

国防电子信息技术丛书



Microwave Circuit Design Using Linear and Nonlinear Techniques
Second Edition

线性与非线性 微波电路设计 (第二版)

[美] George D. Vendelin Anthony M. Pavio Ulrich L. Rohde 著

雷振亚 谢拥军 译

郝跃 审校



电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

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

国防电子信息技术丛书

线性与非线性微波电路设计

(第二版)

Microwave Circuit Design Using Linear
and Nonlinear Techniques

电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

内 容 简 介

本书是微波电路设计领域的一本经典著作。内容包括:射频/微波系统,集总和分布参数元件,有源器件,双端口网络,阻抗匹配,微波滤波器,线性双端口的噪声,小信号和大信号放大器,功率放大器,振荡器设计,微波混频器,射频开关和衰减器,MMIC设计工作站等。6个附录给出了多种器件电路和噪声模型、增益理论、互调失真、无源不连续元件等公式的详细推导,最后给出了专业术语的中英文对照索引,便于查阅。

本书适合于电磁场与微波技术、电路与系统、微电子学等微波元器件和电路模块的专业人员使用,也可供从事雷达、通信、航空航天、探测制导、遥测遥感、射频识别等相关工作的专业人员参考。本书可以作为工程技术人士,高校教师的参考用书,也适合作为相关专业本科生、研究生等的教材。

Microwave Circuit Design Using Linear and Nonlinear Techniques, Second Edition

ISBN: 978-0-471-41479-7

George D. Vendelin, Anthony M. Pavio, Ulrich L. Rohde

Original English Edition Copyright © 2005 by John Wiley & Sons, Inc.

All rights reserved.

This translation published under license.

Authorized Translation of the Edition published by John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey.

No part of this book may be reproduced in any form without the written permission of John Wiley & Sons, Inc.

Copies of this book sold without a Wiley sticker on the back cover are unauthorized and illegal.

本书中文简体版专有出版权由 John Wiley & Sons, Inc. 授予电子工业出版社。专有出版权受法律保护。

本书封底贴有 John Wiley & Sons, Inc. 防伪标签,无标签者不得销售。

版权贸易合同登记号 图字: 01-2006-7354

图书在版编目(CIP)数据

线性与非线性微波电路设计: 第2版/(美)维德林(Vendelin, G. D.), (美)帕维奥(Pavio, A. M.), (美)罗德(Rohde, U. L.)著;雷振亚,谢拥军译. —北京:电子工业出版社,2010.5
(国防电子信息技术丛书)

书名原文: Microwave Circuit Design Using Linear and Nonlinear Techniques, Second Edition

ISBN 978-7-121-10698-9

I. ①线… II. ①维…②帕…③罗…④雷…⑤谢… III. ①微波电路—电路设计 IV. ①TN710

中国版本图书馆CIP数据核字(2010)第066839号

策划编辑: 马 岚

责任编辑: 李秦华

印 刷: 北京市天竺颖华印刷厂

装 订: 三河市鑫金马印装有限公司

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: 47 字数: 1456千字

印 次: 2010年5月第1次印刷

定 价: 95.00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 zts@phei.com.cn, 盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

服务热线:(010)88258888。

译 者 序

2006年春天,我们为了改编《微波电子线路》教材,与 John Wiley & Sons 公司和电子工业出版社建立了联系。适逢 George D. Vendelin 等人编写的 *Microwave Circuits Design Using Linear and Nonlinear Techniques* 的第二版出版,并计划在中国翻译出版。出版社委托我们承担翻译任务,实属荣幸。

这本书的前版一直是我们的教学与科研的主要参考书之一。内容全面,理论体系完整,工程实例具体。实际使用中,当我们查阅本书寻找相关专题时,总会有满意的收获。这次翻译第二版,系统地读完整本原著,恰当地翻译全书,的确是一个认真学习的好机会。事实上,通过这项工作,我们的现代微波电路知识得到了全方位的升华。

与微波半导体最新材料和工艺,微波集成系统计算机设计工具等创新技术紧密结合是第二版的显著优点。深切体会到这本书涵盖了微波电路设计半个多世纪发展的全部成就。这是一本世界著名的经典力作,是微波电路设计领域的一块里程碑。以这本书作为案头必备,将有助于提升我国在电子和信息产业方面的整体水平,也将有助于我国在射频与微波领域培养具有国际竞争能力的技术人才。

值得强调的几个特点:本书的3位作者来自美国3家不同的著名公司,10多位参加编写人员是美欧多家相关大学的教授和公司的专家,20多家公司提供了重要的业界信息;本书引用文献和参考资料包括了我们所能找到的所有材料,按照书中标注查阅原文,非常方便;本书的实例均为公司的实际销售产品,电路完整,照片清晰,便于学习参考;本书规范引用了美国国防部和众多机构的公告,有些实例就来自于军事合同项目;书中的器件和软件均为世界流行的商业化产品,普及面广;各章后面的多个习题有连贯性,知识运用系列化。读者可以在阅读中慢慢体会。

译著以尽量保持原版原意为基本原则,结合译者多年从事微波电路理论的探索和工程实践经验,翻译过程中对原理力求准确,对语言力求通俗易懂,对基本概念的阐述力求简洁清晰,即使是一些比较晦涩的概念,也力求结合实际电路和模型,使读者不论是从理论分析上还是感性认识上,都能比较好地理解和接受。

感谢我们的同事杨锐、马晓华、明正峰等对译稿所做的贡献,感谢他们翻译或校对了部分章节所付出了艰苦劳动。与他们的讨论使我们受益匪浅,使得许多描述更加符合作者原意。

感谢西安电子科技大学工程学院,天线与微波国防重点实验室,微电子学院,宽禁带半导体材料和器件教育部重点实验室等单位的有关领导和同事给予的大力支持和帮助。微波研究所的研究生陈博韬、傅焕展、冯鹤、龚云峰、李亚峰、岳亮、李沙、蒋俊、蒋永辉、汪娟和梁丹丹等提供了本书的初译第一稿,他们的辛勤劳动是本书能够完成的基本保证。

本书由雷振亚教授主持翻译工作,完成全书的定稿,完成前言、绪论、第9章至第13章的统稿;谢拥军教授完成附录、第1章至第5章的统稿;李磊博士完成第6章至第8章的统稿。全书的翻译第二稿由研究生分组完成并相互校对,具体分工为:杨轲和刘海强翻译第8章、第13章和附录,张佳亮和王杰翻译第5章、第11章和第12章,宁高利和赖寒昱翻译第2章、第9章和第10章,党琳和王杨婧翻译第6章和第7章,蔡得水和王荣兵翻译第3章和第4章,雷斐然翻译前言、绪论和第1章。

特别感谢郝跃教授对译稿的审校把关。译稿的完成凝结着他的心血。感谢他自始至终对翻译工作的关切,是他的鼓励和支持增强了我们完成任务的信心。

追求准确是我们努力的目标,印刷之前,对书稿还不是很满意。主要有三方面的原因:大量的专业名称有多种中文说法;有些最新微电子材料、工艺和设计软件工具等尚无明确中文表示法;由于译者水平有限,对书中某些内容的理解定有不妥和错误之处。欢迎各位读者就书中内容提出宝贵意见,以便下次修正。我们诚挚谢意!

译 者
2009 年秋
于西安电子科技大学

序 言

本人受邀为这本书第一版写序已经是 15 年前的事情了。从那时起,书中所涉及的应用领域已经发生了巨大的变化。例如,微波集成电路(MMIC)的设计和技术,无论是军事还是通信系统的应用都日趋成熟。现在,无线电技术已经发展到了鼎盛时期。微波频段中的 GaAs、SiGe 和 MOS 技术补充了有源器件中 Si 技术的应用领域。人们正在批量生产高功率,高频率,低噪声性能的固态有源器件。

第二版修订并扩充了第一版的内容,给工程师们提供了不可或缺的大量数据和设计工具,使她或她能最大限度地适应这些技术发展的新需求。这个版本新增了 5 章。

本书第 1 章是引导性的回顾。内容涉及各类主题,从麦克斯韦(Maxwell)方程到射频无线/微波/毫米波的应用,模拟和数字的需求,基本射频发射机和接收机,以及非线性电路分析的 CAD,等等。

第 2 章中涉及的频率范围从射频频段到毫米波频段,在这个非常宽的频率范围,电路元件的电路性能存在一个从集总元件到分布元件的连续性过渡。理解这一性能对宽带设计尤其重要。

第 3 章是本书中最长的章节。它阐述了所有基本微波有源器件的大量细节。这些器件包括二极管、双极型晶体管、场效应管(FET),以及它们的变形,如 MOSFET 和 HEMT。讨论了这些器件的小信号、大信号特性,建模及其应用。列举了超过 200 个与器件相关的方程,完全可以满足任何一个设计者的设计需要。同时,也增加了关于加工要求的一节。

完全可以说,大多数有源器件是由两个或两个以上端口的网络及其互连线组成的。第 4 章介绍了许多工具,我们要利用这些工具来设计射频/微波双端口网络,以及三端口和四端口网络。例如,对于了解通信电路中不同回路的设计和特性,知道四端口网络的相关参数是非常有必要的。设计中,要考虑放大器的功率和电流/电压增益,也要考虑它们的稳定性和噪声参数达到相关指标。许多实例都可以证明多端口网络参数的重要性。

第 5 章是第 4 章的补充,内容差不多遵循了集总和分布元件阻抗匹配的传统方法。给出了解析法和图解(Smith 圆图)法。选择了许多例子来说明匹配技术。

新增的第 6 章的内容备受关注。几乎在任何一个微波系统中,无论是雷达系统还是移动电话的发射机中,滤波器都是非常关键的元件。滤波器的相关设计在 20 世纪的大量文献中都有所描述。现代滤波器的设计方法多种多样,有如巴特沃思(Butterworth)法的一类经典分析方法,也有元件的计算机优化技术。这一章主要使用的是前者。低通、带通和高通滤波器都是使用巴特沃思法设计的,切比雪夫(Chebyshev)响应是用传输线滤波器的 Richards 和 Kuroda 变换法来表述的。大量实例都可以阐明这些分析方法。

接下来一章介绍了线性双端口网络的噪声,第二版大大丰富了第一版相应章节的内容。更加详细地阐述了针对噪声分析的噪声相关矩阵方法。由于噪声矩阵可以处理为双端口网络的信号矩阵,并且容易与后者相混淆,故相关矩阵方法特别适合计算机处理。噪声矩阵方法是一种同时适用于线性无源和有源器件的普遍方法。书中给出实例,把它应用到 BJT 和 FET 的设计中。给出的方程组能满足大部分设计者的设计需要。

第 8 章和第 9 章分别反映了在无线领域电路设计和基于平面固态技术的电路集成技术的重要发展。

第 10 章针对前一版的相关内容进行了改写和扩充。文中提出了最新的频域和时域分析方法。重点在功率优化和噪声分析。为了丰富本章内容,章末列举了 180 多条引用文献和参考资料。

第 11 章内容上也有所扩展。新增的一节对两种 FET 混频器噪声进行了数学分析,同时也阐述了混频器设计的 CAD 方法。参考资料中也增加了关于这些补充内容的相关文献。

第 12 章是补充的新章节,包括 PIN 二极管、开关和衰减器。FET 开关也有所涉及。最后一章关于微波 CAD 与前一版最后一章大致相同。

我写这篇序言是为了描述第二版的显著特点。不过,只有读者自己对这本书进行仔细研读,才能体会到本书所涉及的内容之广泛,感悟本书在描述微波领域和通信工业的需求变化上有多么成功。

作者们在这本著作中所做的努力值得称赞。这本书将会成为广大设计者书架上的珍宝。

Robert A. Pucel
科学博士, RCP 顾问
2005 年 4 月

前 言

自从本书的第一版修订并获得高等院校和工业领域的一致好评已经过去 15 年了。尽管物理学和数学的基本原理并未改变,当今的技术条件仍给我们提供了难得的机遇来提高线性和非线性电路的设计水平。为了精简本书,我们应该遵循掌握系统概念及其在微波频段的具体要求这一思路,以体现集总元件到分布元件以及令人感兴趣的新型器件之间的转化。谈到令人感兴趣的新型器件,这里特别要提出的是硅-锗晶体管 and 低成本的 Bi-CMOS 技术, Bi-CMOS 技术可以和砷化镓技术相媲美,并在很多无线电的应用中更凸现其优势。现代晶体管的截止频率超过了 200 GHz,具有低噪声系数和低工作电压的特点。现在振荡器实际工作频率可达到 70 GHz 以上。对于高功率应用,砷化镓场效应管功率则高于 100W, LDMOS 器件也可适用于 3 GHz 以上的频率。随着科学技术的不断进步,微波器件的未来将朝着低噪声、高功率、高频率的方向迅速发展。

为便于读者阅读本书,我们将双端口网络独立成章,并在随后新增两章来探讨它们的特性。其中一章讲述了网络的匹配,另一章讨论射频微波滤波器,包括用于移动电话的硅基滤波器。

作为线性双端口一章中有关噪声方面内容的扩充,我们给出了相关于温度噪声和对双极型晶体管和场效应管噪声系数的详细推导。并且,在小信号放大器和功率放大器的一章中还加入了最新的电路设计和选择,包括线性化技术。

在振荡器章节中,添加了现代降噪电路,以及适用于高集成化的 Bi-CMOS 和 SiGe HBT 振荡器。同时,也加入了起振条件的时域分析方法。因为一些新设计的出现,微波混频器部分也得到了扩充。

为了满足工业界的需求,还增加了一个关于射频开关和衰减器的新章节。最后,同第一版一样,本书的末章将关注最新的微波电路设计软件。即便这些设计软件最基本的性能未变,但随着更好更快的软件工具的出现,它们还是在不断地更新中。

本书中涉及的大部分软件工具来自于 Ansoft 公司,可以从其网站下载三种学生版软件。同时其他的公司也会提供免费的演示版。

本书的完成时间要比预期更长,当然,在此期间,很多人为保证和提高本书的质量做出了很大贡献,在此对他们表示由衷的感谢。他们包括来自于 Synergy Microwave 公司和 Motorola 公司的工程师们。此外,世界各地的教授们也参与进来,他们是 Santa Clara 大学的 Tim Healy 教授, Robert Owens 教授(同时撰写了第 6 章关于滤波器的内容), Allen Sweet 教授和 Martin Grace 教授; UC Davis 分校的 G. R. Branner 教授; Stanford 大学的 Tom. H. Lee 教授; UC Berkeley 分校的 Ali Niknejad 教授和 Robert Broderon 教授; 葡萄牙 Aveiro 大学的 Jose Carlos Pedro 教授以及 UC Santa Barbara 分校(UCSB)的 Steve Long 教授。对本书提供重要业界信息的有德国 Siemens 公司的 Klaus Aufinger, 加拿大 SiGe 半导体公司的 Steve Kovacic, 加拿大 CRC 公司的 Rene Douville, Philips 公司的 Dipark Patel, Oepic 公司的 Kirk Laursen, RFMD 公司的 Mike Zybura, Infineon 公司的 Jim Cochrane, Anritsu 公司的 Jon Martens, Watkins Johnson 公司的 Karl Niclas, Agilent/Celeritek 公司的 Paul Khanna, RFIC 公司的 Li-Wu Yang 和 Tanhua Wu, MWT 公司的 Greg Zhou, Motorola 公司的 Edison Fong, Ansoft 公司的 Harpreet Randhawa 和 Pat Tesera 以及顾问 Peter Sturzu, Filtronics 公司的 Mike Bailey, Modelithics 公司的 Larry Dunleavy 和 Tom Weller, Agilent 公司的 Al Ward, Biniam Ayele 和 Rich Ruby; 最后是 Avnet 公司的 Ken Kawakami(同时撰写附录 E)。许多学生也帮助修改了本书并完成习题解答,他们是 Chi-Chung(Calvin), Chien, Hu-Sun(Luke)Huang 和 Francisco Madriz。

参与编写本书 13 章内容的人员分工如下: Vendelin 编写第 1 章, 第 2 章, 第 4 章, 第 5 章, 第 6 章 (与 Owens 一起), 第 8 章, 及附录 D 和附录 E (同 Kawakami); Pavio 编写第 9 章, 第 11 章, 第 12 章; Rohde 编写第 3 章, 第 7 章, 第 10 章, 11.10 节, 第 13 章和附录 A 至附录 C 及附录 F。

一直以来, 能和 Wiley 合作都是一件愉快的事, 特别感谢 George Telecki, 是他的领导、耐心和理解给了我们莫大的帮助。同时, 将三位 IEEE 学会会员的努力成果整理到第二版中也是一项艰巨的任务。

最后, 我们要感谢一位好友 Robert A. Pucel 博士, 他是微波电路设计领域中最杰出的先驱之一。是他完整地审阅了本书的第一版以及 15 年之后的第二版。

George D. Vendelin
Anthony M. Pavio
Ulrich L. Rohde

Saratoga, California
Phoenix, Arizona
Paterson, New Jersey

2005 年 4 月

目 录

第 1 章 射频/微波系统	1
1.1 简介	1
1.2 麦克斯韦方程组	9
1.3 射频无线电技术/微波/毫米波的应用	9
1.4 工作频带,模式和波形	12
1.5 模拟和数字要求	13
1.6 基本定义	14
1.7 基本 RF 发射机和接收机	19
1.8 用于非线性电路分析的现代 CAD	21
1.9 动态负载线	22
引用文献	22
参考资料	24
习题	24
第 2 章 集总元件和分布元件	26
2.1 简介	26
2.2 射频电路到微波电路的过渡	26
2.3 集总元件上的寄生效应	28
2.4 分布元件	32
2.5 混合元件:螺旋线圈	33
引用文献	33
参考资料	35
习题	35
第 3 章 有源器件	37
3.1 引言	37
3.2 二极管	38
3.3 微波晶体管	70
3.4 异质结双极型晶体管	97
3.5 微波 FET	100
引用文献	125
参考资料	129
习题	131
第 4 章 双端口网络	133
4.1 引言	133
4.2 双端口参数	133
4.3 S 参数	136

4.4	通过 SPICE 分析得出的 S 参数	136
4.5	稳定性	137
4.6	功率增益、电压增益和电流增益	140
4.7	三端口器件	144
4.8	转换功率增益的推导	146
4.9	差分 S 参数	147
4.10	双绞线传输线	149
4.11	低噪声和高功率放大器的设计	151
4.12	低噪声放大器设计实例	153
	引用文献	160
	参考资料	161
	习题	162
第 5 章	阻抗匹配	166
5.1	引言	166
5.2	Smith 圆图和匹配	166
5.3	阻抗匹配网络	170
5.4	单元件匹配	171
5.5	双元件匹配	171
5.6	集总元件匹配网络	172
5.7	分布元件匹配网络	173
5.8	匹配网络的带宽限制	177
	引用文献	182
	参考资料	182
	习题	183
第 6 章	微波滤波器	186
6.1	引言	186
6.2	低通原型滤波器的设计	186
6.3	变换	191
6.4	传输线滤波器	198
6.5	精确设计和 CAD 工具	208
6.6	实际滤波器	208
	引用文献	211
	参考资料	211
	习题	211
第 7 章	线性双端口网络的噪声	212
7.1	引言	212
7.2	信噪比	213
7.3	噪声系数测量	214
7.4	噪声参量和噪声相关矩阵	215
7.5	有噪声双端口网络描述	223
7.6	级联网络的噪声系数	226

7.7	外部寄生元件的影响	228
7.8	噪声圆	231
7.9	用相关矩阵计算线性双端口网络的噪声相关性	232
7.10	噪声系数测试设备	235
7.11	噪声参量的确定方法	236
7.12	双极型晶体管和场效应管噪声特性的计算	237
7.13	双极型 T 形晶体管的噪声模型	248
7.14	GaAs 场效应管噪声模型	254
	引用文献	265
	参考资料	266
	习题	268
第 8 章	小信号和大信号放大器设计	270
8.1	引言	270
8.2	单级放大器的设计	271
8.3	倍频器	291
8.4	1.9 GHz 的 PCS 和 2.1 GHz 的 W-CDMA 放大器的设计举例	293
8.5	稳定性分析和局限性	297
	引用文献	299
	参考资料	301
	习题	303
第 9 章	功率放大器的设计	305
9.1	引言	305
9.2	器件建模与描述方法	305
9.3	最优负载	326
9.4	单级功率放大器的设计	328
9.5	多级设计	331
9.6	分布式功率放大器	336
9.7	工作类型	347
9.8	功率放大器的稳定性	353
9.9	放大器线性化方法	355
	引用文献	356
	参考资料	360
	习题	361
第 10 章	振荡器设计	362
10.1	引言	362
10.2	压缩 Smith 圆图	365
10.3	串联或并联谐振	366
10.4	谐振器	367
10.5	双端口振荡器的设计	378
10.6	晶体管模型的负电阻	383
10.7	振荡器的 Q 值与输出功率	388

10.8	振荡器中的噪声:线性方法	390
10.9	用 S 参数分析方法对振荡器设计进行优化	408
10.10	振荡器的非线性有源模型	417
10.11	使用非线性 CAD 工具进行振荡器设计	424
10.12	微波振荡器特性	432
10.13	使用大信号 Y 参数的振荡器设计	435
10.14	基于贝塞尔函数的大信号设计实例	437
10.15	最佳相位噪声和良好的输出功率的振荡器设计实例	440
10.16	在振荡器中计算相位噪声的 CAD 方法	447
10.17	验证电路	457
10.18	设计高效微波 FET 和双极型振荡器(最优功率)的解析方法	464
	引用文献	485
	参考资料	488
	习题	498
第 11 章	微波混频器设计	503
11.1	引言	503
11.2	二极管混频器原理	506
11.3	单二极管混频器	516
11.4	单平衡混频器	522
11.5	双平衡混频器	531
11.6	场效应管混频器理论	546
11.7	平衡场效应管混频器	562
11.8	特殊混频器电路	571
11.9	使用现代 CAD 工具	578
11.10	混频器噪声	583
	引用文献	592
	参考资料	594
	习题	595
第 12 章	RF 开关和衰减器	597
12.1	PIN 二极管	597
12.2	PIN 二极管开关	598
12.3	PIN 二极管衰减器	605
12.4	FET 开关	608
	引用文献	610
	参考资料	611
第 13 章	用于 MMIC 设计的微波计算机辅助工作站	612
13.1	引言	612
13.2	砷化镓 MMIC 加工:CAD 的作用	617
13.3	产品驱动设计	619
13.4	利用谐波平衡法设计非线性电路	621
13.5	可编程微波调谐系统	629

13.6	考虑布线效应的 MMIC 的介绍	632
13.7	GaAs MMIC 布线软件	637
13.8	设计实例	639
13.9	CAD 的应用	647
	参考资料	658
附录 A	BIP:GUMMEL-POON 双极型晶体管模型	661
附录 B	MOSFET 的 LEVEL 3 模型	667
附录 C	GaAs MESFET 的噪声参量	670
附录 D	单向增益部分的推导	681
附录 E	双音互调产物的矢量表示	683
附录 F	微波无源元件	699
索引	714

第 1 章 射频/微波系统

1.1 简介

本书与大多数知名教材^[1.1-1.12]相似,都是从一个工程学的直观角度,给出了关于射频微波电路设计这一相同工程学主题的一些不同的侧重见解。本书第一版^[1.13]完成于 1982 年,其中只涉及到线性技术并已绝版。随后经 1990 年的添增^[1.14],覆盖了线性和非线性技术两个部分。本书第二版的出版是为了更新技术以包含所有最新的工程工具,特别是处于快速发展中的现代微波计算机辅助设计(CAD)。

本书适用对象为射频/微波专业的研究生和该行业的工程技术人员,并以掌握以下基础知识为前提:放大器、振荡器和混频器的各部分组成元件及其定义;双端口网络理论;功率增益;Smith 圆图匹配;直流(DC)偏置等。但这些知识也包含在本书中,以备查阅。在使用计算机辅助设计(CAD)工具之前,实践工程师首先应该能够用 Smith 圆图和计算器来解决一些常规的射频微波问题。CAD 软件只能是对工程师设计的一个检验,或在某种情况下,它是对初始设计的一种强化。其实这样的整个设计流程和元件制造商提供的非线性模型的流程是一样的,而且都是一个不断进展的工作,逐年提高。

本教材按四个季度顺序被用在 Santa Barbara 大学的研究生教学中:

秋季:基础设计——不使用 CAD,有源微波器件 I (ELEN 711)

冬季:线性设计——(使用 CAD 求解 S 参数),有源微波器件 II (ELEN 712)

春季:非线性设计(ELEN 714)

夏季:高级非线性设计(ELEN 719)

本课程安排在写学位论文,专著,学术论文以及开始博士培养计划等必修课之前。其重点通常在于对“为什么当工程师们在掌握用准确的非线性模型设计电路的基本原理后, CAD 就能如此出色地完成任务”问题的理解。第 8 章将给出一个这样的经典例证,该例子讨论了 2002 的春季教学部分中的一个额外学分问题——无耗反馈放大器。

本书将首先介绍一下 19 世纪和 20 世纪通信成果的简史,如表 1.1^[1.15]所示。尽管重要的科学大事在一个多世纪以前就发生了,但是现代数字无线时代还是在 1962 年来临,并在 1988 年得到商业应用。

表 1.1 通信技术历史事件表

时 间	人物或单位	年 份
麦克斯韦方程组	James Clerk Maxwell	1873
电话的发明	Alexander Graham Bell	1876
麦克斯韦理论的验证	Heinrich Hertz	1891
大西洋彼岸通信	Guglielmo Marconi	1901
硫化铅检波器	J. C. Bose	1901(已提交专利申请)
超外差式接收机	Edwin H. Armstrong	1917
X 波段雷达	MIT 辐射实验室	1942
晶体管的发明	John Bardeen, William Brittain, and William Shockley, Bell Labs	
数字音频传输	ATT	1962
GaAs MESFET 的发明	C. A. Mead Cal Tech	1965

(续表)

时 间	人物或单位	年 份
第一个固态 X 波段雷达	Texas Instruments	1970
第一个卫星上的 GaAs MESFET	SPAR/CRC	1975
模拟便携收音机	ATT/Motorola	1983
数字便携收音机	ATT	1988
数字式个人通信服务(PCS)GSM 和 CDMA	Europe/Qualcomm	1993
WCDMA(宽波段 CDMA)4GCDMA 网络	Mobile Internet	2000

由固态器件角度出发,这一重要科学大事是双极型晶体管(BJT)和砷化镓场效应管(GaAs MES-FET)的发明,它们至今仍为电子学的核心。而由于温度因素和平面工艺的发现,锗双极型晶体管(Ge BJT)又很快地被硅双极型晶体管(Si BJT)代替。贝尔实验室在试图制造一个可变电阻器或场效应管的时候意外发现了锗双极性晶体管。

第一个固态 X 波段雷达是 Texas Instruments 于 1966 - 1970 年在和 Wright Patterson 空军基地有合同关系时开发的^[1.16]。这一合同方案被称为 MERA 方案(Microwave Electronics Radar Application,微波电子雷达应用)。它带来了微波工程学的革命,即在人们认为硅材料不可能制作微带传输线之后,首次提出了利用氧化铝为材料制成混合微波集成电路(MIC)的新思路。MERA 方案由一个相控阵天线组成,它的指向由在功率为 1 W 发射机前的移相器决定,移相器个数为 640。MERA 方案于 20 世纪 90 年代在 BMDO[Ballistic Missile Defense Operation, 基地雷达(GBR)弹道导弹防卫控制]中,被 Raytheon 公司和 TI 公司所发明的砷化镓场效应管组件所取代,该模型在 1996 年大约就能装载 60 000 个单元^[1.17]。

在航天领域中,对于砷化镓场效应管的首次应用我们有必要再做些说明。1973 年, Fairchild 公司和 Plessey 公司都在生产砷化镓场效应管,每个管子栅长约 2 μm , 价格约 500 美元。1975 年, SPAR 准备发射一枚卫星,于是雇用加拿大的通信研究中心(CRC)。该中心选择上述两公司制造的新型场效应管来设计低噪声放大器(LNA)。第一批用于太空的 23 个砷化镓场效应管便从 Fairchild 公司耗资 40 000 美元购进。但由于静电释放(ESD)的问题,这些场效应管在两个月内大量报废。接下来他们又购进了一整套的晶体管。这个故事的简化版被记载在引用文献[1.18]和[1.19]之中。在这个事件中,两家供货商提供用于 5 级或 6 级的放大器的场效应晶体管(参见图 1.1)。此类放大器中心频率为 12 GHz, 带宽 300 MHz, 增益 26 dB, 噪声系数为 10 dB。并且在 1975 年,两枚装有该放大器的卫星发射升空。Plessey 公司在该项目中大获全胜,该公司的放大器持续工作了 3 年时间^[1.20];但是由于卫星中的开关问题, Fairchild 公司所生产的放大器从未加电工作过。放大器中所有电路都制作在 25 mil^① 的抛光氧化铝基板之上,其 TiW/AU 金属层有 6 μm 厚。TiW 的电阻为 50 Ω/m^2 。这些放大器被应用于 1975 年末在澳大利亚发射的全球首枚直播电视广播卫星中,其照片如图 1.1 所示。

接下来我们探讨一下移动电话的有关问题。目前公认的第一代移动电话系统为 1984 年首次采用的模拟移动系统。而现在人们使用的数字系统,如 GSM, 个人数字移动电话(PDC), CDMA One(IS-95)和 US-TDMA(IS-136)都属于第二代系统。这些系统适用于语音通信和其他业务如文本传送和数据网络接入。第三代系统设计目的是多媒体通信:高质量的图像和影像使得人际沟通水平得以提高。并且第三代移动系统具有更高的数据传送速率和新型灵活的通信能力,也使得人们通过公共或私人网络访问信息及业务的能力得到了加强。第三代移动通信系统的空中接口方案中广为接受的便是 WCDMA 技术,它是由第三代合作伙伴计划(3GPP)研究制定的。在 3GPP 中, WCDMA 被称为 UTRA(通用移动通信系统地面无线接入), FDD(频分复用)和 TDD(时分复用)。在引用文献[1.21]中给出了 WCDMA FDD 和 WCDMA TDD 之间的差别。

① 1 mil(密耳) = 25.4×10^{-6} m——编者注。

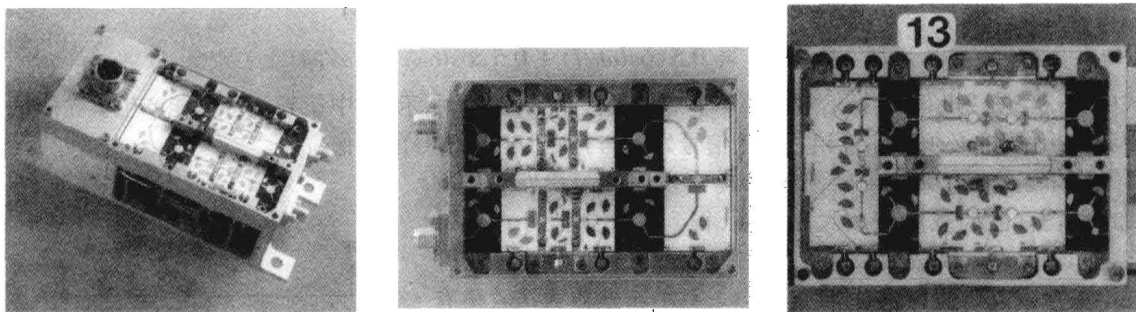


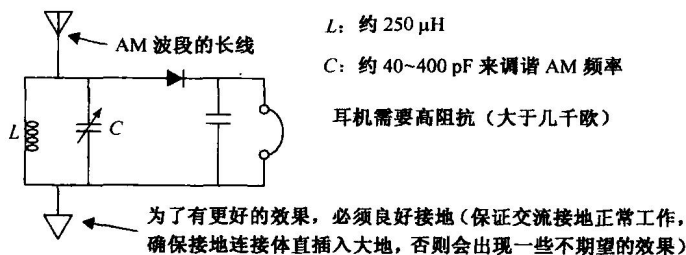
图 1.1 第一个 12 GHz 直播卫视中的 GaAs MESFET 放大器

移动电话用户调查表明电话的语音性能和价格是购买时的主要考虑因素,而其余辅助功能都是次要的。这些次要的功能包括存储影像、数字图像和手机上网等,它们显然会抬高手机的价格。消费者盼望“零 G”产品,即只有语音,从而使得价钱最低。没有动听的铃声而只有通话,除此之外的其他因素都不是普通客户的兴趣所在。所以需要移动电话进行新的改革来降低价格,这一切也正在进行之中。

现阶段互补金属氧化物半导体(CMOS)技术的另一个体现便是大批量产品中的每个 40×40 mm 硅片的成本为 10 美分。它对射频部分并没有多大的影响。当移动射频模拟收发机降到如此小的尺寸时,数字内容、外壳和天线将成为手机的实际成本,此时手机便有望覆盖全世界的大部分区域。

同时,射频/微波工程还大量应用在当今的娱乐行业中。数字电视在其中占很大的比例,当之无愧为下一代的消费品。因此我们希望能将模拟和数字功能集成在同一块硅基片上,从而在很大程度上减少消费品的成本。

100 多年前,最简单的无线电接收机是晶体(矿石)无线电接收机,如图 1.2 所示,它不需要电池。调幅(AM)信号被二极管(或晶体)解调,从而使耳机中传出声音。该种接收机因为在第二次世界大战中的应用也被称为“掩体收音机”。它由天线(其实为一定长度的电线),LC 谐振回路,检波器和耳机组成。其中的检波器由一根铅笔芯接触一个吉列刀片构成。与耳机并联的 1000 pF 电容器是载频的射频接地面。耳机检测接收信号的包络,也就是所期望的信息。这种类型的接收机是所有接收机中最简易的。我们还可以依据需求在众多网站上买到自己所需的收音机。

图 1.2 晶体无线电接收机或掩体收音机^[1,12]

同样不用电池的另一个发明是电话^[1,22]。其检波器是一个能够将声音传到人耳耳膜的振动膜^[1,23]。人的耳膜非常灵敏,可以清晰感觉到频率大概为 5 kHz 的一个氢原子的位移。

图 1.3 展示了接收机的频谱图像,其中的镜频信号将有可能产生出一个不期望的中频输出,所以我们应该过滤镜频信号。镜频信号是有用射频信号的镜像。

收音机是一个频率为载频的已调谐振电路,这样可以使外差式接收机(参见图 1.4)的输入电压最大。通过本地振荡器(LO)可以使输入信号转化成为一个频率较低的中频信号,相关的数学表达式为: