

微波射频测量 技术基础

李秀萍 高建军 编著



机械工业出版社
China Machine Press

高等学校教材

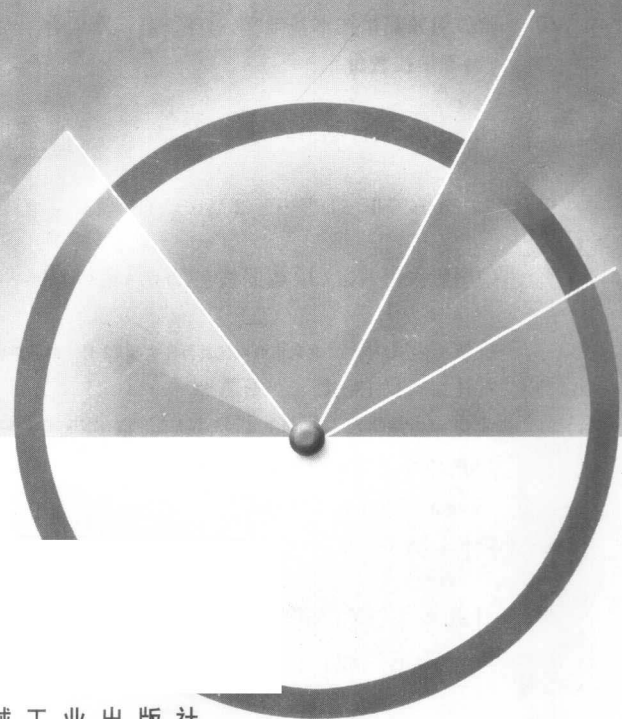
TM931

9

2007

微波射频测量 技术基础

李秀萍 高建军 © 编著



机械工业出版社
China Machine Press

本书主要内容包括微波测量技术在集成电路设计中的重要性和微波网络理论、微波 S 参数测量技术、微波射频电路噪声和功率测量技术。每章末均附有参考文献。

本书顺应了当前电子通信技术发展和教学的需求,反映了当前微波测量技术及研究成果。本书可以作为高等院校电磁场与微波技术专业、通信与信息系统专业、物理电子学及电路与系统专业的高年级本科生和研究生的教材,也可供从事集成电路设计的科研人员参考。

版权所有,侵权必究。

本书法律顾问 北京市展达律师事务所

图书在版编目(CIP)数据

微波射频测量技术基础/李秀萍,高建军编著. —北京:机械工业出版社,2007.6
(高等学校教材)

ISBN 978-7-111-21315-4

I. 微… II. ①李… ②高… III. 射频-微波测量-高等学校-教材 IV. TP931

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 058406 号

机械工业出版社(北京市西城区百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

责任编辑:王颖 秦燕梅

北京京北制版厂印刷·新华书店北京发行所发行

2007 年 6 月第 1 版第 1 次印刷

186mm × 240mm · 14 印张

定价:28.00 元

凡购本书,如有倒页、脱页、缺页,由本社发行部调换

本社购书热线:(010)68326294



机械工业出版社 华章公司

Huazhang Graphics & Information Co., Ltd

教师服务登记表

尊敬的老师:

您好!感谢您购买我们出版的_____教材。

机械工业出版社华章公司本着为服务高等教育的出版原则,为进一步加强与高校教师的联系与沟通,更好地为高校教师服务,特制此表,请您填妥后发回给我们,我们将定期向您寄送华章公司最新的图书出版信息,为您的教材、论著或译著的出版提供可能的帮助。欢迎您对我们的教材和服务提出宝贵的意见,感谢您的大力支持与帮助!

个人资料 (请用正楷完整填写)

教师姓名	<input type="checkbox"/> 先生 <input type="checkbox"/> 女士	出生年月	职务	职称: <input type="checkbox"/> 教授 <input type="checkbox"/> 副教授 <input type="checkbox"/> 讲师 <input type="checkbox"/> 助教 <input type="checkbox"/> 其他	
学校	学院		系别		
联系电话	办公: 宅电: 移动:		联系地址 及邮编		
			E-mail		
学历	毕业院校	国外进修及讲学经历			
研究领域					
主讲课程		现用教材名	作者及出版社	共同授课教师	教材满意度
课程: <input type="checkbox"/> 专 <input type="checkbox"/> 本 <input type="checkbox"/> 研 <input type="checkbox"/> MBA 人数: 学期: <input type="checkbox"/> 春 <input type="checkbox"/> 秋					<input type="checkbox"/> 满意 <input type="checkbox"/> 一般 <input type="checkbox"/> 不满意 <input type="checkbox"/> 希望更换
课程: <input type="checkbox"/> 专 <input type="checkbox"/> 本 <input type="checkbox"/> 研 <input type="checkbox"/> MBA 人数: 学期: <input type="checkbox"/> 春 <input type="checkbox"/> 秋					<input type="checkbox"/> 满意 <input type="checkbox"/> 一般 <input type="checkbox"/> 不满意 <input type="checkbox"/> 希望更换
课程: <input type="checkbox"/> 专 <input type="checkbox"/> 本 <input type="checkbox"/> 研 <input type="checkbox"/> MBA 人数: 学期: <input type="checkbox"/> 春 <input type="checkbox"/> 秋					<input type="checkbox"/> 满意 <input type="checkbox"/> 一般 <input type="checkbox"/> 不满意 <input type="checkbox"/> 希望更换
备注	已出版著作		译著		
	著书	方向一			
	计划	方向二			
是否愿意从事翻译工作 <input type="checkbox"/> 是 <input type="checkbox"/> 否			翻译方向		
意见和建议					

填妥后请选择以下任何一种方式将此表返回: (如方便请赐名片)

地址: 北京市西城区百万庄南街1号 华章公司营销中心 邮编: 100037

电话: (010) 68353079 88378995 传真: (010) 68995260

E-mail: hzedu@hzbook.com marketing@hzbook.com 图书详情可登录<http://www.hzbook.com>网站查询

随着电子通信技术的飞速发展，其应用领域日益广泛，国内外对微波射频技术人才的需求也日益旺盛。国内各高等院校虽已开设微波测量课程多年，但是当前的教材无法满足研究生及高年级本科生学习的需求。本书顺应当前技术发展的趋势和教学的需求，总结了作者在电磁场与微波技术领域多年工作、学习、研究和教学过程中获得的知识和经验。主要内容包括微波网络理论、微波 S 参数测量技术、微波射频电路噪声和功率测量技术，反映了当前测量技术及研究成果的概貌。

微波射频(RF)测量是一门技术，更是一门科学，从其测量手段来说可分为同轴测量技术和在片测量技术；从所测量的电路特性分可分为小信号测量技术、大信号测量技术及噪声测量技术。

微波 RF 测量技术是一门涵盖了从理论分析设计到实际应用的技术，是获得无源器件、有源器件等效电路模型的核心技术，准确的电路模型有助于提高 RF、微波、毫米波单片集成电路设计的成功率，有助于缩短电路研制周期，所以，高精度微波 RF 器件特性的测量数据是微波集成电路计算机辅助设计技术的基础。

如何获得精确的测量结果？所说的测量技术看起来进行的只是一种物理操作，但如何知道这种物理操作是准确的？如何知道测量的结果是准确的？如果不准确，应该如何去纠正？实际的测量工作和单纯的理论分析不同，存在太多随机和未知因素的影响和干扰，在这种情况下如果没有足够的理论基础，对测量设备、所测器件和校准方法没有较好的理解，就无法在出现问题的情况下做出准确的判断，提出解决方案，更无从得到精确的测量数据。所以说，测量这门科学，内容广泛，而且需要随着技术的发展不断更新。

本书第 1 章总结了无源器件、有源器件及集成电路的发展状况，重点介绍了微波测量技术在集成电路设计中的地位及其重要性。

第 2 章的微波网络理论深化了微波基础网络的理论，以可测量的 S 参数为主线，介绍了相关的网络参量及波参量和电路参量的相互转换。另外，还介绍了测量中常用

微波器件的 S 参数模型，给出了 De-embedding 技术的并联、串联、级联及混和四大类技术。本章强调概念理解和物理意义，强调理论和实践相结合。

第 3 章微波 S 参数测量技术是本书的重点之一，良好的微波校准是微波测量的前提。文中介绍了同轴和在片测量系统的组成，各种测量误差模型的建立，各种校准方法及其精度的比较；给出了实际工作中小信号微波测量的具体步骤和注意事项，以及如何判断所进行的微波校准是否良好。本章给出的微波低成本测量方法有助于降低实际测量工作中的测量成本。

第 4 章介绍了微波射频集成电路设计中噪声的种类和特性，以及噪声系数、噪声参数的定义和相应的测量技术。

第 5 章介绍了微波射频电路功率增益及各种非线性特性和常用微波功率器件，介绍了微波射频电路和有源器件功率测量技术及常用仪器设备的工作机理。还介绍了微波射频功率放大电路设计中常用的负载牵引技术。

以这本书为教材的“微波射频测量”课程在北京邮电大学开设，在此感谢选修这门课的北邮研究生，他们在学习的过程中帮我做了大量的校对工作，也给了我很多有益的建议。感谢他们的学习激情，让我更加领悟到了努力工作的价值。

作者

2007 年 3 月于北京

致 谢

追溯本书，始自2001年，作者在新加坡工作期间，先后接触多种无源器件设计及各种器件测量，并和高建军教授一起对天线、滤波器、各种MEMS器件(开关、天线、滤波器)，各种有源器件(HBT、HMET等)进行测量，之后逐渐分析各种测量数据，在国际期刊和会议上发表了多篇文章。2004年回国后，才逐渐整理思路，落笔写书。

该书得到清华高葆薪教授的极大支持，高教授还对本书做了部分的审校工作。在此，向高葆薪教授表示感谢并致以深深的敬意，老一辈科研工作者兢兢业业、勤勤恳恳的科研态度将永远是我们学习的榜样。

“问泉哪得清如许，为有源头活水来”，作者非常感谢一路走来所结识的良师益友们，是他们让我思如泉涌，在科研的道路上一步一个脚印。特别感谢新加坡南洋理工大学的Law Choi Look教授、Sheel Aditya教授、Zhu Lei教授、Wang Hong教授，感谢德国柏林工业大学Georg Boeck教授和韩国延世大学的Yook Jong-Gwan教授。与他们一起共事让我受益匪浅。

感谢在国外生活过的近3年的时光，感谢让我有这样的一段纯粹的时间完全投入到科研工作中。与之苦，与之乐，科研工作在我的生命中占据了重要的地位。海外生活中遇到的很多帮助过我和让我感动的事情，他们让我对人生有了更深刻的理解和思考。

无论身在何处，每个人都将与自己祖国的命运紧密联系在一起。谨以此书献给北京邮电大学，感谢她让我有展示的舞台、发展的空间和报效祖国的机会。感谢回国两年多来学校和电信工程学院领导的关心和支持、同事的帮助和鼓励。也感谢所有的朋友和曾经帮助过我的人。

最后特别感谢我的家人对我事业上的巨大支持，感谢疼爱我的祖母、父亲和母亲，这是我完成此书的巨大动力。

第1章 引言	1
1.1 频谱的划分	1
1.2 微波射频器件的进展	3
1.2.1 无源器件的进展	4
1.2.2 有源器件的进展	5
1.3 微波射频集成电路的发展	9
1.4 微波射频测量技术的重要性	13
1.5 本书的目标和结构	16
参考文献	17
第2章 微波网络理论	19
2.1 微波网络概述	19
2.2 微波网络散射参量(S 参数)	19
2.2.1 S 参数的定义	19
2.2.2 S 参数的性质	21
2.2.3 S 参数和 Spice 之间的关系	22
2.3 传输参量(T 参数)	25
2.4 电路参量	25
2.4.1 阻抗参量(Z 参数)	26
2.4.2 导纳参量(Y 参数)	27
2.4.3 典型的 π 型和 T 型网络	28
2.4.4 转移参量(A 参数)	29
2.4.5 Z , Y 和 $ABCD$ 参数之间的关系	29
2.5 Smith 圆图	32

2.5.1	Smith 圆图简介	32
2.5.2	Smith 圆图的特点	34
2.5.3	Smith 圆图的构成	34
2.5.4	Smith 圆图的用途	36
2.5.5	等反射系数及等驻波比圆	36
2.5.6	等噪声系数圆	37
2.5.7	有损耗传输线在 Smith 圆图上的表示	39
2.6	二端口网络的互联	39
2.6.1	二端口网络的串联	39
2.6.2	二端口网络的并联	40
2.6.3	二端口网络的级联	41
2.7	微波网络的信号流图及其应用	42
2.7.1	信号流图的定义	42
2.7.2	信号流图的性质	45
2.7.3	Mason 法则	47
2.8	测量中常用微波元件的 S 参数模型	48
2.8.1	基本电路单元的 S 参数模型	48
2.8.2	电感、电容、电阻的 S 参数模型	50
2.8.3	50Ω 传输线在 Smith 圆图上的表示	53
2.8.4	各校准件所用到的基础电路原型的 S 参数模型	55
2.9	噪声技术	57
2.9.1	三端口网络和二端口网络的 S 参数	58
2.9.2	三端口网络和二端口网络的噪声参数	60
2.10	De-embedding 技术	61
2.10.1	De-embedding 的定义	61
2.10.2	并联技术	62
2.10.3	串联技术	63
2.10.4	级联技术	65
2.10.5	混合技术	66
2.10.6	De-embedding 技术实例说明	67
	本章小结	71
	参考文献	71

第3章 微波S参数测量技术	72
3.1 S参数测量系统的组成	72
3.1.1 标量网络分析仪	73
3.1.2 矢量网络分析仪	74
3.1.3 射频电缆	75
3.1.4 偏置电缆	76
3.1.5 T型偏置	77
3.1.6 定向耦合器件	78
3.1.7 电桥	79
3.1.8 同步信号源	81
3.1.9 多端口网络分析仪	81
3.2 同轴和在片测量系统	82
3.2.1 同轴测量系统	82
3.2.2 在片测量系统	84
3.3 测量系统的校准	91
3.3.1 误差模型	91
3.3.2 测量误差	93
3.3.3 测量校准	94
3.3.4 校准方法	98
3.4 商用测量系统	112
3.4.1 2.4mm 同轴测量系统	112
3.4.2 2.4mm 在片测量系统	120
3.5 一种低成本的在片微波测量方法	128
3.5.1 微波探针S参数	128
3.5.2 微波探针等效电路模型及参数提取	130
3.5.3 低成本在片测量方法	133
本章小结	134
参考文献	135
第4章 微波射频噪声测量技术	137
4.1 噪声的特性	138
4.2 噪声的种类	139
4.2.1 热噪声	139



4.2.2	散弹噪声	143
4.2.3	高频噪声	146
4.2.4	闪烁噪声	147
4.2.5	等效噪声带宽	148
4.3	二端口网络的噪声系数	150
4.3.1	噪声系数的定义	150
4.3.2	等效噪声温度	153
4.3.3	无源二端口网络的噪声系数	156
4.3.4	级联网络的噪声系数	157
4.3.5	噪声测量指标	160
4.4	噪声系数测量技术	161
4.4.1	噪声源	161
4.4.2	Y因子方法	163
4.4.3	校准技术	164
4.4.4	误差分析	165
4.5	二端口网络的噪声参数	166
4.6	噪声参数测量技术	168
4.6.1	基于调谐器原理的噪声系数提取	168
4.6.2	校准技术	171
4.6.3	半导体器件的噪声参数	172
	本章小结	174
	参考文献	174
第5章	微波射频电路功率测量技术	176
5.1	二端口网络功率增益	176
5.1.1	源资用功率	177
5.1.2	负载资用功率	178
5.1.3	工作功率增益	179
5.1.4	资用功率增益	179
5.1.5	转换功率增益	180
5.1.6	单向转换功率增益	181
5.1.7	最大资用功率增益	182
5.2	非线性特性	184
5.2.1	传递函数数学表征	184



5.2.2	谐波失真	185
5.2.3	交调失真	187
5.2.4	1-dB 压缩点	188
5.2.5	三阶交调点	189
5.3	微波射频功率器件	192
5.4	频谱分析仪的工作原理	196
5.4.1	频谱分析仪的定义	196
5.4.2	频谱分析仪的基本结构	197
5.4.3	频谱分析仪的设计指标	201
5.5	功率测量技术	207
5.5.1	功率增益测量技术	207
5.5.2	交调失真测量技术	209
5.5.3	负载牵引技术	209
	本章小结	212
	参考文献	212

微波射频测量技术是指对应用于微波射频频段的无源器件、有源器件及由无源和有源器件所构成的集成电路等电气特性的测量技术。微波射频测量是验证微波射频器件性能和检验理论设计的必要步骤，是微波电路计算机辅助设计技术的基础。随着通信应用频段的提高，无源器件、有源器件及集成电路的快速发展，微波射频测量技术也日益重要。

1.1 频谱的划分

电磁波谱包括诸如红外线、可见光、X射线等相当宽的频率范围。国际电联 (ITU) 当前只定义了 9kHz ~ 400GHz 范围，划分为 12 个频段，目前实用的频段均在 40GHz 以下。图 1-1 给出了目前常用的国际电子电气工程师协会 (IEEE) 建立的电磁频谱分类。

射频 (RF)、微波 (Microwave) 和毫米波 (Millimeter Wave) 占据电磁波谱 300GHz 以下的频段。一般地，微波频率范围是从 300MHz ~ 30GHz，相应波长从 1m ~ 1cm。低于微波频率的称之为射频 (RF) 频谱，高于 30GHz 的频率范围依次为毫米波 (30 ~ 300GHz)、亚毫米波、红外和光频谱。值得注意的是工程上通常把低于 2GHz 的微波电路简称为射频电路。为方便起见，微波和毫米波频谱被进一步划分为许多频段，表 1-1 和 1-2 分别给出了一些常用的微波和毫米波频段。

频谱资源是有限的，不同于土地、水、矿山和森林，是属于可再生或非再生资源，频谱资源是非消耗性的，不充分利用它则是一种浪费，使用不当也是一种浪费，甚至会造成严重的危害。此外，频谱资源易受污染，比如它易受系统内干扰、系统之间的干扰及人为噪声和自然噪声的干扰。电波传播有其自己的传播规律，电波传播与覆盖

可能会跨过行政区域甚至国家边界(见图 1-2)，因此无线电频率的使用需要合理分配，否则会造成相互干扰而不能确保正常的无线电通信。

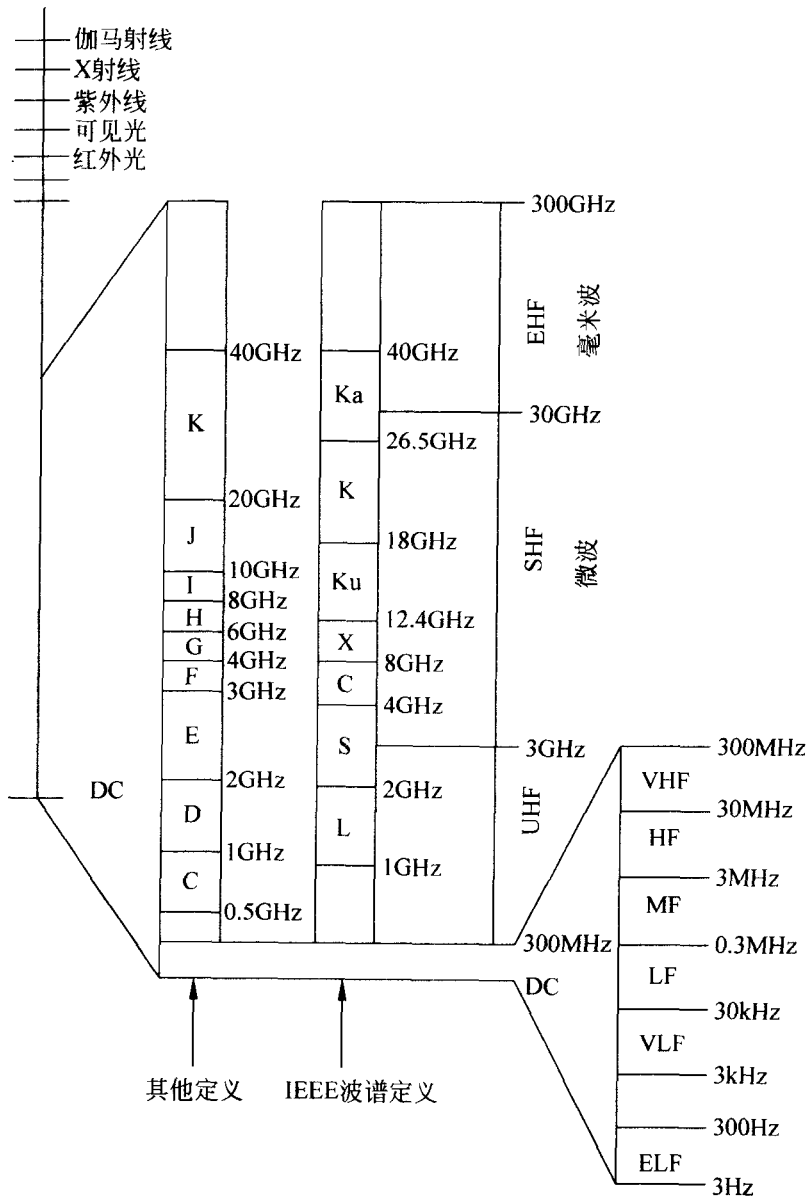


图 1-1 电磁波谱

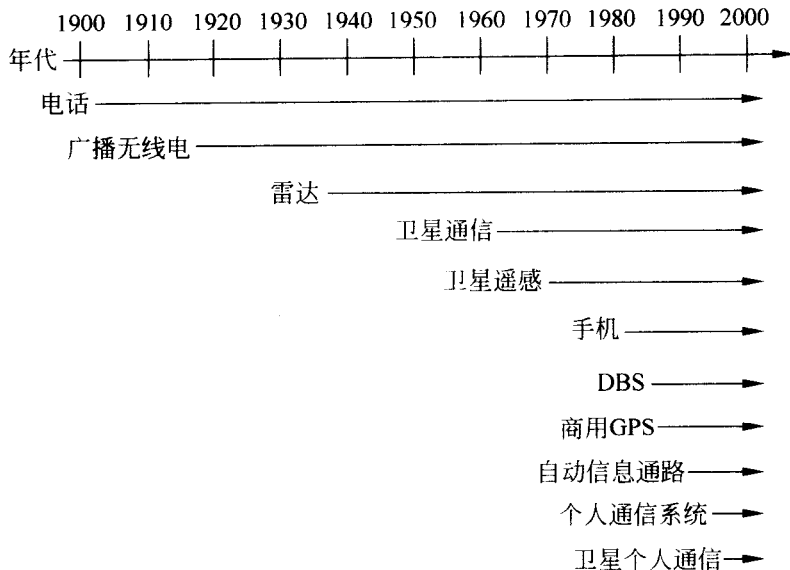


图 1-2 无线通信历史总结

表 1-1 常用微波频段

命名	频段/GHz
C 波段	4 ~ 8
X 波段	8 ~ 12.4
Ku 波段	12.4 ~ 18
K 波段	18 ~ 26.5

表 1-2 常用毫米波频段

命名	频段/GHz	命名	频段/GHz
Q 波段	33 ~ 50	W 波段	75 ~ 110
U 波段	40 ~ 60	D 波段	110 ~ 170
V 波段	50 ~ 75	G 波段	140 ~ 220
E 波段	60 ~ 90	Y 波段	220 ~ 325

微波射频器件的进展

微波射频器件分为无源和有源两大类，区分两者的标准是看该器件所建立的等效电路模型中是否含有电源（电压源或者电流源），若器件等效电路模型中无电源，该器件为无源器件；若等效电路模型中有电源，该器件为有源器件。由此可见，无源器件和有源器件的区分与系统有无工作电源无关。而且，同一器件在不同的工作状态即呈现不同等效电路模型的情况下，可以被划分为不同的类别。

随着电子技术的发展，对所有器件的要求都在不断地改变，尽管有源和无源器件是最古老、最基本的电子器件，其性能的发展也必须加以优化，以满足特殊的应用需求，比如高速、高频、高功率、低噪声等。

1.2.1 无源器件的进展

无源器件主要包括电阻、电容、电感、转换器、渐变器、匹配网络、谐振器、滤波器、混频器和开关等。为满足应用的需求，无源器件的进展从以下几个方面展开分析。

1. 集成模块化

随着电子产品向多功能化发展，每种电子产品中包含的电子元器件在不断增加，以致将这么多的元器件安置在一起所花费的组装成本问题就凸显了出来。

通常，系统中无源器件数目较多，在组装上容易造成可靠度降低、成本提高及占大量面积等缺点。有公司经过统计调研后提出了这样的数据：在电子产品中，IC 和无源器件在全部电子器件及零部件的生产总成本中分别占 46.1% 和 9.3%，而在总安装成本中却分别占 12.7% 和 55.1%，甚至某些在片元件的管理和安装成本已经超过其价格。解决这一问题的有效方法之一就是集成模块化。

集成模块是无源器件未来的趋势，集成无源器件经过了从简单到复杂的发展过程，从最初集成几个元件的无源网络和阵列器件，发展到集成无源器件(Integrated Passive Device)和集成无源/有源器件(Integrated Passive/active Active Device)，一直到最后的集成功能模块。集成功能模块已经不再是单纯的电阻、电容、电感和二极管的集成，而是在功能上可替代多个无源和有源器件的集成产品。集成模块提供了整合有源器件或模块及无源器件的能力，并能同时达到模块缩小化及低成本的要求。

将多个不同类型、不同性能无源器件集成在一个封装内有多种方法，主要有低温共烧陶瓷技术(LTCC Technology: Low Temperature Co-fired Ceramic Technology)、薄膜技术、硅片半导体、多层电路板技术等。从技术成熟度、产业化程度及应用广泛程度等角度来评价，目前 LTCC 技术是无源集成的主流。

LTCC 技术采用了多层制造工艺及三维模拟技术和材料技术，并将滤波器及平衡/非平衡阻抗转换器(BALUN)等电路嵌入内藏式的 LTCC 基板，从而使得产品集成度得到提高，模块尺寸也大幅缩小。不过遗憾的是，大容量的电容和电感并没有被集成到基板上，模块小型化仍然受到这些分立器件的限制。

在 LTCC 技术中，如果集成大容量的电容和电感，就必须增加电极贴膜厚度，但会导致阻抗的升高。针对这一局限，不少科研工作者为突破 LTCC 技术中的陶瓷贴膜作出了不少努力，第三代基板制造工艺的技术要求能够将模块所需的所有元器件集成在一起，从而进一步缩小了模块尺寸。

2. 小型化

集成模块化是无源器件发展的方向，但事实上，整合往往是一把“双刃剑”，随着把不同的功能收归到一个模块之中，却又无可避免地导致了模块中各种元件数量的不



断增加,这与无线产业追求的更小型化和更轻量化的目标是背道而驰的。虽然我们能够通过依照摩尔定律缩小有源 IC 的尺寸,但无源器件的小型化工作一直相对滞后,由于后者占手持设备总体 PC 板面积的比例接近 60%,所以它就成了无线设备缩小尺寸和降低成本的主要瓶颈之一。

为了解决这一问题,最直接的一种方法是缩小基本无源元件的尺寸,但这种方案导致元件贴装操作的成本上升,因为元件越小,在模块中取放时就越需要更高的精度。

射频(RF)技术在现代通信领域正得到越来越广泛的应用,用 MEMS(微电子机械系统或称微机电系统)方法制备的射频元件不仅尺寸小、成本低、功能强大,而且更利于系统集成。在目前的通信系统中使用大量射频片外分立单元,如谐振器、滤波器、耦合器等,使系统的空间尺寸较大。利用 MEMS 技术可以同标准集成电路工艺兼容,制作的无源元件有利于系统集成度和电学性能的提高,并且成本更低。但随之而来的是对这类 RF-MEMS 系统元件和封装问题的研究,这些也成为人们关注的热点。

3. 封装效应

无源元件在 RF 系统中数目众多,占用系统面积大。有统计表明,无源元件(电容、电感、电阻等)在 RF 系统中占到元件数目的 80%~90%^[1],因此,无源元件的集成对于提高系统的集成度非常重要。同目前常用的表面安装无源元件相比,将元件集成于封装内可以有效地提高系统的可靠性,缩短导电通路,降低寄生效应,降低成本和减小器件尺寸。

系统的封装设计必须既要考虑封装体对 RF 器件的影响,又要考虑封装 RF 元件的一些特殊性,如在射频条件下由封装引入的寄生电感、寄生电容会引起信号串扰和延迟等。特别是在输入端口和输出端口位置,这些连接和界面的电学性能将直接影响系统的电学性能。在较高频率,模块的所有内部互联(Interconnection)被看做无源器件。封装效应的特征提取已是一个重要的课题。

此外,系统级封装(System in a Package, SiP)由于寄生效应小、集成度高的优点,特别适合用来封装 RF-MEMS 系统。SiP 可使信号在封装体内直接传输,这样可缩短系统内元件间的连线距离,降低系统的寄生效应,改善互联的电学性能。利用 MEMS 工艺加工的无源元件的可集成性正是 MEMS 的突出优点之一,也有利于系统级封装的实现。因此,将 RF-MEMS 元件进行系统级封装对于简化系统结构、降低寄生效应和损耗、提高应用频率范围、缩短产品开发时间、降低成本都具有重要意义。

1.2.2 有源器件的进展

有源器件的类型主要分为:微波二极管器件、微波三极管器件及微波电真空器件。微波二极管和三极管器件统称微波半导体器件。主要包括大部分目前流行的微波射频