



微波技术与天线

第2版

丁荣林 李媛 编著

*M*icrowave Technology
and Antenna

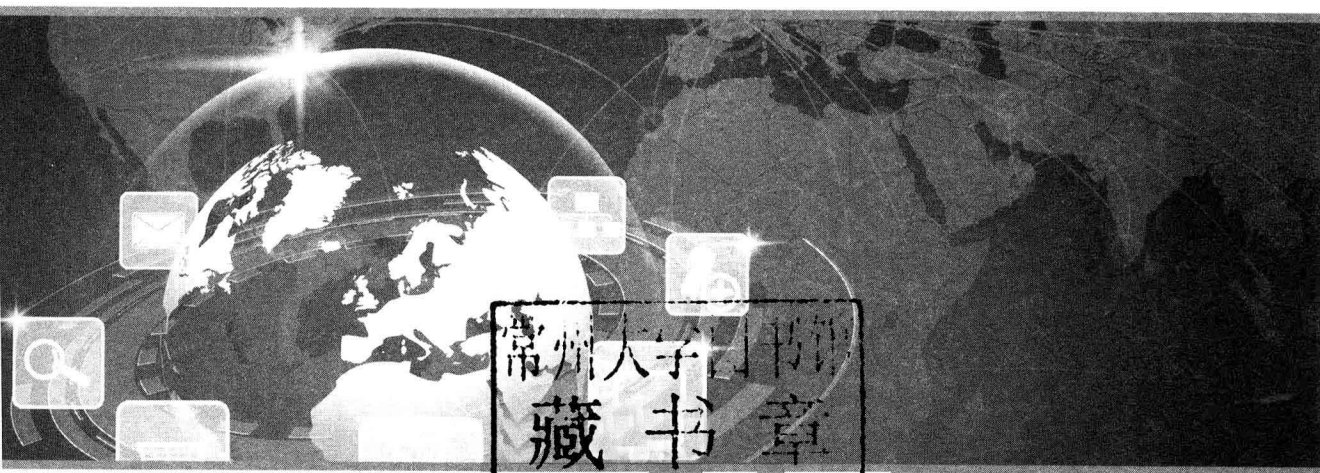


机械工业出版社
China Machine Press

高等院校电子信息与电气学科系列规划

微波技术与天线

第2版



丁荣林 李媛 编著



机械工业出版社
China Machine Press

图书在版编目 (CIP) 数据

微波技术与天线 / 丁荣林, 李媛编著. —2 版. —北京: 机械工业出版社, 2013. 7
(高等院校电子信息与电气学科系列规划教材)

ISBN 978-7-111-43001-8

I. 微… II. ①丁… ②李… III. ①微波技术—高等学校—教材 ②微波天线—高等学校—教材 IV. ①TN015
②TN822

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2013) 第 136113 号

版权所有·侵权必究

封底无防伪标均为盗版

本书法律顾问 北京市展达律师事务所

本书内容分为两大部分: 第一部分为微波技术, 主要讲述微波的基础知识、基本理论以及在各个方面的应用, 涉及书中第 1 章至第 6 章的内容, 分别为绪论、传输线理论、微波传输系统、微波网络、无源微波元件以及有源微波器件; 第二部分为天线, 包括第 7 章至第 10 章的内容, 分别为天线基本理论、通信中的常用天线、现代微波工程天线以及微波测量。

本书可作为电子类专业 (通信工程专业、电子信息专业与电子元器件专业) 本科生的教材, 对内容作适当的调整可作为电子类大專生的教材, 亦可作为从事微波方面的工程技术人员参考书。

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

三河市杨庄长鸣印刷装订厂印刷

2013 年 8 月第 2 版第 1 次印刷

185mm × 260mm · 22.25 印张

标准书号: ISBN 978-7-111-43001-8

定 价: 45.00 元

凡购本书, 如有缺页、倒页、脱页, 由本社发行部调换

客服热线: (010) 88378991 88361066

投稿热线: (010) 88379604

购书热线: (010) 68326294 88379649 68995259

读者信箱: hzjsj@hzbook.com

FOREWORD

第2版前言

第2版在第1版的基础上增加了有关微波测量和工程实用天线及一些新型天线的内容, 这些内容可看作第1版的应用和拓展, 旨在反映当代微波及天线的发展, 扩展学生的视野, 为他们尽快地胜任该领域工作打下坚实基础。

李媛编写了天线部分新增内容, 分别安排在第8章和第9章后面; 丁荣林编写了微波测量部分新增内容(作为第10章), 并统稿全书。

另外, 本版对第1版的勘误进行了更正。尽管如此, 书中难免仍有不足之处, 希望广大读者批评指正。

编者

2013年6月

第1版前言

FOREWORD

《微波技术与天线》一书是针对电子类专业(非微波专业)的学生而编写的,旨在使学生对微波和天线领域有较深入的了解,并掌握相关理论和知识,为今后从事该领域的工作打下扎实的基础。

本书是在天津大学电信工程学院多年使用的《微波技术与天线》教材基础上修改而成的。根据21世纪高等院校培养宽口径人才的要求,并考虑到电子类专业特别是通信工程专业与电子信息专业的特点,对课程的内容作了适当的调整,压缩了一些目前用得较少的内容,加入了当代微波技术发展中的新技术、新方法和新器件(例如微波集成电路中常用的平面型传输线及元器件);在有关天线的叙述中重点介绍了现代通信与微波工程中的实用天线,加入了微带天线与智能天线的内容。

本书内容分为两大部分:第一部分为微波技术,主要讲述微波的基础知识、基本理论及在各个方面的应用,涉及书中第1章至第6章的内容,它们分别为绪论、传输线理论、微波传输系统、微波网络、无源微波元件及微波有源器件;第二部分为天线,包括第7章至第9章的内容,分别为天线基本理论、通信中的常用天线及现代微波工程天线。

在编写过程中,力求基本概念讲述清楚,由浅入深,层次分明,突出重点;基本理论推导去繁就简,思路清楚,结论明确,并着眼于应用。本书内容丰富,涵盖面广,选材适中,可作为电子类专业(通信工程专业、电子信息专业与电子元器件专业)本科生的教材,对上课内容作适当的调整可作为电子类大专生的教材,亦可作为从事微波方面的工程技术人员的参考书。

本书共9章,其中李媛编写了第7章至第9章的天线部分;丁荣林编写了第1章至第6章的微波部分,并统编了全书。在编写过程中,得到天津大学电信学院的各届领导和同事们的大力支持和帮助,在此表示衷心的感谢。

由于编者水平有限,书中难免有不足之处,希望广大读者批评指正。

丁荣林

2007年4月

一、教学目的

1. 掌握微波的基本概念、基本特点。了解微波在国民经济和国防现代化建设中的重要作用，使学生认识到学习本课程的重要性，激发学习兴趣。
2. 了解微波技术中常用的两种分析方法，即分析规则波导的“电磁场分析法”和分析微波元器件或微波系统的“化场为路的等效电路分析法”。掌握微波传输线中波型的概念、截止和传输条件。熟悉常用的一些微波传输线中主要工作模式的特性。
3. 了解微波无源和有源器件的结构、性能和应用场合，基本掌握构成微波系统的各部分(如微波的产生、传输、放大、滤波和混频等环节)的工程设计方法。掌握微波部件间的阻抗匹配概念。
4. 了解微波网络各种网络参数的定义及其相互间的转换。
5. 了解天线的基本特性参数，基本掌握通信中常用天线的工程设计方法。
6. 了解天线领域发展动态，熟悉微带天线和智能天线的分析设计过程。

二、教学实施

教学内容	学习要点	课时安排
第1章 绪论	(1)微波的概念 (2)微波的基本特点 (3)微波的应用 (4)本书的结构及学习方法	2
第2章 传输线理论	(1)微波传输线中“分布参数”和“长线”两个基本概念 (2)微波传输线上电压和电流沿线“波动”的现象 (3)传输上电压和电流波的状态参量及其三种工作状态 (4)传输线的阻抗匹配 (5)阻抗圆图及其应用	8
第3章 微波传输系统	(1)规则波导中电磁波传输波型及其传输特性，了解有关波型的截止和传输条件 (2)矩形波导、圆波导、微带线及其他平面型微波传输线中的工作波型、场结构和传输特性 (3)不同微波传输线之间的转换和波导的激励	8
第4章 微波网络	(1)微波网络各种网络参数的定义及其相互间的转换(会通过查表求得) (2)双端口网络转移矩阵的级联特性 (3)常用的五种双端口基本微波电路的网络参量 ※(4)信号流图在微波网络分析中的应用	8

(续)

教学内容	学习要点	课时安排
第5章 无源微波元件	(1)微波立体分立元件的结构、特性及其功能应用 (2)平面型微波元件的结构、特性和应用 ※(3)微波铁氧体隔离器及环行器的工作原理及应用 ※(4)微波滤波器设计要点	10
※第6章 微波有源器件	(1)微波半导体管的工作原理和特性 (2)微波晶体管放大器、振荡器和混频器设计方法和要点 (3)微波集成电路的新工艺、新技术及其应用进展	6
第7章 天线基本理论	(1)电基本振子远区的辐射特性 (2)天线的特性参数 (3)线天线、阵列天线的分析方法,掌握天线阵的方向图乘积定理 (4)直线式天线阵的工作原理和特性	8
第8章 通信中的常用天线	(1)通信中常用天线的结构、工作原理及其应用场合 (2)移动终端天线的构成及分析方法	6
第9章 现代微波工程天线	(1)反射面天线的结构、工作原理和应用场合 (2)微带天线的构成、分析方法和辐射特性 ※(3)智能天线的组成、辐射特性及发展现状 ※(4)微波光子晶体天线结构及应用 ※(5)MIMO 多天线技术设计	6
※第10章 微波测量	(1)自动微波网络分析仪的构成及网络参数的测量 (2)436A 程控功率计的组成和工作原理 (3)自动微波频谱分析仪性能 (4)如何组建噪声测量系统	6
演示实验	网络分析仪测量微波器件(例如微波滤波器)的滤波特性	2
课时总计		70

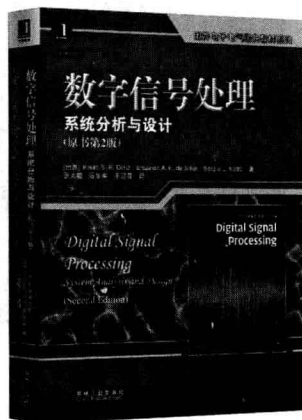
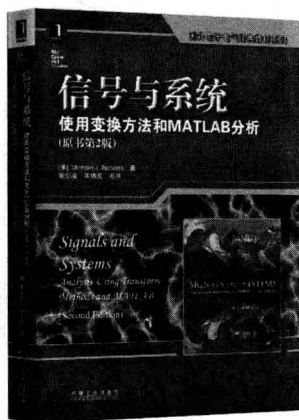
三、教学方法

该书是一门技术基础课,宜以课堂教学为主,并辅以演示实验,以加强学生理论联系实际的能力。有条件的院校,可在学期中后期组织学生参观本地的卫星地面站,巩固学生已学的微波技术与天线的知识。建议增加学生上网查阅微波和天线方面的信息资料(查阅哪方面的内容可由老师给出),并进行课堂讨论;还可以针对学生做作业的情况增加1~2次习题课,指出作业中存在的普遍性问题或进行典型范例的分析讲解,以促进学生学习的自觉性。

四、说明

本书总学时为70学时(包括演示实验),4学分。如果对于不同的专业及课程设置,学时减少为48学时(3学分),则教师可根据实际情况对内容进行适当的删减,上面表中带“※”处可删减。对于电子专业大专生,带“※”处和第6章微波有源器件、第10章微波测量亦可删减,这样可适当放慢讲课进度,利于学生理解。

推荐阅读



模拟电子技术基础 (第2版)

作者: 黄丽亚 杨恒新 ISBN: 978-7-111-38699-5 出版时间: 2012年8月 定价: 39.00元

本书精选内容,突出重点,强化三基。以分立元件电路为基础,以集成电路为重点,强调概念的物理本质和含义。注重培养电路设计能力。注重模拟电路与数字电路教学内容的衔接,将集成门电路内容纳入模拟电路部分。第2版在第1版的基础上,增加有源滤波器设计举例、滤波器设计软件FilterPro简介;更新Multisim 8至Multisim 11,增加Multisim 11应用举例;删除了ispPAC芯片相关内容。可作为电子信息、电气、自动化、控制类专业“模拟电子技术”课程教材。

信号与系统: 使用变换方法和MATLAB分析 (原书第2版)

作者: (美) M. J. Roberts 译者: 胡剑凌 ISBN: 978-7-111-42188-7 出版时间: 2013年6月 定价: 89.00

信号与系统课程是数字信号处理和控制理论等课程的基础课程,本书以主要涵盖傅里叶变换、傅里变换分析、拉普拉斯变换、拉普拉斯变换分析、离散时间系统的z变换、z变换分析等。书中给出了大量的例子,并介绍实现分析方法的MATLAB函数和运算。可作为电子信息类相关专业的本科生教材。

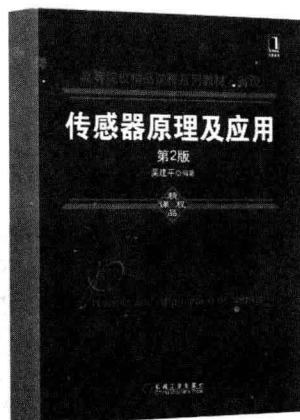
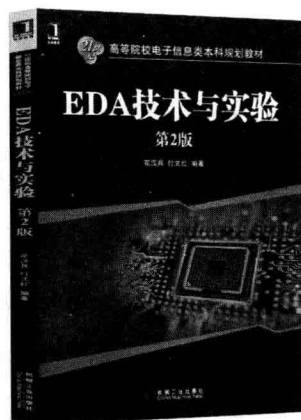
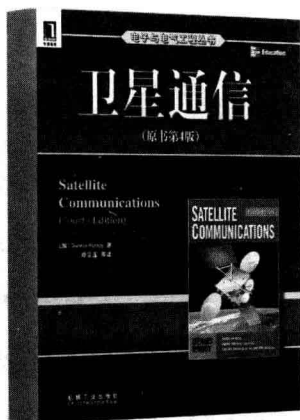
数字信号处理: 系统分析与设计 (原书第2版)

作者: (巴西) Paulo S. R. Diniz等 译者: 张太镒等 ISBN: 978-7-111-41475-9 出版时间: 2013年4月 定价: 85.00元

英文版 ISBN: 978-7-111-38253-9 出版时间: 2012年6月 定价: 79.00元

本书全面、系统地阐述了数字信号处理的基本理论和分析方法,详细介绍了离散时间信号及系统、傅里叶变换、z变换、小波分析和数字滤波器设计的确定性数字信号处理,以及多重速率数字信号处理系统、线性预测、时频分析和谱估计等随机数字信号处理,使读者深刻理解数字信号处理的理论和设计方法。本书不仅可以作为高等院校电子、通信、电气工程与自动化、机械电子工程和机电一体化等专业本科生或研究生教材,还可作为工程技术人员DSP设计方面的参考书。

推荐阅读



卫星通信（原书第4版）

作者：（加）Dennis Roddy 著 郑宝玉 等译 ISBN: 978-7-111-33447-7 出版时间：2011年6月 定价：59.00元

本书涵盖了卫星通信的基本理论、发射方法及实际应用等各个方面。对硬件进行了完整的描述，包括卫星结构、天线、地球站及星上系统。涉及了许多边缘应用，比如无线Internet、电话、全球定位系统(GPS)及数字电视的全球广播等。包括了ATM、TCP/IP、LEO卫星组网、移动系统及星上交换等新内容。给出了有关计算方法、轨道、链路、多址接入、信号、调制及干扰的细节。所有的例子和习题都以Mathcad的形式给出，把数学计算的复杂程度降到最低。

EDA技术与实验（第2版）

作者：花汉兵 付文红 ISBN: 978-7-111-42654-7 出版时间：2013年8月 定价：35.00元

为适应教学改革的需要，培养学生能力的循序渐进的过程，对第1版内容进行了修订，从而实现了从基础电路设计、综合电路设计再到创新型设计的教学模式，有利于在培养学生基本实践能力的基础上，培养了他们的创新意识和创新能力。该第2版精心构建基础与前沿、经典与现代有机结合的实践教材内容，结合大学生电子设计竞赛，修订EDA技术与实验内容，使学生掌握现代电子设计方法，实现教材内容与科研、工程、社会应用实践密切联系。本着与时俱进的原则，采用了一些在技术上更为先进的软件和设备。如可编程器件由原来的Cyclone系列更新为CycloneIII系列，并介绍了QuartusII软件的使用。

传感器原理及应用（第2版）

作者：吴建平 ISBN: 978-7-111-36554-9 出版时间：2012年2月 定价：36.00元

本书第1版自2009年1月面世以来，得到广大同行、专家和读者的支持和肯定，并先后4次重印。为提高教材的可读性和实用性，本书对上一版中的部分章节进行了调整：将“超声波传感器”归入第7章；将“热电式红外传感器”并入第12章；第11章为射线传感器，主要讨论核辐射探测器的原理和应用；本书还特别增加了第13章集成智能传感器，主要讨论现代新型的集成器件。另外，本书还增加了部分传感器的应用实例。

读者可以在本书配套的精品课程网站中找到更多的资料。本书同时为教师提供教学课件及配套习题答案。

第2版前言

第1版前言

教学建议

第1章 绪论	1
1.1 微波的概念	1
1.2 微波的基本特点	2
1.3 微波的应用	2
1.4 本书的结构及学习方法	4
第2章 传输线理论	5
2.1 引言	5
2.2 传输线方程及其解	5
2.3 传输线的状态参量	8
2.4 传输线的工作状态	12
2.5 相速和相波长	16
2.6 圆图及其应用	17
2.7 传输线的阻抗匹配	23
2.8 有损耗的传输线	26
习题	28
第3章 微波传输系统	31
3.1 引言	31
3.2 规则波导中的导行电磁波及其传输特性	31
3.3 矩形波导中的导行波	38
3.4 圆波导中的导行波	47
3.5 同轴线中的导行波	51
3.6 微带线	54
3.7 其他平面型微波传输线简介	58
3.8 波导的激励	61

习题	64
----	----

第4章 微波网络	65
4.1 引言	65
4.2 微波系统的一般分析	65
4.3 双端口微波网络参数(包含多端口的散射参数)	69
4.4 双端口基本单元电路的网络参量及其应用	79
4.5 简单不均匀性的等效电路近似分析	84
4.6 信号流图在微波网络分析中的应用	92
习题	96
第5章 无源微波元件	98
5.1 引言	98
5.2 连接元件和终端元件	98
5.3 衰减器和移相器	101
5.4 分支微波元件	105
5.5 定向耦合元件	111
5.6 微波谐振腔	118
5.7 微波铁氧体元件	131
5.8 微波滤波器	133
习题	151
第6章 微波有源器件	154
6.1 引言	154
6.2 微波半导体管的工作原理和特性	154
6.3 微波晶体管放大器	160

6.4 微波晶体管振荡器	169	8.6 移动终端天线	231
6.5 微波混频器	174	8.7 基站天线	244
6.6 微波集成电路简介	178	习题	248
习题	182		
第7章 天线基本理论	183	第9章 现代微波工程天线	249
7.1 引言	183	9.1 引言	249
7.2 电基本振子的辐射	183	9.2 喇叭天线	249
7.3 磁基本振子的辐射	186	9.3 反射面天线	258
7.4 天线的特性参数	187	9.4 微带天线	268
7.5 线式振子天线的辐射	192	9.5 智能天线	279
7.6 天线阵的方向图乘积定理与 二元阵的方向图	197	9.6 射频识别天线	290
7.7 直线式天线阵	200	9.7 光子晶体天线	298
7.8 均匀平面阵与立体阵	203	9.8 MIMO 多天线技术	305
7.9 面天线基础	204	习题	313
习题	214		
第8章 通信中的常用天线	216	第10章 微波测量	314
8.1 菱形天线	216	10.1 微波网络参数的测量	314
8.2 对数周期天线	218	10.2 高频微波功率测量	321
8.3 引向天线	221	10.3 信号频谱分析	330
8.4 蝙蝠翼天线	225	10.4 噪声测量	338
8.5 螺旋天线	228	习题	343
		参考文献	344

绪 论

随着科学技术的迅猛发展,微波技术与天线已成为一门比较成熟的学科,它在移动通信、微波通信、卫星通信、雷达、导航、电子对抗、计算机工程以至于日常生活及医疗等诸多领域得到了广泛的应用,在国民经济和国防现代化建设中发挥了巨大作用。因此,微波技术与天线目前已是电子类各专业的一门技术基础课。下面我们介绍微波的概念与基本特点,微波的发展与应用,以及本书的结构和学习方法。

1.1 微波的概念

微波是一种频率极高、波长很短的电磁波,微波的所谓“微”,即是指其波长与普通无线电波相比更微小的意思。微波对应的频率大约 $300\text{MHz} \sim 3000\text{GHz}$,由频率 f ,波长 λ 和电磁波在真空中的传播速度 $c(c \approx 3 \times 10^8 \text{m/s})$ 之间的关系

$$f\lambda = c$$

可知,微波的波长范围大约在 $1\text{m} \sim 0.1\text{mm}$ 之间。微波在整个无线电波中的位置见表 1-1。从表 1-1 中可见,其低频端与普通无线电波的“超短波”波段相连接,而其高频端则与红外线的“远红外”波段毗邻。在微波波段内部,按其波长范围划分为分米波、厘米波、毫米波和亚毫米波。

表 1-1 无线电波的波段划分

波段名称		波长范围	频率范围	频段名称
超波长		$10^5 \sim 10^4 \text{m}$	$3 \sim 30\text{kHz}$	超低频(ULF)
长波		$10^4 \sim 10^3 \text{m}$	$30 \sim 300\text{kHz}$	低频(LF)
中波		$10^3 \sim 10^2 \text{m}$	$0.3 \sim 3\text{MHz}$	中频(MF)
短波		$10^2 \sim 10\text{m}$	$3 \sim 30\text{MHz}$	高频(HF)
超短波		$10 \sim 1\text{m}$	$30 \sim 300\text{MHz}$	甚高频(VHF)
微波	分米波	$10 \sim 1\text{dm}$	$300\text{MHz} \sim 3\text{GHz}$	特高频(UHF)
	厘米波	$10 \sim 1\text{cm}$	$3 \sim 30\text{GHz}$	超高频(SHF)
	毫米波	$10 \sim 1\text{mm}$	$30 \sim 300\text{GHz}$	极高频(EHF)
	亚毫米波	$1 \sim 0.1\text{mm}$	$300 \sim 3000\text{GHz}$	超极高频
红外、远红外		$100 \sim 0.72\mu\text{m}$	$3000 \sim 416000\text{GHz}$	—

微波工程上习惯将常用的波段以拉丁字母表示,各波段的表示见表 1-2。

表 1-2 微波波段常用代号及其相应的频率和波长范围

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

1.2 微波的基本特点

微波位于无线电波的高频段,与低频无线电波相比,具有以下几个基本特点。

1. 频率高,信息容量大

微波的振荡频率每秒达3亿次以上,比低频无线电波的振荡频率高出几个数量级,因此,低频段一些并不显著的效应在微波波段就显现了出来:如渡越时间效应、时延效应、趋肤效应和辐射效应等,并产生了与低频不同的分析方法和结构形式。低频电路中基本量是电压和电流,在微波中则为电场和磁场,电压和电流失去了意义;低频元件一般为集中参数,而微波元器件常表现为分布参数形式;低频采用双线传输能量,微波则不行(由于双线在微波波段产生趋肤效应和辐射效应,微波能量被损耗),需要用其他的结构如同轴线、波导、微带线和共面波导等统称微波传输线来传导能量;另外,由于微波频率高,对应的波长很短,微波在传输线上的时延将导致各处具有不同的相位;值得一提的是,微波波段产生微波信号的器件和调谐电路的结构与低频段亦有很大的差别。

更为重要的是,由于微波的频率高,在不太大的相对带宽下,其可用频带是很宽的,可达数百甚至上千兆赫,这就意味着微波信息容量大,从而使得它在需要很大信息容量的场合(如微波多路通信、卫星通信等)得到了广泛的应用。

2. 似光性和具有直线传播的特点

微波的波长比地球上一般的宏观物体如建筑物、船舰、飞机和导弹等的尺度要小得多,当微波波束照射到这些物体上时,将会产生显著的反射。一般说来,电磁波的波长越短,则其传播特性越接近于几何光学,波束的定向性和分辨率就越高。微波的这一特性使它在雷达、导航和通信中获得了重要的应用。

3. 穿透能力强

微波照射到介质物体时,能深入到物体内部的特性称为穿透性。例如,微波能穿透电离层来进行卫星通信和宇航通信,使之成为人类观测宇宙的一个“窗口”。医学上利用微波热疗乃至日常生活中人们使用的微波炉等都是这一特性的典型应用。

4. 量子特性

微波的量子能量并不大,为 $10^{-5} \sim 10^{-2} \text{ eV}$,在与物质相互作用的时候,不会改变物质的内部结构,因而,微波的作用是非电离性的。但在超低温和低功率条件下,微波的量子效应就会显现出来,可将它作为探索物质内部结构和基本性质的一种有效的研究手段。

1.3 微波的应用

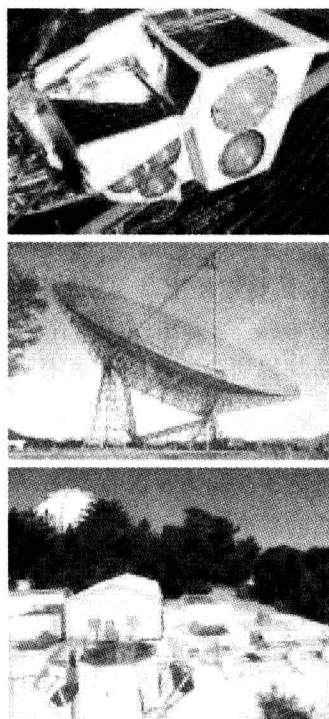
微波技术的发展大致可分为四个阶段:1940年以前为第一阶段,此阶段为实验室阶段,主要研究微波产生的方法;1940~1945年为第二阶段,这个阶段正值第二次世界大战期间,由于军事上的需要,微波技术首先应用于雷达中,当时所谓的微波工程实际上就是雷达工程,由于雷达应用的需求,产生了很多的微波器件,但这一时期对微波理论的研究较少;1945年~20世纪60年代,主要是微波技术的理论研究阶段,建立了一整套微波电子学的理论体系,进而发展成为一门相对独立的微波学科,为以后的发展提供了坚实的理论基础;20世纪60年代至今,是微波技术迅速发展的阶段,特别是近20年来,微波技术与微电子和计算机技术的有机结合,开辟了微波器件的新时代,目前正向着小型化、多功能、数字化、宽频带和更高频段方向发展。

微波的实际应用相当广泛,遍及通信、军事国防、科学研究、工农业生产和日常生活等各个

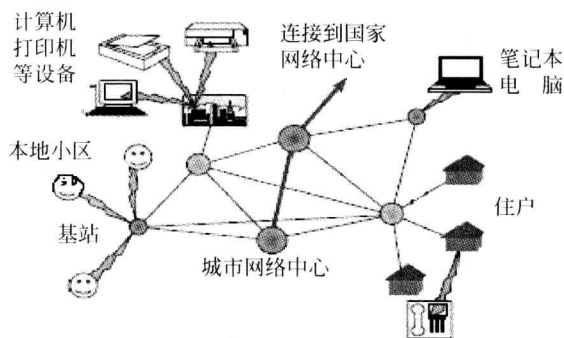
领域,下面分别简要介绍。

1. 通信

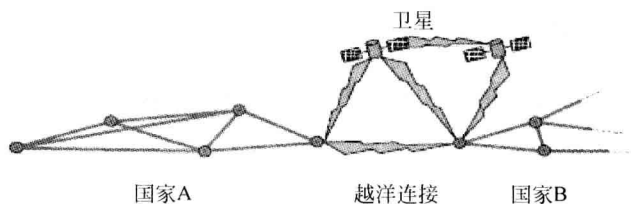
微波几乎遍及通信的各个领域(除光通信外),常用的微波通信有移动通信(载波频率有900MHz, 1800MHz, 2.4GHz),微波多路通信(包括微波中继接力通信),卫星通信(载波频率为3.7~4.2GHz, 11.7~12.75GHz),利用三个互成 120° 的位于外层空间的同步卫星,可实现对全球的通信和电视转播,在地面上利用网络通信则已十分普及。图1-1为几种通信方式的示意图。



a) 卫星地面站



b) 地面网络通信



c) 卫星通信

图1-1 几种通信方式示意图

2. 雷达

正如前述,雷达是微波技术的早期应用,时隔几十年,现代雷达的种类已很多,性能也日益提高,诸如导弹跟踪雷达、导弹制导雷达、空中交通管制雷达、炮瞄雷达、气象雷达、导航雷达等。采用单脉冲雷达,作用距离可达数十万千米。特别值得一提的是,由于半导体集成电路技术的发展和计算机信息处理能力的提高,不仅可使雷达小型化,而且能使雷达从噪声中提取微弱的信号,并进行程序控制,从而,使雷达的作用距离、精度、分辨率和多目标等性能方面得到了极大的提升。

3. 科学研究手段

微波的穿透性和量子特性,可以作为科研的手段。如将飞机或卫星作为平台,采用微波遥感技术,对地球资源进行调查,进行海洋和气象观测,进行地质和水旱灾害预报等;又如将微波作为观察宇宙的一个窗口,用射电天文望远镜观测和发现新的天体;另外通过微波与物质的相互作用,可以进行物质基本物理常数和内部频谱精细结构的测定等。

4. 微波能的应用

微波加热具有均匀、速度快、节能、效率高和卫生等优点,被广泛地应用于工农业生产和日常生活中,微波炉已成为家庭的必备炊具,微波加热还应用于食品加工及木材、纸张、卷烟等物品的干燥与杀菌,微波能也用于医疗中,对人体进行局部组织的热疗。近年来,对微波的生物效应方面的研究十分活跃,出现了类似微波化学和微波生物学等的边缘学科,微波的应用方兴未艾。

1.4 本书的结构及学习方法

微波技术是一门实用性学科,其基本内容包括理论和实践两个方面。本书编写的指导思想是突出重点,着眼于应用。微波技术的理论基础是以麦克斯韦方程组为核心的经典电磁场理论,基本研究方法是“场解法”,即求解满足简单边界条件下(具有规则形状的微波传输线)的三维波动方程,可以得到严格的解析解,这就是第3章微波传输系统的主要内容。但对于形状比较复杂的系统来讲,求解变得相当烦琐,甚至难以得到数学解,往往要采用各种数值分析方法近似来求解。作为工程应用而言,还可以采用称为“等效电路”的方法,这种方法将本质上是属于“场”问题,在一定条件下转化为类似低频中使用过的“电路”问题,即“化场为路”的方法,其内容就是第2章介绍的传输线理论。对于微波不均匀区域,可以采用微波网络加以研究,构成了本书第4章的内容。

微波的实践问题包括无源和有源器件,这部分介绍了微波振荡器、放大器、混频器这类有源器件及谐振器等无源器件,采用了场路结合的方法加以研究,这便是第5章和第6章的内容。

本书的后面四章为天线部分,以及微波的测量,分别讨论了天线的基本振子、基本参数、线天线、阵列天线和面天线,然后侧重介绍了通信中的常用天线和现代微波工程天线,最后介绍了微波的测量方法。

本课程的前修课为《高频电子线路》与《电磁场理论》,还涉及工程数学中的“线性代数”和“数理方程”的内容,书中理论推导较多,只要理解它就可以了。领会分析的方法和思路,记住必要的结论和公式,搞清它的应用场合和物理意义,把它们用到工程设计中去,提高分析问题和解决问题的能力,这就是学习本课程的目的所在。不言而喻,微波技术在不断地向前发展,发展过程中还会出现新的交叉结合点,新工艺、新器件和新方法层出不穷,新一代的微波工作者应当考虑发展与创新。

传输线理论

2.1 引言

传输线理论,是从电路的观点出发,对传输线上电磁波的波动现象进行简化分析,即将传输线看做分布参数电路,求解沿线电压、电流或等效电压和电流的变化,与下一章规则波导中导波理论相比较,它只关心电压波、电流波沿纵向(轴向)传输保留电磁波波动的主要特征,而不考虑横向(垂直于传输线的截面)上场的分布,是一种“化场为路”的等效电路的方法,在微波工程设计中是非常有效的方法。本章首先介绍了传输线方程及其解、描写传输线的状态参量和工作状态,然后重点讨论了工程上很实用的圆图及其应用,最后介绍了传输线的阻抗匹配概念和运用。

在学习传输线理论之前,必须建立两个基本概念。一是“长线”的概念。所谓长线是指传输线的几何长度与该传输线上所传输的电磁波的波长可相比拟,或者还要长,反之则为短线。应注意,这个“长”与“短”的概念是一个相对的概念,它是相对于电磁波的波长而言的。例如,20km长的输电线相对于 $f=50\text{Hz}$ 和波长为6000km的市电线来说,不能算是长线,只能视为短线;而工作于X波段的微波信号,其标称波长为3cm,一段长仅为10cm的微波传输线却是长线。为了分析和计算方便,引入“电长度”这个概念来描述。它定义为传输线的几何长度与工作波长的比值,记为 $\bar{l} = \frac{l}{\lambda}$,若 $\bar{l} \geq 1$,则称为长线;若 $\bar{l} < 1$,则称为短线。在微波波段,波长较短,一般

多为长线,所以传输线理论又称为“长线理论”。二是“分布参数”的概念。分布参数是相对于集总参数而言的。在低频电路中,常出现的集总参数有电容、电感和电阻,认为电场能量全部集中在电容器之中;磁场能量全部集中在电感之中;只有电阻才消耗能量;而连接各元件的导线(传输线)则认为是理想导线,常忽略分布效应,导线上的电压和电流是不随时空而变化的常数。可是一旦频率上升到了微波波段以后,就必须计入传输线上的分布参数效应。这是由于趋肤效应所致,当电流流过导体表面的时候,产生热效应,从而构成了沿线的分布参数效应;另外,导线周围存在有高频磁场,两线间存在着高频电场,电磁场也是沿线分布的,随之形成了分布电感和分布电容的概念。由于上述分布参数的存在,导致了传输线上各处的阻抗和导纳值不一样,因而各处的电压和电流值也不相同,换言之,微波传输线上的电压和电流是随时空而发生变化的,这是区别于低频导线的一个显著的特点。

图2-1为一段均匀传输线及其分布参数电路。图中, R_1 和 L_1 分别表示传输线单位长度上串联的分布电阻和分布电感; G_1 和 C_1 分别为传输线单位长度上并联的分布电导和分布电容。

2.2 传输线方程及其解

图2-1为连接始端能源(信号源)与终端负载之间的一段均匀传输线的等效电路模型。设传输线纵向 z 轴由负载指向信号源,坐标原点选在终端负载处。为了推导传输线方程,先来具体分析线上 dz 微分段上电压和电流之间的关系。设传输线单位长度的串联阻抗 Z_1 和并联导纳 Y_1 分别为

$$Z_1 = R_1 + j\omega L_1 \quad (2-1a)$$

$$Y_1 = G_1 + j\omega C_1 \quad (2-1b)$$

由图 2-1 可以求得串联阻抗 $Z_1 dz$ 上的电压降 dV 为

$$dV = I Z_1 dz \quad (2-2a)$$

类似地, 流过并联导纳上 $Y_1 dz$ 的电流 dI 为

$$dI = V Y_1 dz \quad (2-2b)$$

式(2-2)可改写成一阶微分方程的形式, 通常又称为传输线方程或电报方程

$$\frac{dV}{dz} = -Z_1 I \quad (2-3a)$$

$$\frac{dI}{dz} = -Y_1 V \quad (2-3b)$$

对式(2-3a)再求导, 并将式(2-3b)代入, 得

$$\frac{d^2 V}{dz^2} = -Z_1 Y_1 V = \gamma^2 V \quad (2-4a)$$

同样的方法, 可得到电流 I 的二阶微分方程

$$\frac{d^2 I}{dz^2} = -Z_1 Y_1 I = \gamma^2 I \quad (2-4b)$$

式(2-4)为均匀传输线上电压和电流满足的波动方程。式中, $\gamma = \sqrt{Z_1 Y_1} = \sqrt{(R_1 + j\omega L_1)(G_1 + j\omega C_1)}$ 称为传输线上电压波和电流波的传播常数, 它反映了电磁波在传输线上传输时幅度及相位的变化。 γ 又可表示为 $\alpha + j\beta$, 其中 α 是单位长度上的衰减, 称为衰减常数; β 是单位长度上的相移, 称为相移常数。对无损传输线, 即 $R_1 = G_1 = 0$, 则 $\gamma = j\omega \sqrt{L_1 C_1} = j\beta$ ($\beta = \omega \sqrt{L_1 C_1}$), 此时 $\alpha = 0$ 。由 $\gamma = \sqrt{Z_1 Y_1} = \sqrt{(R_1 + j\omega L_1)(G_1 + j\omega C_1)} = \alpha + j\beta$, 比较此式两边复数的实部和虚部相等, 可得

$$\alpha = \sqrt{\frac{1}{2} [(R_1 G_1 - L_1 C_1 \omega^2) + \sqrt{(R_1^2 + \omega^2 L_1^2)(G_1^2 + \omega^2 C_1^2)}]} \quad (2-5a)$$

$$\beta = \sqrt{\frac{1}{2} [(\omega^2 L_1 C_1 - R_1 G_1) + \sqrt{(R_1^2 + \omega^2 L_1^2)(G_1^2 + \omega^2 C_1^2)}]} \quad (2-5b)$$

式(2-4)是一组标准的二阶常微分方程, 它描写了传输线上电压波和电流波沿线的分布规律, 其通解为

$$V = Ae^{\gamma z} + Be^{-\gamma z} \quad (2-6a)$$

$$I = Ce^{\gamma z} + De^{-\gamma z} \quad (2-6b)$$

式中, A 、 B 、 C 和 D 为待定复常数, 可由始端或终端的电压和电流值确定。

由式(2-3a)和式(2-6a)可得

$$I = \frac{1}{Z_1} \frac{dV}{dz} = \frac{\gamma}{Z_1} (Ae^{\gamma z} - Be^{-\gamma z}) = \frac{1}{Z_c} (Ae^{\gamma z} - Be^{-\gamma z}) \quad (2-7)$$

式中, $Z_c = \frac{Z_1}{\gamma} = \sqrt{\frac{Z_1}{Y_1}} = \sqrt{\frac{R_1 + j\omega L_1}{G_1 + j\omega C_1}}$ 为特性阻抗, 它和传播常数一样, 是表征传输线特性的基本

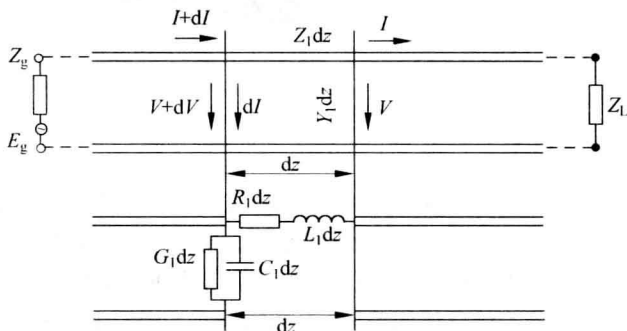


图 2-1 均匀传输线及其等效电路模型