转换为微带滤波器	267	12.1.1 小信号放大器的设计	313
10.5.1 LC 滤波器向微带滤波器的		12.1.2 放大器的稳定性	314
转换	267	12.1.3 放大器的增益	315
10.5.2 Kuroda 变换	270	12.1.4 放大器输入输出驻波比	316
习题	273	12.1.5 放大器的噪声	316
		12.2 晶体管研读、下载、安装和	
		分析	317

12.2.1 研读晶体管芯片资料 DataSheet.....	317	13.4.2 仿真结果及 Source-Pull 的源 阻抗.....	374
12.2.2 下载并安装晶体管库 文件.....	323	13.5 输出匹配网络和输入匹配网络的 设计.....	376
12.2.3 晶体管分析.....	326	13.5.1 输出匹配网络的 设计目标.....	376
12.3 设计指标与选择晶体管.....	328	13.5.2 输出匹配网络的实现.....	376
12.4 偏置电路设计.....	329	13.5.3 输入匹配网络的设计 目标.....	380
12.4.1 利用 Design Guide 设计偏置 电路.....	329	13.5.4 输入匹配网络的实现.....	380
12.4.2 利用 Equations 设计偏置 电路.....	331	13.6 原理图仿真.....	383
12.5 稳定性、增益和噪声分析.....	334	13.6.1 原理图 S 参数仿真.....	383
12.5.1 稳定性和增益分析.....	334	13.6.2 原理图谐波平衡仿真.....	385
12.5.2 噪声系数圆和增益圆 分析.....	335	习题.....	394
12.6 最小噪声放大器的设计.....	337	第 14 章 振荡器的设计	396
12.6.1 设计输入匹配网络.....	338	14.1 射频振荡器的理论基础.....	396
12.6.2 设计输出匹配网络.....	341	14.1.1 振荡器的巴克豪森准则.....	396
12.6.3 仿真结果分析.....	345	14.1.2 振荡器的振荡条件.....	396
12.7 低噪声放大器的设计.....	346	14.1.3 压控振荡器.....	397
12.7.1 设计输入匹配网络.....	346	14.1.4 振荡器的设计步骤.....	398
12.7.2 添加输出匹配网络.....	351	14.1.5 振荡器的性能参数.....	398
12.7.3 优化输入输出匹配网络.....	352	14.2 晶体管振荡器的设计.....	399
12.7.4 仿真结果分析.....	355	14.2.1 设计指标与选择晶体管.....	399
习题.....	357	14.2.2 设计振荡器的偏置电路.....	399
第 13 章 功率放大器的设计	358	14.2.3 设计振荡器.....	404
13.1 功率放大器的理论基础.....	358	14.2.4 振荡器输出信号仿真.....	406
13.1.1 功率放大器的工作状态和 分类.....	358	14.2.5 振荡器噪声分析.....	407
13.1.2 功率放大器的性能参数.....	358	14.3 压控振荡器的设计.....	410
13.2 功率放大器设计的一般步骤.....	360	14.3.1 设计指标与选择器件.....	410
13.3 Load-Pull.....	362	14.3.2 设计压控振荡器的偏置 电路.....	411
13.3.1 ADS 中的 Load-Pull 模板.....	362	14.3.3 设计压控振荡器.....	415
13.3.2 仿真结果及 Load-Pull 的 负载阻抗.....	369	14.3.4 压控振荡器输出信号仿真.....	418
13.4 Source-Pull.....	372	14.3.5 压控振荡器噪声分析.....	420
13.4.1 ADS 中的 Source-Pull 模板.....	372	14.3.6 压控振荡器输入电压与输出 频率的关系.....	425
		习题.....	427
		第 15 章 混频器的设计	428
		15.1 混频器的理论基础.....	428

第 1 篇

ADS 初识篇

第 1 篇“ADS 初识篇”共有 3 章内容。第 1 章简要地介绍了 ADS 的基本概况，其内容包括 ADS 由来、ADS 应用现状和 ADS 设计仿真功能。第 2 章和第 3 章详细地介绍了 ADS 工作界面的基本构成，其中第 2 章介绍了 ADS 主视窗的工作界面，第 3 章介绍了 ADS 原理图视窗和 ADS 数据显示视窗的工作界面。ADS 操作主要在主视窗、原理图视窗和数据显示视窗中完成。

ADS (Advanced Design System) 由美国安捷伦 (Agilent) 公司开发。1939 年，毕业于斯坦福大学电子工程专业的戴维·帕卡德 (Dave Packard) 和比尔·休利特 (Bill Hewlett) 创立了惠普 (Hewlett-Packard, HP) 公司。从 20 世纪 40 年代开始，惠普公司研制的电子测试与测量产品就在工程和科学领域广受欢迎，并收到大量政府订单。1943 年，惠普公司为海军研究实验室开发了信号发生器及雷达干扰设备，从而进入微波领域。惠普公司在第二次世界大战期间开发的成套系列微波测试产品，使该公司成为信号发生器领域公认的佼佼者。在以后的几十年间，惠普公司在微波测量仪器领域的重大技术进步使测量结果更加全面，并显著提高了测量精确性。2000 年，安捷伦公司从惠普公司中分离出来并完全独立。现在，安捷伦公司的矢量网络分析仪是全球最优秀的同类测量仪器。该仪器是射频微波行业最高技术的体现，安捷伦公司也因此成为世界最优秀的微波仪器公司。

随着通信手段的日益丰富和通信技术的不断发展,通信领域经历了从有线到无线、从固定到移动、从低频到高频的巨大变化。在需求的强大激励和技术的有力支持下,与现代通信相匹配的射频(RF)和微波(MW)电路得到了广泛的应用。目前应用日趋广泛的移动通信(GSM、3G和4G)、全球定位(GPS)、无线局域网(WLAN)、宽带无线接入系统(WIMAX)和射频识别(RFID)等领域,工作频率都已经达到GHz频段;此外新型半导体器件和计算机的工作频率也已经达到GHz频段。近年来美国、日本、澳大利亚、中国以及欧洲等国家相继在60GHz附近划分出免许可的ISM频段,其中我国开放了59GHz~64GHz频段,这非常大的频率范围将主要用于微功率、短距离和高速率的无线电技术,GiFi就是使用了60GHz。

从20世纪80年代开始,射频和微波电路的应用已逐渐由传统的波导和同轴器件转向微波平面电路。微波平面电路是电与磁的场分布理论与传统电子学技术的融合,它将电磁场的波动理论引入电路之中,形成了射频和微波电路的理论体系。微波平面电路设计一直比较复杂,现在随着市场需求的不断提升,指标要求越来越高,而设计周期却越来越短,这要求设计者使用EDA(电子设计自动化)软件工具。目前国外各种商业化的射频和微波EDA软件工具不断涌现,使用软件工具已经成为微波平面电路设计的必然趋势。在深入理解射频和微波电路理论的基础上,结合EDA软件工具进行设计,是通向射频和微波电路设计成功的最佳路线。

先进设计系统(Advanced Design System, ADS)软件由美国安捷伦(Agilent)公司开发,是当前射频和微波电路设计的首选工程软件,可以支持从模块到系统的设计,能够完成射频和微波电路设计、通信系统设计、射频集成电路(RFIC)设计和数字信号处理设计。该软件仿真手段丰富多样,可实现包括时域和频域、模拟和数字、线性和非线性等多种仿真手段,并可进行电磁仿真,从而大大提高了复杂电路的设计效率。ADS是当今业界最流行的射频和微波电路设计工具,已经在国内高校、科研院所和大型IT公司中推广使用。

1.1 射频概念和射频应用

广义地说,可以向外辐射电磁信号的频率称为射频。而在电路设计中,当频率较高、电路的尺寸可以与波长相比拟时,电路可以称为射频电路。一般认为,当频率高于30MHz时电路的设计就需要考虑射频电路理论,而射频电路应用的典型频段为几百MHz至几GHz。在这个频率范围内,电路需要考虑波动特性和分布参数的影响,低频的基尔霍夫电路理论不再适用。

微波是频率从300MHz到3000GHz的电磁波,对应的波长从1m到0.1mm,分为分米波、厘米波、毫米波和亚毫米波4个波段。从上面的频率划分可以看出,微波的低频端与射频频率

相重合，目前射频频率与微波频率之间没有定义出明确的频率分界点。

在电子通信领域，信号采用的传输方式和信号的传输特性主要是由工作频率决定的。对于电磁频谱，按照频率从低到高（波长从长到短）的次序，可以划分为不同的频段。电通信的容量几乎与所使用的频率成正比，对通信容量的要求越高，使用的频率就越高。由于应用领域众多，所以对频谱的划分有多种方式，而今较为通用的频谱分段法是由 IEEE 建立的（见表 1.1）。

表 1.1 IEEE 频谱

频段	频率	波长
ELF (极低频)	30~300Hz	10 000km~1 000km
VF (音频)	300~3 000Hz	1 000km~100km
VLF (甚低频)	3~30kHz	100km~10km
LF (低频)	30~300kHz	10km~1km
MF (中频)	300~3 000kHz	1km~0.1km
HF (高频)	3~30MHz	100m~10m
VHF (甚高频)	30~300MHz	10m~1m
UHF (特高频)	300~3 000MHz	100cm~10cm
SHF (超高频)	3~30GHz	10cm~1cm
EHF (极高频)	30~300GHz	1cm~0.1cm
亚毫米波	300~3 000GHz	1mm~0.1mm
P 波段	0.23~1GHz	130cm~30cm
L 波段	1~2GHz	30cm~15cm
S 波段	2~4GHz	15cm~7.5cm
C 波段	4~8GHz	7.5cm~3.75cm
X 波段	8~12.5GHz	3.75cm~2.4cm
Ku 波段	12.5~18GHz	2.4cm~1.67cm
K 波段	18~26.5GHz	1.67cm~1.13cm
Ka 波段	26.5~40GHz	1.13cm~0.75cm

目前使用射频和微波频率的无线通信应用越来越多，射频和微波技术在各个领域越来越显示出其重要性。几种重要的无线通信系统的工作频率见表 1.2。

表 1.2 无线通信系统的工作频率

系统名称	工作频率
GSM (900MHz 频段)	上行 890~915MHz, 下行 935~960MHz
GSM (1 800MHz 频段)	上行 1 710~1 785MHz, 下行 1 805~1 880MHz
3G (WCDMA)	上行 1 920~1 980MHz, 下行 2 110~2 170MHz
3G (TD-SCDMA)	2 010~2 025MHz, 1 880~1 920MHz, 2 300~2 400MHz
3G (CDMA2000)	825~835MHz, 870~880MHz 1 920~1 935MHz, 2 110~2 125MHz
4G (中国移动)	1 880~1 900MHz, 2 320~2 370MHz, 2 575~2 635MHz
4G (中国联通)	2 300~2 320MHz, 2 555~2 575MHz

系统名称	工作频率
4G (中国电信)	2 370~2 390MHz, 2 635~2 655MHz
GPS	1 227.60~1 575.42MHz
WLAN	2 400~2 483.5MHz, 5 150~5 350MHz, 5 470~5 725MHz
WMAN	3 400~3 430MHz, 3 500~3 530MHz, 5 725~5 850MHz
RFID (我国超高频频段)	840~845MHz, 920~925MHz
RFID (微波频段)	2.400~2.4835GHz, 5.725~5.875GHz
电视广播 (DS14~68 频道)	470~950MHz
60GHz (我国)	59~64GHz
60GHz (北美和韩国)	57~64GHz
60GHz (欧洲和日本)	59~66GHz
60GHz (澳大利亚)	59.4~62.9GHz

1.2 ADS 概述

ADS 具有各种设计仿真功能。ADS 还允许与其他软件和测试设备连接, 并允许将厂商的元件模型读入。ADS 每年都有更新, 其中 ADS 2008~ADS 2013 增加了许多新功能。

1.2.1 ADS 设计仿真功能

ADS 可以提供原理图设计和 layout 版图设计。在设计中, ADS 不仅提供了从无源到有源、从器件到系统的设计面板, 而且提供设计工具、设计向导和设计指南等。ADS 的仿真功能十分强大, 可以提供直流仿真、交流仿真、S 参数仿真、谐波平衡仿真、增益压缩仿真、电路包络仿真、瞬态仿真、预算仿真和电磁仿真等。ADS 可以进行线性和非线性仿真、电路和系统仿真、频域和时域仿真、电磁仿真等, 还可以在数据显示视窗看到仿真结果。

1. ADS 设计功能

(1) 设计面板。在原理图设计中, ADS 提供了多种元件面板, 同一类元件位于同一个元件面板上, 每个元件面板上有几个到几十个不等的元件。这些元件面板上有时域源、频域源、调制源等各种类型的源; 微带线、带状线等各种类型的传输线; 集总参数元件、分布参数元件等各种无源器件; 砷化镓器件、双极结型器件等各种有源器件; 滤波器、放大器、混频器等各种系统级部件等。利用元件面板上提供的元部件, 使用者可以进行电路设计和系统设计。

(2) 设计工具。在原理图设计中, ADS 提供了多种设计工具, 使用者可以利用设计工具提供的图形化界面进行计算和设计。设计工具包括各种类型的传输线计算 (例如, 微带线尺寸和特性阻抗的计算)、史密斯圆图的使用 (例如, 用史密斯圆图显示反射系数和设计匹配网络) 等。

(3) 设计向导。在原理图设计中, ADS 提供了多种设计向导。设计向导提供设定界面, 使用者可以利用图形化界面设定参数, 设计向导会自动完成电路响应模型。ADS 提供的设计向导包括匹配负载设计向导、滤波器设计向导、放大器设计向导、混频器设计向导和振荡器设计向导等。

(4) 设计指南

设计指南以范例与指令说明的形式示范电路的设计流程, 使用者可以利用这些范例, 学习

如何利用 ADS 进行高效的设计。目前 ADS 提供的设计指南包括 GSM 设计指南、WLAN 设计指南、CDMA 设计指南和 RFIC 设计指南等。使用者也可以通过 ADS 中的 Design Guide Developer Studio 建立自己的设计指南。

(5) 仿真与数据显示

ADS 能对已经设计完成的原理图进行仿真分析,仿真结果在数据显示视窗中显示。为增加仿真分析的方便性,ADS 提供了仿真模板功能,仿真模板将经常重复使用的设计仿真设定成一个模板直接使用,避免了重复设定所需的时间和步骤。使用者也可以通过软件建立自己的仿真模板。

ADS 可以将原理图设计转换成 layout 版图设计,对 layout 版图也可以进行编辑和仿真,仿真结果同样可以在数据显示视窗中显示。

(6) 电子笔记本

用户使用电子笔记本,可以在所设计的电路和仿真结果中加入文字说明,制成一份网页的报告。电子笔记本制成的报告,无需执行 ADS 即可在浏览器上浏览。

2. ADS 仿真功能

(1) 线性分析。线性分析为频域、小信号电路的仿真分析方法,可以对线性和非线性射频电路进行线性分析。在进行线性分析时,ADS 首先计算电路中每个元件的线性参数,如 S 参数、Z 参数、Y 参数、电路阻抗、反射系数、稳定系数、增益与噪声等;然后对进行整个电路进行分析和仿真,得到线性电路的幅频、相频、群时延、线性噪声等特性。

(2) 谐波平衡和增益压缩分析。谐波平衡和增益压缩为频域、大信号、非线性、稳态电路的仿真分析方法,可以用来分析具有多频输入信号的非线性电路,得到谐波失真、功率压缩点、三阶交调点、非线性噪声等参数。与时域瞬态 SPICE 仿真分析相比,ADS 谐波平衡和增益压缩仿真是一个有效的频域分析工具,可以给非线性电路提供快速有效的分析方法,对现今频率越来越高的通信系统来说尤为重要,填补了时域瞬态 SPICE 仿真和小信号 S 参数仿真的不足。

(3) 高频 SPICE 瞬态分析。ADS 高频 SPICE 瞬态分析可以分析线性与非线性电路的瞬态响应,是一种时域的仿真分析方法。瞬态仿真是传统 SPICE 软件采用的最基本仿真方法,SPICE 软件可以说是所有电路仿真软件的鼻祖,能够对模拟和数字电路进行仿真。但与传统 SPICE 软件相比,ADS 高频 SPICE 瞬态分析有很多优点,例如可以直接使用频域分析模型,对微带线和分布参数滤波器等进行分析,这是因为 ADS 在仿真时可以将频域分析模型进行拉氏变换后再进行瞬态分析,因此高频 SPICE 瞬态仿真分析能够对频域模型进行分析。

(4) 电路包络分析。ADS 电路包络仿真是近年来通信系统的一项标志性技术,可以将高频调制信号分解为时域和频域两个部分进行处理,非常适合对数字调制射频信号进行快速、全面的分析。在时域上,电路包络仿真对相对低频的调制信息用时域 SPICE 方法仿真分析;而对相对高频的载波成分,电路包络仿真则采用类似谐波平衡法的仿真方法,在频域进行处理。这样的处理,使仿真器的速度和效率都得到了一个质的飞跃。

(5) 电磁仿真分析。ADS 采用矩量法 (Momentum) 对电路进行电磁仿真分析,近年来又增加了基于有限元算法 (FEM) 的电磁仿真分析。矩量法和有限元法都是一种数值计算方法,可以对微分方程和积分方程进行数值求解,因此在电磁场的数值计算中应用十分广泛。其中,矩量法是将激励和加载分割成若干个部分,并将一个泛函方程化为矩阵方程,从而得到射频电路电磁分布的数值解,若激励和加载分割的部分越多,矩量法的电磁数值解就越精确。ADS 采用矩量法可以对 layout 版图进行电磁仿真分析,得到电路版上的寄生和耦合效应,能对原理图的设计结果加以验证。

1.2.2 ADS 与其他软件、测量仪器和厂商元件模型的连接

现在商业化的电子软件不断涌现,各种软件的主要功能和侧重点也有所不同,因此软件的开放和兼容是不容忽视的问题,软件和软件、软件和硬件、软件和测试设备、软件和元器件生产商之间的联系和沟通在设计中值得关注。

1. 与其他软件连接

ADS 提供了丰富的接口,允许与其他软件连接。例如,ADS 的 SPICE 电路转换器可以将 SPICE 格式的电路图转换成 ADS 格式的电路图进行仿真分析,ADS 格式的电路图也可以转换成 SPICE 格式的电路图进行仿真分析。又例如,ADS 的 layout 版图转换器可以将其他 EDA 或 CAD 产生的版图文件导入 ADS 中进行编辑。可以与 ADS 连接的有 CST、Mentor Graphics、Cadence、Matlab、EMPro、HSPICE 等。

(1) ADS 的 SPICE 电路转换器可以将 Cadence、Spectre、PSPICE、HSPICE 和 Berkeley SPICE 等产生的电路转换成 ADS 格式。

(2) 电路与布局文件格式转换器可以将不同 EDA 产生的文件,转换成 ADS 可以使用的文件格式。

(3) 布局转换器可以将其他 CAD 或 EDA 产生的布局文件导入 ADS 编辑使用。Cadence Allegro 是著名的高速电路板设计与仿真软件,ADS 支持 Allegro 版图的导入和导出。

(4) SPICE 模型产生器可以将频域分析得到的或是测量仪器得到的 S 参数转换为 SPICE 可以使用的格式,以弥补 SPICE 仿真软件无法使用 S 参数的不足。

2. 与测量仪器的连接

ADS 的仪器伺服器提供了与测量仪器连接的功能。用户可以通过仪器伺服器,将网络分析仪测量得到的资料或 SnP 格式的文件导入 ADS 中进行仿真分析;也可以将软件仿真所得的结果输出到仪器设备(例如,信号发生器),作为待测元件的测试信号。

3. 与厂商元件模型间的沟通

ADS 允许得到厂商的元件模型,并能将其读入 ADS,供使用者在设计和仿真中使用。Agilent 公司和多家半导体厂商合作,提供最新的设计工具箱(Design Kit)给用户使用,用户可以得到最新的设计资源。Design Kit 扮演了 ADS 与厂商元件模型间沟通的重要角色,ADS 利用 Design Kit 可以将半导体厂商的元件模型读入,供用户进行电路设计、仿真和分析。

1.2.3 ADS 2008 ~ ADS 2013 新增加的功能

ADS 每年都有更新。近几年来,ADS (ADS 2008~ADS 2013)增加了许多新功能,下面给出简要的介绍。

1. 工作窗口的更新和改进

(1) 提供了新的工作界面,优化了对工作窗口文件的管理效率。

(2) 提供了新的 Design Kit 管理系统,可以对每个设计项目的 Design Kit 单独管理。

(3) 提供了新的停靠窗口和选项卡窗口,并配有相应的对话框。

(4) 提供了灵活的归档和解档,实现了工作区的资源共享。

(5) 提供了新的网络领航员,能够确认节点的连通性。

2. 电路模型仿真的更新和改进

(1) 提高了直流仿真、交流仿真、瞬态仿真的速度。

(2) 更新了 S 参数仿真控制器。

(3) 提供了新的良品率仿真模板。

(4) 增加了半导体厂商的最新元件库。