



信息通信专业教材系列

微波技术

W E I B O J I S H U

栾秀珍 房少军 金 红 邵佑诚 编著



北京邮电大学出版社
www.buptpress.com

信息通信专业教材系列

微波技术

栾秀珍 房少军 编著
金红 邵佑诚

北京邮电大学出版社
• 北京 •

内 容 简 介

本书系统地论述了微波技术的主要内容,包括微波传输线、微波谐振腔、微波定向耦合器和微波滤波器等,微波无源器件和微波混频器等有源器件以及各向异性的微波铁氧体器件。本书对微波电路的计算机辅助设计、微波集成电路以及微波测量技术也做了简单介绍。

本书内容丰富,表述去繁就简,深入浅出,适合作为电子信息、通信专业等电子工程类专业学生的教材或参考书,也可供从事微波技术、射频无线电技术工作的科技人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

微波技术/栾秀珍等编著. —北京:北京邮电大学出版社,2009

ISBN 978-7-5635-1603-2

I. 微… II. 栾… III. 微波技术—高等学校—教材 IV. TN015

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 046110 号

书 名:微波技术

作 者:栾秀珍 房少军 金 红 郇佑诚

责任编辑:满志文

出版发行:北京邮电大学出版社

社 址:北京市海淀区西土城路 10 号(邮编:100876)

发 行 部:电话:010-62282185 传真:010-62283578

E-mail: publish@bupt.edu.cn

经 销:各地新华书店

印 刷:北京忠信诚胶印厂

开 本:787 mm×960 mm 1/16

印 张:20

字 数:411 千字

印 数:1—3 000 册

版 次:2009 年 6 月第 1 版 2009 年 6 月第 1 次印刷

ISBN 978-7-5635-1603-2

定 价:34.00 元

· 如有印装质量问题,请与北京邮电大学出版社发行部联系 ·

前 言

随着现代电子信息与通信技术的迅速发展,微波技术已经广泛应用于各个领域。在卫星通信、雷达系统、全球定位系统、射频识别和微波遥感等诸多领域都有微波技术的重要应用。本书系作者在原编写的、由大连海事大学出版社出版的《微波工程基础》的基础上,根据电子信息、通信等电子类专业的特点、要求,结合当前微波理论和器件的应用、发展状况改编而成的。全书共分13章,第1、2章讨论了微波传输线的基本理论和各种形式的微波传输线;第3、4章介绍了基本微波元件和微波谐振腔的构成原理和方法;第5章讲述了微波网络参量的定义和计算方法;第6、7章介绍了微波定向耦合器和微波滤波器的构成原理和方法;第8章讲述了非互易的微波铁氧体器件;第9、10章讨论了微波混频器和微波固态源的工作原理和基本电路;第11、12章简单介绍了微波电路的计算机辅助设计方法和微波集成电路的基本概念;第13章介绍了微波测量的基本原理和基本方法。

本书的特点是对书中出现的专业技术词汇进行了英文标注。目前,大多数高校通过开设专业英语课来为学生查阅英文资料打基础。但这样做并不能覆盖所有专业课的所有知识点。实际上,查阅英文资料的最大障碍是缺乏专业词汇。为此,本书对各章节出现的专业词汇进行了英文标注。这样可使学生加强记忆和理解,且费时少,具有事半功倍的效果。本书内容丰富、概念清晰、重点突出、语言精炼,且各章之后附有习题,易于理解和

掌握。在本书的编写过程中,借鉴了国内外较新文献的内容,也结合了我校这门课程长期教学实践的经验,希望能为广大读者提供一本内容丰富、易于掌握的微波技术教材。

本书由栾秀珍主编,房少军、金红、邵佑诚副主编,由王百锁主审。在本书的编写过程中,得到了大连海事大学王百锁教授的大力支持和帮助,谭克俊、陈鹏也对本书的编写做出了多方面的工作,在此表示衷心的感谢。由于作者学识有限,书中难免有一些不足之处,殷切地欢迎读者批评、指正。

作 者

目 录

绪 论

0.1 微波的基本概念	1
0.2 微波的特点	3
0.3 微波技术的发展与应用	4
0.3.1 微波技术的发展	4
0.3.2 微波技术的应用	4

第 1 章 微波传输线理论

1.1 传输线的基本概念	8
1.1.1 微波传输线的分类	8
1.1.2 微波传输线的分析方法	9
1.2 长线理论	9
1.2.1 基本概念	10
1.2.2 传输线方程及其解	12
1.3 传输线的特性参数和状态参量	16
1.3.1 传输特性参数	16
1.3.2 状态参量	18
1.4 无耗传输线的工作状态	22
1.4.1 匹配状态	22
1.4.2 全反射状态	23
1.4.3 部分反射状态	31
1.5 圆图	34
1.5.1 阻抗圆图	34
1.5.2 导纳圆图	39
1.5.3 圆图的应用举例	40
1.6 阻抗匹配	42
1.6.1 阻抗匹配的概念	42

1.6.2 负载阻抗匹配的方法	44
1.6.3 单支节调配器	47
习题	54

第2章 各种形式的微波传输线

2.1 概论	57
2.2 平行双线	58
2.3 同轴线	61
2.3.1 同轴线中的 TEM 模	61
2.3.2 同轴线中的高次模	62
2.3.3 功率容量与损耗	62
2.3.4 同轴线尺寸的选择	63
2.4 矩形波导	64
2.4.1 矩形波导的结构与场分布	64
2.4.2 矩形波导的基本特性参数	65
2.5 圆形波导	69
2.5.1 圆形波导的传输特性	69
2.5.2 圆形波导中的三个主要模式及其应用	71
2.6 介质波导	74
2.7 微带线	75
2.7.1 微带线的结构	75
2.7.2 微带线中的工作模式	76
2.7.3 微带线的特性阻抗	76
2.8 平行耦合微带线	79
2.8.1 概述	79
2.8.2 奇偶模参量法	80
2.8.3 用奇偶模参量法求平行耦合微带线的特性参量	81
2.9 槽线 共面波导 鳍线 基片集成波导	83
2.9.1 槽线	83
2.9.2 共面波导	83
2.9.3 鳍线	84
2.9.4 基片集成波导	85
2.10 微波传输线中波的激励与模式转换	86
2.10.1 激励器	86

2.10.2 模式转换器	87
习题	88
第3章 基本微波元件	
3.1 概论	90
3.2 微波电阻性元件	90
3.2.1 吸收式衰减器	91
3.2.2 极化衰减器	91
3.2.3 截止式衰减器	92
3.2.4 匹配负载	94
3.3 微波电抗性元件	94
3.3.1 波导元件的实现方法	94
3.3.2 微带元件的实现方法	98
3.4 微波移相器	103
3.5 极化变换器	105
3.6 抗流式连接元件	106
习题	108
第4章 微波谐振腔	
4.1 概论	109
4.2 谐振腔的基本参量	110
4.3 矩形谐振腔	113
4.4 圆柱形谐振腔	114
4.5 同轴腔和微带线谐振腔	117
4.5.1 同轴线谐振腔	117
4.5.2 微带谐振器	119
4.6 谐振腔的调谐、激励与耦合	121
4.6.1 谐振腔的调谐	121
4.6.2 谐振腔的激励与耦合	122
4.7 谐振腔的等效电路和它与外电路的连接	125
4.8 微波谐振腔的应用	127
4.8.1 微波炉	127
4.8.2 波长计	128
习题	129

第5章 微波网络基础

5.1 概论	131
5.2 微波传输线和平行双线传输线的等效	133
5.3 微波网络参量	134
5.3.1 网络参考面	135
5.3.2 微波网络参量的定义	136
5.3.3 网络参量间的相互关系	142
5.3.4 网络参量的性质	144
5.3.5 常用基本电路单元的网络参量	145
5.3.6 参考面移动时网络参量的变化	147
5.4 二端口网络的组合	148
5.5 微波网络的工作特性参量	150
习题	152

第6章 定向耦合器

6.1 概论	155
6.2 微带定向耦合器	157
6.2.1 微带双分支定向耦合器	157
6.2.2 微带混合环	163
6.2.3 微带平行耦合线定向耦合器	165
6.3 矩形波导定向耦合器	169
6.3.1 矩形波导单孔定向耦合器	169
6.3.2 矩形波导多孔定向耦合器	170
6.3.3 矩形波导十字孔定向耦合器	171
6.3.4 矩形波导匹配双T	174
6.3.5 波导裂缝电桥	178
6.4 微带功分器	183
6.4.1 无耗互易三端口网络的性质	184
6.4.2 微带三端口功率分配器	184
习题	188

第7章 微波滤波器

7.1 滤波器的基本知识	190
7.2 低通原型滤波器	193

7.2.1 基本概念	193
7.2.2 最平坦式低通原型滤波器的综合设计	194
7.2.3 契比雪夫式低通原型滤波器的综合设计	196
7.3 频率变换	200
7.3.1 低通滤波器与低通原型的频率变换	200
7.3.2 高通滤波器与低通原型的频率变换	202
7.3.3 带通滤波器与低通原型的频率变换	203
7.3.4 带阻滤波器与低通原型的频率变换	205
7.4 变形低通原型	206
7.4.1 倒置变换器	206
7.4.2 变形低通原型	209
7.4.3 含阻抗倒置变换器的集中参数带通滤波器	211
7.4.4 含导纳倒置变换器的集中参数带通滤波器	212
7.5 滤波器电路的微波实现	213
7.5.1 微波低通滤波器的微波实现	213
7.5.2 微波带通滤波器的微波实现	216
习题	221
第 8 章 微波铁氧体器件	
8.1 概论	223
8.2 铁氧体中的张量磁导率	224
8.3 场移式铁氧体隔离器	226
8.4 铁氧体环行器	228
8.4.1 相移式铁氧体环行器	228
8.4.2 环形器的应用	230
习题	231
第 9 章 微波混频器	
9.1 概论	233
9.2 微波混频二极管	234
9.2.1 金属-半导体结二极管的结构	234
9.2.2 金属-半导体结二极管的特性	235
9.3 微波混频器的理论分析	236
9.3.1 混频原理	236
9.3.2 混频器的传输特性	240

9.3.3 混频器的噪声系数	243
9.4 微波混频器的基本电路	246
9.4.1 单端混频器	246
9.4.2 平衡混频器	247
9.5 镜像回收与镜像抑制	251
习题	252

第 10 章 微波固态源

10.1 概论	253
10.2 体效应二极管	253
10.2.1 砷化镓的能带结构及其负阻特性	254
10.2.2 微波振荡产生的过程	255
10.2.3 体效应二极管的等效电路	256
10.3 雪崩二极管	256
10.3.1 崩越模雪崩二极管的工作原理和负阻特性	257
10.3.2 IMPATT 二极管的等效电路	258
10.4 微波二极管负阻振荡器电路及其频率调谐	259
10.5 微波二极管负阻振荡器的频率稳定度	262
10.5.1 高 Q 腔稳频振荡器电路	263
10.5.2 注入锁相稳频原理	265
习题	266

第 11 章 微波电路的计算机辅助设计简介

11.1 概论	267
11.2 微波电路的最优化设计	268
11.2.1 引言	268
11.2.2 最优化设计的基本原理	268
11.2.3 目标函数	270
习题	274

第 12 章 微波集成电路和单片微波集成电路

12.1 微波集成电路	275
12.1.1 概论	275
12.1.2 微波集成电路优化设计	276
12.2 单片微波集成电路	277

12.2.1 概论	277
12.2.2 单片微波集成电路的材料和元件	278
12.2.3 MMIC 的设计	279
12.2.4 MMIC 的实际应用举例及应用前景	281
习题	283
第 13 章 微波测量	
13.1 微波功率与频率的测量	284
13.1.1 微波功率的测量	284
13.1.2 微波频率的测量	286
13.2 驻波比的测量	287
13.2.1 概论	287
13.2.2 实验仪器描述	288
13.2.3 测量方法	289
13.3 晶体检波器的校准及阻抗测量	291
13.3.1 晶体检波器的校正	291
13.3.2 驻波法测阻抗的基本原理	292
13.3.3 测量方法	293
13.3.4 实验仪器描述	294
13.3.5 实验步骤	294
13.4 衰减测量	295
13.4.1 替代法	295
13.4.2 散射参量法	297
13.5 定向耦合器特性的测量	299
13.5.1 技术指标	300
13.5.2 测试方法	301
13.5.3 实验步骤	302
13.6 微波滤波器的调试与测量	303
13.6.1 测量原理	303
13.6.2 测量方法	304
13.6.3 实验步骤	305
参考文献	306

绪 论

微波技术是近代科学研究的重大成就之一。几十年来,它已发展成为一门比较成熟的学科,在通信、雷达、导航、电子对抗等许多领域得到了广泛的应用。在绪论中将介绍微波的基本概念、特点及应用。

0.1 微波的基本概念

微波 (Microwave) 是波长微小的电磁波,其波长范围从 0.1 mm 到 1 m,频率范围从 300 MHz 到 3 000 GHz。图 0.1.1 给出了微波在整个电磁波谱中的位置。由图可见,微波可以细分为分米波、厘米波、毫米波和亚毫米波 4 个波段。在通信和雷达工程中,根据微波器件特性随频率的变化规律,将微波分为多个波段,并用英文字母表示各分波段,如表 0.1.1 所示。

表 0.1.1 常用微波分波段代号

波段代号	频率范围/GHz	波长范围/cm	标称波长/cm	波段代号	频率范围/GHz	波长范围/cm	标称波长/cm
L	1~2	30~15	22	K	18~27	1.67~1.11	1.25
S	2~4	15~7.5	10	Ka	27~40	1.11~0.75	0.8
C	4~8	7.5~3.75	5	U	40~60	0.75~0.5	0.6
X	8~12	3.75~2.5	3	V	60~80	0.5~0.375	0.4
Ku	12~18	2.5~1.67	2	W	80~100	0.375~0.3	0.3

从图 0.1.1 可知,微波的低频端与普通无线电波的“超短波”波段相连接,而其高频端与红外线的“远红外”波段毗邻。与其他波段的无线电波相比,微波的波长要短得多,频率也高得多。这种数量的变化引起了电磁波性质的变化,使得微波具有一系列不同于其他波段无线电波的特点;同时,微波的波长又比可见光的波长长得多,与光波也不同,所以通常将其划分出来进行专门研究,这就是微波技术。

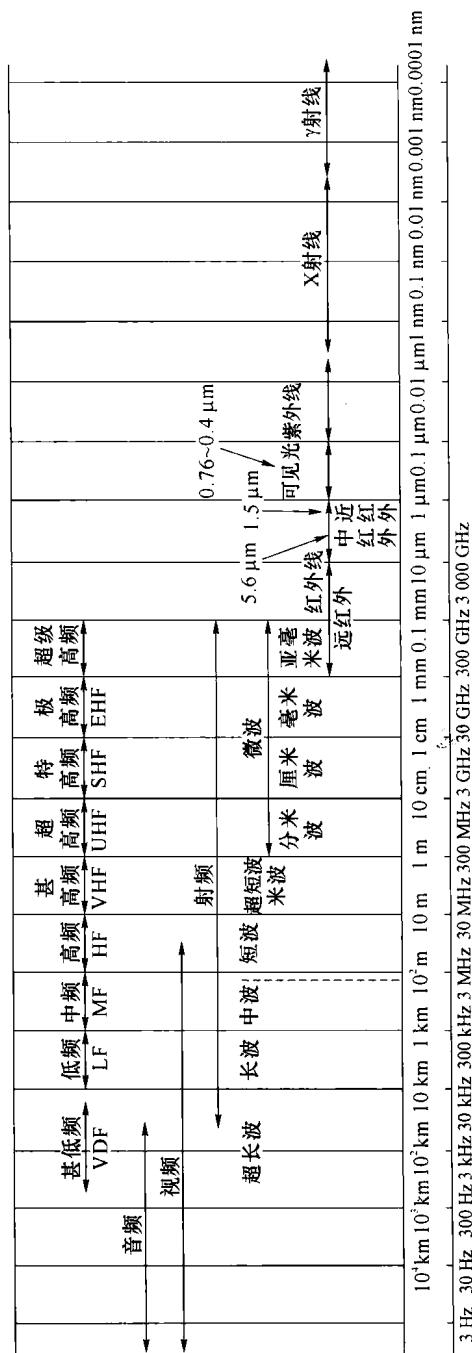


图 0.1.1 电磁波频谱

0.2 微波的特点

与其他波段的无线电波相比,微波具有以下主要特点。

1. 似光性和似声性

微波波段的波长与无线电设备的线长度及地球上的一般物体的尺寸相当或小得多,其传播特性与光相似:沿直线传播,遇到障碍物时会产生反射。利用这一特点,可以制造出高方向性的微波天线,从而为微波中继通信、卫星通信及雷达等提供了必要条件。

微波的波长与无线电设备尺寸相当的特点,使得微波又表现出与声波相似的特征,即具有似声性。例如,微波波导类似于声学中的传声筒;喇叭天线和缝隙天线类似于声学喇叭、箫和笛;微波谐振腔类似于声学共鸣箱等。

2. 高频性

微波的频率很高,这使之在应用上能适合于宽频带技术的要求。因为无线电设备相对带宽的增大受到技术的限制,而载波频率的提高就可以在相同相对带宽情况下使设备的绝对带宽增加,从而在微波设备上可以容易地实现大信息容量宽带信号(如多路的电话和电视信号)的传送和辐射。

另一方面,由于微波的频率很高、波长很短,使得在低频电路中被忽略了一些现象和效应(例如趋肤效应、辐射效应、分布参数效应)在微波波段则不可忽略。这样,在低频电路中常用的集总参数元件(电阻、电感、电容)、普通双导线传输线和 LC 谐振回路等都不能适用于微波,电压、电流在微波波段甚至失去了唯一性意义。在微波波段取而代之的是分布参数电路元件、微波传输线和谐振腔等微波元器件。因此,不论在结构型式和工作原理上,微波分布参数电路与低频集中参数电路都将有很大的区别。

3. 穿透性

微波照射于介质物体时,能深入该物质内部的特点称为穿透性。例如微波能穿透电离层,因而成为卫星通信、全球卫星导航及人类探测外层空间的“宇宙窗口”;微波能穿透云雾、雨、植被、积雪和地表层,具有全天候和全天时工作的能力,成为遥感技术的重要波段;微波能穿透生物体,成为医学透热疗法的重要手段;毫米波还能穿透等离子体,是远程导弹和航天器重返大气层时实现通信和终端制导的重要手段。

4. 研究方法和测量方法的独特性

微波技术的研究方法不同于低频无线电。低频无线电电路中的电压、电流仅是时间的函数而与空间位置无关,因此可以通过克希荷夫定律描述的电路理论来研究。而在微波波段,电场矢量和磁场矢量不仅是时间的函数而且还是空间位置的函数,因此必须通过麦克斯韦方程所描述的电磁场理论来研究。

微波测量也不同于低频无线电测量。低频无线电测量的基本参量是电压、电流、频

率以及电路元件参数(如电阻、电容和电感等)。而微波测量的基本参量是功率、阻抗、波长以及电路的衰减和相移。这是因为在微波波段一些低频参量已经没有物理意义了。

5. 抗低频干扰特性

地球周围充斥着各种各样的噪声和干扰,主要归纳为由宇宙和大气在传输信道上产生的自然噪声以及由各种电气设备工作时产生的人为噪声。由于这些噪声一般在中低频区域,与微波波段的频率差别较大,在微波滤波器的阻隔下,基本不会影响微波通信的正常进行,因此微波具有抗低频干扰特性。

综上所述,正是由于微波具有许多独特的性质,才为它的迅速发展和广泛应用提供了动力和开辟了前景。

0.3 微波技术的发展与应用

0.3.1 微波技术的发展

微波技术的发展和它的实际应用是相互促进的。微波的发展已有 60 多年的历史,第二次世界大战期间雷达的研制推动了微波技术的飞速发展。在 20 世纪 60 年代以后,微波通信、卫星通信兴起,更促使微波技术加速发展;到了 70 年代,微波技术的应用扩大到遥感、医疗、无损检测和能源等各个领域。微波技术在不断满足上述应用中,得到了发展和完善。目前,就其发展方向来看,大致有如下几个特点:

(1) 工作频段不断向高频段扩展。微波波段经历了从分米波、厘米波到毫米波的发展阶段,目前正向毫米波和亚毫米波波段发展。

(2) 微波元器件及整机设备不断向小型化、宽频带发展。随着电子技术的发展,微波元器件也经历了从电真空器件向半导体微波器件、从分离元件到集成电路的发展过程。而整机设备也不断向体积小、重量轻、频带宽、可靠性高的方向发展。

(3) 微波系统不断向自动化、智能化和多功能化方向发展。随着科学技术,特别是计算机技术的普及,各门学科间的相互渗透,促使微波设备、系统和测试仪表也逐步实现了自动化、智能化和多功能一体化。

0.3.2 微波技术的应用

由于微波有众多特点,因此得到了广泛的应用。它的应用已经遍及尖端科技、军事国防、工农业生产和科学研究等各个部门,甚至深入到医疗卫生和人们的日常生活中,而且新的应用领域还在不断地扩大。微波的应用主要在于作为信息载体的应用和微波能的应用两个方面,下面主要介绍微波在这两个方面的应用。

1. 雷达

雷达是微波技术发展的策源地。它是利用电磁波遇物体会发生反射回波,并根据所

接收的回波来获取被测物体的有关信息,从而实现对被测物体的测距、测向、测速以及目标识别与重建等。

雷达作为一种测量设备具有许多独特的特点,如测量距离远、全天候、实时性、穿透性等,这是其他测量方法所不及的。因此,雷达技术除了大量应用于军事上以外,还越来越广泛地应用于民用上,如民用航空(航空管制及飞机导航)、航海、气象、天文、遥感、城市交通等方面。现代雷达大多数都工作在微波波段。

2. 通信

由于微波具有频率高、频带宽、信息量大的特点,因此被广泛地应用于各种通信业务中。现代的通信系统主要有微波中继通信、卫星通信、移动通信和光纤通信四种。除了光纤通信,其他三种均属于微波的范畴。

(1) 微波中继通信

由于微波具有直线传播特性,而地球是一个球体,地球的曲率半径使微波在地面上只能传播数十公里的距离,因此,为了增大通信距离而采用在中间设立若干中继站的办法,如图 0.3.1 所示。其中,微波接收天线接收前一站发射来的信号并作放大、均衡等处理,再由其发射天线定向发射到下一个中继站,这样一站一站地把信号传下去,如此实现远距离通信。微波中继通信具有传输容量大、长途传输质量稳定、投资少、建设周期短、维护方便和抗重大自然灾害能力强等特点。因此,即使在光纤通信非常发达的今天,微波中继通信仍有着不可替代的存在价值。它主要应用于电话、电视和数据等远距离的传递。微波中继通信大多工作于 $1\sim 20\text{ GHz}$ 频段之间。

(2) 卫星通信

利用微波能穿透电离层的特性,可进行卫星通信和宇航通信。其实,卫星通信就是把微波中继站放到外层空间的卫星上的微波中继通信。如果把互成 120° 角的三颗卫星放置于地球的同步轨道上,如图 0.3.2 所示,就可以实现全球的通信和电视实况转播了。

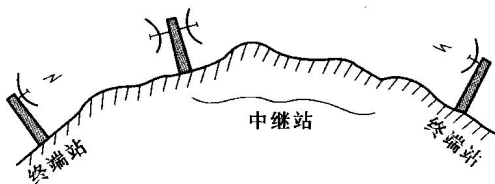


图 0.3.1 微波中继通信示意图

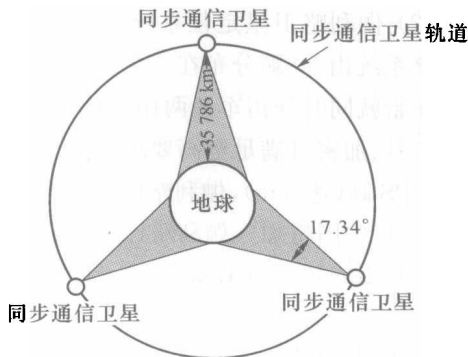


图 0.3.2 同步卫星实现全球通信与广播