



微波电路和无线系统

仿真与设计

柳培忠 黄德天 邓建华 编著



厦门大学出版社 国家一级出版社
XIAMEN UNIVERSITY PRESS 全国百佳图书出版单位



微波电路和无线系统 仿真与设计

柳培忠 黄德天 邓建华 编著



厦门大学出版社 国家一级出版社
XIAMEN UNIVERSITY PRESS 全国百佳图书出版单位

图书在版编目(CIP)数据

微波电路和无线系统仿真与设计/柳培忠,黄德天,邓建华编著. —厦门:厦门大学出版社, 2015.6

ISBN 978-7-5615-5573-6

I. ①微… II. ①柳… ②黄… ③邓… III. ①微波电路-系统仿真②微波电路-系统设计③无线电通信-系统仿真④无线电通信-系统设计 IV. ①TN710②TN92

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 121189 号

官方合作网络销售商:



厦门大学出版社出版发行

(地址:厦门市软件园二期望海路 39 号 邮编:361008)

总编办电话:0592-2182177 传真:0592-2181406

营销中心电话:0592-2184458 传真:0592-2181365

网址:<http://www.xmupress.com>

邮箱:xmup@xmupress.com

三明市华光印务有限公司印刷

2015 年 6 月第 1 版 2015 年 6 月第 1 次印刷

开本:787×1092 1/16 印张:28

字数:682 千字 印数:1~2 000 册

定价:65.00 元

本书如有印装质量问题请直接寄承印厂调换

内 容 简 介

本书是一本关于射频/微波电路和无线系统仿真与设计技术的著作,主要内容包括:微波技术基础,ADS与HFSS软件的应用,滤波器、振荡器、低噪声放大器、混频器、功率放大器等部件以及无线系统仿真和设计方法。本书还扼要介绍了笔者近年来研究开发的空间映射优化、建模技术。

本书内容深入浅出,特别注重理论与工程实用相结合,既有严密的微波电路理论分析,也有大量电路设计实例和仿真实验过程的详细讲解,可供读者深入了解射频/微波电路和无线系统的设计开发过程,并熟练掌握相关仿真方法与手段。本书可作为相关专业大学高年级学生和研究生教材,同时也可作为工程技术人员学习和设计射频/微波电路、无线系统的实用参考书。

序 言

近年来,世界军事信息技术有了长足发展,一些发达国家纷纷建立起先进的C⁴I系统、国土防空系统和反导系统,雷达、精确制导武器、电子战系统、战场通信、智能武器、遥控遥测系统、军用航天飞行系统的研制技术也日新月异。这些都与微波技术水平的快速发展息息相关,微波技术在国防建设和国民经济中发挥着不可替代的作用。

信息技术被视为未来战争的核心,电子系统对经济建设和国家安全至关重要。我国国防信息化建设任务十分紧迫并面临着诸多挑战。微波电路与系统已成为现代电子信息系统中重要的组成部分。近二三十年来,微波技术的应用领域不断扩大,新器件、新技术,特别是新系统的不断出现,进一步推动了微波技术的发展。随着计算机辅助设计技术的发展以及各种商业仿真软件不断推陈出新,射频/微波电路和无线系统仿真成为设计开发的重要手段,直接关系到各种复杂系统和装备的开发速度和质量。因此,电子信息系统与技术领域的学生、研究人员和工程技术人员必须不断学习和掌握该领域迅速发展的仿真与设计方法。

《微波电路和无线系统仿真与设计》是一本关于射频/微波电路和无线系统仿真与设计技术的著作。本书作者长期从事国防信息技术研究,具备扎实的理论基础和丰富的工程实践经验。该书的突出特点是,紧密联系科研实践,物理概念清晰,既有大量翔实的工程设计、仿真实例,也有前沿理论研究成果介绍。本书既是作者多年从事微波与无线通信技术研究的工作总结,也是一本系统介绍仿真与设计技术的专业书籍。该书的出版,必将有助于我国培养更多射频/微波技术和系统人才,促进我国国防工业发展以及信息建设。

张翔 中将

中国人民解放军国防信息技术研究会副会长

原解放军第二炮兵部队副司令员

2015年5月

前言

射频/微波电路广泛应用于雷达、导航、电子对抗、武器制导和无线通信系统。国内外关于电路理论和无线系统的教材和书籍很多,大都侧重于基础性理论和设计原理。高年级大学生、研究生以及刚进入微波射频领域的工程师普遍感到现有专业书籍缺少实际工程设计知识,在设计、仿真电路时无从下手。因此,迫切需要一本密切结合工程实践,并能详细指导微波射频电路和无线系统仿真与设计的书籍,让读者在仿真设计过程中去深入思考、探索,发现问题和解决问题,并加深对基础理论知识的掌握,这正是写作本书的目的。

本书省略了冗长的理论细节与数学推导,简明扼要地给出了主要电路原理及相关概念,以便将重点集中在仿真与设计上。因此,读者必须具备基本的电路理论、电磁场和微波技术以及无线系统方面的基础知识,并可以通过本书全面了解各种常用微波射频电路和无线系统仿真设计过程的知识。如果涉及微波射频电路理论中的严格推导,可以参考相关专业书籍。本书给出了大量的电路设计实例,详细介绍了各种电路设计的基本步骤及仿真过程,稍加修改就能应用于针对特定要求的各种实际工程设计中。

随着微波射频电路仿真软件和三维电磁仿真软件技术的发展,微波电路及系统的设计变得简单、快捷,研制周期大大缩短,成本大大降低。Agilent公司的ADS和Ansoft公司的HFSS软件功能强大,在国内得到了广泛应用。因此,本书所有的设计实例都基于这两个软件。本书第2章只介绍ADS和HFSS的基础应用,它们的高级应用将在每个电路设计实例中由浅入深逐步讲解。

在编写本书时,笔者力图使本书具有如下特点:

基础性

本书着眼于常用微波射频电路仿真设计技术的基础介绍,并结合实际工程应用,尽量使读者对所学知识能够融会贯通。

实践性

本书通过大量电路设计实例介绍微波射频电路、无线系统的仿真与设计方法及技巧,力求理论联系工程实践,并强调创新性思维与解决实际问题能力的培养。

前沿性

本书一些内容融入了笔者研制微波射频电路和无线系统的最新成果,如空间映射方法等近年来新颖的微波电路优化建模方法,以及低温共烧陶瓷(low-temperature cofired ceramics, LTCC)复杂多层微波电路设计方法等。

本书所给出的各种无线系统仿真实例在国防与民用领域都具有代表性,因为系统复杂、内容众多,不可能面面俱到,所以只针对每个系统技术重点结合协仿真技术领域进行侧重介

绍。因此,对于线性调频(linear frequency modulated, LFM)雷达系统,侧重讲解数字信号处理子系统的协仿真过程;对于导弹导引头系统,侧重讲解微波电路子系统的协仿真过程;对于 2.45 GHz 频率的射频识别(radio frequency identification, RFID)系统,侧重讲解无线信道子系统的协仿真过程;对于模拟传输参考超宽带通信(transmitted reference ultra-wideband communications, TR-UWB)系统,侧重讲解调制解调子系统的协仿真过程。

本书第 1 章至第 6 章第 2 节由华侨大学柳培忠博士撰写,第 6 章第 3 节至第 9 章由华侨大学黄德天博士撰写,邓建华博士为本书的主要策划和技术指导者。栾佳、李东、李铮迪、吕波、曾仲辉、丁川、陈海波、骆炎民、洪铭、顾培婷、邓宗睿、李波、王哲和张力等为书稿的文字整理和图表绘制做了大量工作,在此表示感谢。特别感谢 Agilent 公司提供 ADS 软件和相关技术文档,以及 Ansoft 公司提供 HFSS 软件和相关技术文档。同时也感谢近年来国防研究项目、国防预研基金、国家自然科学基金和国家“863”计划、福建省物理网云计算平台建设项目(2013H2002)对我们在射频/微波电路和无线系统领域研究项目提供的资助,正是这些项目研究成果的积累,才使我们具备了写作此书的技术基础。最后感谢中国西南电子技术研究所甘体国研究员、黄建研究员和电子科技大学王秉中教授 3 位恩师,在百忙之中抽出时间对本书进行了认真细致的审校。

由于笔者水平有限,虽几易其稿,恐仍有错误和不当之处,敬请读者批评指正。

电子邮箱:jh_deng@hotmail.com,pzliu@hqu.edu.cn。

著作者

2015 年 4 月

目 录

第 1 章 绪 论	1
1.1 微波射频电路特点以及在无线通信系统中的地位	1
1.2 微波射频电路技术的发展历程	3
1.3 微波射频电路计算机辅助设计技术介绍	4
1.4 微波射频电路基础知识	7
1.4.1 电路分类	7
1.4.2 常用微波介质基片与接头	8
1.4.3 关于分贝的概念辨析	9
第 2 章 ADS 与 HFSS 软件基础	13
2.1 ADS 软件基本知识	13
2.1.1 ADS 的仿真分析方法、控制器与辅助功能	13
2.1.2 ADS 与其他 EDA 软件和测试设备间的连接	21
2.1.3 ADS 数据传输格式	22
2.1.4 ADS 快速入门	24
2.2 HFSS 软件基本知识	34
2.2.1 HFSS 功能概述及基本原理	34
2.2.2 HFSS 实例入门	38
2.2.3 复杂结构参数化建模实例	51
2.2.4 使用 Matlab 进行海量数据表面建模	59
2.2.5 HFSS 场计算器的使用	61
第 3 章 微波无源电路仿真与设计	71
3.1 S 参数仿真	71
3.2 滤波器、耦合器基础	79
3.2.1 滤波器、耦合器基本原理	79
3.2.2 滤波器、耦合器技术参数	80
3.2.3 微波无源电路 CAD 设计过程	82



3.3	微波无源电路设计实例	83
3.3.1	LC 滤波器与分支线耦合器的 Design Guide 设计实例	83
3.3.2	平行耦合谐振单元带通滤波器设计实例	95
3.3.3	微波 6 线朗格耦合器仿真实例	111
3.3.4	微波 LTCC 滤波器设计仿真实例	120
3.3.5	微带贴片天线设计仿真实例	135
第 4 章	微波放大器仿真与设计	143
4.1	直流(DC)仿真	143
4.2	交流(AC)仿真	146
4.3	大信号 S 参数	148
4.4	增益压缩仿真	150
4.5	P2D 仿真	152
4.6	微波放大器基础	155
4.6.1	微波放大器原理	155
4.6.2	微波放大器技术参数	157
4.6.3	功率放大器的线性化技术	158
4.6.4	微波放大器的稳定性	160
4.6.5	微波放大器 CAD 设计过程	160
4.7	微波放大器仿真设计实例	164
第 5 章	微波振荡器仿真与设计	182
5.1	瞬态/卷积仿真	182
5.1.1	瞬态与卷积仿真描述	183
5.1.2	瞬态仿真器的参数设置	185
5.1.3	关于瞬时卷积仿真的建议	189
5.1.4	解决收敛问题	189
5.1.5	卷积分析中如何避免仿真误差	190
5.2	微波振荡器基础	196
5.2.1	微波振荡器原理	196
5.2.2	微波振荡器技术参数	199
第 6 章	微波检波器、混频器仿真与设计	202
6.1	谐波平衡仿真	203
6.1.1	谐波平衡	203
6.1.2	谐波平衡技术参数	203

6.1.3	选择谐波平衡求解器类型	212
6.2	谐波平衡方法理论基础	218
6.2.1	理论基础	218
6.2.2	仿真问题解决	222
6.3	微波检波器、混频器基础	226
6.3.1	微波检波器、混频器原理	226
6.3.2	混频器性能指标	231
第 7 章	微波/射频收发前端仿真与设计	234
7.1	包络仿真	234
7.1.1	关于包络仿真	235
7.1.2	包络仿真的理论基础	237
7.1.3	包络仿真参数设置	243
7.1.4	包络仿真例子	255
7.2	射频系统预算分析仿真	257
7.2.1	射频系统预算分析	257
7.2.2	射频系统预算分析的操作理论	262
7.2.3	使用预算控件	272
7.2.4	设计例子	274
7.3	无线收发前端及信道基础	290
7.3.1	无线接收机的构成与技术参数	290
7.3.2	无线发射机的构成与技术参数	295
7.3.3	无线收发前端 CAD 设计过程	298
第 8 章	无线信道数模协仿真与设计	303
8.1	托勒密数据流仿真技术基础	303
8.1.1	托勒密仿真基本理论与数据类型	303
8.1.2	HDL 协仿真与数字信号处理仿真技术	312
8.1.3	Matlab 协仿真技术	315
8.1.4	信号处理与模拟/射频协仿真技术	316
8.2	无线传输信道构成与技术参数	324
8.3	无线收发机及信道仿真设计实例	326
8.3.1	ADS 自带 CommSys 仿真实例	326
8.3.2	多普勒雷达前端链路仿真实例	368
8.3.3	卫星链路高速数传系统的前端仿真设计实例	372

第9章 空间映射优化、建模技术	377
9.1 空间映射方法理论基础	378
9.2 空间映射方法在 LTCC 电路设计中的应用	380
9.2.1 初始空间映射方法应用于 LTCC 电容、电感的优化	381
9.2.2 主动空间映射方法应用于 LTCC 过渡、滤波器的优化	387
9.2.3 神经网络空间映射方法应用于 LTCC 滤波器的优化	399
9.3 新型空间映射优化算法开发	414
9.3.1 对等效电路进行综合的稳定增强方法	415
9.3.2 影子粗糙模型与特征元件	417
9.3.3 特征元件空间映射算法	417
9.3.4 LTCC 电容优化实例	419
9.4 空间映射优化系统软件	421
9.4.1 空间映射优化软件功能模块及构架	421
9.4.2 空间映射优化软件的运行及使用	422
9.5 空间映射建模技术	425
9.5.1 模型库的开发过程及关键技术	426
9.5.2 LTCC 无源元件的增强模型实例	427



第 1 章

绪 论

1.1 微波射频电路特点以及在无线通信系统中的地位

微波是波长在 $0.1\text{ m} \sim 1\text{ mm}$ 范围(相应的频率约从 $300\text{ MHz} \sim 300\text{ GHz}$)的电磁波,包括分米波、厘米波和毫米波等波段。现代一般认为短于 1 mm 的电磁波即亚毫米波,也是现代微波研究的一个重要领域。微波的波长比普通电磁波短得多,即频率高得多,这种量变引起了电磁波的质变,从而使得微波具有一系列不同于普通无线电波的特点。同时,微波的波长与可见光相比则要长得多,即频率要低得多,因此它与光波也不相同。总之微波具有它自身的特点。要掌握微波这一波段,就意味着要解决这一波段的一系列有关技术问题,包括电磁波的产生、放大、发射、接收、传输、控制和测量。微波波段的这些技术在某些方面是较低频率的无线电技术的发展。但整体来说,它是建立在新的原理和基础上的。例如,在微波传输方面采用了一整套与普通无线电波不同的技术,虽然在若干情形下也还采用从低频技术发展起来的同轴线,但主要的微波传输线和微波元件,不可能采用一般低频双导线和集总参数的电阻、电感和电容等元件,而是采用一些具有分布效应的特殊传输线,如波导、鳍线、微带、带状线等;并且这些传输线的长度与微波波长相当,因而在低频时可以忽略的一些效应(如时延效应、辐射效应和趋肤效应等)在微波频段时必须加以考虑。

因此,不论是在处理问题所用的概念和方法上,还是在实际微波系统的原理和结构上,微波都与低频电磁波情况完全不同。这就说明了有必要把微波技术作为一门独立的学科加以研究。研究微波问题的方法与低频不同:在低频电路中是采用“路”的概念和方法,而在微波电路中需要采用“场”的概念和方法。这是因为在低频电路中,电路的尺寸比波长小得多,可以认为稳定状态的电压和电流的效应在整个电路系统各处是同时建立起来的。亦即电磁场在整个电路中是均匀分布的,不使用场和波的概念,且电流、电压有完全确定的意义,能对系统作完整的描述。但在微波波段,波长与电路尺寸相当,或甚至更小,这时就不能忽略电磁场的空间分布,应当作为波动过程来研究,而电流、电压等概念已失去确切的意義了,只有用电磁场和电磁波的概念和方法才能对系统作完整的描述。因此,在微波理论中广泛地应用着“场”的概念、“场”的理论和分析方法;但这并不意味着“路”的概念、“路”的理论和分析方法就不适用了。微波技术的问题往往也并不是任何时候都是用电磁场理论分析最好。有

时在一定的条件下,引入电路的概念能使问题更容易分析,设计得以简化,这种“化场为路”的方法就是微波网络分析方法,在微波技术中得到了广泛应用。从经验中得出,善于将“场”和“路”的概念结合起来应用,常常能够帮助解决许多单纯依靠“场”或“路”的方法所不能解决的复杂的微波问题。

微波成为一门技术科学,开始于 20 世纪 30 年代。微波技术的形成以波导管的实际应用为标志,在第二次世界大战中,微波研究的焦点集中在雷达上,并带动了微波元器件、高功率微波管、微波电路和微波测量技术的研究和发展。微波振荡源的固体化以及微波系统的集成化是现代微波技术发展的两个重要方向,向更短波长的推进仍是微波研究和发展的主要趋势。微波的最重要应用是雷达和通信。射电望远镜、微波加速器等对于天文学、物理学等的研究具有重要意义。微波遥感已成为研究天体、气象和资源勘探等的重要手段。微波在工业、农业、生物学、医学等方面的应用与发展也越来越受到重视。若干重要的交叉学科如微波天文学、微波气象学、微波波谱学、量子电动力学、微波半导体电子学、微波超导电子学等已趋成熟。

由于微波与射频技术的应用越来越广泛,微波与射频电路设计领域得到了科技界和工业界的特别关注。新型半导体器件使得高速数字系统和微波射频系统不断扩张,这在无线通信、导航、制导、空间链路、全球定位系统以及雷达等系统中已是有目共睹的事实,因此要求科技工作者以及工程技术人员能够深刻掌握并不断创新性地发展相关电路设计技术。微波/射频电路几乎包括了无线通信信道中的所有单元电路,微波/射频电路几乎是无线电发射机和接收机的全部,主要由振荡器、低噪声放大器、倍频器、混频器、检波器、锁相环、功率放大器、调制解调器等组成。

无线通信,就是利用无线电来准确而迅速地传递信息。信息传输对人类生活的重要性是不言而喻的。可以这样说,信息传输是人类社会赖以生存及发展的根本。进入 19 世纪,人们发现点电能以光速沿导线传输。1837 年,莫尔斯发明了以点、画、线、空组合代表字母和数字的电报。1876 年,贝尔发明了电话。1895 年,意大利的马可尼与俄国的波波夫发明了无线电通信。

要完成无线电通信,首先必须产生频率稳定的射频载波,这个任务由三极管振荡器、场效应管振荡器、介质振荡器或频率合成器等高稳定的信号产生电路完成。射频载波经放大、倍频(如果载频不够高)送入下一级调制电路单元。调制是“装载”信息的过程,也就是让载波的某个特征量(振幅、频率或相位)按信息的变化规律而变化。最后,已调波经功率放大单元放大到一定的功率后由天线发射出去。

无线电信号接收的任务实质上是准确地恢复信息。经天线接收的信号首先由低噪声高频放大,然后与本地振荡器产生信号混频。差频称为中频,中频是恒定的。当输入的信号频率变化时,本地振荡器的振荡信号的频率也跟着变化,使中频保持恒定。这样,中频放大器是一个中心频率不变且带宽给定的放大器,可以设计成增益高且稳定的放大器。接收到的微弱信号经过中频放大器后,再经解调,把信息从载波中还原出来。因此微波射频电路覆盖了无线电收发系统的单元电路、系统设计中的整个过程。

许多初学者可能会对专业术语“高频电路”、“射频电路”和“微波电路”的概念和定义感到困惑,除波电路能够在频率范围内严格定义(即频率范围为 300 MHz~300 GHz)以外,高频电路和射频电路的工作频率范围是没有具体定义的,它们只能给出模糊的含义解释。高

频电路是相对于频率小于 10 kHz 的低频电路而言的较高频段电路,射频电路指用于发射或接收无线电波的电路。但国内外微波技术领域的工程师们,通常认为三者在工作频率范围内有如图 1-1 所示的对比关系。适用于射频电路和微波电路的设计与开发技术是一致的,因此本书的后续内容不再区分微波电路与射频电路在设计上的差别,都以讲述微波电路的仿真与设计来反映整书的核心内容。



图 1-1 高频电路、射频电路和微波电路工作频率之间的关系

1.2 微波射频电路技术的发展历程

微波电路开始于 20 世纪 40 年代应用的立体微波电路,由波导传输线、波导元件、谐振腔和微波电子管组成。随着微波固态器件的发展以及分布型传输线的出现,60 年代初,出现了平面微波电路,它是由微带元件、集总元件、微波固态器件等利用扩散、外延、沉积、刻蚀等制造技术将这些无源微波器件和有源微波元件制作在一块半导体基片上的微波混合电路(hybrid microwave integrated circuit, HMIC),属于第二代微波电路。与以波导和同轴线等组成的第一代微波电路相比较,它具有体积小、重量轻等优点,避免了复杂的机械加工,而且易与波导器件、铁氧体器件连接,可以适应当时迅速发展起来的小型微波固体器件。又由于其具有性能好、可靠性强、使用方便等优点,因此被用于各种微波整机,并且在提高军用电子系统的性能和小型化方面起了显著的作用。

70 年代,砷化镓(GaAs)材料制造工艺的成熟,对微波半导体技术的发展有着极为重要的影响。GaAs 材料的电子迁移率比 Si 高 7 倍,而且漂移速度也比 Si 高得多,这种高频高速性能是由其材料特性决定的。又由于 GaAs 材料的半绝缘性(其电阻率可达 $10^5 \Omega/\text{cm}$)可以不需要采用特殊的隔离技术而将平面传输线、所有无源元件和有源元件可以集成在同一块芯片上,更进一步地减小了微波电路的体积。

GaAs 技术的问世与 GaAs 材料的特性促成了由微波集成电路向单片集成电路(monolithic microwave integrated circuit, MMIC)的过渡。与第二代的微波混合电路 HMIC 相比较,MMIC 具有体积更小、寿命更长、可靠性更高、噪声更低、功耗更小、工作的极限频率更高等优点,因此,受到广泛的重视。尽管 MMIC 技术发展很快,但至今仍然存在着某些互连困难,如某些性能指标的常规电路元件不能制造,开发费用高等问题。我国 MMIC 技术受到投资不足、技术水平低等条件的限制,发展一直比较缓慢。相对而言,单片微波混合电路(MHMIC)技术则解决了这些问题,它具有许多突出的优点,如电路的体积较传统的微波混合电路大大缩小、设计灵活、开发成本低、周期短、生产效率高,为微波混合集成电路进行低成本的大规模生产提供

了有效的技术途径。正因为如此,国外 MHMIC 技术也获得了迅速的发展。

80 年代以来,微波/毫米波电路设计与制作的一个重要特点是从立体电路向混合集成电路和平面集成电路过渡。随着 MMIC 技术的进一步提高和多层集成电路工艺的进步,利用多层基片内实现几乎所有的无源器件和芯片互连网络的三维多层微波结构受到越来越多的重视,其中比较突出的是低温共烧陶瓷(LTCC)技术。它是将低温烧结陶瓷粉制成厚度精确且致密的生瓷带,在生瓷带上利用激光打孔、微孔注浆、精密导体浆料印刷等工艺制出所需要的电路图形,并将多个无源元件电路(如低容值电容、电阻、滤波器、阻抗转换器、耦合器等)埋入多层陶瓷基板中,然后叠压在一起,内、外电极可分别使用银、铜、金等金属,在 900℃ 下烧结,可制成三维空间互不干扰的高密度电路,也可制成内置无源元件的三维电路基板,在其表面可以贴装 IC 和有源器件,制成无源/有源集成的功能模块,进一步将电路小型化与高密度化,特别适合用于微波收发组件。LTCC 技术当前已取得很大进展,该技术领域及相关领域具备许多其他基板技术所没有的优势,也因此近年来受到前所未有的广泛关注。

建立在 LTCC 多层基板上的微波多芯片组件(multichip module technology, MCM)技术,是在高密度多层互连基板上,采用微焊接、封装工艺将构成电路的各种微波元器件组装起来,形成高密度、高性能、高可靠性的小型化微波产品(包括组件、部件、子系统、系统)。它是为适应现代电子系统短、小、轻、薄和高速、高性能、高可靠性、低成本的发展方向而在传统封装基础上发展起来的新一代微波封装与组装技术,是实现微波系统高效集成的有力手段,这是微波集成电路发展的重要方向。目前,MMIC 和 MCM 技术的发展为微波系统在各个领域的应用提供了广阔的前景,如空间电子、雷达、卫星、公路交通、民航系统、电子对抗、通信系统等多种尖端科技中。

1.3 微波射频电路计算机辅助设计技术介绍

微波电路及器件的工作频率、集成度和复杂程度的不断提高,加大了电路的设计难度,并且对电路内部进行测量调试十分困难,甚至不可能。计算机辅助设计(computer aided design, CAD)的发展开始于 20 世纪 70 年代。CAD 对缩短产品的设计周期、提高产品的质量、降低产品成本起着极其重要的作用。在 CAD 被广泛应用之前,微波电路的设计不得不依靠带有一定盲目性的人工调试。这样不仅延长了研制周期,增加了产品成本,也不易使产品达到要求的性能指标。微波电路 CAD 技术的引入以及相应仿真工具的应用,不仅使得微波电路与器件的设计变得简单快捷,从设计研究到批量生产的周期大大缩短,而且也避免了由于人工调试造成的误差,并能够大幅降低开发成本,提高产品性能指标。如今微波电路 CAD 软件已经成为微波工程师进行电路与器件研制过程中的必备工具,而且这项技术也逐渐向一门专门的学科发展。

微波电路 CAD 软件与一般的电子线路 CAD 软件相比有以下几个特点:

- (1)微波电路 CAD 软件必须有精确的传输线模型和各种微波部件模型。
- (2)微波电路 CAD 软件中具备电磁仿真等数值工具。
- (3)微波电路 CAD 软件一般都有 S 参数分析的功能。

在微波集成电路 CAD 中,各种传输线及其不均匀区模型、元件之间的寄生耦合模型以

及微波有源器件的非线性模型等在技术上具有很大的难度。因此,在 MMIC 的设计中相应地要有特殊的适合于微波集成电路计算机软件的支持。随着 MMIC 技术的不断发展和 MMIC 器件以及 MMIC 系统的工作性能的不断提高,微波集成电路 CAD 技术为了适应这些需要也逐渐地向更高的层次发展。电磁仿真技术的发展,促进了利用先进仿真技术对 MMIC 进行设计开发,使微波集成电路 CAD 软件具有更强的实际分析能力,更好地适应了 MMIC 器件的工作频率以及工作性能的不断提高。

使用 CAD 软件设计微波射频电路基本过程如图 1-2 所示。

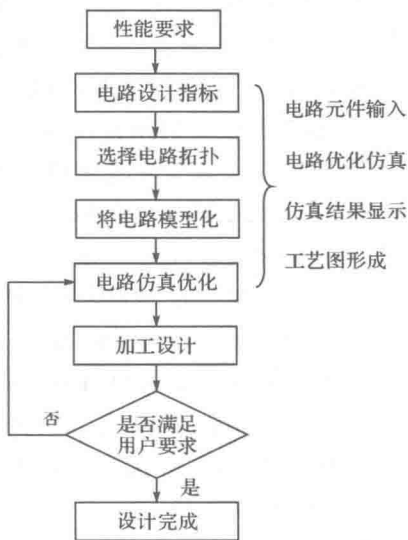


图 1-2 微波电路 CAD 设计过程

具体设计步骤如下：

(1)根据电路的指标确立电路形式。这是电路设计的一个重要环节,设计者的经验起着重要的作用。正确选取电路形式,常常可以使整个设计工作事半功倍。

(2)输入电路。首先设计者要将设计的电路结构输入计算机,软件使用者必须根据软件的要求,正确地将电路划分为不同的元件组合,建立相应的数据库文件。电路输入的同时,也意味着将复杂的电路按设计者的想法变成软件的模型组合,这种从电路到模型的分解须操作者仔细考虑。

(3)仿真优化。利用软件的功能,对输入的电路进行仿真或优化计算。在计算的过程中,软件的使用者要正确地选取中间变量,选用正确的计算方法。软件可以很快给出电路性能参数。

(4)给出改变后的元件值。计算机的方针优化存在一定的局限性。它表现在:①电路的拓扑结构和元件初值选定虽然有时可用微波网络综合的方法,但通常还是需用户凭经验给定;②电路优化经常会陷入局部最小点,因而电路的设计结果和元件初值的选取关系极大。

(5)显示结果。大多数软件都可以方便地显示仿真优化的结果,并可根据需要随时查看计算结果,对分析设计的成功与失败的原因、加快设计过程、检查设计结果非常重要。

(6)工艺图的形成。软件的工艺图自动形成,不仅为设计者实现电路设计提供了方便的工具,而且其生成的工艺图和软件的模型往往有着很好的一致性,可以避免由于人工原因造成的差错。

CAD 技术在微波领域的大规模应用开始于 20 世纪 70 年代末美国 COMPACT 公司开发的通用微波电路分析和优化设计软件 Compact 的推广。该软件最初是在分时系统上为用户服务,后来发展成为向用户提供 PC 版和 workstation 版的软件包。80 年代,CAD 软件主要是 Super-compact, MW-space, MDS 以及 Touchstone 等。虽然它们的功能强大,但都存在一个共同的弱点,即必须从“路”出发。如果某个电磁问题不能化成“路”来求解,CAD 便很难进行,所以当时的微波 CAD 应用面及精确度存在很大局限。

目前,微波射频领域主要的软件工具首推 Agilent 公司的 ADS 软件和 Ansoft 公司的 HFSS、Designer 软件,其次比较小型的有 Microwave Office、Ansoft Serenade、CST、Zeland IE3D、XFDTD、Sonnet、Empire 等设计的仿真软件。下面将简要地介绍一下各个微波 CAD 软件的功能特点和使用范围,以期能够对现有商业 CAD 软件进行总体了解。

微波电磁仿真软件与电磁场的数值算法密切相关,所有的电磁场数值算法都是建立在 Maxwell 方程组之上的,了解 Maxwell 方程是学习电磁场数值算法的基础。在频域,数值算法有有限元法(finite element method, FEM)、矩量法(method of moments, MoM)、差分法(finite difference method, FDM)、边界元法(boundary element method, BEM)和传输线法(transmission-line-matrix method, TLM),在时域,数值算法有时域有限差分法(finite difference time domain, FDTD)和有限积分法(finite integration technology, FIT)。其中,使用矩量法的仿真软件有 ADS, Ansoft Designer, Microwave Office, Zeland IE3D, Ansoft Ensemble, Super NEC 和 FEKO;使用有限元法的微波 EDA 软件有 HFSS 和 ANSYS;使用时域有限差分法的微波 EDA 软件有 EMPIRE 和 XFDTD;使用有限积分法的微波 EDA 软件有 CST Microwave Studio 和 CST Mafia。

本书主要使用 ADS 软件和 HFSS 软件作为仿真与设计工具,下面将对它们作详细介绍。

ADS(advanced design system)软件是国内各大学和研究所以使用最多的微波/射频电路和通信系统仿真软件。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。它主要应用于:射频和微波电路的设计仿真、MMIC 和 RFIC 的设计仿真、通信系统的设计仿真、数字逻辑设计仿真、DSP 设计仿真。微波射频电路系统版图和电磁场仿真工具无缝集成,并且其自动化版图功能使得版图与原理图自动同步,大大提高了版图设计效率。

此外,Agilent 公司和多家半导体厂商合作建立 ADS Design Kit 及 Model File 以供设计人员使用。使用者可以利用 Design Kit 及软件仿真功能进行通信系统的设计、规划与评估,及 MMIC/RFIC、模拟与数字电路设计。除上述仿真设计功能外,ADS 软件也提供辅助设计功能,如 Design Guide 是以范例及指令方式示范电路或系统的设计流程,而 Simulation Wizard 是以步骤式界面进行电路设计与分析。ADS 还能与其他 EDA 软件,如 Spice、Mentor Graphics 的 ModelSim、Cadence 的 NC-Verilog、Mathworks 的 Matlab 等做协同仿真(Co-Simulation),加上丰富的元件应用模型 Library 及测量/验证仪器间的连接功能,能够极大增加电路与系统设计的方便性、速度与精确性。

Ansoft HFSS,是 Ansoft 公司推出的三维电磁仿真软件;是世界上第一个商业化的三维结构电磁场仿真软件,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界面、精确自适应的场求解器,拥有功能强大的后处理器,能计算