



经典译丛

WILEY

微波与射频技术

微波与射频电路 工程设计

Microwave and RF Engineering

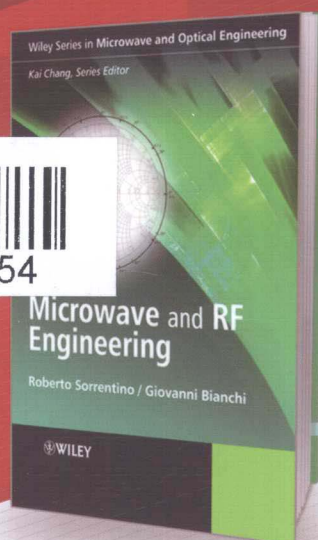
【意】 Roberto Sorrentino 著
Giovanni Bianchi

鲍景富 等译

Microwave and RF Engineering



02738554



中国工信出版集团



电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

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

经典译丛·微波与射频技术

微波与射频电路工程设计

Microwave and RF Engineering

[意] Roberto Sorrentino 著
Giovanni Bianchi

鲍景富 等译

电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

内 容 简 介

本书重点讲述微波元件设计、微波控制元件、微波电路工艺、射频/微波系统构成、数值分析方法与 CAD 技术及测试仪器与技术等工程应用中的知识。主要包括:基本电磁场理论、导波电磁传输、微波电路理论、谐振器和腔体、阻抗匹配、无源微波元件、微波滤波器、微波元件设计、微波控制元件、放大器、振荡器、频率变换器、微波电路工艺、射频/微波系统构成、数值分析方法与 CAD 技术、测试仪器与技术等。本书兼备理论研究和工程实践性,内容上既有广度又有深度。

本书适合作为高等院校相关专业高年级本科生和研究生的教材或参考书,同时也可以作为微波电路及器件研发的工程技术人员的参考用书。

Microwave and RF Engineering ISBN: 978-0-470-75862-5

Roberto Sorrentino Giovanni Bianchi

Copyright © 2010 John Wiley & Sons, Ltd.

All rights reserved. This translation published under license.

Authorized translation from the English language edition published by John Wiley & Sons, Ltd.

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

本书简体中文版专有翻译出版权由 John Wiley & Sons, Ltd. 授予电子工业出版社。未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书的任何部分。

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

版权贸易合同登记号 图字:01-2011-4145

图书在版编目(CIP)数据

微波与射频电路工程设计/(意)索伦蒂诺(Sorrentino, R.), (意)比安基(Bianchi, G.)著;鲍景富等译.

北京:电子工业出版社,2015.4

(经典译丛·微波与射频技术)

书名原文: Microwave and RF Engineering

ISBN 978-7-121-25779-7

I. ①微… II. ①索… ②比… ③鲍… III. ①微波电路-电路设计 ②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 062814 号

策划编辑:马 岚

责任编辑:冯小贝

印 刷:三河市华成印务有限公司

装 订:三河市华成印务有限公司

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:43.5 字数:1227 千字

版 次:2015 年 4 月第 1 版

印 次:2015 年 4 月第 1 次印刷

定 价:109.00 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 zlt@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

本书共分为 17 章：第 1 章介绍了微波和射频的基本概念；第 2 章对基本的电磁场理论进行了简要回顾；第 3 章对无线传输线的导波电磁传输进行了研究；第 4 章介绍了微波电路，并对一些典型的微波结构进行了建模分析；第 5 章~第 8 章研究了几种类型的无源微波元件，其中第 5 章介绍了微波谐振器和腔体，第 6 章介绍了微波电路的阻抗匹配，第 7 章主要介绍无源微波互连元件，第 8 章介绍了微波滤波器；第 9 章~第 12 章研究了几种类型的控制和有源微波元件，其中第 9 章介绍了微波元件设计中的一些基本概念，第 10 章研究了几种微波控制元件，第 11 章介绍了基于固态器件的微波放大器，第 12 章介绍了振荡器；第 13 章介绍了变频器；第 14 章讲解了微波电路加工制造技术，包括微波集成电路(MIC)和单片微波集成电路(MMIC)；第 15 章介绍了射频与微波发射/接收机的结构；第 16 章介绍了微波电路设计中的数值方法和 CAD 技术；最后，第 17 章介绍了微波电路的测试仪器和测试技术。所有这些知识对于微波工程师来说都是应该掌握的。

大多数传统的微波书籍专注于电磁相关的理论分析，虽然很好地掌握电磁场理论是必需的，但不应该仅限于理论，也需要掌握特定的分析方法和基础的网络理论知识。本书所有章节的实例都源于作者的实际工程经验，同时还给出了相关 CAD 技术及测试仪器和测试技术，具有很高的参考价值，这也是本书的特色所在。本书的读者对象包括高等院校的高年级本科生、研究生及射频工程师等专业人员，书中展现了不同难度、不同深度的内容和主题。为了帮助读者更好地理解 and 掌握本书的内容，每一章的末尾都给出了参考文献和相关的仿真文件，并在附录中给出了实用的转换关系、傅里叶变换、标准矩形波导及同轴电缆数据等内容。

全书由电子科技大学的鲍景富老师组织翻译工作，并负责全书内容的校对和统稿。此外，还得到了许多实验室的博士研究生、硕士研究生的协助，参与翻译工作的有黄洪云、李智鹏、黄裕霖、凌源、丁芳军、蒋俊文、易亮、赖宏南、郑永华、刘超、李丰军、徐铭海、曹存文、何月、何宗郭、寇波、王秋苹、谭伟、潘明争、汪帆、车珊、邓迪等，在文字校对方面也得到了电子工业出版社的大力帮助，在此一并表示衷心的感谢。

但由于本书篇幅较大，时间仓促，加之译者水平有限，书中难免存在错误，恳请读者批评指正。

译者于成都

2015 年 3 月

作者简介

Roberto Sorrentino: 1971 年在意大利罗马 La Sapienza 大学获得电子工程学士学位并留校任教。1986 年~1990 年在罗马 Tor Vergata 大学任教。1990 年后在意大利 Perugia 大学任教。在微波无源电路及天线的分析和设计领域,发表国际期刊论文 100 余篇,国际会议论文 300 余篇,出版专著 3 本。Sorrentino 教授于 1990 年成为 IEEE 会士,并在 2000 年和 2004 年分别获得 IEEE Third Millennium Medal,以及由 IEEE MTT-S 颁发的 Distinguished Educator Award。并在 1998 年~2009 年担任欧洲微波协会会长。

Giovanni Bianchi: 1987 年在意大利罗马 La Sapienza 大学获得电子工程学士学位。1988 年加入 Elettronica 公司的微波部门,参与微波元件(包括砷化镓单片微波集成电路)及子配件的设计工作。Bianchi 于 2000 年加入摩托罗拉个人通信服务部,从事 GSM 和 WCDMA 移动手机的设计工作,并于 2004 年在 SDS S. r. L 负责微波电路设计。自 2008 年 1 月后,以高频理论和技术方面的专家身份在 Verigy 公司担任硬件/射频部门的研发工程师。在其 20 多年的设计生涯中, Bianchi 的研究范围涵盖了各类无源及有源微波元件(包括滤波器、放大器、振荡器及合成器)。Bianchi 还撰写了 4 本专著(包括本书)及发表了 12 篇论文。

前言^①

本书关注的对象是一个相当复杂的学科,涉及许多不同的方法和技术,而想要得到结果却如此困难但同时又如此地吸引人。大多数传统的微波学术专著都侧重于电磁相关方面的介绍,即如何科学地求解麦克斯韦方程组,而求解过程中涉及的许多非同一般的难点会使得内容的阐述难以十分透彻。电磁场理论无疑是包含了射频(RF)到毫米波的高频技术的基础,因此清楚地认识它才能理解和掌握众多应用中所使用的物理原理。但在无线电通信领域,虽然它十分重要却并不是人们唯一关注的焦点。

微波技术并不能简单地归纳为电磁场理论。微波工程师即设计者虽然在处理如此高频率的对象时需要运用一些特定的方法而必须具备电磁场理论的基本知识,但同时也必须熟悉网络理论、信号理论、线性和非线性电路、电子技术,尤其是微波集成电路、CAD技术及测试设备。而以上考虑正是我们撰写本书的出发点。我们认为一些以往作为边缘内容的章节,如半导体器件建模、测试仪器等对于一名微波工程师来说也是同等重要的,因此对其进行了详尽的介绍,这是不同于以往传统微波专著之处。

本书面向的读者为学生和专业人士。各个主题的内容无法避免地具有不同层次的深度。读者或许会发现,即使忽略一些特定内容的讨论,也不会影响全文论述的连贯性。我们正是以这种不失详细而确保严谨的阐述方式来绕过一些传统微波讨论方法的难点。在内容安排方面,出于篇幅限制不得不对课题做一些取舍,许多重要的课题没有包含在本书中,尤其是介质波导中的波传播及波在光纤中的传播,而微带传输和印制电路的研究被局限于简明的定性描述,同样被压缩篇幅的还有许多元器件的分析和一些相关内容。我们衷心希望内容的取舍不会影响本书成为无论是初学者还是后续深入研究的人员的一本有效工具书。

根据各自以往的经验,我们认识到一本将规范的学术严谨性与实践方法相结合的图书才能最好地帮助设计者,因此将常见的以课题学术研究为导向的列表扩展到覆盖了众多面向应用的方面,并在所有章节中都包含了许多实际工程应用中的例子。

在对微波及射频领域进行了概要介绍后,将在第2章以平面波传播为重点帮助读者简明回忆基本的电磁场理论知识。本书假设读者应该具有一定的电磁场理论基础,本章仅仅是作为一个简单参照并起到帮助读者回顾知识点的作用。第3章用于学习沿均匀传输线传播的导行电磁波的相关知识。不同于其他教材,本书将介绍在圆柱形波导中传播模态的传输线方程。后续部分为集总电路模型的常规推导,还将讨论包括耦合传输线在内的一些最为常见的波导结构。

第4章介绍微波电路的基本概念及一个用于描述微波结构特征的有效模型。本章着重关心微波结构的建模及有限长度传输线的分析,内容包括史密斯圆图、 N 端口电路和终端耦合线。本书将在第5章~第8章分析各类无源微波元件。第5章中涉及微波腔体和谐振器结构,其中谐振模态扩展理论作为求解麦克斯韦方程组的重要理论方法而单独列在章末进行介绍。我们将在第6章讨论微波电路的匹配问题,并会对四分之一波长变换器做详尽的说明。第7章将介绍大量的无源

① 本书中文翻译版的一些字体、正斜体、图示、符号保持英文原版的写作风格,特此说明。

微波元件,其中无源一词在此等效为线性的,开关及可调单元不包含在这些元件中,但会在第10章讨论。第7章主要介绍运用了各种工艺技术的互连元件,如各类定向耦合器、功分器及合成器,还包括了对微波多波束合成网络的简单描述,并在章末简要介绍了非互易元件。考虑到微波滤波器对于微波工程师在设计电路时的重要性,将在第8章对其进行细致的讲解。

第9章的内容为随后章节中学习控制和有源器件所需要用到的一些基本概念。第10章介绍了利用控制装置工作的无源微波控制元件,例如二极管和晶体管等作用在微波信号上但不会提升信号能量的元件。基于固态元件的微波放大器则安排在第11章,受篇幅限制,对这类放大器的讨论局限于主要概念及最常见的结构,包括小信号、低噪声、功率放大三类放大器的由一个晶体管放大电路和单输入/单输出匹配网络所构成的普通配置。第12章讨论微波的生成,包括振荡器及其常见结构,以及阐述一些相关的分析技术。

第13章的研究对象为频率变换,这是微波及射频信号从检波到乘积混频等非线性处理中的一项基本技术。

第14章的主题为微波电路的制造技术。需要注意的是,制造技术只限于集成电路(IC),涵盖了微波集成电路(MIC)及最为复杂的单片微波集成电路(MMIC),本章内容还包括对硅基射频集成电路(RFIC)的综述。

在第15章将以系统的观点来研究发射机/接收机中的射频和微波结构,包括对基本调制理论的概述。第16章介绍基本的数值计算方法,以及用于微波电路设计的CAD技术。虽然应该给这一重要课题分配更多的篇幅,但我们认为已经为读者提供了足够的基本内容,可以日后查阅该领域更加专业的书籍。第17章主要介绍测试方法及相关的仪器。这里强调的是,我们的确认为一名微波工程师应该意识到第17章的基础内容是对其工作结果进行最终验证不可或缺的一环。

为了更详尽地说明和扩展第5章~第17章(除去第14章)阐述的内容,我们总结了近百份仿真文档,收藏在附带的光盘中^①。允许读者修改其中的一些数据,以了解更改参数对电路响应的影响,并且还可以生成与书中给出的例子不同的结果。此光盘还包含了两个用于安装所需应用工具的设置程序,命名为Ansoft Designer SV和SIMetrix。

仿真文档以每章一个文件夹的形式分组,各文件夹又进一步分为数个子文件夹,同一类文档被归纳在一个子文件夹中,主要分为以下三类:Ansoft Designer SV, Mathcad, SIMetrix,均为我们已采用的商业化软件。虽然这三种软件都具有更为宽泛的功能,但我们只采用如下功能:

- Ansoft Designer SV: 作为Ansoft Designer的一个功能子集,提供商业化的分布式设计管理环境和微波/射频硬件开发所需的电路仿真。我们将使用这款软件用于线性S参数和噪声的分析。
- Mathcad: 一款能够在执行数学计算的同时记录数据的计算机数学处理软件。它将用户熟悉的标准数学符号以文本和图形的方式集成在一个工作表中,从而提供了直观、简洁的可视化用户交互界面。我们将在分析和综合微波/射频结构中用到它。
- SIMetrix: 包含一个带有原理图编辑器的SPICE仿真器,以及一个标准环境下的波形观测仪。可以使用它给读者提供非线性电路和子系统分析的例子。

如果需要更进一步描述或者下载更新的软件版本,可以访问它们各自的网站: www.ansoft.com, www.ptc.com, www.simetrix.co.uk。

^① 原版书附带的光盘内的仿真文件可登录华信教育资源网(www.hxedu.com.cn)免费注册下载。

我们由衷地感谢 Elisa Fratticcioli 和 Cristiano Tomassoni 对本书文字和图片所做的编辑工作。感谢 Luca Pelliccia 对全文内容细致而耐心的校正，帮我们清除了许多拼写错误及工作差错。Michele Ancis、Simone Bastioli、Loris Caporali、Federico Casini、Paola Farinelli、Elisa Sbarra 和 Roberto Vincenti Gatti 对本书各章内容提供了必要的支持，在此一并表示感谢。

对于本书，虽然经过多次修订，仍有许多不足之处及一些不可避免的错误。我们欢迎广大读者指出本书的错误，或将自己的意见及任何疑问发送电子邮件到以下邮箱。

Roberto Sorrentino (sorrentino@diei.unipg.it)

Giovanni Bianchi (bardolfo@libero.it)

目 录

第 1 章 简介	1
1.1 微波与射频	1
1.2 频率带宽	3
1.3 应用	4
参考文献	5
第 2 章 电磁场基本理论	6
2.1 引言	6
2.2 麦克斯韦方程组	6
2.3 时谐电磁场; 一个矢量的极化	8
2.4 时谐域中的麦克斯韦方程组	9
2.5 边界条件	10
2.6 电磁场的能量和功率; 坡印亭矢量	12
2.7 一些基本理论	13
2.8 平面波	15
2.9 直角坐标系下波动方程的解	16
2.10 平面波的反射和透射; 斯涅耳定理	20
2.11 电位	27
参考文献	28
第 3 章 导波电磁传输	29
3.1 引言	29
3.2 圆柱形结构; TE、TM 和 TEM 模的麦克斯韦方程解决方法	30
3.3 传输线的传播模式	36
3.4 一维电路传输线	38
3.5 相速度、群速度和能量速度	41
3.6 横向模态矢量 $\mathbf{e}_t$ 、 $\mathbf{h}_t$ 的性质; 场在波导中的扩张	42
3.7 实际波导中的损耗、衰减和功率处理能力	44
3.8 矩形波导	46
3.9 脊形波导	50
3.10 圆形波导	50
3.11 同轴电缆	54
3.12 平行板波导	55
3.13 带状线	56
3.14 微带线	57

3.15 共面波导	61
3.16 耦合线	62
参考文献	65
第4章 微波电路	66
4.1 引言	66
4.2 微波电路的简单陈述	66
4.3 终端传输线	68
4.4 史密斯圆图	70
4.5 功率流	77
4.6 矩阵表示	80
4.7 传输线支节电路模型	89
4.8 平移参考平面	90
4.9 带负载的二端口网络	91
4.10 耦合线的矩阵描述	91
4.11 耦合线的匹配	93
4.12 使用耦合线支节的二端口网络	93
参考文献	95
第5章 谐振器和腔体	96
5.1 引言	96
5.2 谐振条件	96
5.3 品质因数 Q	98
5.4 传输线谐振器	100
5.5 平面谐振器	103
5.6 谐振腔	105
5.7 谐振腔 Q 值的计算	106
5.8 介质谐振器	108
5.9 电磁场的传播	110
参考文献	120
第6章 阻抗匹配	121
6.1 引言	121
6.2 法诺约束	121
6.3 四分之一波长传输线	122
6.4 多节四分之一波长变换	124
6.5 传输线和短截线变换器; 短截线调谐器	132
6.6 集总 L 形网络	134
参考文献	138
相关文件	138

第 7 章 无源微波元件 139

7.1 引言 139

7.2 匹配负载 139

7.3 可变短路线 140

7.4 衰减器 141

7.5 固定移相器 143

7.6 节点和互连节点 144

7.7 功率分配器和功率合成器 151

7.8 集总元件实现的电路 163

7.9 波束形成网络 165

7.10 非互易元件 170

参考文献 172

相关文件 173

第 8 章 微波滤波器 174

8.1 引言 174

8.2 定义 174

8.3 低通原型 175

8.4 半集总低通滤波器 183

8.5 频率变换 187

8.6 Kuroda 规则 194

8.7 导抗逆变器 196

参考文献 210

相关文件 211

第 9 章 微波元件设计的基本概念 212

9.1 引言 212

9.2 级联线性二端口网络 212

9.3 信号流图 221

9.4 二端口网络中的噪声 222

9.5 二端口网络的非线性 231

9.6 半导体器件 246

9.7 高频半导体器件的电气模型 252

参考文献 267

相关文件 267

第 10 章 微波控制元件 269

10.1 引言 269

10.2 开关 269

10.3 可变衰减器 290

10.4 移相器 298

参考文献	307
相关文件	308
第 11 章 放大器	309
11.1 引言	309
11.2 小信号放大器	309
11.3 低噪声放大器	321
11.4 实验放大器的设计	324
11.5 功率放大器	330
11.6 其他功放结构	365
11.7 微波放大器实例	378
参考文献	381
相关文件	382
第 12 章 振荡器	384
12.1 引言	384
12.2 总则	384
12.3 负阻振荡器	388
12.4 正反馈振荡器	391
12.5 标准振荡器结构	396
12.6 振荡器的设计	405
12.7 振荡器的性能指标	409
12.8 特殊振荡器	415
12.9 双推微波 VCO 的设计	426
参考文献	428
相关文件	428
第 13 章 变频器	430
13.1 引言	430
13.2 检波器	430
13.3 混频器	444
13.4 倍频器	482
参考文献	485
相关文件	486
第 14 章 微波电路技术	487
14.1 引言	487
14.2 混合和单片集成电路	487
14.3 基本的 MMIC 元件	492
14.4 仿真模型和版图库	500
14.5 MMIC 加工技术	502
14.6 射频集成电路	505
参考文献	505

第 15 章 射频与微波电路结构	506
15.1 引言	506
15.2 调制理论回顾	506
15.3 发射机	511
15.4 接收机	525
15.5 射频收发机的进一步阐述	548
15.6 特殊射频功能模块	566
参考文献	583
相关文件	584
第 16 章 数值方法和计算机辅助设计	586
16.1 引言	586
16.2 电磁分析	588
16.3 电路分析	604
16.4 优化	610
参考文献	613
第 17 章 测试仪器与技术	615
17.1 引言	615
17.2 功率计	615
17.3 频率计	617
17.4 频谱分析仪	622
17.5 宽带采样示波器	627
17.6 网络分析仪	633
17.7 特殊的测试仪器	650
参考文献	659
相关文件	660
附录 A 一些有用的矢量分析关系及三角函数恒等式	661
附录 B 傅里叶变换	670
附录 C 理想波导中的特征矢量正交性	672
附录 D 标准矩形波导管和同轴线参数	674
附录 E 电气原理图常见符号	677
附录 F 缩略词列表	679

第1章 简介

1.1 微波与射频

有时，科技词汇会有不同寻常的历史。就像微波(microwave)这个词，起初，它被严格界定为雷达、无线电通信和电磁学领域的专业词汇，几十年后，由于30年前微波炉的推广，微波又变成了一个与烹饪有关的流行词汇。正是由于这个原因，微波一词在专业领域的应用有所下降，常常被意义更宽泛、使用更普遍的射频(RF)和频率30 GHz以上的毫米波(millimeter wave)两个词语代替。差不多在同一时期，马尼克(Marconi)创造和首先使用的表达方式“无线”(wireless)开始取代“无线电”(radio)，并在近几年流行起来。

微波一词首次被用做科技词汇是在1932年，Nello Carrara用它来定义波长小于30厘米(cm)，也就是频率高于1 GHz的电磁波^[1]。当时，雷达的研究推动了这些高频率波的应用，在世界各地，人们为此做了许多研究，花费了许多资源^①。

对微波最简单的定义是频率位于一个规定区间内的频谱。图1.1描述了从长波到紫外线的所有频谱。在大多数教科书中，微波的频率在300 MHz~300 GHz之间，波长在1毫米(mm)~1米(m)之间。但少数资料显示，微波的频率下限升至500 MHz或者1 GHz。因为毫米波波长定义在1~10毫米之间，所以频率在30~300 GHz之间的微波也指毫米波。

这些术语的不确定性，反映出没有一个明确的物理现象能够分辨出精确的频率界限。同时，射频也不能代表一段精确的频率范围，它只能表示应用于无线电技术范围内的频率，这些频率通常在微波范围以下。

微波不是一个频率范围，它实际上表示一种方法，或者说是一种研究电磁现象的特殊手段。这种手段介于其他两大源自麦克斯韦(Maxwell)方程的方法——电路理论和光学之间。更确切地说，这三种方法论的区别主要不在于频率，而是在于波长，或者说与波长和电路及电磁场分布物体尺寸的比例有关。

因为低频电磁波的波长比电路的尺寸大很多，电磁场从电路的一点传到另一点的时间只是其周期的很小一部分，所以一般采用集总电路理论，这是麦克斯韦方程的一种简化。相反，即当物体和电路元件远大于波长时，可以采用光学规律，这也是麦克斯韦方程的一种简化。波长和电路有近似尺寸(通常认为是电路尺寸的1/10~10倍)的微波符合这些条件。因此，这两种近似必满足其一，麦克斯韦方程必须有解。

频率	应用	频带	波长
1 PHz	牙科治疗 光纤	紫外线	10^{-8}
			10^{-7}
	夜视	红外线	10^{-6}
			10^{-5}
1 THz	生物影像	太赫兹	10^{-4}
			10^{-3}
	雷达(1~100 GHz)	微波	10^{-2}
			10^{-1}
1 GHz	移动电话 (900 MHz~2.4 GHz)	RF	10^0
			10^1
	电视广播 (54~700 MHz)	VHF	10^2
			10^3
1 MHz	调频广播 (88~108 MHz)	HF	10^4
			10^5
	调幅广播 (600 kHz~1.6 MHz)	MF	10^6
			10^7
1 kHz	基带声音设备 (20 Hz~15 kHz)	ULF	10^8
			10^9
	电力分配(50 Hz)	SLF	10^{10}
			10^{11}

图 1.1 电磁频谱

① 雷达的发展比原子弹花费了更多的资金。

当波长与承载电磁场的物体尺寸可比拟时,一些特殊或者常见的违反直觉的效应就会出现。这就造成了这个学科的一些特殊问题:一些在低频电路中很常见的电路元件,像电阻、电容等,在高频电路中不仅会被完全假设为非常规的形状,而且它们实际上是一些只储存电能或者只储存磁能的特殊空间区域。因为这些特殊性,一些对电磁现象的直觉可能会误导人们。因此,在操作微波频率设备、电路和系统时,经常有一些特别的注意事项和特殊的专业技术。一种特殊的现象是波的衍射。就像前面曾经说过的,这种现象与波长 λ 和障碍尺寸 d 的比例严格相关。下面的例子将说明这一点。

虽然波长为厘米量级的声波信号可以很容易传给坐在2、3米高的墙后的听者,但是波长为几分之一微米(μm)的光信号则不可能做到这一点。当两个人坐在墙的两边时可以互相听到对面的声音,是因为声波绕过了墙的边缘;他们看不到对方,是因为光波不能绕过墙体。波通过宽度为 d 的孔隙在墙上散射于 $d \ll \lambda$ 或者 $d \gg \lambda$ 条件下的结果如图1.2所示。就像我们看到的,在前一种情况下,波就像声波绕过墙一样绕过了孔隙边缘,沿各个方向传播。相反,在后一种情况下,波沿直线传播,仅能达到入射波方向的点。

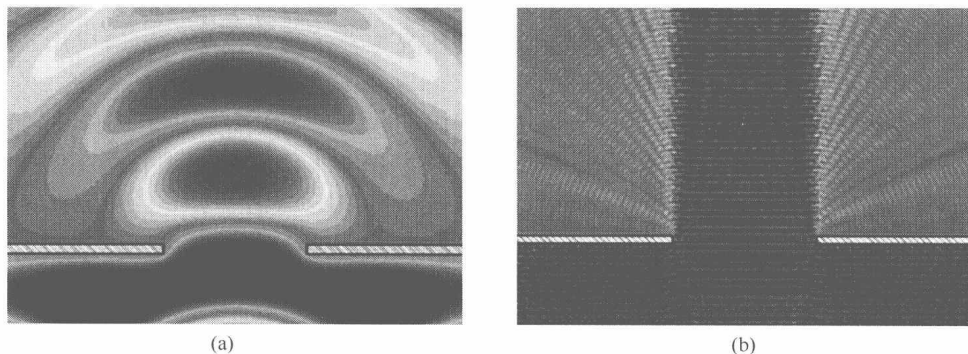


图1.2 电磁波的小孔衍射:(a) $d \ll \lambda$; (b) $d \gg \lambda$

另一种难以通过直觉预测的现象是损耗波造成的,即波在无损耗的介质中也会衰减^①。实际上这些波会在远距离的物体和电路元件之间发生相互作用,产生能量交换。这种现象在机械实验中是完全不可能发生的。其中一种效应是光隧道效应,它是一种在不传播、只损耗电磁波的空间区域内进行的功率传送^②。在损耗区域内,电磁波之间的相互作用也会导致电路元件在相对接近的情况下做出不同的反应,所以分立元件电路模型不能使用。

微波电路的分布特性决定了其他的一些现象,这些现象在所有电路元件都可以看成是集成元件的低频电路中是不可能发生的。一个微波滤波器永远不会像理想滤波器那样工作,理想滤波器一般只有一个通带和一个阻带,但是微波滤波器事实上包含无数的寄生通带。微波放大器不仅仅是一个有增益的方块(可能还有一个噪声系数),它还有频率相关增益、失配、信号失真、加性噪声,更糟的情况下还有自激振荡。

在微波电路的设计中,当我们面临一个理论的切实实施时,如果盲目相信已设计好的工具,有可能会发生意外。我们必须牢记,仿真器虽然是电路分析和设计中不可或缺的工具,但它是基于模型的,因此只要这些模型能精确代表相关结构或者电路元件,仿真器就能精确反映出电路性能。同样,测量工具显示的测量值不是真正的测量值,而是精确度或高或低的另一个相关物理量。

① 见2.10.1节中介绍的全反射的例子。

② 光隧道效应最近被提出用做一种为电池提供轻便的再充电设备的可能方式。

尽管有这些不同,又或者恰恰是因为这些不同,微波才成为这样一门既刺激又迷人的技术和学科。本书试图通过我们会用的简单方法来描述这门学科,以此来减小理论上的难度,但是必须强调,在处理从没遇见过的微波问题时,会遇到很多其他问题,即使你已经进行了多年的微波学习和专业训练也不能避免。

1.2 频率带宽

尽管微波一词应该指一种方法而不是一段频率范围的电磁波,但是很明显,在实践中还是需要一种常见的频带细分。但有一些混淆是不能消除的,因为大家有不同的使用习惯。

表 1.1 依据 CCIR(Consultative Committee on International Radio, 国际无线电咨询委员会)列出了在 30 Hz ~ 300 GHz 区间内的频率表。这个微波频率区间包括频带 9(**UHF**)、10(**SHF**)和 11(**EHF**)。

最常见的微波频段设计如表 1.2 所示,它用一个字母定义不同的频带范围。这种频率分配法要追溯到第二次世界大战时期,当时随机选取字母来混淆敌人,但是现在仍然存在一些混淆^[2](例如,在一些书中, Q 频段用来表示 33 ~ 50 GHz 的频段)。

表 1.1 射频频段的名称

频 带 类 别	频率范围	波 长
1	ELF < 30 Hz	> 10 000 km
2	SLF 30 ~ 300 Hz	10 000 ~ 1000 km
3	ULF 300 Hz ~ 3 kHz	1000 ~ 100 km
4	VLF 3 ~ 30 kHz	100 ~ 10 km
5	LF 30 ~ 300 kHz	10 ~ 1 km
6	MF 300 kHz ~ 3 MHz	1 km ~ 100 m
7	HF 3 ~ 30 MHz	100 ~ 10 m
8	VHF 30 ~ 300 MHz	10 ~ 1 m
9	UHF 300 MHz ~ 3 GHz	1 m ~ 10 cm
10	SHF 3 ~ 30 GHz	10 ~ 1 cm
11	EHF 30 ~ 300 GHz	10 ~ 1 mm
12	LHF > 300 GHz	< 1 mm

表 1.2 微波频段的 IEEE 名称

类 别	频率范围 (GHz)
UHF	0.3 ~ 1
L	1 ~ 2
S	2 ~ 4
C	4 ~ 8
X	8 ~ 12
Ku	12 ~ 18
K	18 ~ 27
Ka	27 ~ 40
V	40 ~ 75
W	75 ~ 110
毫米波	30 ~ 300
亚毫米波	300 ~ 3000

从实践的角度来看,频带的选择基于特殊应用和电磁波在大气中的传播特性。电路尺寸和波长之间的比例 d/λ 是决定天线在空间中的辐射电磁场能力的最重要条件。正是这个原因,电路尺寸和波长应该是同一个数量级的,所以频率越高,天线的尺寸应该越小。类似地,数据的传输速率也有赖于传输载波的频率。应用高频载波可以提高信道容量,从而提高信息传输速率。但是,大气中的传播会产生衰减。衰减不仅与自由空间中传播的距离有关,也与介质的物理、化学特性有关,正如图 1.3 所示的在海平面和海拔 4000 m 的地方测得的大气衰减。

就像图中所看到的,超过 10 GHz 以后,衰减非单调急速增加,根据吸水量在 22 GHz 处达到峰值,根据吸氧量在 63 GHz 处达到峰值,衰减最小值分别在 24 GHz 处和 94 GHz 处。

一般来说,就像上面分析的,使用高频载波有很多好处,像减小组件(天线,连线,电路元件)尺寸,扩展频带宽度,提高信号处理速度和数据传输速率,提高雷达分辨率和天线指向性,从而降低干扰。但同时,高频载波的使用也存在一些实际问题,像更高的大气衰减(尽管不一定),更严格的制造公差(因为尺寸缩小),更高的制造成本,固态设备中更高的电路损耗和更大的有效功率缩减,还有不成熟的高频半导体加工工艺。

鉴于高频载波的这些优缺点,大多民用射频系统(像电视、蜂窝式数据通信系统、GPS、微波炉)都使用 500 MHz ~ 5 GHz 频率的电磁波作为载波,也就是波长 6 ~ 60 cm 的波。就像参考文献[2]中指出的,这一方面与天线尺寸有关,需要天线的尺寸足够小,另一方面与信号随频率上升在大气

中的衰减有关。后者需要更高的发射功率,同时,对人类也存在一个潜在风险。例如,如果根据实际需要,选择了一个 10 cm 的天线, $d/\lambda > 0.1$ 的情况就意味着频率不能低于 300 MHz。

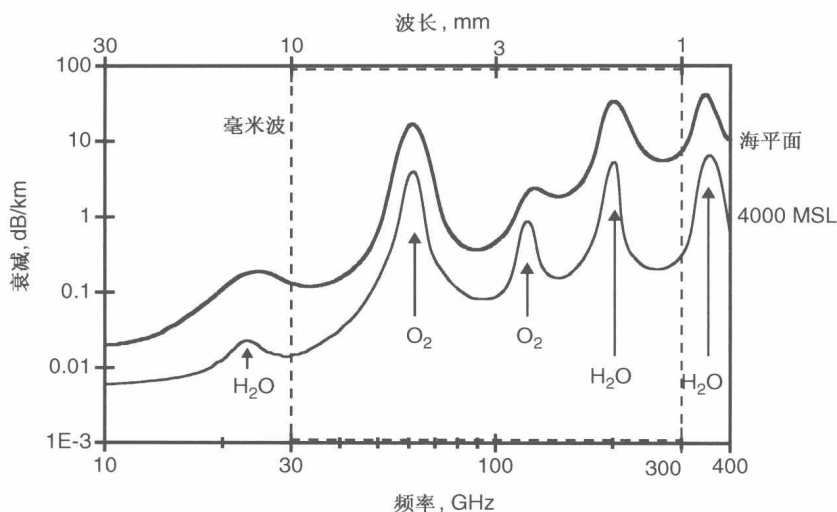


图 1.3 大气衰减

1.3 应用

最初被确定为军用(雷达)的射频和微波技术,目前在一些民用领域得到了发展,特别是蜂窝电话系统和所谓的个人通信系统(PCS)。通信系统依然保留在最重要的应用领域,除了蜂窝电话系统和卫星通信,还包括无线电和电视广播、无线本地区域网络(WLAN)和一点对多点的广播系统,即 LMDS(本地多点分配系统)和 MMDS(多点多通道分配系统)。

射频和微波技术也包括几个应用:

- 航海和定位系统,例如 GPS 定位系统,基于 24 轨道人造卫星,能为使用者提供地理坐标和海拔高度,还有相应的欧洲系统伽利略(Galileo)和飞行器着陆系统。
- 用于测量和描述物理量及工业材料性质等特征的电磁传感器。
- 天气预报和远程环境参数(例如温度、风速、湿度)感应及自然资源检测。
- 自动道路交通协助与控制。
- 民用、军用监督系统。
- 用于医学检查、诊疗和治疗的医疗保健与药品,像用于癌症治疗的微波热疗技术。
- 射电天文学和太空探索。
- 民用和军用的微波成像技术。
- 射频辨识系统(RFID)快速代替条形码,利用射频信号辨别和跟踪产品、动物或者人。
- 食品加工,原材料和商品(例如昆虫)工业处理(烘干、腌制、加热等)。

我们不应该忽视科学研究,因为科学研究是各种有发展前景的领域未来发展的基础,这些方向终将促进人类的进步。读者可以查阅 EURAMIG(欧洲微波通信协会)网站(<http://www.euramig.org/>),这是一个为促进微波和射频发展而首创的非盈利欧洲组织。

我们没有必要担心生活中无处不在的电磁波技术会造成人类和其他有机体的生物安全性问题。一份在广大地区所做的关于电磁场(不仅在射频频谱范围内)与生物体的互相作用的调查已