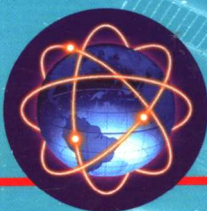


电子与通信工程



系列教材

微波技术

主编 吴群 宋朝晖

哈尔滨工业大学出版社

微波技术

主 编 吴 群 宋朝晖

哈尔滨工业大学出版社

内 容 简 介

本书为电子与通信工程系列教材之一。本书介绍了微波技术的基本概念、基本理论和基本分析方法。全书共分7章:绪论、传输线基本理论、微波传输线、规则波导理论、微波网络基础、微波元件和微波谐振器。每章后都有一定数量的习题及具有启发性的思考题和精练的内容小结,书末附有习题答案。

本书可作为高等院校电子、信息与通信工程类专业的教材或参考书,也可供从事电磁兼容性、射频无线技术与微波相关领域工作的科技人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

微波技术/吴群主编. —哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社,2004.2

ISBN 7-5603-1990-4

I. 微… II. 吴… III. 微波技术 IV. TN015

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2004)第 009805 号

出版发行 哈尔滨工业大学出版社
社 址 哈尔滨市南岗区教化街 21 号 邮编 150006
传 真 0451-86414749
印 刷 哈尔滨工业大学印刷厂
开 本 787×1092 1/16 印张 13 字数 294 千字
版 次 2004 年 2 月第 1 版 2004 年 2 月第 1 次印刷
书 号 ISBN 7-5603-1990-4/TN·73
印 数 1~3 000
定 价 18.00 元

前 言

微波技术课程是电子、信息与通信工程类本科生的一门专业基础课,是当代科技人员从事该学科研究所必备的重要基础之一。

本书是在孙道礼、郭文彦等老教授编写的《电磁场与电磁波》、《微波技术》等的基础上修订而成的。书中既有他们多年从事该学科经验的总结,又满足教育部新大纲对该学科的要求,并根据本课程学习内容要求的特点,尽量避开繁琐的数学推导和公式,注重基本概念的理解和基本理论的应用。为此,每章后安排了具有启发性的思考题、习题及精练的内容小结,以帮助读者加深对基本理论与基本概念的理解和掌握。为配合课程教学辅导,建立了相应微波技术课程学习网站及网络远程教学网站(见 <http://microwave.hit.edu.cn>),提供相当数量的课外学习辅导资料和微波技术学科发展前沿的新技术。本书还参照了国外同类大学所采用的教材中的有关内容,博取众家之长,从教材体系的安排上尽量与国际著名大学接轨,既注重基础理论,也强调与实际应用的联系,使学生在掌握微波技术的基本理论和分析方法的同时,培养他们分析问题和解决问题的能力。

全书共分七章。在第1章绪论中,简述了微波的概念、特点、应用概况及研究方法。第2章从路的观点出发,研究微波传输线的基本传输特性及其计算方法,给出一系列关于微波传输线的基本概念、基本理论和分析方法。第3章是关于几种常用的微波传输线的分类研究,包括双线、同轴线、微波集成电路用传输线结构及其传输特性。第4章是研究规则的空心金属波导中的场分布及主要波型的传输特性。第5章给出网络的五种参量矩阵的定义,着重阐述散射矩阵及其基本性质,介绍了二口网络特性参量的计算方法,讨论二、三、四口网络的基本性质。第6章扼要介绍微波工程技术中常用到的几种微波元器件的结构、工作原理、主要技术参数及其特性。第7章是几种主要的微波谐振器的构成原理及各基本参量的计算方法。本书所需学时数约为50~70学时。

本书由吴群、宋朝晖主编。秦月梅、张红军、付佳辉、孟繁义等都参加了部分编写工作。

本书在编写中得到自1978年成立微波教研室就开创本课程教学的孙道礼教授的精心指导,也得到其他青年教师及研究生的大力帮助,在此深表谢意。同时也感谢哈尔滨工业大学教务处的的大力支持。

由于编者学识水平有限,书中错误和疏漏之处难免,欢迎提出宝贵意见(哈尔滨工业大学341信箱)。

作 者

2004年1月

目 录

第1章 绪 论	1
1.1 微波及其特点	1
1.2 微波的应用	3
1.3 微波技术的研究方法和基本内容	6
本章小结	7
思考题	7
习 题	7
第2章 传输线基本理论	8
2.1 引 言	8
2.2 传输线基本概念	11
2.3 行 波	16
2.4 驻 波	20
2.5 行驻波	25
2.6 行波系数和驻波系数	29
2.7 阻抗圆图	30
本章小结	37
思考题	39
习 题	40
第3章 微波传输线	46
3.1 双线传输线	46
3.2 同轴传输线	47
3.3 带状线	50
3.4 微带线	55
3.5 耦合带状线	60
3.6 耦合微带线	63
3.7 槽线和共面线	67
本章小结	70
思考题	71
习 题	71
第4章 规则波导理论	74
4.1 电磁场理论基础	74
4.2 矩形波导	77
4.3 圆形波导	93

4.4 波导的激励与耦合	102
4.5 波导尺寸的选择	104
本章小结	106
思考题	108
习 题	108
第 5 章 微波网络基础	110
5.1 引 言	110
5.2 均匀波导系统与长线的等效	112
5.3 微波网络的各种参量矩阵	118
5.4 基本电路单元的参量矩阵	128
5.5 网络的工作特性参量	132
5.6 二、三、四口网络的基本特性	135
5.7 网络参数的测量	141
本章小结	144
思考题	145
习 题	145
第 6 章 微波元件	149
6.1 引 言	149
6.2 终端负载	149
6.3 电抗元件	151
6.4 衰减器	157
6.5 移相器	159
6.6 阻抗变换器	160
6.7 定向耦合器	161
6.8 桥式分路元件	164
本章小结	171
思考题	171
习 题	172
第 7 章 微波谐振器	175
7.1 引 言	175
7.2 微波谐振器的基本参量	175
7.3 波导矩形谐振腔	180
7.4 圆柱谐振腔	185
本章小结	188
思考题	188
习 题	189
习题答案	190
主要参考文献	200

第1章 绪 论

英国物理学家 J.C. Maxwell 于 1862 年提出了位移电流的概念,并提出了“光与电磁现象有联系”的推断。1865 年,Maxwell 在其论文中第一次使用了“电磁场”(Electromagnetic Field)一词,并提出了电磁场方程组,推演了波方程,还论证了光是电磁波的一种。一百多年来的事实证明,建立在电磁场理论基础上的微波科学技术,对人类生活产生了极其巨大的影响。微波技术已有几十年的发展历史,现已成为一门比较成熟的学科。在雷达、通信、导航、遥感、电子对抗以及工农业和科学研究等方面,微波技术都得到了广泛的应用。微波技术是无线电电子学门类中一门相当重要的学科,对科学技术的发展起着重要的作用。

1.1 微波及其特点

一、微波的含义

微波是频率非常高,而波长非常短的无线电波。由于这种电磁波的波长非常短,而称微波(Microwave)。电磁波的传播速度 v 与其频率 f 、波长 λ 满足下列关系

$$f\lambda = v \quad (1.1.1)$$

若波是在真空中传播,则速度为 $v = c = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$ 。

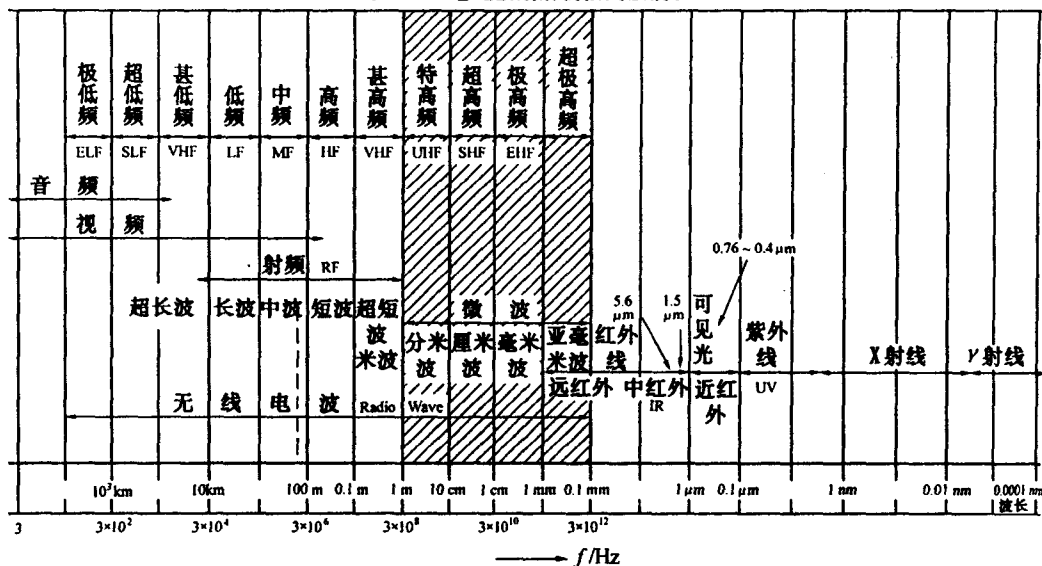
微波一般指频率从 $3 \times 10^8 \sim 3 \times 10^{12} \text{ Hz}$,对应的波长从 $1 \text{ m} \sim 0.1 \text{ mm}$ 范围的电磁波。

为使人们对微波在整个电磁波谱中所占的位置有一个全貌的了解,现将整个宇宙中电磁波的波段划分列于表 1.1.1 中。从表中可见,微波频率的低端与普通无线电波的“超短波”波段相连接,其高端则与红外线的“远红外”区相衔接。微波所占的频率范围几乎是所有低频频率范围之和的 1 000 倍(即在 $300 \text{ MHz} \sim 3 000 \text{ GHz}$ 的范围可包含 1 000 个所有长、中、短波波段的频率范围之和)!

频率为 $300 \text{ kHz} \sim 300 \text{ MHz}$ 的范围称为射频(Radio Frequency,简称为 RF)。射频有时也指微波的低端频率范围,是当前无线通信领域最活跃的波段(其 RF 高端频率应用可达 5.6 GHz)。

根据频率的高低,在微波波段范围内,还可分为分米波、厘米波、毫米波及亚毫米波等波段。做更详细的划分,厘米波又可分为 10 厘米波段、5 厘米波段、3 厘米波段及 1.25 厘米波段,等等;毫米波可细分为 8 毫米、6 毫米、4 毫米及 2 毫米波段,等等。

表 1.1.1 电磁波频谱及相关波段表



实际工程中常用拉丁字母代表微波波段的名称。例如 S、C、X 分别代表 10 厘米波段、5 厘米波段和 3 厘米波段；Ka、U、F 分别代表 8 毫米波段、6 毫米波段和 3 毫米波段，等等，详见表 1.1.2。

表 1.1.2 微波频段的划分

波段	频率范围/GHz	波段	频率范围/GHz
UHF	0.30 ~ 1.12	Ka	26.50 ~ 40.00
L	1.12 ~ 1.70	Q	33.00 ~ 50.00
LS	1.70 ~ 2.60	U	40.00 ~ 60.00
S	2.60 ~ 3.95	M	50.00 ~ 75.00
C	3.95 ~ 5.85	E	60.00 ~ 90.00
XC	5.85 ~ 8.20	F	90.00 ~ 140.00
X	8.20 ~ 12.40	G	140.00 ~ 220.00
Ku	12.40 ~ 18.00	R	220.00 ~ 325.00
K	18.00 ~ 26.00		

二、微波的特点

微波，之所以作为一个相对独立的学科来加以研究，是因为它具有下列独特性质。

(1) 频率极高 根据电磁振荡周期 T 与频率 f 的关系式

$$T = 1/f \quad (1.1.2)$$

可知微波波段的振荡周期在 $10^{-9} \sim 10^{-13}$ 秒(s)量级,而普通电真空器件中电子的渡越时间一般为 10^{-9} 秒(s)量级,二者属于同一数量级。于是,在低频时被忽略了的电子惯性,即电磁波与电子间的相互作用、极间电容和引线电感等的影响在微波情况下就不能再忽视了。普通电子管已不能用做微波振荡器、放大器或检波器了,取而代之的是建立在新的原理基础上的微波电子管、微波固体器件和量子器件,同时伴随频率的升高,高频电流的趋肤效应、传输系统的辐射效应以及电路的延时效应(相位滞后)等突出地暴露出来。

由于微波频率极高,故它的实际可用频带很宽,可达 10^9 Hz 数量级,是低频无线电波无法比拟的。频带宽意味着信息容量大,这就使微波得到了更广泛的应用。

(2) 波长极短 一种情况:微波的波长比地球上的宏观物体(如飞机、舰船、导弹、卫星、建筑物等)的几何尺寸小得多,故当微波照射到这些物体上时将产生强烈的反射。雷达就是根据微波的这个原理工作的。这种直线传播的特点与几何光学相似,故微波具有“似光特性”。利用这一特性,可以制成体积小、方向性很强的天线系统,可以接收到由地面或宇宙空间物体反射回来的微弱信号,从而增加雷达的作用距离并使定位精确。

另一种情况:微波的波长与普通电路或实验设备(比如波导、微带、谐振腔和其他微波元件)的尺寸相比在同数量级,使得电磁能量分布于整个微波电路之中,形成所谓“分布参数”系统,线路上各点电压、电流不能认为是同时建立的,各点电压、电流的相位和振幅也都不同。这与低频电路有原则区别,因为低频时电场和磁场能量是分别集中于所谓“集总参数”的各个元件中。

(3) 可穿透电离层 低频无线电波由于频率低,所以当它射向电离层时,其一部分被吸收,一部分被反射回来。对低频电磁波来说,电离层形成一个屏蔽层,低频电磁波是无法穿过它的。而微波的频率很高,可以穿透电离层,从而成为人类探测外层空间的“宇宙之窗”。这样,不仅可以利用微波进行卫星通信和宇航通信,也为射电天文学等学科的研究开拓了广阔前程。

(4) 量子特性 根据量子理论,电磁辐射的能量不是连续的,而是由一个个的“光子”所组成。单个量子的能量与其频率的关系为

$$\epsilon = hf \quad (1.1.3)$$

式中 $h = 4 \times 10^{-15} \text{ eV} \cdot \text{s}$, 称为普朗克常数。由于低频电波的频率很低,量子能量很小,故量子特性不明显。微波波段的电磁波,单个量子的能量为 $10^{-6} \sim 10^{-3} \text{ eV}$ 。而一般顺磁物质在外磁场中所产生的能级间的能量差额介于 $10^{-5} \sim 10^{-4} \text{ eV}$ 之间,电子在这些能级间跃迁时所释放或吸收的量子频率是属于微波范畴的,因此,微波可用来研究分子和原子的精细结构。同样地,在超低温时物体吸收一个微波量子也可产生显著反应。上述两点点对近代尖端科学,如微波波谱学、量子无线电物理的发展都起着重要作用。

1.2 微波的应用

微波技术是研究微波信号的产生、放大、传输、发射、接收和测量的学科,它是近代科学技术的重大成就之一。

从物理学的角度讲,微波技术所研究的主要是微波产生的机理,它在各种特定的边界

条件下的存在特性,以及微波与物质的作用。

从工程技术角度讲,微波技术所研究的主要是具备各种不同功能的微波元器件(包括传输线)的设计,以及这些微波元器件的合理组合应用。

综上所述,微波技术的应用范围和包含的内容相当广泛,但是本书主要讨论研究微波传输方面的基本理论。具体讲是传输线问题,它是研究微波技术中其他问题的基础。例如,在当前时钟频率超过数百 MHz 的微处理器芯片及其构成的高速数字电路布线等都需要利用微波的基本原理才能实现正确的设计。因此,微波技术是从事当今电子与信息学科研究人员必不可少的基础知识。

微波技术的发展是和它的应用紧密联系在一起的。微波的实际应用极为广泛,下面就几个重要方面加以介绍。

一、军事方面

雷达是微波技术最先得到应用的典型例子。在第二次世界大战期间,敌对双方开始了迅速准确地发现敌人的飞机和舰船的踪迹,继而又为了指引飞机或火炮准确地攻击目标,发明了可以进行探测、导航和定位的装置——雷达。事实上,正是由于第二次世界大战期间对于雷达的急需,微波技术才迅速发展起来。现代雷达多数是微波雷达。迄今为止,各种类型的雷达,例如导弹跟踪雷达、火炮瞄准雷达、导弹制导雷达、地面警戒雷达,乃至大型国土管制相控阵雷达等,仍然代表微波技术的主要应用。这主要是由于这些雷达要求它所用的天线能像光探照灯那样,把发射机的功率基本上全部集中于一个窄波束内辐射出去。但天线的辐射能力受绕射效应的限制,而绕射效应又取决于辐射器口径尺寸相对于波长的比值 D/λ_0 ,其中 D 是辐射器口径面线长度, λ_0 是工作波长。抛物面天线的主波束波瓣宽度可用下式计算

$$2\theta_0 = k \frac{\lambda_0}{D}$$

其中, k 是用度表示的常系数,视抛物面口径面张角 ψ 的不同而异。例如当 $\psi = 90^\circ$ 时, $k = 81.84^\circ$ 。于是一个直径 $D = 90$ cm 的抛物面,在波长 $\lambda_0 = 3$ cm(即频率为 10 GHz)工作时,可以产生 2.73° 的波束。这样窄的波束可以相当精确地给出雷达要观察的目标的位置。但频率为 10^8 Hz 时,欲达到与上述情况可相比拟的性能,则需要口径达 90 m 的抛物面,这样大的天线显然不现实。

除军事用途之外,还发展了多种民用雷达,如气象探测雷达、高速公路测速雷达、汽车防撞雷达、测距雷达及机场交通管制雷达等。这些雷达也多是利用微波频率。

飞行体的雷达可检测性是用 RCS (Radar Cross Section, 雷达反射截面) 这个指标表示的。美国 B-52 远程战略轰炸机的 RCS 约 100 m^2 , B-1 轰炸机的 RCS 约 10 m^2 。改进后的 B1-B 型仅有 1 m^2 。在海湾战争中大显身手的 F-117A 隐身战斗机的 RCS 竟低到 0.01 m^2 以下! 它的隐身奥秘有三个方面,首先是采用多平面多角体结构,角形平滑面向各个方向散射掉入射波波束;其次是大量使用轻质复合吸波材料及防护涂层;最后是严密屏蔽飞机自身的波辐射。因此,雷达很难发现 F-117A 飞机。对电磁波隐身的飞机,设计制造的关键是它的形状和所用微波吸收材料。此外,隐身舰船和隐身坦克也在研究中。

近年来,高功率微波(High Power Microwave,简称为 HPM)作为一种定向能武器新技术而受到关注,它是指工作频率为 1~300 GHz,输出功率超过 100 MW 的微波器件与设备。所谓定向能武器,其攻击效果取决于能量的大小,而不像常规武器那样依赖于弹壳爆炸碎片的杀伤力。通常,微波炸弹由巡航导弹携带,一旦抵达目标,可在瞬间释放出巨大的能量。导弹在接近目标时,弹上电容器发出的电磁脉冲将以光速传播,而且不受恶劣天气影响。电磁脉冲将沿着通风管道、水管和天线深入地下掩体。微波炸弹可以烧毁电脑和电子元件。这种利用单一、强大微波脉冲摧毁敌方电子系统的方式,可以使敌方失去通信联络与控制能力,雷达失灵,导弹失效,计算机误码,是非常独特的作战方式。其次,它的进攻速度近于光速,敌方根本没有拦截时间。

1984 年美国国防部的定向能发展计划,包括了高能激光、粒子束和高功率微波三个方面。为了获得 HPM,采用了相对论电子束产生大功率微波振荡或放大,主要的高功率微波源有回旋管、自由电子激光器、回旋自谐振脉冲(CARM)、相对论返波管、行波管、速调管、磁控管和虚阴极振荡器等。美国、俄罗斯在 HPM 方面的研究正在突破 100GW 水平。

二、通信方面

由于微波的可用频带宽、信息容量大,所以一些传送大信息量的远程设备都采用微波作为载体。微波多路通信是利用微波中继站来实现高效率、大容量的远程通信的。由于微波的传播只在视距内有效,所以,这种接力通信方式是把人造卫星作为微波接力站。美国在 1962 年 7 月发射的第一个卫星微波接力站——Telstar 卫星,首次把现场的电视图像由美国传送到欧洲。这种卫星的直径只有 88cm,因而,有效的天线系统只可能在微波波段,利用互成 120°角的三个定点赤道轨道同步卫星,可以实现全球性的电视转播和通信联络。由平均分布在围绕地球的 6 个圆形轨道上的 24 颗人造地球卫星(即导航卫星)所组成的全球定位系统(GPS),如今已经成为当今世界上最实用,也是应用最广泛的全球精密导航、指挥和调度系统。目前,无线通信如移动通信中的手机、Bluetooth、无线接入、非接触式射频识别卡等新技术都典型地代表了当今微波技术与微电子技术发展的结合所形成的微波集成电路技术。这些都是微波技术成功应用的事例。

三、工农业生产方面

在工农业生产方面广泛应用微波进行加热和测量。利用微波通过物质时被吸收而减弱的原理制成的微波湿度计可实时测量湿度含量。它可以用来测量煤粉、石油或各种农作物的水分,检查粮库的湿度,测量土壤、织物等的含水量,等等。微波加热的独特优点是物质内部加热,内外同热,无需传热过程,瞬时可达高温,因而加热速度快、均匀、质量好,而且能进行自动控制。微波加热现已应用于造纸、印刷、制革、橡胶、木材加工及卷烟等工业生产中。在农业上,微波已用来灭虫、育种、育蚕和谷物干燥等。在食品行业用来烘干糕点、方便面等。在医疗应用中,微波不仅可用于某些疾病的诊断,还可用于治疗,如微波理疗、微波针灸、冷藏器官的快速解冻以及对某些癌症的治疗等。微波热效应的研究也十分活跃,这为微波在化学、生物学和医学诸方面的应用开辟新的途径。微波在未来的卫星太阳能电站的应用中,可先将太阳能变为直流电流,再转换成微波能量发射回地面接

收站,最后将接收到的微波能量转换成直流电功率,以供人类使用。微波本身可以作为一种能源,已广泛用于食物烹调,如各式微波炉等。

1.3 微波技术的研究方法和基本内容

微波的基本理论是经典的电磁理论,主要是以麦克斯韦方程为核心的场与波的理论。研究微波技术问题的基本方法是“场解”的方法,这与在低频电路中采用的路的概念和方法完全不同。在低频时,电路的几何尺寸比工作波长小得多,因此在整个电路系统中,各处的电压和电流可以认为是同时建立起来的。电压、电流有确切的物理意义,能对系统作完全的描述,这就是以基尔霍夫方程为核心的低频电路理论。在微波电路中,工作波长与电路尺寸可相比拟,甚至更小,因而在整个系统中,从源端起直至负载端,波已变化了若干个周期,这样,电磁场的相位滞后现象(延时效应)不能再忽视了。此时,电压、电流等概念已失去明确的物理意义,只有用电磁场和电磁波的概念和方法才能对系统作完全的描述。

然而,这种“场解”法虽然是严格的,但只有在非常简单的边界条件下方能奏效。因为它涉及到偏微分方程的求解问题,对较复杂的边界条件,直接求解相当繁杂,常需借助各种数值解法。实际上,有许多微波工程问题并不需要知道系统中某点处的电、磁场的具体数据,所关心的仅是某元件、器件的对外特性,因而利用等效电路法求解,即可满足要求。这种等效电路法就是把本质上属于场的问题,在一定条件下化为电路问题。这种化场为路的方法是一种简便的工程计算方法,在微波技术中得到了广泛的应用。

微波技术自20世纪初发展以来不断开辟新的波段,扩展新的应用范围和领域,逐步形成了一系列新学科,并在实践的基础上不断总结建立起较完整的微波理论体系,为微波技术的进一步发展和提高奠定了理论和应用基础。20世纪60年代中期,随着微波固体器件和微波集成电路的出现和发展,使微波技术进一步向固体化、小型化方向发展。移动通信中的手机就是一个成功应用实例。微波技术正向毫米波和亚毫米波方向迅速发展并逐步得到实际应用。

波长在 $10 \sim 0.1 \text{ mm}$ 的电磁波称为毫米波,它能以低损耗穿过云雾和烟尘。如果避开 O_2 和 H_2O 气体吸收所造成的高衰减区域(如22、60、118、183 GHz附近),其优点是十分突出的。毫米波天线容易实现窄波束和高增益;或者说,在同样的波束宽度和增益条件下可把天线尺寸大大减小。毫米波最引人注目的应用是汽车防撞雷达和军用车辆(坦克、装甲车)之间的识别装置,以及卫星通信、城市内短距离通信等。

本书共分七章。在第1章绪论中,简述了微波的概念、特点、应用概况及研究方法。第2章是从路的观点出发研究微波传输线的基本传输特性及其计算方法,给出一系列关于微波传输线的基本概念和分析方法。第3章是关于几种传输线的分类研究,包括双线、同轴线和微波集成电路用传输线结构及其传输特性。第4章是研究规则的空心金属波导中的场分布及主要波型的传输特性。第5章给出网络的五种参量矩阵的定义,着重阐述散射矩阵及其基本性质,介绍了二口网络特性参量的计算方法,研究二、三、四口网络的基本性质。第6章介绍微波工程技术中常用到的几种微波元器件的结构、工作原理、主要技术参数及其特性,还对一些重要元器件的设计方法作以扼要介绍。第7章研究的是几种

主要的微波谐振器的构成原理及各基本参量的计算方法。

本章小结

1. 微波频率范围通常为 $3 \times 10^8 \text{ Hz} \sim 3 \times 10^{12} \text{ Hz}$, 对应的波长范围为 $1 \text{ m} \sim 0.1 \text{ mm}$ 。
2. 微波波段可分为分米波、厘米波、毫米波及亚毫米波波段。
3. 微波特点: 波长极短(频率极高), 具有似光特性, 能穿透电离层及量子特性。由于微波所具有的这些独特的特点, 使微波的应用范围、研究方法、传输系统、微波元件和器件以及测量方法都与普通的无线电波不同, 因此需要将微波从普通无线电波中单独划分出来专门加以研究。
4. 微波与低频电路不同, 在微波中, 电流、电压不具有明确的物理意义, 需要用电磁场和电磁波的概念和方法来完全描述。
5. 微波技术是研究微波信号的产生、放大、传输、发射、接收和测量的学科, 也是当今从事电子与信息学科研究所必备的基础知识。
6. 微波除军事用途之外, 在工农业、医学和科学研究等诸方面得到广泛应用, 特别是通信领域。
7. 微波技术分析方法
 - (1) 场理论
以麦克斯韦方程组为依据, 求得电磁场表达式, 获得电磁场分布及其传播特性和辐射特性。
 - (2) 传输线理论
以基尔霍夫定律为依据, 求得传输线上电流、电压表达式, 获得电磁功率的传输特性。
 - (3) 网络理论
“化场为路”, 主要用于研究和描述微波元件或系统参量及特性。

思考题

- 1.1 什么叫微波? 什么是射频? 微波波段是怎样划分的?
- 1.2 简述微波有哪些特征。
- 1.3 微波有哪些重要应用?

习 题

- 1.1 GSM 双频手机的频率分别为 900 MHz 和 1800 MHz , 其对应的波长各为多少?

第2章 传输线基本理论

2.1 引言

一、传输线的种类

用来传输电磁能量的线路称为传输系统,由传输系统引导向一定方向传播的电磁波称为导行波或导波(guided wave)。和低频段不同,微波传输线的种类繁多。图 2.1.1 中给出了微波传输系统各类传输线结构的横截面图。它们可以分为两大类:①传统波传输线,如平行双线、同轴线、矩形波导、圆形波导、椭圆波导及脊波导等;②集成电路传输线,如微带线、带状线、介质波导、镜像线、共面线、槽线、鳍线等等。

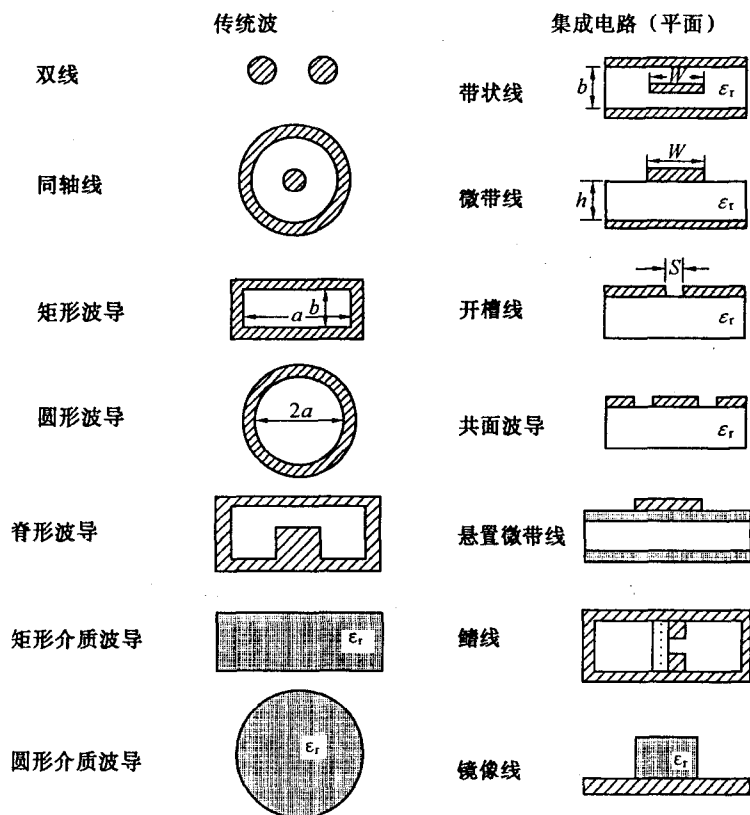


图 2.1.1 传输线和波导结构

微波传输线不仅能将电磁能量由一处传送到另一处,还可以构成各种各样的微波元件和电路或子系统,这与低频传输线截然不同。不同的频段,可以选不同类型的传输线。对传输线的选择要综合电气和机械特性,电气参数包括损耗、色散、高次模、工作频率与带宽、功率容量、元件或器件的适用性。机械特性包括加工容差与简易性,可靠、灵活,重量和尺寸。在许多应用中,成本也是一项重要考虑因素。

二、分布参数的概念

如图 2.1.2 所示,当频率很低时,导线中的电流是均匀分布的,电路或传输线中除集中表现出电阻、电容、电感元件参数外,引线之间、元件与元件之间的分布效应都可以忽略不计,电路的引线的长短不影响电路工作,这样的电路称为集总参数电路。当频率升高后,导线中电流开始出现趋肤效应,并开始向外辐射,因此,除了像集总参数电路中的各元件外,还存在分布电导、分布电容和分布电感,引线的长短都影响电路特性,这样的电路就为分布参数电路。图 2.1.3 为趋肤效应示意图。

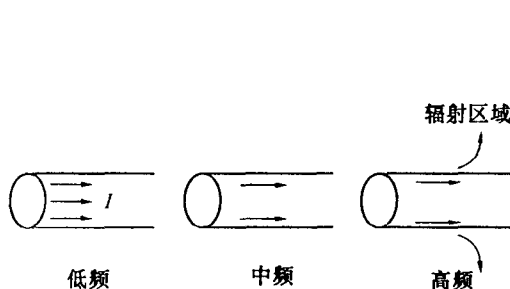


图 2.1.2 不同频率下金属导线上的电流分布

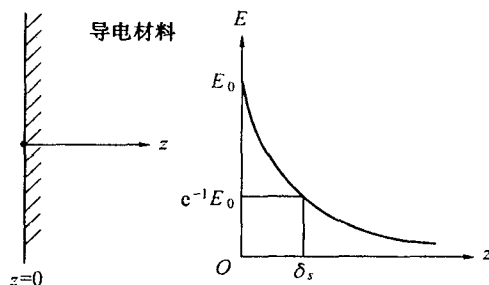


图 2.1.3 导电材料内部场

“短线”和“长线”：“长度”有绝对长度与相对长度两种概念。对于传输线的“长”或“短”，并不是以其绝对长度而是以其与波长比值的相对大小而论的。把比值称为传输线的相对长度(电长度)。在微波领域里,波长以厘米或毫米计。比如半米长的同轴电缆,传输频率为 3GHz,是工作波长的 5 倍,须把它称为“长线”;相反,输送市电的电力传输线(频率为 50Hz)即使长度为几千米,但与其波长(6000 km)相比小得多,因此只能称为“短线”。前者对应于微波传输线,后者对应于低频率传输线。因为频率很高时分布参数效应不能再忽视了,传输线不能仅当作连接线,它将形成分布参数电路,参与整个电路的工作,因此长线是分布参数电路。传输线在电路中所引起的效应必须用传输线理论来研究,即在微波传输线上处处存在分布电阻、分布电感,线间处处存在分布电容和漏电电导。用 R_1 、 L_1 、 G_1 、 C_1 分别表示传输线单位长度的电阻、电感、电导和电容,数值大小与传输线截面尺寸、导体材料、填充介质以及工作频率有关。表 2.1.1 列出了平行双导线和同轴线的各分布参数表达式。根据传输线上分布参数的均匀与否,可将传输线分为均匀和不均匀两种。本章讨论的主要是均匀传输线。

对一均匀传输线,由于参数沿线均匀分布,故可任取一小线元 dz 来讨论。因 dz 很小,可将它看成一个集总参数电路。用一个 Γ (T 或 π) 形四端网络来等效,如图 2.1.4(a) 所示。

于是,整个传输线就可看成是由许多相同线元的四端网络级联而成的电路,如图2.1.4(b)所示。这是有耗传输线的等效电路,对于无耗传输线(即 $R_1 = G_1 = 0$),其等效电路如图2.1.4(c)所示。

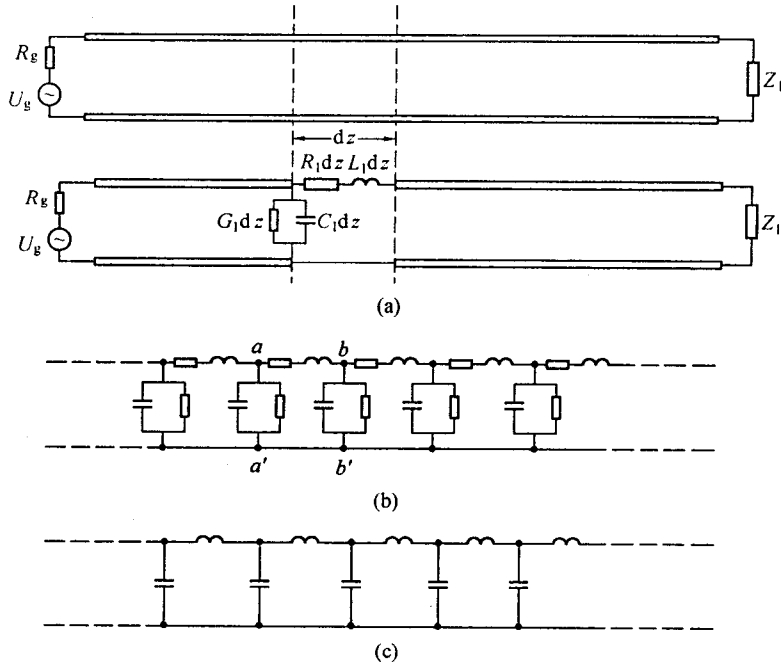


图 2.1.4 传输线的等效电路

表 2.1.1 平行双导线和同轴线的分布参数

参 数 \ 传 输 线	双导线	同轴线
$L_1/(\text{H/m})$	$\frac{\mu}{\pi} \ln \frac{D + \sqrt{D^2 - d^2}}{d}$	$\frac{\mu}{2\pi} \ln \frac{b}{a}$
$C_1/(\text{F/m})$	$\frac{\pi \epsilon_1}{\ln \frac{D + \sqrt{D^2 - d^2}}{d}}$	$\frac{2\pi \epsilon_1}{\ln \frac{b}{a}}$
$R_1/(\Omega/\text{m})$	$\frac{2}{\pi d} \sqrt{\frac{\omega \mu}{2\sigma_2}}$	$\sqrt{\frac{f \mu}{4\pi \sigma_2}} \left(\frac{1}{a} + \frac{1}{b} \right)$
$G_1/(\text{S/m})$	$\frac{\pi \sigma_1}{\ln \frac{D + \sqrt{D^2 - d^2}}{d}}$	$\frac{2\pi \sigma_1}{\ln \frac{b}{a}}$

注: σ_1 为导体是介质不理想的漏电电导率; σ_2 为导体的电导率, 单位为 S/m ; μ 为磁导率; ϵ_1 为介质介电常数。

有了上述等效电路就容易解释传输线上电压、电流不相同的现象。参看图 2.1.4(b), 由于 aa' 和 bb' 之间有串联电阻存在, 二处的阻抗不相等, 因而两处的电压也不相同; 又由线间并联回路的分流作用, 通过 a 和 b 点的电流亦不相同。同时还可看出, 当接通电流后,

电流通过分布电感逐次向分布电容充电形成向负载传输的电压波和电流波。就是说电压和电流是以波的形式在传输线上传播并将能量从电源传至负载。

2.2 传输线基本概念

一、传输线方程 (transmission line equations)

表征均匀传输线上电压、电流关系的方程式称为传输线方程。该方程最初是在研究电报线上电压、电流的变化规律时推导出来的,故又称做“电报方程”。

分析图 2.2.1 所示的微波传输系数。令传输线上距始端为 z 处的瞬时电压、瞬时电流分别为 u 、 i ; 在 $z + dz$ 处则分别为 $u + du$ 和 $i + di$ 。其中 u 、 i 既是空间位置 z 又是时间 t 的函数,即

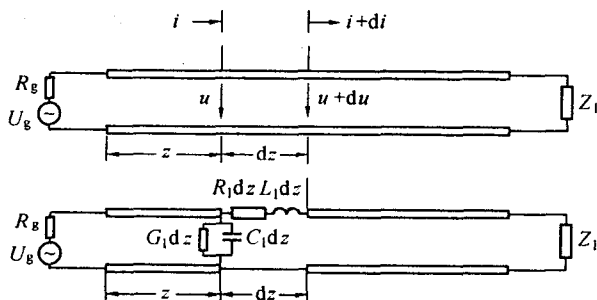


图 2.2.1 传输线等效电路

$$u = u(z, t)$$

$$i = i(z, t)$$

于是,在某一时刻经过微小线元 dz 后,电压、电流的变化分别为

$$- du = - \frac{\partial u}{\partial z} dz$$

$$- di = - \frac{\partial i}{\partial z} dz$$

我们知道,线元 dz 两端处电压、电流的变化(减小)是由于串联阻抗的电位降、并联导纳分流造成的,它们遵循基尔霍夫定律,即

$$- \frac{\partial u}{\partial z} dz = R_1 dz \cdot i + L_1 dz \cdot \frac{\partial i}{\partial t}$$

$$- \frac{\partial i}{\partial z} dz = G_1 dz \cdot u + C_1 dz \cdot \frac{\partial u}{\partial t}$$

消去 dz ,上式变为分布参数电路的微分方程式

$$- \frac{\partial u}{\partial z} = R_1 i + L_1 \frac{\partial i}{\partial t} \quad (2.2.1)$$

$$- \frac{\partial i}{\partial z} = G_1 u + C_1 \frac{\partial u}{\partial t} \quad (2.2.2)$$