

微波原理 与技术

WEIBOYUANLI
YU JISHU

李大年 编

北京师范大学出版社

微波原理与技术

李大年 编

北京师范大学出版社

微波原理与技术

李大年 编

北京师范大学出版社

前 言

本书可作为理工科大学无线电电子学，电子工程学非微波专业学生学习微波原理与技术的教材或教学参考书，也可作为综合性大学及师范院校物理系学生选修微波课程之用。

本书共分八章，第一章绪论扼要地介绍了什么是微波，微波的特点及其主要应用。其余的七章可划分为三个主要部分，第一部分是微波技术的基本理论，它包括：第二章，传输线的基本理论；第三章，波导与谐振腔；第四章，微波网络基础。第二部分在微波网络的基础上讲述微波无源电路与器件，包括第五章，微波滤波器与阻抗变换器；第六章，微波多端网络与器件。第三部分的内容是微波有源器件，包括第七章，微波电真空器件与第八章微波半导体器件与电路。除了微波天线以外，基本上概括了微波技术的主要内容。

编写本书时，编者给自己提出的目标是：第一，理论联系实际，既要有较高的理论起点，系统地阐述基本理论，又要兼顾工程实用性，每论述完一项基本理论后立即指出它的工程应用，以激发学生的学习兴趣和兴趣。第二，在叙述方法上力求简明扼要，精炼，不使本书篇幅过大，使读者望而畏。第三，要适当反映微波技术的一些新发展新方向，为此增加了计算机辅助微波电路分析与设计，介质波导与光纤，回旋管，自由电子激光器以及微波单片集成电路等章节。

本书是在编者多年授课的讲义基础上经修订扩充而成，参考教学时数为 80 学时。

本书除作为无线电类专业教材外，也可供从事通信，雷达，广

播,电视等专业的工程技术人员工作中参考及自学使用。

限于编者水平,书中难免存在一些缺点和错误,殷切希望广大读者批评指正。

编者

一九九二年二月

目 录

第一章 绪论	1
§ 1 通信的需求和电磁波波谱的开拓.....	1
§ 2 微波的特点.....	4
§ 3 微波技术的发展历史.....	5
§ 4 微波的应用.....	6
第二章 传输线的基本理论	9
§ 1 麦克斯韦方程的横电磁波 (TEM) 形式.....	9
§ 2 传输线方程.....	13
§ 3 均匀传输线的稳定正弦状态.....	19
§ 4 入射波、反射波、反射系数.....	23
§ 5 传输线方程的双曲函数型式及传输线 的等值网络.....	26
§ 6 输入阻抗, 开路线、短路线、驻波比.....	31
§ 7 传输线的圆图, 反射系数圆图, 阻抗圆图及导纳圆图	40
§ 8 史密斯圆图及其应用.....	44
§ 9 传输线的阻抗匹配.....	50
§ 10 对称微带线.....	62
§ 11 微带线.....	71
§ 12 耦合带状线.....	77
第三章 波导与谐振腔	90
§ 1 矩形波导.....	90
§ 2 矩形波导中的主模 TE_{10} 模.....	101

§ 3	圆波导	111
§ 4	同轴线	117
§ 5	圆柱形介质波导与光纤	120
§ 6	金属空腔谐振器	127
§ 7	同轴线谐振腔	137
§ 8	介质谐振器	140
第四章	微波网络基础	145
§ 1	引言	145
§ 2	均匀波导管的等效电路	146
§ 3	单端口网络(二端网络)	154
§ 4	微波网络的广义克希荷夫定律	157
§ 5	散射矩阵	162
§ 6	双端口网络	167
§ 7	双口网络散射参数的实验测定, 双口网络的外特性参数	170
§ 8	微波网络的信号流图	175
§ 9	波导中简单不均匀性的等效电路	177
§ 10	计算机辅助微波电路分析	181
第五章	微波滤波器与阻抗变换器	201
§ 1	概述	201
§ 2	滤波器的插入衰减综合法	205
§ 3	低通原型滤波器的梯形网络综合法	213
§ 4	微波低通滤波器设计法	223
§ 5	微波高通与带通滤波器	232
§ 6	倒置变换器和变形原型滤波器	236
§ 7	平行耦合线带通滤波器	242
§ 8	四分之一波长阶梯阻抗变换器的综合设计	249
第六章	微波多端网络与器件	255

§ 1	三端口网络, 环行器	255
§ 2	E-T 接头及 H-T 接头	260
§ 3	四端口网络, 魔 T	264
§ 4	混合环	268
§ 5	定向耦合器	275
§ 6	波导小孔定向耦合器	279
§ 7	平行耦合传输线定向耦合器	282
§ 8	微波功率分配器与功率合成器	285
§ 9	微波铁氧体	288
§ 10	微波铁氧体器件	294
第七章	微波电真空器件	299
§ 1	引言	299
§ 2	双腔速调管	300
§ 3	多腔速调管	311
§ 4	反射速调管	313
§ 5	行波管	325
§ 6	慢波结构	328
§ 7	行波管的小信号理论	333
§ 8	磁控管	344
§ 9	返波管振荡器	350
§ 10	回旋管	352
§ 11	自由电子激光器	357
第八章	微波半导体器件与电路	363
§ 1	引言	363
§ 2	肖特基表面势垒二极管	364
§ 3	微波混频器	368
§ 4	转移电子振荡器与放大器	373
§ 5	变容二极管与参量放大器	383

§ 6 微波晶体管放大器.....	393
§ 7 PIN 二极管及其应用.....	402
§ 8 微波集总元件电路与微波单片集成电路.....	405
习题.....	409

第一章 绪 论

§1 通信的需求与电磁波波谱的开拓

所谓通信，广义地说来就是两个不同的单元彼此之间传递信息。这两个单元可以是人与人，也可以是机器与机器，或者人与机器，或者是机器的这一部分与另一部分，甚至可能是细胞与细胞。由此可见通信是在自然界以及人类社会中普遍存在并且起着重大作用的一种客观现实。

当前我们所谈的通信主要是指电信，就是利用电信号传递信息。电信的出现至今也不过只有一百多年的历史，但是对于人类社会的发展却有着巨大的作用，人类社会愈是现代化，对于通信的需求就愈是巨大。当前人类社会正向信息化社会发展，信息传递的速度与质量是社会发展的条件。这由我国在第六、七、八三个五年计划中均把通信与交通运输，能源并列为重点就可以看出了。

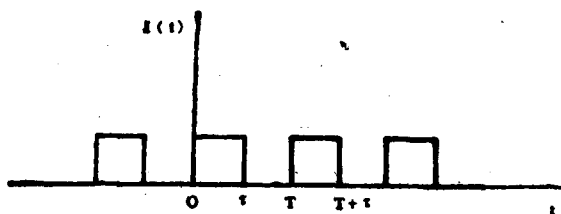


图 1-1

现在我们来简单回顾一下电信系统及其发展，由此我们将得出一些重要结论。最简单的电信就是直流电报，它是以一定的持续时间 τ 交替按键和放键的脉冲信号，采用导线传输，其波形如图 1-1 所示。此一周期性的脉冲信号可以用富氏级数展开为：

$$I(t) = A_0 + \sum_{n=1}^{\infty} A_n \sin 2\pi n f t$$

式中：

$$f = \frac{1}{T}$$

f 为基波频率， τ 为脉冲持续时间， T 为周期，事实上，上式中的谐波数目 n 不必取无穷多，例如 5 次即已足够。可以证明，这时的传输带宽只需 20 赫即已足够。但在实际上为了通信可靠，通常的直流电报传输带宽 Δf 定为 0~100 赫。

传真电报已不是传输文字的编码，而是直接传输真迹文字或图象。由直观即可看出它所传输的信息量比电报大的多，它所需要的带宽 Δf 约为 3000 赫。

按照信息论，通信系统所传输的信息量与系统的通频带成正比。常见的一些通信系统及其所需的带宽如下：

电话： $\Delta f = 150 \sim 3400$ 赫

广播： $\Delta f = 8 \sim 10$ 千赫

高质量调幅广播： $\Delta f = 15$ 千赫

调频广播： $\Delta f = 150$ 千赫

电视广播： $\Delta f = 12$ 兆赫，单边带发送时则只需

$\Delta f = 4 \sim 6$ 兆赫(625 行)

由此可见，通信系统的发展(这也体现了人们日益增长的通信需求)，要求占用的频带越来越宽，因而这就要求人们不断地开拓电磁波频谱来满足这日益增长的需求。以无线电广播为例，它一般占用电磁波频谱的中波和短波，波长约在 1000 米至 10 米，频率由

表 1-1

频段及波段名称	对应波长及频率	频宽 Δf	频段利用
中频(MF), 中波(MW)	λ : 1000~100m f : 300~3000kHz	$\Delta f = 2700\text{kHz}$	调幅广播台 270 个
高频(HF), 短波(SW)	λ : 100~10m f : 3MHz~30MHz	$\Delta f = 27\text{MHz}$	调幅广播 2700 台
甚高频(VHF), 超短波	λ : 10m~1m f : 30M~300M	$\Delta f = 270\text{MHz}$	可安排 60 个电视台, 或一部分调频广播台
特高频(UHF), 分米波	λ : 1m~30cm f : 300M~1000M (1GHz)	$\Delta f = 700\text{MHz}$	500M 以下为电视广播 500M 以上为卫星电视广播
超高频(SHF), 微波(厘米波, 毫米波)	λ : 30cm~1mm f : 1G~300G	$\Delta f = 299\text{GHz}$ 为所有长, 中, 短波的 299 倍	微波通信, 电视节目传输, 卫星通信, 雷达, 遥测, 遥感
亚毫米波(Submillimeter wave)	λ : 1~0.1mm f : 300G~3000G	$\Delta f = 2.7 \times 10^5\text{MHz}$ 为短波的 10 万倍	
远红外(far-infrared) 红外(infrared)	λ : 0.1mm~10 μ λ : 10 μ ~1 μ	$\Delta f = 7.5 \times 10^{10}\text{MHz}$ 为短波的 28 亿倍	可以把全世界的所有电话路数包括在一束细光束中, 用于光通信
可见光	λ : 0.76 μ ~0.4 μ		光通信, 水下通信
紫外	λ : 0.1 μ ~0.01 μ		
X-射线	λ : 10 $\text{\AA}$ ~0.1 $\text{\AA}$, 1 $\text{\AA} = 10^{-10}\mu$		
γ -射线	λ : 0.01 $\text{\AA}$ ~		

3000 千赫至 30 兆赫,如以每个电台每套节目的频宽为 10 千赫计算,这一频段大约只能安排 3000 个电台,其中又包括了世界上所有的通信台、广播台,导航台甚至遥测遥控台。这显然是不够用的。

问题还不止于此,我们还有调频广播(频宽 15 千赫)和电视广播(频宽 4~6 兆赫),此外还有业余无线电通信,这些都无法安排在这一频段,所以我们只能把它们安排在超短波波段。

关于电磁波波谱及其利用情况参见表 1-1,由以上所述可知,只有日益开拓所能掌握的更短波长的新频带,才能满足通信的需求以及通信系统发展的需要。

§2 微波的特点

1. 微波的波长很短,典型的数值约为厘米级,与地球上的一般物体如房屋,轮船,飞机等尺寸(约几十米)相比小得多,可以认为是无穷小。此时,微波的行为完全可以用几何光学理论来描述,因而呈现似光特性,当其照射到物体上时会产生显著的反射,这正是微波雷达的应用基础。此外,由于天线的方向性增益和天线尺寸与波长比的平方成正比,因此在微波波段使用尺寸不大的天线就可提供很高的增益和极强的方向性。

2. 微波的频率很高,每秒振动 10 亿次以上。因此在不太大的相对频宽下,其可用频带极宽,可达数百或上千兆赫。因而其信息容量很大。在通信应用方面有着巨大的潜力。

3. 由于频率极高,因而周期很短,电子在电子器件中的渡越时间效应已不能忽略,这意味着必须用与低频电子器件不同的崭新的物理原理,来研制新的微波电子器件。

4. 微波在传播特性方面也具有一系列的新特点,由于它的似光性,表现出直射传播特性,且在大气中传播稳定,这一特点适于发展地面微波接力通信。由于它可以穿透电离层,因而它是无线电波谱中的又一个“窗口”,这导致了射电天文学和卫星通信的发展。

5. 由于微波的波长已可与通常的电路元件(R, L, C)的尺寸相比拟,因而在这些元件中及元件附近,场的分布变化已很大,这时元件的特性已不再能用一个参数来表示,而必须考虑到分布效应,电路参数需由集总参数过渡到分布参数。

6. 在理论与研究方法上与低频电路也很不同,主要应用场理论,而不是路理论,例如波导与电磁谐振腔理论就是典型的场理论,在研究方法上也愈来愈多地与光学技术相结合,例如应用几何光学理论研究反射面天线,透镜天线。用迈克尔逊干涉仪作为谐振腔等等。

7. 量子特性开始计及。根据量子理论,电磁波具有波-粒子二象性,频率为 f 的电磁波是由能量 $E = hf$ 的光子组成,式中 $h = 6.626 \times 10^{-34}$ 焦耳·秒,为普朗克常数,当频率极高时每个量子的能量已不再能视为无穷小,因而在一束功率较低电磁波中,量子特性开始表现出来,这时研究它们就必须应用量子规律。这方面的例子就是微波量子放大器。

§3 微波技术的发展历史

微波技术的发展大致可分为如下的几个阶段:

1930~1940 年为理论研究及实验室阶段,这时人们已经研究了电磁波沿中空波导管的传播,电磁谐振腔理论,多种微波电真空器件的原理已经提出,并且已经达到了实验室水平。

1940~1945 年受到第二次世界大战的推动,微波技术已广泛应用于雷达,导航,遥控等领域,但理论研究落后于实际应用。

1945~1965 年,大战后微波技术已由军事应用转移到科学研究方面的应用,此时先后创立了微波波谱学,射电天文学,射电气象学等。

1965~1970 年开始向集成化,固态化发展,微波集成电路,微波固态器件已达到了实用化阶段。多种新型的器件如参量放大

器,微波量子放大器(maser)等也达到了实用阶段。

1970~, 固态器件开始向高功率发展,已逐步取代电真空器件。微波集成电路的集成化程度更高,具有大规模集成电路水平的微波单片集成电路已有实用性产品。计算机被广泛用于微波电路的分析与设计,自动测试系统和智能化微波仪器也普遍地发展起来了,一些新型的微波毫米波源,例如回旋管,自由电子激光器等已经达到了很高的水平。向毫米波和亚毫米波的频谱开拓和应用研究正在蓬勃发展。

§4 微波的应用

1. 雷达 雷达是微波技术的主要应用之一,正是在二次世界大战时期,对雷达日益改进的要求,刺激了雷达和微波这两门技术相辅相成地发展起来了,雷达是利用目标对电磁波的反射来探测目标的方位,距离和速度。并进而用来跟踪,导航,控制人造卫星和飞行器的飞行。雷达还可用来探测风速,风向,测定雨雪分布,云层的高度及厚度,这些研究内容即构成了所谓雷达气象学。

雷达技术军事应用的更进一步发展就是电子对抗技术,又称电子战。它最初是设法干扰敌方的雷达回波,进而要求测定敌方雷达的位置,工作频率以及其他工作参数等以提供重要的军事情报,这就是电子侦查。当然,敌方也要日益改进其技术以进行反对抗。这方面的代表作就是目前国际上大力进行研究的无雷达回波的所谓隐形飞机。电子对抗所应用的技术主要的也是微波技术。

2. 通信 微波应用于通信除了它的可用频带宽之外,由于它的天线方向性强,波束窄,所以它还具有抗干扰能力强,保密性高等特点。它可应用于点对点通信,微波多路接力通信,卫星通信,散射通信,市内直拨电话通信,公路通信,油管通信以及海上钻井平台与陆地基地的通信等等。

3. 科学研究应用 微波在科学研究方面的应用范围也是十分

广泛的,例如作为时间和频率基准的铯原子钟,实际上就是一个微波量子振荡器,它是用铯-133的微波辐射谱线作为频率和时间基准的。高能物理中用来加速基本粒子的直线加速器,同步回旋加速器也是采用微波电子管并在微波技术的基础上发展起来的。此外还可以用微波测量电介质的性质,测量等离子体性质及用来加热等离子体。微波遥感是遥感技术中的一门重要分支,它可以用来测量农作物和土壤中的水分、湿度。在地质学中可以用来找水、探矿,尤其是用来找石油。射电天文学也是微波技术在科学研究方面的主要应用,六十年代天文学的四大发现——类星体,中子星,2.7 K背景辐射和星际有机分子全是利用微波作为主要观测手段而发现的。

4. 微波的工业应用 这方面的应用也是很广泛的,在食品工业方面可用来干燥,烘烤,消毒,快速加热冰冻食品,在橡胶工业中用来加热,硫化,制造多孔橡胶,在木材工业,皮革工业,油漆工业,纺织工业以及印刷工业中用来干燥,还可以用它来熔炼高质量的光学玻璃等等。

微波还可以用来测量长度,速度,厚度,这可在冶金工业中用来测量钢板和线材的厚度和尺寸,也可测量绝缘板或纸张的厚度。

此外微波还可以用来测量和连续监视多种物体中水分和湿度含量。在安全与保卫系统中还可用微波来监测和监视。

5. 微波的其他应用 在农业上可用来灭虫杀菌,用来育种、育蚕、谷物干燥以及谷物含水度的测量等等,在医疗方面可用作微波理疗,治疗癌症(尤其是皮癌),监听心脏跳动,肺的水分检测,此外研究人体内的电磁传输还可以用作多种的非侵入性的诊断检查。作为冰冻组织的快速融化,将来还可能用于开胸外科手术之中。

在日常生活当中,国外已广泛应用微波炉,微波烘箱来烘烤食物,并可用于冰冻食品的快速融化。

6. 微波的潜在可能应用: 微波潜在应用的最诱人前景是太阳

能卫星功率站,即在地球的同步轨道上安置卫星功率站,它把太阳能变成直流电能,然后再换成微波能,由发射天线射向地球,在地球上安置接收天线接收微波辐射然后再转换成直流电能以供应用。表 1-2 列举了一个提议中的 10,000 兆瓦卫星功率站的技术经济指标。

表 1-2

空间站	
空间站尺寸	10×20km
净重	86×16 ⁴ kg
寿命	30 年
发射天线	
频率	2450MHz
微波发生器的数目	10 ⁴
尺寸	1km
90%功率主瓣波束宽	2.15×10 ⁻⁴ 弧度
地面微波功率密度	
主瓣	
轴上的功率密度	29.3mW/cm ²
90%功率的功率密度	2.7mW/cm ²
90%功率的半径	3.85km
第一个旁瓣	
最大功率密度	0.2mW/cm ²
半径	6.9km
接收天线特性	
面积	9.7×12.6km
半波振子,间隔 0.6λ × 0.6λ	10 ¹⁰
每个元件检拾的功率	~1.5W
价格	
研制费用	440 亿美元
安装费用	76 亿美元(5000MW)
运转费用/年	140 百万美元
30 年周期的预期收益	350 亿美元