



高等学校电子信息类“十三五”规划教材

AWR射频微波电路设计 与仿真教程

主 编 张媛媛
副主编 徐 茵 徐粒粟



微 课



西安电子科技大学出版社
<http://www.xduph.com>

高等学校电子信息类“十三五”规划教材

AWR 射频微波电路设计与仿真教程

主 编 张媛媛

副主编 徐 茵 徐粒粟



第六部分为第 19 章, 西安电子科技大学出版社

内 容 简 介

本书主要介绍利用 AWR 软件进行射频微波电路设计和仿真的方法, 内容包括射频电路基础及 AWR 软件入门、无源器件设计、电磁仿真设计、有源器件设计、通信系统仿真、AWR 软件高阶技术, 重点介绍各类射频微波电路的理论和设计仿真方法, 包括功率分配器、耦合器、滤波器、阻抗匹配与变换、功率放大器、低噪声放大器、振荡器、混频器、MMIC、微带天线、多层平面电路、任意三维结构、通信系统、射频链路预算等设计实例, 涵盖范围广, 工程实用性强。

本书适合高等院校通信、电子信息、微电子等相关专业学生使用, 对射频微波领域的设计工程师也具有较高的参考价值。

图书在版编目(CIP)数据

AWR 射频微波电路设计与仿真教程 / 张媛媛主编. —西安: 西安电子科技大学出版社, 2019.10
ISBN 978-7-5606-5493-5

I. ① A… II. ① 张… III. ① 射频电路—微波电路—电路设计—计算机辅助设计—应用软件—高等学校—教材 IV. ① TN710.022

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2019)第 215303 号

策划编辑 高 樱

责任编辑 郑一锋 阎 彬

出版发行 西安电子科技大学出版社(西安市太白南路 2 号)

电 话 (029)88242885 88201467 邮 编 710071

网 址 www.xduph.com 电子邮箱 xdupfb001@163.com

经 销 新华书店

印刷单位 陕西天意印务有限责任公司

版 次 2019 年 10 月第 1 版 2019 年 10 月第 1 次印刷

开 本 787 毫米×1092 毫米 1/16 印 张 26

字 数 621 千字

印 数 1~3000 册

定 价 58.00 元

ISBN 978-7-5606-5493-5 / TN

XDUP 5795001-1

如有印装问题可调换

前 言

在射频、微波电路设计领域，NI AWR 公司的 NI AWRDE 软件(通称 AWR 软件)设计功能强大、界面直观友好，可用于射频与微波小型化电路、单片微波集成电路(MMIC)、片上系统(MSOC)以及微波射频系统级封装(MSIP)等仿真设计，能够实现电路设计和版图设计的无缝衔接，辅以各种电磁求解器、仿真接口，极大地方便了用户，仿真设计结果极具准确性、可靠性和高效性。因此，AWR 软件已经成为业界最强大、最灵活的射频/微波设计工具，在各种工程研发及应用中得到了非常广泛的使用。

本书主要分为 6 部分，共 19 章。

第一部分为第 1~3 章，主要包括射频微波电路基础、AWR 软件介绍和使用入门。第 1 章主要介绍射频技术的发展和趋势，介绍较常见的几种仿真设计工具。第 2 章介绍 AWR 软件的安装、视窗、套件组成及其功能、基本操作等，是 AWR 软件的基本概述。第 3 章为 AWR 软件入门，从电路图设计和版图设计两个方面进行具体介绍，并分别以整流器设计和放大器设计为例，进行详细、完整的步骤说明。

第二部分为第 4~8 章，主要介绍射频微波无源器件的仿真设计。第 4 章介绍功率分配器的电路图设计与仿真、版图设计与仿真、电磁提取分析等，该设计实练基本涵盖了进行电路仿真所需的各项软件功能，建议重点阅读。第 5 章是耦合器综合设计，包括基本、进阶、扩展三方面内容，难度逐级提升，并扩展到硬件加工版图的设计。第 6 章介绍低通滤波器的原理及仿真设计，包括集总参数和阶梯阻抗两种电路形式。第 7 章介绍阻抗匹配电路和阻抗变换电路的原理及仿真设计。第 6、7 章只进行电路图仿真，无版图设计。第 8 章为 DBR 带通滤波器的综合设计，此部分增加了版图标注内容。

第三部分为第 9~12 章，主要介绍电磁仿真设计，即 AWR 的三种电磁仿真器及其不同应用。第 9 章主要介绍 EMSight 电磁仿真，包括螺旋电感的电磁分析、微带缝隙天线的理论及设计应用。第 10 章重点介绍 AXIEM 平面电磁仿真，其中交指型带通滤波器的设计结构较为简单，微带贴片天线为综合设计，在扩展内容部分引入了针对版图的变量扫描。第 11 章介绍 Analyst 有限元电磁仿真，分别对简单结构、参数化模型、任意三维结构进行了说明。第 12 章为多层平面电路设计，以一个 DGS 低通滤波器的综合设计为例，说明了进行多层建模以及电磁分析的方法。

第四部分为第 13~17 章，主要介绍射频微波有源器件的仿真设计。第 13 章介绍功率放大器设计，第 14 章介绍低噪声放大器设计，第 15 章介绍振荡器设计，第 16 章介绍混频器设计，均有理论说明及设计实例介绍。第 17 章是 MMIC 设计，包括设计示例、版图、电磁提取和仿真、设计验证等基本内容，并进行 MMIC 电路设计的实练。

第五部分为第 18 章，主要介绍应用 AWR 软件的 VSS 套件进行通信系统仿真，内容包括通信系统的基本理论，并以调幅示例、端到端通信系统仿真、射频链路预算分析等设计示例加以说明。

第六部分为第 19 章，介绍 AWR 软件的高阶技术及其应用，内容包括智能滤波器综合、

智能连接线、符号生成器、图形预处理、输出等式、参数化建模及电磁扫描、X 模型元件和智能元件 iCells、器件库安装、PDK、DRC、负载牵引等各种智能模块及其应用示例。此章为 AWR 功能的提高部分，非常适合对软件应用有更高需求的设计人员。

需要特别说明的是，本书作为软件应用教程，强调“学”与“用”相结合，内容既有对软件功能、仿真设计的示例性介绍(读者可以逐步参照进行)，也包括一部分的设计实练和综合设计内容，设计时需要读者按要求自行计算才能进行后续内容。实练和综合设计项目均已在章节标题中标出，设计和计算结果可填入书中表格。因此，本书既适用于读者自学，也适用于高校的相关专业教学。

本书由张媛媛任主编，徐茵、徐粒栗任副主编。其中，徐茵编写第 6、7、9、13、14、15、16 章的理论部分，徐粒栗编写第 1 章以及第 2、4 章部分内容，张媛媛编写其余章节。

本书在编写过程中得到了西安电子科技大学教务处、校国家级电工电子实验教学中心的立项支持和帮助，得到了 NI AWR 公司的技术、资金支持和帮助，在此一并表示感谢！衷心感谢高樱编辑在各方面的大力支持和帮助！

由于本书内容涉及面广，编者水平有限，书中难免存在疏漏或不妥之处，敬请广大读者批评指正。联系方式：emlab@xidian.edu.cn。

编者

2019 年 6 月

目 录

第一部分 射频电路基础及 AWR 软件入门

第 1 章 射频/微波电路基础	2	2.5.17 修改版图属性和绘图属性	27
1.1 射频技术的发展和趋势	2	2.5.18 使用版图管理器	28
1.2 射频微波电路仿真设计工具	4	2.5.19 创建测量图和测量项	28
第 2 章 NI AWRDE 软件介绍	7	2.5.20 设置仿真频率并执行仿真	29
2.1 软件简介	7	2.5.21 调节和优化仿真	30
2.2 软件安装	8	2.5.22 使用命令快捷方式	30
2.2.1 安装综述	8	2.5.23 使用脚本和向导	31
2.2.2 安装准备	9	2.5.24 使用在线帮助	31
2.2.3 安装软件	9	第 3 章 AWR 软件入门	32
2.2.4 配置文件位置	10	3.1 电路图设计入门——整流器	32
2.3 软件视窗	10	3.1.1 创建工程和原理图	32
2.3.1 启动 NI AWRDE 软件	10	3.1.2 创建图表及测量项	33
2.3.2 视窗构成	11	3.1.3 设置频率及单位	34
2.4 套件组成及功能	12	3.1.4 仿真分析	35
2.4.1 Microwave Office 套件	12	3.1.5 手动调节	35
2.4.2 Visual System Simulator 套件	14	3.1.6 编辑图表	36
2.4.3 Analog Office 套件	15	3.1.7 保存工程	36
2.4.4 AXIEM 套件	16	3.2 版图设计入门——放大器	36
2.4.5 Analyst 套件	17	3.2.1 创建新工程	37
2.4.6 AWR 软件接口	18	3.2.2 导入版图工艺文件	37
2.5 基本操作	18	3.2.3 设置数据库单位和默认的网格大小	37
2.5.1 工程的内容	19	3.2.4 导入 GDSII 单元库	38
2.5.2 创建、打开和保存工程	19	3.2.5 导入数据文件	38
2.5.3 设置工程单位	19	3.2.6 调用数据文件并设置接地点	39
2.5.4 打开示例工程	19	3.2.7 改变元件符号	39
2.5.5 创建测试台	20	3.2.8 在版图中放置微带线元件	39
2.5.6 在 MWO 中使用原理图和网表	21	3.2.9 为原理图元件配置封装单元	41
2.5.7 在 VSS 中使用系统图	21	3.2.10 查看版图	42
2.5.8 使用元件管理器	22	3.2.11 衔接版图	42
2.5.9 在原理图中添加子电路	23	3.2.12 连通性检查	42
2.5.10 在系统图中添加子电路	24	3.2.13 固定版图单元	44
2.5.11 在原理图和系统图中添加端口	24	3.2.14 创建封装单元	45
2.5.12 在原理图和系统图中添加连线	24	3.2.15 为封装单元添加端口	46
2.5.13 在网表中添加数据	25	3.2.16 设置电容的封装	47
2.5.14 创建电磁结构	25	3.2.17 编辑 MTRACE2 元件版图	49
2.5.15 定义电磁结构界限	26	3.2.18 版图单元的衔接功能	50
2.5.16 创建版图	26	3.2.19 输出版图	53

第二部分 无源器件设计

第4章 实练：功率分配器设计.....	56	第6章 低通滤波器设计.....	91
4.1 功率分配器基本理论.....	56	6.1 低通滤波器基本理论.....	91
4.1.1 概述.....	56	6.1.1 概述.....	91
4.1.2 技术指标.....	56	6.1.2 参数指标.....	91
4.1.3 设计原理.....	57	6.1.3 设计理论.....	92
4.2 传输线计算工具 TXLine.....	58	6.2 实练：集总参数低通滤波器设计.....	95
4.3 电路图设计与仿真.....	59	6.2.1 创建原理图.....	95
4.3.1 初始参数计算.....	59	6.2.2 添加图表及测量项.....	96
4.3.2 物理参数计算.....	59	6.2.3 测量.....	96
4.3.3 电路图仿真分析.....	60	6.2.4 手动调节.....	96
4.4 版图设计与仿真.....	62	6.2.5 自动优化.....	96
4.4.1 定义封装.....	62	6.3 实练：阶梯阻抗微带低通滤波器设计.....	97
4.4.2 版图调整.....	64	6.3.1 低通原型滤波器设计.....	98
4.4.3 版图对比分析.....	67	6.3.2 阶梯阻抗微带滤波器初值计算.....	99
4.5 电磁提取分析.....	68	6.3.3 阶梯阻抗微带滤波器 仿真及优化.....	100
4.5.1 ACE 分析.....	68	第7章 阻抗匹配和阻抗变换设计.....	102
4.5.2 版图小型化调整.....	71	7.1 阻抗匹配和阻抗变换基本理论.....	102
4.5.3 AXIEM 分析.....	73	7.1.1 阻抗匹配原理.....	102
第5章 综合设计：耦合器设计.....	76	7.1.2 阻抗变换基本理论.....	108
5.1 耦合器基本理论.....	76	7.2 实练：阻抗匹配器设计.....	109
5.1.1 分支线耦合器的概念.....	76	7.2.1 初始值计算.....	109
5.1.2 分支线耦合器模型分析.....	76	7.2.2 仿真分析.....	110
5.1.3 分支线耦合器指标参数.....	79	7.2.3 手动调节.....	111
5.2 基本内容.....	79	7.3 实练：阻抗变换器设计.....	112
5.2.1 物理参数计算.....	79	7.3.1 初始值计算.....	113
5.2.2 电路原理图仿真.....	80	7.3.2 仿真分析.....	114
5.2.3 ACE 分析.....	81	7.3.3 手动调节.....	114
5.2.4 版图小型化设计.....	83	第8章 综合设计：DBR 带通滤波器设计.....	115
5.2.5 AXIEM 分析.....	84	8.1 DBR 滤波器基本理论.....	115
5.3 进阶内容.....	84	8.1.1 传统 DBR 结构.....	115
5.3.1 物理参数计算.....	84	8.1.2 等效 π 型网络.....	115
5.3.2 电路原理图仿真.....	86	8.1.3 基于 π 型网络的 DBR 滤波器.....	116
5.3.3 版图小型化设计.....	88	8.2 DBR 带通滤波器设计.....	117
5.3.4 ACE 分析.....	88	8.2.1 初始参数计算.....	117
5.3.5 AXIEM 分析.....	89	8.2.2 原理图仿真.....	118
5.4 扩展内容.....	89	8.2.3 ACE 分析.....	119
5.4.1 导出 DXF 版图.....	89	8.2.4 AXIEM 分析.....	120
5.4.2 导入 DXF 版图.....	89	8.2.5 二维版图标注.....	121
5.4.3 编辑版图.....	89	8.2.6 扩展内容：硬件版图完善.....	121
5.4.4 导出 PCB 版图.....	90		

第三部分 电磁仿真设计

第 9 章 EMSight 电磁仿真	124	11.2 层次设计和三维参数化模型	168
9.1 螺旋电感的电磁分析	124	11.2.1 层次设计的优点	168
9.2 微带缝隙天线设计	127	11.2.2 打开现有工程	168
9.2.1 微带天线基本理论	127	11.2.3 层次设计	169
9.2.2 实练: 微带缝隙天线设计	132	11.2.4 三维参数化单元模型	176
第 10 章 AXIEM 电磁仿真	137	11.3 任意三维结构	179
10.1 交指型带通滤波器设计	137	11.3.1 三维结构的使用方式	179
10.2 综合设计: 微带贴片天线设计	144	11.3.2 打开现有的工程	180
10.2.1 贴片天线设计	144	11.3.3 添加 SMA 连接器	180
10.2.2 匹配电路设计	153	11.3.4 添加焊盘	185
10.2.3 总电路设计	154	11.3.5 完整结构的仿真	186
10.2.4 扩展内容: 变量扫描和 版图微调	157	11.3.6 仅进行过渡仿真	189
11.3.7 密封芯片和键合线	192	第 12 章 综合设计: 多层平面电路 DGS 低通滤波器设计	197
第 11 章 Analyst 有限元电磁仿真	159	12.1 建模环境设置	197
11.1 简单的电磁结构	159	12.2 低通滤波器结构建模(表层电路设计)	201
11.1.1 安装 Analyst 3D EM 仿真器	159	12.3 DGS 结构建模(底层电路设计)	205
11.1.2 创建工程	160	12.4 AXIEM 电磁仿真	209
11.1.3 将 AXIEM 仿真转换为 Analyst 仿真	160	12.5 扩展内容: Analyst 电磁仿真	211
11.1.4 运行 Analyst 仿真	164		

第四部分 有源器件设计

第 13 章 功率放大器设计	214	16.1 混频器基本原理	257
13.1 放大器基本理论	214	16.1.1 混频器原理	257
13.1.1 功率放大器分类	214	16.1.2 混频器性能参数	258
13.1.2 功率放大器性能参数	216	16.2 单管 BJT 混频器设计	261
13.2 功率放大器设计	219	第 17 章 MMIC 设计	271
第 14 章 低噪声放大器设计	227	17.1 设计示例概要	271
14.1 低噪声放大器基本理论	227	17.1.1 打开 MMIC 设计示例	271
14.1.1 低噪声放大器简介	227	17.1.2 用户文件夹分组	273
14.1.2 低噪声放大器性能参数	229	17.2 版图设计	274
14.1.3 放大器的稳定性分析	231	17.2.1 指定线型	274
14.2 低噪声放大器设计	233	17.2.2 使用自动互连	277
17.2.3 版图自动衔接功能(Snap Together)	278	17.2.4 衔接以贴合(Snap to fit)	284
17.2.5 使用智能参数语法	285	17.3 电磁提取和仿真	287
第 15 章 振荡器设计	243	17.3.1 跨层次提取	288
15.1 振荡器基本理论	243	17.3.2 配置组	290
15.1.1 振荡器原理	243	17.3.3 使用增量提取	291
15.1.2 微波振荡器	243	17.3.4 使用数据集	294
15.1.3 振荡器性能参数	245		
15.1.4 振荡器设计步骤	247		
15.2 晶体振荡器设计	249		
第 16 章 混频器设计	257		

17.3.5 简化几何图形	298	17.5.4 版图:应用自动互连功能	314
17.4 设计验证	300	17.5.5 版图:改变背景颜色	320
17.4.1 连通性高亮	300	17.5.6 版图:衔接策略	320
17.4.2 连通查看器	302	17.5.7 版图:添加文本	320
17.4.3 版图原理图一致性检查(LVS)	304	17.6 实练:MMIC 电路性能分析	321
17.4.4 设计规则检查(DRC)	304	17.6.1 应用 PDK 打开新工程	321
17.5 扩展内容:高阶应用	307	17.6.2 工程参数设置	323
17.5.1 设计层次导览:原理图和版图	307	17.6.3 器件 IV 分析	324
17.5.2 原理图和版图交叉选择	310	17.6.4 理想稳态电路分析	325
17.5.3 智能参数语法	311		

第五部分 通信系统仿真

第 18 章 VSS 通信系统仿真	332	18.2.9 添加测量项	342
18.1 通信系统基本理论	332	18.2.10 运行仿真并分析结果	343
18.1.1 数据类型	332	18.3 端到端通信系统仿真	343
18.1.2 复包络信号(CE)	333	18.3.1 创建 QAM 工程	343
18.1.3 中心频率和采样频率	334	18.3.2 创建 QAM 端到端通信系统框图	344
18.1.4 参数传播	335	18.3.3 添加图表和测量项	346
18.2 幅度调制仿真	336	18.3.4 运行仿真分析	347
18.2.1 创建工程	336	18.3.5 调谐系统参数	350
18.2.2 默认工程设置选项	337	18.3.6 创建 BER 和 SER 仿真	351
18.2.3 创建系统框图	337	18.3.7 将 BER 曲线结果转换为表格	355
18.2.4 在系统图中放置块	338	18.4 射频链路预算分析	356
18.2.5 连接块并添加测试点	339	18.4.1 创建射频链路	356
18.2.6 修改模块参数	340	18.4.2 添加测量项	357
18.2.7 指定系统仿真器选项	341	18.4.3 成品率分析	359
18.2.8 创建图形以查看结果	341		

第六部分 AWR 软件高阶技术

第 19 章 AWR 高阶技术及应用	362	19.5.2 应用示例	384
19.1 智能滤波器综合	362	19.6 参数化建模及电磁扫描	388
19.1.1 滤波器设计	363	19.6.1 简介	388
19.1.2 滤波器综合	370	19.6.2 应用示例	389
19.1.3 阻抗匹配	373	19.7 X 模型元件和智能元件 iCells	397
19.2 智能连接线	375	19.8 器件库安装	398
19.3 符号生成器	378	19.8.1 本地器件库安装	399
19.3.1 简介	378	19.8.2 Murata 器件库安装	401
19.3.2 应用示例	380	19.8.3 NXP 器件库安装	402
19.4 图形预处理	381	19.9 制程工艺开发向导	404
19.5 输出等式	384	19.10 设计规则检查	408
19.5.1 简介	384	19.11 负载牵引	408

第一部分

射频电路基础及AWR软件入门

射频电路基础

微波毫米波工程十讲(第2讲)微波电路基础

微波毫米波工程十讲(第2讲)微波电路基础

微波毫米波工程十讲(第2讲)微波电路基础

微波毫米波工程十讲(第2讲)微波电路基础

微波毫米波工程十讲(第2讲)微波电路基础

微波毫米波工程十讲(第2讲)微波电路基础

微波毫米波工程十讲(第2讲)微波电路基础

微波毫米波工程十讲(第2讲)微波电路基础

微波毫米波工程十讲(第2讲)微波电路基础

微波毫米波工程十讲(第2讲)微波电路基础

微波毫米波工程十讲(第2讲)微波电路基础

微波毫米波工程十讲(第2讲)微波电路基础

微波毫米波工程十讲(第2讲)微波电路基础

微波毫米波工程十讲(第2讲)微波电路基础

微波毫米波工程十讲(第2讲)微波电路基础

微波毫米波工程十讲(第2讲)微波电路基础

微波毫米波工程十讲(第2讲)微波电路基础

微波毫米波工程十讲(第2讲)微波电路基础

微波毫米波工程十讲(第2讲)微波电路基础

微波毫米波工程十讲(第2讲)微波电路基础

微波毫米波工程十讲(第2讲)微波电路基础

微波毫米波工程十讲(第2讲)微波电路基础

微波毫米波工程十讲(第2讲)微波电路基础

第 1 章 射频微波电路基础

1.1 射频技术的发展和趋势

射频/微波设计必须满足下一代通信和雷达系统所要求的许多严格的器件/系统需求,服务于 5G、物联网、航空/国防网络、无线生物医学设备和支持 ADAS 车辆等多种应用。5G 通信系统将通过提高频谱效率和提高带宽,利用新的调制波形、扩展载波聚合和毫米波频带,来实现更高的数据速率和容量。随着 5G 标准的逐步充实和落地,5G 商用/预商用的大幕即将拉开。国内三大运营商、基站设备制造商、移动芯片厂商和手机厂商等均在加快 5G 商用部署的脚步,目前整个无线通信行业已经进入 5G 产品研发、测试和生产的新阶段。

5G 已来,6G 也即将来临。通信从 1G(0.9 GHz)到现在的 4G(1.8 GHz 以上),使用的无线电磁波的频率在不断升高,因为频率越高,允许分配的带宽范围越大,单位时间内所能传递的数据量就越大。5G 已经进入了毫米波频段,6G 将进入太赫兹频段。太赫兹频段是指 100 GHz~10 THz,是一个频率比 5G 高出许多的频段。目前,通信行业正在积极开拓尚未开发的太赫兹频段,已有厂商在 300 GHz 频段上实现了 100 Gb/s 的通信速率。这对射频技术提出了更高的要求。行业专家认为 6G 将会有 4 个发展方向:一是多网络的融合,陆地、天空甚至多层次网络融合,将来卫星跟陆地的通信联合组网中,不光有低轨卫星,还有高轨卫星,甚至有更高的卫星,进行全网络的覆盖;二是频段更高,未来随着芯片或者物理技术的成熟会使用更高的频段,而且频谱的利用方式也会发生变化;三是采用“去蜂窝”网络架构、无线能量传输技术等;四是要实现网络的 IT 化和个性化,比如可能发展成“个人定制类型的通信网络”等。

5G 是一个万物智联的世界,车联网、远程医疗等应用需要一个几乎无盲点的全覆盖网络,但“全覆盖”梦想不可能一蹴而就,相信这将在 6G 时代得到更好的完善和补充。网络建设及射频技术发展也一直不断呈现出新的趋势,例如软件化和开源化的趋势将颠覆网络建设方式。在 6G 时代,软件无线电(SDR)、软件定义网络(SDN)、云化、开放硬件等技术估计将进入成熟阶段。再如基站小型化的发展趋势,已有公司正在研究“纳米天线”,如同将手机天线嵌入手机一样,将采用新材料的天线紧凑集成于小基站里,以实现基站小型化和便利化,让基站无处不在。总体来看,6G 时代的网络建设方式或将发生前所未有的变化。

未来服务于 5G/6G 的技术内容,研究方向大致基于以下几点:

(1) 大规模无线通信物理层基础理论与技术。

针对未来移动通信的巨流量、巨连接持续发展需求,以及由此派生出的大维空时无线通信和巨址无线通信两个方面的科学问题,开展大规模无线通信物理层基础理论与技术研究,形成大规模无线通信信道建模和信息理论分析基础、无线传输理论方法体系及计算体系,获取源头创新理论与技术成果,构建实测、评估与技术验证原型系统。研究面向未来全频段、全场景、大规模无线通信系统构建,建立典型频段和场景下统一的大维信道统计表征模型,研究大维统计参数获取理论方法;围绕大维空时无线通信和巨址无线通信,开展大规模无线通信极限性能分析研究,形成大规模无线通信信息理论分析基础;研究具有普适性的大维空时传输理论与技术,突破典型频段和场景下大维信道信息获取瓶颈,解决大维空时传输的系统实现复杂性以及对典型频段和场景的适应性问题,支撑巨流量的系统业务承载;研究大维随机接入理论与技术,解决典型频段和场景下大维随机接入的频谱和功率有效性、实时性及可靠性等问题,支撑巨连接的系统业务承载;研究大规模无线通信的灵巧计算、深度学习及统计推断等理论与技术,形成大规模无线通信计算体系,解决计算复杂性和分析方法的局限性等问题。

(2) 太赫兹无线通信技术与系统。

面向空间高速传输和下一代移动通信的应用需求,研究太赫兹高速通信系统总体技术方案、太赫兹空间和地面通信的信道模型以及高速高精度的太赫兹信号捕获和跟踪技术;研究低复杂度、低功耗的高速基带信号处理技术和集成电路设计方法,研制太赫兹高速通信基带平台;研究太赫兹高速调制技术,包括太赫兹直接调制技术、太赫兹混频调制技术、太赫兹光电调制技术,研制太赫兹高速通信射频单元;集成太赫兹通信基带、射频和天线,开发太赫兹高速通信实验系统,完成太赫兹高速通信试验。

(3) 面向基站的大规模无线通信新型天线与射频技术。

面向未来移动通信应用,满足全场景、巨流量、广应用下无线通信的需求,解决跨频段、高效率、全空域覆盖天线射频领域的理论与技术实现问题,研究可配置、大规模阵列天线与射频技术,突破多频段、高集成射频电路面临的低功耗、高效率、低噪声、非线性、抗互扰等多项关键性挑战,提出新型大规模阵列天线设计理论与技术、高集成度射频电路优化设计理论与实现方法,以及高性能大规模模拟波束成型网络设计技术,研制实验样机,支撑系统性能验证。

(4) 兼容C波段的毫米波一体化射频前端系统关键技术。

为满足未来移动通信基站功率和体积约束下高集成部署和大容量的需求,研究30 GHz以内毫米波一体化大规模MIMO前端架构和关键技术以及与Sub 6 GHz前端兼容的技术。针对毫米波核心频段融合分布参数与集总参数的电路建模与设计方法,采用低功耗易集成的分布式天线架构与异质集成技术,大幅提升同等阵列规模下毫米波阵列的发射EIRP和接收通路的噪声性能。同时探索多模块毫米波核心频段分布式阵列与Sub 6 GHz大规模全数字化射频前端的共天线罩集成化设计技术,探索高效率易集成收发前端关键元部件以及辐射、散热等关键技术问题,突破大规模MIMO前端系统无源与有源测试和校正等系统级技术;最终前端系统在高频段与低频段同时实现大范围波束扫描,且保持高频段与低频段前端之间的高隔离。

(5) 基于第三代化合物半导体的射频前端系统技术。

针对新一代无线通信的需求,研究基于第三代化合物半导体工艺的射频前端系统集成技术及毫米波有源和无源电路设计理论与方法。探索适用于新一代无线通信毫米波频段的第三代半导体器件的功率密度、线性、散热等性能提升技术及使用该类器件实现高性能功率放大器、低噪声放大器、双工开关等关键有源电路的原创性拓扑结构;侧重研究从半导体器件结构、工艺制程等方面及创新电路架构设计等方面提升功率放大器输出功率、效率以及线性度等关键指标的设计方法;研究 GaN MMIC 中低损耗互连(传输线)以及其他高性能无源功能性器件(如功分器、耦合器等)的设计方法;提出基于 GaN HEMT 的高集成度射频集成前端的设计新理念与新方法;探索基于第三代化合物半导体芯片的集成与封装技术。研究包含多种功能电路的高集成度 MMIC 上的设计及性能优化方法,研究从封装方面提升电路性能的方法,实现毫米波芯片、封装与天线一体化,优化前端系统的整体射频性能。

1.2 射频微波电路仿真设计工具

微波系统的设计越来越复杂,对电路的指标要求越来越高,电路的功能越来越多,电路的尺寸要求越做越小,而设计周期却越来越短。传统的设计方法已经不能满足系统设计的需要,使用微波 EDA 软件工具进行微波元器件与微波系统的设计已经成为微波电路设计的必然趋势。随着单片集成电路技术的不断发展,以 GaAs、硅为基础的微波、毫米波单片集成电路(MIMIC)和超高速单片集成电路(VHSIC),都面临着一个崭新的发展阶段,电路的设计与工艺研制日益复杂化,如何进一步提高电路性能、降低成本、缩短电路的研制周期已经成为电路设计的一个焦点,而 EDA 技术是设计的关键。EDA 技术的范畴包括电子工程师进行产品开发的全过程,以及电子产品生产过程中期望由计算机提供的各种辅助功能。一方面,EDA 技术可分为系统级、电路级和物理实现级三个层次的辅助设计过程;另一方面,EDA 技术应包括电子线路从低频到高频、从线性到非线性、从模拟到数字、从分立电路到集成电路的全部设计过程。

随着无线和有线设计向更高频率的发展和电路复杂性的增加,对于高频电磁场的仿真,由于忽略了高阶传播模式而引起仿真误差。另外,受传统模式等效电路分析方法的限制,与频率相关电容、电感元件的等效模型也会引起误差。例如,在分析微带线时,易于出错的结构通常包含交叉、阶梯弯曲、开路、缝隙等情况,因为在这些情况下都存在多模传输。为此,通常采用全波电磁仿真技术去分析电路结构,通过电路仿真得到准确的非连续模式 S 参数。

美国 NI AWR 公司的 AWR 设计套件为业界提供了最强大、最灵活的射频/微波设计环境。该套件采用独一无二的 AWR 软件高频设计平台,结合开放式设计环境和先进的统一数据模型,实现了前所未有的开放性和交互性。AWR 能实现射频与微波小型化电路设计仿真计算,以及单片微波集成电路(MMIC)、片上系统(MSOC)和微波射频系统级封装(MSIP)设计仿真。AWR 软件使用简单,建模容易,需要的计算机资源低,仿真精度高,整体设计效率高,尤其在 MMIC、MSIP 方面,AWR 软件具有极其高效和准确的解决方案。AWR

的平面电磁求解器可以实现 MMIC、MSOC 以及 MSIP 电磁仿真,从而有效提高设计器件的可靠性。另外,AWR 还提供 Analyst 电磁求解器,基于有限元算法,可以对三维电磁场进行设计和分析。同时,AWR 还为其他电磁仿真软件、热仿真软件提供电磁仿真接口,如 MWS、HFSS、IE3D、SYMMIC 等,极大地方便了用户。

其他的业界射频/微波 EDA 软件还包括 ADS、Sonnet、IE3D、Ansys HFSS、MWS 等。

ADS(Advanced Design System)是 Agilent 公司推出的微波电路和通信系统仿真软件,是国内各大学和研究所使用最多的软件之一。其功能非常强大,仿真手段丰富多样,可实现包括时域和频域、数字与模拟、线性与非线性、噪声等多种仿真分析手段,并可对设计结果进行成品率分析与优化,从而大大提高了复杂电路的设计效率,是非常优秀的微波电路、系统信号链路的设计工具。ADS 主要应用于射频和微波电路的设计、通信系统的设计、DSP 设计和向量仿真。

Sonnet 是一种基于矩量法的电磁仿真软件,面向 3D 平面高频电路设计系统,也是微波、毫米波领域内的设计工具,还可以实现电磁兼容/电磁干扰设计。Sonnet 应用于平面高频电磁场分析,频率从 1 MHz 到几千 GHz。其主要应用有微带匹配网络、微带电路、微带滤波器、带状线电路、带状线滤波器、过孔(层的连接或接地)、耦合线分析、PCB 电路分析、PCB 干扰分析、桥式螺线电感器、平面高温超导电路分析、毫米波集成电路(MMIC)设计和分析、混合匹配的电路分析、HDI 和 LTCC 转换、单层或多层传输线的精确分析、多层的平面电路分析、单层或多层的平面天线分析、平面天线阵分析、平面耦合孔的分析等。

IE3D 是一个基于矩量法的电磁场仿真工具,可以解决多层介质环境下的三维金属结构的电流分布问题。IE3D 可分为 MGRID、MODUA 和 PATTERNVIEW 三部分: MGRID 为 IE3D 的前处理套件,功能有建立电路结构、设定基板与金属材料的参数以及设定模拟仿真参数; MODUA 是 IE3D 的核心执行套件,可执行电磁场的模拟仿真计算、性能参数(Smith 圆图、S 参数等)计算和参数优化计算; PATTERNVIEW 是 IE3D 的后处理套件,可以将仿真计算结果电磁场的分布以等高线或向量场的形式显示出来。IE3D 仿真结果包括 S、Y、Z 参数, VWSR, RLC 等效电路,电流分布,近场分布和辐射方向图,方向性,效率和 RCS 等;应用范围主要包括微波射频电路、多层印刷电路板、平面微带天线设计的分析与设计。

Ansys 公司推出的三维电磁仿真软件 HFSS 是世界上第一个商业化的三维结构电磁场仿真软件,是业界公认的三维电磁场设计和分析的电子设计工业标准。HFSS 提供了简洁直观的用户设计接口和精确自适应的场求解器,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。HFSS 软件拥有强大的天线设计功能,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 3 dB 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:

- 基本电磁场数值解和开边界问题、近远场辐射问题;
- 端口特征阻抗和传输常数;
- S 参数和归一化 S 参数;
- 结构的本征模或谐振解。

由 Ansys HFSS 和 Ansys Designer 构成的 Ansys 高频解决方案是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。

CST(Computer Simulation Technology) 公司推出的高频三维电磁场仿真软件 MICROWAVE STUDIO(MWS)广泛应用于移动通信、无线通信(蓝牙系统)、信号集成和电磁兼容等领域，能为用户的高频设计提供直观的电磁特性。MICROWAVE STUDIO 除了主要的时域求解器模块外，还为某些特殊应用提供本征模及频域求解器模块。CAD 文件的导入功能及 SPICE 参量的提取增强了设计的可能性并缩短了设计时间。另外，MICROWAVE STUDIO 的开放性体系结构能为其他仿真软件提供链接，使得 MICROWAVE STUDIO 与其他设计环境能够集成。

第 2 章 NI AWRDE 软件介绍

2.1 软件简介

NI AWR Design Environment(NI AWRDE)软件由美国 NI 公司下属的 AWR 子公司开发,是进行射频微波电路设计的专业软件,也是本专业领域在全球范围内最主流、最先进的工程设计软件,通常也简称为 AWR 软件。全球超过 700 家公司在应用 AWR 的产品,几乎涵盖了全部的射频微波电子器件和系统的生产商。

NI AWRDE 软件是一套完整的 EDA 软件解决方案,真正简化了产品从概念、仿真到生产的整个流程。AWR 公司不断对产品进行优化与创新,对于产品、库的建立和设计方法等也提供技术咨询服务。NI AWRDE 具有革命性、前瞻性的产品架构和开放式软件平台,充分展现了 AWR 公司在射频、微波和毫米波设计应用领域的专业技术与多年的经验积累,并将电子设计自动化的效率提高到了一个前所未有的高度。

NI AWRDE 软件包含若干个功能强大的套件工具,如 Microwave Office (MWO)、Visual System Simulator (VSS)、Analog Office (AO)、AXIEM、Analyst 等。这些工具完全集成在 NI AWRDE 软件中,可以共同用于创建集成系统、RF 或模拟设计环境等。因此,设计人员无需离开 NI AWRDE 设计环境,就可以将电路设计整合到系统设计中。

NI AWRDE 软件可以设计分析射频/微波模块(MCM、SiP)、集成电路(MIC、MMIC、RFIC)、平面天线、射频印刷电路板(PCB)以及电磁分析、通信系统链路仿真等,基本涵盖了微波/射频领域内的所有研究内容。

NI AWRDE 软件创造性地统一了电路图设计和版图设计,单一数据库直接与内核同步,不需要通过许多层软件。无论设计是源自电路图、仿真还是版图,NI AWRDE 软件都能提供从原理到仿真,再到最后版图实现所需要的所有设计平台。

NI AWRDE 软件的仿真引擎包括线性仿真器、高级谐波平衡仿真器(APLAC 谐波平衡仿真器)、3D 平面电磁仿真器(AXIEM 工具)、3D-FEM 仿真器(Analyst 工具)、瞬态电路仿真器(APLAC 瞬态仿真器或可选的 HSPICE 仿真器)等。

NI AWRDE 软件界面直观、统一,其核心是高级的面向对象技术,可以确保软件具有紧凑性、快速性与可靠性。NI AWRDE 软件还兼具开放性和交互性,能与第三方工具无缝整合,因而具有极高的工程实用性,在通信、电子、半导体、航天等领域已有广泛的应用。

登录 AWR 官网 <http://www.awrcorp.com/cn>, 可以查看 NI AWRDE 软件的更多介绍。

NI AWRDE 软件的基本设计流程如图 2-1 所示。

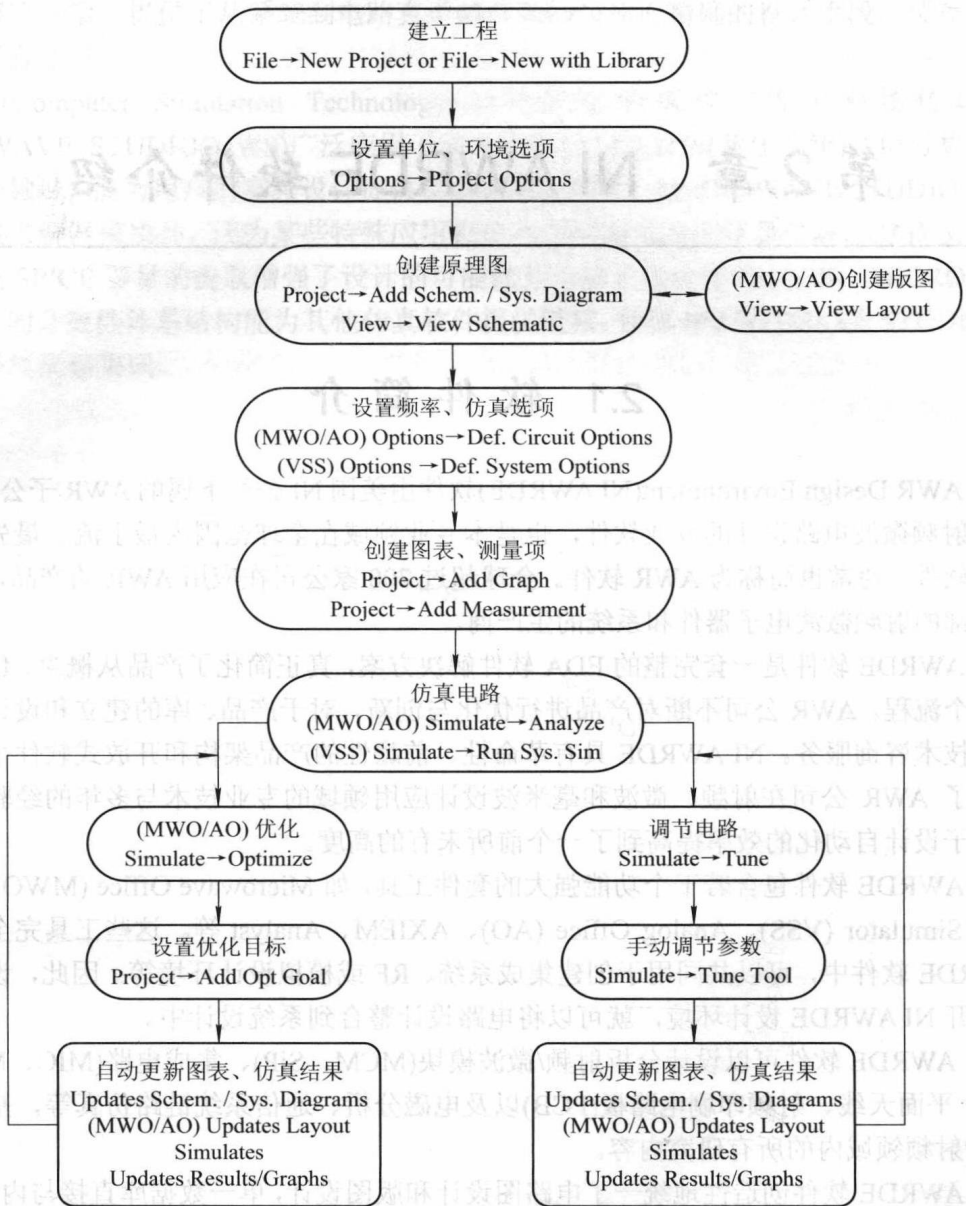


图 2-1 基本设计流程

2.2 软件安装

2.2.1 安装综述

用户可以从 NI AWR 网站(www.ni.com/awr)下载并安装 NI AWRDE, 或者索取安装光盘来安装该软件。安装后可以通过 NI AWRDE 软件中的元件管理器或者在 NI AWR 的网站上访问供应商器件库。