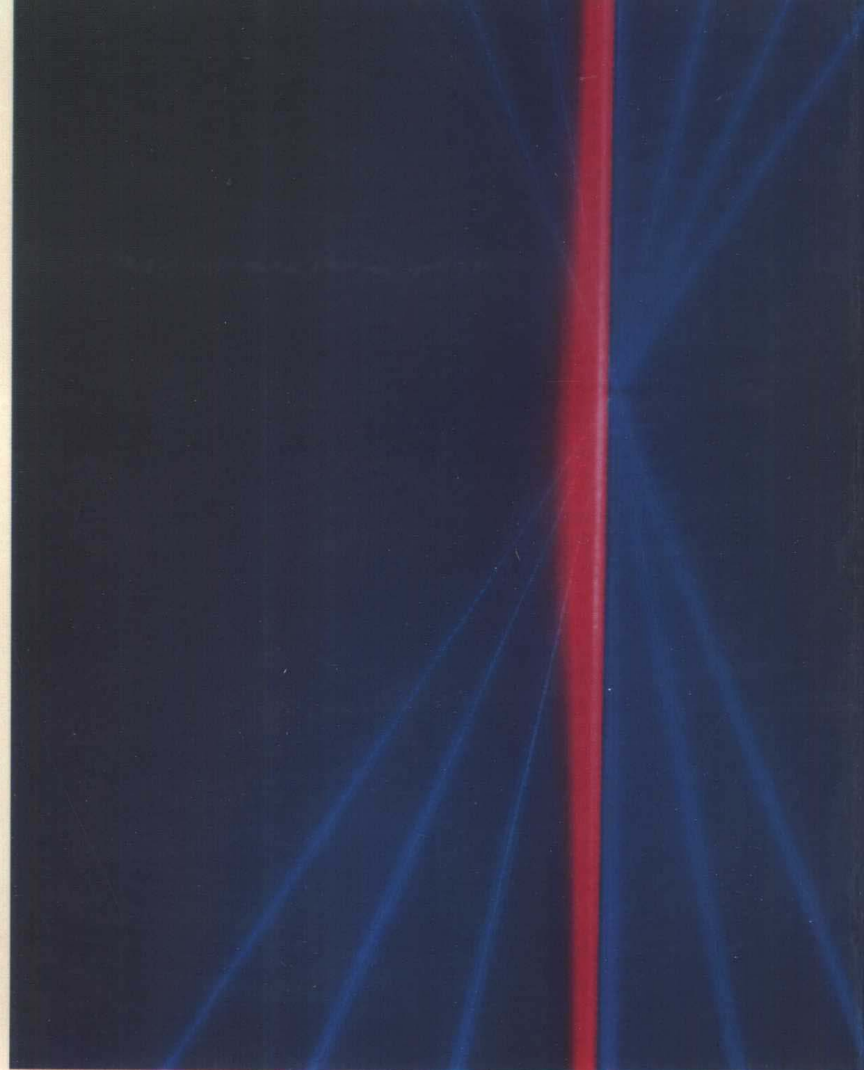
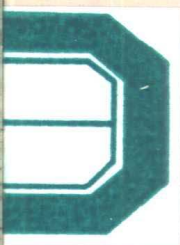


WEIBO
YU
GUANGDAOBO
JISHU
JIAOCHENG



微波与光导波技术教程

陈抗生 著



浙江大学出版社

微波与光导波技术教程

陈抗生 著

浙江大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

微波与光导波技术教程 / 陈抗生著. 杭州: 浙江大学出版社, 2000. 9

高等学校教材

ISBN 7-308-02400-8

I. 微... II. 陈... III. ①光波导-波导传输-高等学校-教材②微波传播-高等学校-教材 IV. TN01

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2000)第 32376 号

出版发行 浙江大学出版社

(杭州浙大路 38 号 邮政编码 310027)

(E-mail: zupress@mail. hz. zj. cn)

(网址: <http://www.zjupress.com>)

责任编辑 沈国明

排版 浙江大学出版社电脑排版中心

印刷 浙江良渚印刷厂印刷

经销 浙江省新华书店

开本 787mm×1092mm 16开

印张 21.25

字数 517千字

版印次 2000年9月第1版第1次印刷

印数 0001—1500

书号 ISBN 7-308-02400-8/TN·049

定价 30.00元

前 言

人类开始步入信息社会,从某种意义上说,信息社会是建立在将世界连接起来的无比巨大的通信网络之上的。正是通过这个巨大的网络,世界上各种各样产生、接收、处理、显示和利用信息的站点连接在一起。瞬息之间,万亿比特的信息从地球的一端传到另一端。

世间运动最快的物质是电磁波,真空中它以光速(3×10^8 m/s)传播。网络上万亿比特的信息就是以电磁波作为载体传播的。因此,以当今信息社会最重要的信息载体——电磁波的产生、传输、调制、开关、扫描、放大、频率变换、检测,以及以此为基础的信息存取、显示、传递、处理和利用为特征的信息电子与光子技术,已成为信息社会的一项基础技术。信息传输是其重要组成部分。作为信息载体的电磁波具有很宽的波谱,其中微波与光波得到最广泛的应用。研究微波与光波的传输对驾驭信息电子技术至关重要。广义地说,微波与光导波技术涉及微波与光波的产生、放大、传输、处理等多方面问题。本课程主要研究微波与光波的传输以及与传输相关的问题,并针对通讯、高速数字集成电路、微波集成电路、集成光路以及雷达、遥感、导航等诸多应用领域中涉及的微波与光波传输问题取舍教材内容,力求将各种分析方法融于一体,便于理解和掌握。

微波与光波波长相差 3~4 个数量级,它们的传播特性有很大的差别。历史上很长一个时期内微波与光波被分开研究,处理方法也各具特点,因此,微波技术、光波技术一般分作两门课程。到 20 世纪 70 年代,尤其进入 80 年代后,随着微电子、激光与通信技术的进步,微波与光波技术的交叉越来越明显,将微波技术、光导波技术组织在一门课程中教学成为一种实际的需要。从物理尺寸看,微波波导与光波波导虽然有 3~4 个数量级之差,但以波长量度,都在同一量级,因而微波与光波沿波导的传输用统一的方法去分析处理,微波技术与光导波技术组织在同一门课程中教学是可以做到的。国内已出版了几本将微波技术与光导波技术结合起来的教材,但如何将两者有机结合,还有许多问题要进一步研究。本书作者注意到,以波长作计量尺度,微波波导与光波波导没有本质差别。微波、光波沿波导纵向传播,与传播方向垂直的横向,电磁场必取驻波场分布,即电磁场在横向谐振。利用横向谐振原理可导出各类波导的色散关系,可从一个侧面将各类波导的分析统一起来。

微波与光导波技术要用到较多的数学,有时还不易理解。如何用工程技术人员熟悉的语言描述微波与光波的传播是很值得研究的问题。本课程从麦克斯韦(Maxwell)方程出发证明,就波的纵向传播而言,各类波导都可用传输线等效;而在与波传播方向垂直的横向,可用一网络表示。波导的等效电路模型在本书分析各类波导时反复得到应用,其优点是便于已熟悉网络理论与技术的电子工程技术人员理解。

各类实用的微波、光波导,尤其与器件连接的部分,边界条件很复杂,解析解很难得到,一般要借助计算机进行数值模拟。电磁问题的数值模拟在微波与光导波技术研究中越来越

重要。本书尽力把所研究的问题表示成计算机可求解的形式,并推荐 Matlab 作为首选的应用软件。如读者需要,作者可提供部分数值模拟程序。

本教材作业分两部分:习题以理解课程内容为主,专题研究侧重于应用本课程知识解决实际问题。从我们的教学实践看,专题研究得到学生的普遍欢迎,有利于学生知识创新能力的培养。

本教材主要针对电子信息类专业本科生教学的需要而编写,但也兼顾部分专业研究生教学的需要。

本教材作本科教学用时,有些章节(如第七、第十两章)可以不讲,请使用者留意。

以上编写本书的一些指导思想已在我们的教学中进行过多次实践,效果是好的。由于我们对微波与光导波技术这门课的教学研究还不够深入,具体经验也有限,书中不妥之处在所难免,欢迎使用本书的教师、同学及广大科技工作者批评指正。

微波、光导波技术已是一门成熟的技术,国内外有关文献、专著、教材不胜枚举。本书编写过程中参考了许多专家、学者的研究成果,在此一并致谢。主要参考资料在本书最后列出,专业性强的参考资料则同时在本书有关章节给出。

在本书撰写过程中,得到许多同志的鼓励、帮助与指导:周文教授、张克潜教授、张毓昆教授一直关心本书的出版,王湖庄教授、李文扬副教授对本书提出了许多宝贵意见,张云华博士为本书第九章写过一份初稿,并为第十章提供素材,在此表示感谢。美籍华人彭松村教授以及浙江大学信息电子工程系郑国武等多名研究生的研究成果在本书中被引用,在此也一并致谢。

本书由清华大学应嘉年教授主审。应教授在审定中对本书提出了许多宝贵意见,作者在此表示衷心的感谢。

陈抗生

1999 年 10 月 18 日

目 录

1 绪论	(1)
1.1 电磁波谱.....	(1)
1.2 微波与光波的发展历史及其应用.....	(5)
1.3 本课程的结构安排.....	(8)
习题一	(9)
2 传输线基本理论与圆图	(10)
2.1 平行双导线传输线.....	(10)
2.2 同轴线传输线.....	(15)
2.3 色散与群速.....	(17)
2.4 传输线特征量沿传输线的变换.....	(20)
2.5 传输功率与传输效率.....	(27)
2.6 传输线圆图.....	(29)
2.7 传输线圆图应用举例.....	(34)
2.8 阻抗匹配及阻抗匹配器.....	(36)
习题二	(39)
3 麦克斯韦方程及波导结构的传输线模型	(43)
3.1 麦克斯韦方程与物质的结构方程.....	(43)
3.2 时谐电磁场的坡印廷定理.....	(47)
3.3 边界条件和唯一性定理.....	(48)
3.4 波导的传输线模型.....	(50)
3.5 均匀介质的传输线模型及其平面波解.....	(56)
3.6 介质交界面的等效电路模型及其对平面波的反射与折射.....	(61)
3.7 单层平板介质的等效电路模型及其对平面波的反射与透射.....	(65)
习题三	(67)
4 柱形金属波导	(69)
4.1 矩形波导的传输线模型及其解.....	(69)
4.2 矩形波导的模式与场分布.....	(78)

4.3	矩形波导的色散特性与特征阻抗、等效阻抗	(82)
4.4	矩形波导传输的脉冲功率容量与损耗	(87)
4.5	圆波导	(91)
4.6	同轴线中高次模	(101)
4.7	柱形波导元件	(104)
	习题四	(112)
5	介质光波导	(114)
5.1	横向谐振原理	(115)
5.2	单层平板介质光波导	(117)
5.3	多层平板介质光波导	(122)
5.4	条形介质光波导的近似分析	(127)
5.5	介质波导侧面不连续效应的定性分析	(131)
5.6	光纤传播特性的射线分析	(133)
5.7	光纤传输特性的波动分析	(138)
5.8	光纤的损耗特性	(152)
5.9	光纤传输系统中无源光器件	(155)
	习题五	(162)
6	微带、鳍线与共面波导	(164)
6.1	结构与应用特点	(164)
6.2	横向有源等效网络与横向谐振	(167)
6.3	谱域法	(172)
6.4	色散特性、等效阻抗与损耗	(180)
6.5	微带、鳍线与共面波导的工程设计	(184)
6.6	微带线应用	(189)
6.7	微带线与同轴线及矩形波导的过渡	(194)
	习题六	(196)
7	周期结构	(197)
7.1	周期结构的一般性质	(198)
7.2	周期层状介质	(202)
7.3	正弦变化的周期介质	(206)
7.4	非对称周期金属栅及梳形慢波线	(210)
7.5	介质栅天线	(216)
7.6	金属栅加载毫米波介质天线	(223)
7.7	光纤光栅	(228)
	习题七	(234)

8 谐振器	(235)
8.1 结构特点及其等效电路	(235)
8.2 谐振器的特征参数	(238)
8.3 空腔谐振器	(241)
8.4 微带谐振器	(250)
8.5 介质谐振器	(254)
8.6 开放式谐振器	(260)
8.7 谐振器与传输线的耦合	(262)
习题八	(267)
9 波导器件的等效网络分析	(270)
9.1 波导器件的分类与等效网络表示	(270)
9.2 N 端口网络输入、输出关系的矩阵表示	(272)
9.3 无源、互易和无耗网络矩阵特性	(279)
9.4 波导器件的等效网络矩阵特性	(282)
习题九	(292)
10 波导器件等效网络参数的数值模拟	(294)
10.1 两多层介质波导交界面阶跃不连续的等效网络表示及其变换	(294)
10.2 谐振法数值模拟波导器件的网络参数	(306)
10.3 时域有限差分(FD-TD)方法的基本原理	(310)
10.4 FD-TD 法模拟微带器件的等效网络参数	(317)
习题十	(323)
附录 1 磁化铁氧体中的平面波及铁氧体波导器件	(324)
2 坐标与算符 ∇	(330)
3 矢量恒等关系	(331)
主要参考文献	(332)

1 绪 论

微波与光波的传输是微波与光导波技术研究的重要内容。我们常见的应用系统，如通信系统、雷达系统、无线电导航系统、遥感系统以及众多的加热、记录、控制系统，微波与光波的传输在其中起重要作用。本章 1.1 节电磁波谱主要介绍微波与光波的传播特性，1.2 节简述微波与光波技术的发展历史及其应用，1.3 节是本课程的结构安排。

1.1 电磁波谱

信息既可以由分立的电磁能量脉冲串发送，也可以加载在简谐变化的电磁波上传输。前者描述起来更普遍，但分析起来较难；后者易于分析研究，而且实际应用中微波与光波对信息的传输大多取后面这种形式。本课程关注的主要也是后者。事实上，利用傅里叶展开，电磁能量脉冲可以用很多不同频率分量的谐变电磁波叠加表示。所以，针对后者进行重点分析也不失一般性。简谐变化的电磁波可以表示为

$$V = A \sin[2\pi(ft + z/\lambda)] \tag{1.1.1a}$$

或

$$V = A \exp[j2\pi(ft + z/\lambda)], \tag{1.1.1b}$$

式中 t 代表时间， z 代表距离。它有三个特征量，即幅值 A 、频率 f 和波长 λ 。频率 f 也可用角频率 $\omega = 2\pi f$ 表示。信息可以加在这些特征量上。频率的单位用赫(Hz)，波长的单位用米(m)。波长与频率的乘积即电磁波的传播速度，它等于光速 c ：

$$f\lambda = c. \tag{1.1.2}$$

真空中光速近似等于 3×10^8 m/s。频率和波长的变化范围可以覆盖多个数量级。为了简化数字，频率常用千赫、兆赫等表示，波长常用千米、毫米等表示，如表 1-1、1-2 所示。

表 1-1 频率常用单位

名 称	简 写	大 小
千赫(kilohertz)	kHz	10^3 Hz
兆赫(megahertz)	MHz	10^6 Hz
吉赫(gigahertz)	GHz	10^9 Hz
太赫(Terahertz)	THz	10^{12} Hz
拍赫(Petahertz)	PHz	10^{15} Hz

表 1-2 波长常用单位

名 称	简 写	大 小
千米(kilometre)	km	10^3 m
毫米(millimetre)	mm	10^{-3} m
微米(micrometre 或 micron)	μm	10^{-6} m
纳米(nanometre)	nm	10^{-9} m

波长与频率互为倒数关系. 习惯上工程师喜欢用频率表示波, 而科学家喜欢用波长表示波. 这个界线已越来越模糊. 目前, 频率在 100 GHz 以下的波倾向用频率表示, 100 GHz 以上用波长表示, 但微波这个名称有点例外, 它的频率一般低于 100 GHz.

1.1.1 电磁波谱图

理论上电磁波的频率可以从直流到无穷大, 实际上我们所掌握的电磁波的频率范围是有限的. 电磁波可用频率的范围称为电磁波谱, 如图 1-1 所示. 从图 1-1 可见, 普通无线电波, 包括甚低频(VLF, 3~30 kHz)、低频(LF, 30~300 kHz)、中频(MF, 300~3000 kHz)、高频(HF, 3~30 MHz)、甚高频(VHF, 30~300 MHz), 频率从几 kHz 到 300 MHz. 如用波长来称呼, 甚低频、低频、中频、高频、甚高频分别又叫做超长波、长波、中波、短波、超短波, 波长从 10^5 m 至 1 m. 广义地说, 微波是指频率从 300 MHz 至 300 GHz 范围内的电磁波, 其相应的波长范围是 1 m 至 1 mm. 根据应用上的特点, 微波又可细分成分米波、厘米波、毫米波, 见表 1-3. 微波与红外的过渡段称为亚毫米波. 光波所指的频率范围比可见光(380~770 THz)要宽. 从现代激光和光学系统应用的频率来看, 光波一般是指频率从 100 THz 至 1 000 THz 这段电磁波谱, 相应的波长为 3 μm 至 300 nm. 比可见光波长更短的依次是紫外线、X 射线、 γ 射线.

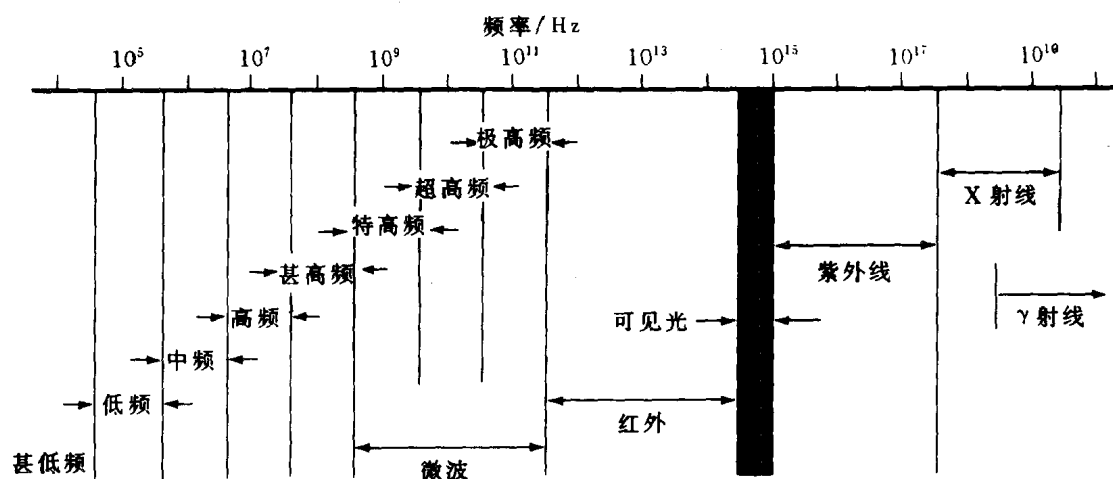


图 1-1 电磁波谱图

表 1-3 微波波段

波长范围 /m	频率范围	波段名称			备 注
		按波长	按频率	代号	
10~1	30~300 MHz	米波	甚高频	VHF	普通无线电波与微波的过渡
1~0.1	300~3 000 MHz	分米波	特高频	UHF	微波
0.1~0.01	3~30 GHz	厘米波	超高频	SHF	
0.01~0.001	30~300 GHz	毫米波	极高频	EHF	
0.001~0.000 01	300~30 000 GHz	亚毫米波			微波与红外的过渡

有时用一些特定的字母代表微波中的某一波段,这些代号起源于初期雷达研究的保密需要,后来沿用至今,没有严格和统一的定义。比较通行的代号如表 1-4 所示。

表 1-4 雷达波段代号

波段代号	P	L	S	C	X	K	K _u	Q	V
波 段	米波	22 cm	10 cm	5 cm	3 cm	2 cm	1.25 cm	8 mm	4 mm

1.1.2 电磁波大气传输窗口

要实现信号的远距离传输,传输过程中损耗一定要小。利用接近地球表面的空间传递信息时,要考虑大气对电磁波传输的影响。大气对于有些频率范围的电磁波是透明的,称为大气窗口,见图 1-2。第一个较宽的大气窗口覆盖了从射频到厘米波这一段电磁波谱。在波长从 10 mm 到 1 mm 的波段也有几个窄的大气窗口。这些大气窗口在通信、雷达、遥感等领域得到广泛应用。在光波段又有一个很宽的大气窗口,其中包括为人眼所感知的可见光窗口。紧靠光波的红外也有很多窄的窗口。由于大气中微粒(如很小的水滴、尘埃)散射引起的损耗,光波通过大气的传输只能在短距离上得到应用。

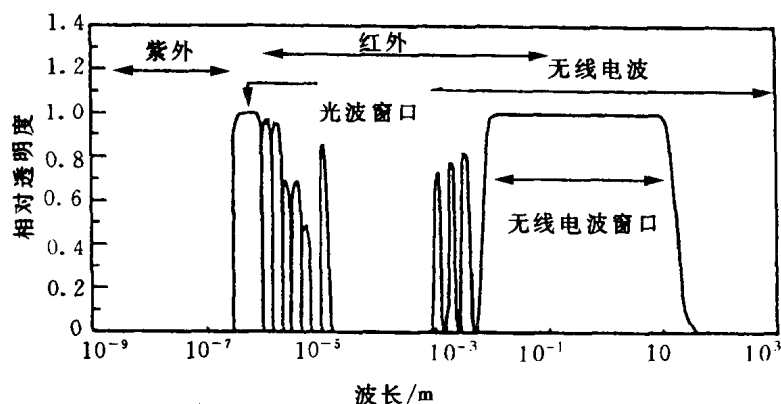


图 1-2 电磁波大气传输窗口

1.1.3 不同波段电磁波传播特性

电磁波谱的各个波段电磁波在空间的传播特性是不一样的。长波可以沿地球的弯曲表面传播得很远,这种传播方式叫地波传播。短波可以借助 60~300 km 高空的电离层折射返

回地面,这种传播方式叫天波传播.到了超短波、微波和光波波段,电磁波则能穿过电离层达到外层空间(视距传播),这种传播方式称为空间波传播.考虑大气吸收,穿透电离层的视距传播,通常采用微波.地球和宇宙空间之间的通信、卫星通信必须使用微波.陆地移动通信越来越多地采用微波.微波视距传播用于陆地长距离通信有它不利的一面,即在地球上它不能传播到很远的地方,因为地球表面是弯曲的表面,一个高 100 m 的发射天线其作用半径只有约 40 km.为了解决微波在陆地上传播距离有限这个困难,在发射台与接收台之间设立若干中继站,站与站之间距离不超过视距,这样微波信号就可像接力棒一样,一站一站地传下去.也可把中继站设在人造地球卫星上,这样通信的距离就很大了.目前广泛使用的是赤道上空距地球表面约 36 000 km 的同步轨道上的同步卫星.三颗同步卫星就可覆盖全球的大部分面积(南北极除外).

光波通过大气衰减较大,光波通过大气传输只能在短距离上实现.光波的长距离传播要用低损耗的光纤.1970 年,美国康宁玻璃公司研制出第一条光导纤维(损耗为 20 dB/km,波长为 0.8 μm).目前工作在 1.45~1.65 μm 波长的商用低损耗石英光纤每千米损耗可小于 0.2 dB.

1.1.4 从微波到光波

由于技术的限制,电磁波谱的利用在历史上是从低频段不断向高频段延伸的.先是一般的无线电波,然后是微波和光波.因为电磁波频率越高,频带越宽,携带的信息量越大.

任何通信系统为了传递一定的信息必须占有一定的频带.例如人耳所能听到的声音频带范围是 20~20 000 Hz,如果只要听懂对方语言,只需传递 300~3 400 Hz 这一频带的信号就足够了.也就是说,一个语音信道至少要有 3 000 Hz 的频带.普通电话就是这样设计的.因此,电话里的声音可以听懂但不悦耳,也就是不够逼真.为了相当逼真地传送语音和音乐,则需要占 6~15 kHz 的频带,这就是广播所要求的频带.传送电视图像需要更宽的频带.一路彩色电视加上伴音要占据 8 MHz 的频带.如果我们要传送几千路电话,几十路电视,需要的频带在 GHz 量级.如果工作频带为载频的 10%,载波频率就是 10 GHz,这是典型的微波工作频率.随着多媒体的发展,用户要求传送的信息量越来越大,所占频带越来越宽,这就要利用光波来传输.工作在 1.45~1.65 μm 波长的低损耗石英光纤,其带宽可达 2.5×10^3 GHz,比微波厘米波段带宽高出两个数量级.理论计算表明,一根光导纤维传输数据的速率可以高达 20 000 Gb/s,相当于在几分钟内把人类有史以来的信息传输完毕.所以,现有通信网干线大多用光纤.

频率提高的另一优点是易于实现窄波束的空间辐射.雷达是利用无线电波的反射来测定目标位置的.为了精确定位,必须让无线电波定向发射,也就是聚成一个窄的波束,以判断反射波究竟是从哪个方向反射回来的.为了使波束定向发射,必须使用尺寸远大于波长的天线.对于常用的抛物面天线,发射电磁波的波束角约等于

$$\theta \approx \frac{140^\circ}{D/\lambda}.$$

式中 D 为抛物面直径, λ 为波长.如欲得到波束角为 5° 的波束,抛物面直径与波长之比为 28.如果工作于短波,即使选最短波长(10 m),也要使用一个直径达 280 m 的抛物面天线,这样大的天线在地面上已十分困难,更不要说装在舰船或飞机上了.如果工作于微波,选用

3 cm 波段,则抛物面天线直径只有 84 cm. 这样小的天线,即使装在飞机上也没有困难. 如果要精确定位,波束要更窄,就要用毫米波了.

光波的波长越短,定向辐射性能越好. 但由于大气吸收,通过大气点对点进行陆地光通信是不适合的. 对于空气稀薄的深空,如卫星之间通信,光通信很有潜力.

1.2 微波与光波的发展历史及其应用

1.2.1 发展历史

人类对光波的应用远早于微波. 早在纪元前就有关于对光的观测和应用记载,但光学作为一门科学直到 17 世纪才发展起来. 天文学家伽利略(Galileo,1564~1642)建立了折射望远镜,标志着天文学的开始. 在许多领域作出杰出贡献的科学家牛顿(Newton)在光学方面也有重要建树. 他研究了白光通过棱镜的色散,发明了反射望远镜. 18、19 世纪光学的理论研究一直没有间断过. 特别是电磁波理论发展后,认识到光的电磁本质,人们对光的研究升华到一个新的阶段,但对光波的应用仍然十分有限. 直到 20 世纪后半叶,人们对光波的应用才有了一个极大的飞跃,这是由许多因素促成的,其中最重要的是激光的发明,尤其是半导体固体激光器的进步. 光纤通信、光盘存贮、电子光学显示、红外成像与遥控、激光打印、复印、激光全息、激光手术等都是近 30 年来光波应用的杰作.

微波的研究比光波晚得多,但它从研究一开始就受到需求推动. 麦克斯韦(Maxwell, 1831~1879)总结前人有关电磁运动规律研究的成果并加以推广,提出了一组描述电磁运动的数学方程. 这组方程后人以他的名字命名,就是著名的麦克斯韦方程. 直到今天,这组方程还是我们研究微波和光波的基础. 麦克斯韦方程预言了电磁波的存在. 1885~1889 年期间,亨利·赫兹(Hertz)不仅在实验上证明了电磁波的存在而且发现了无线电波,并指出光波遵循的反射、折射定律也适用于微波. 马可尼(Marconi,1874~1937)最早指出低频无线电波可用于通信,并在 1901 年实现了低频无线电波横跨大西洋的传输. 这导致了无线电通信的迅速发展,先是在较低的频率(长波与中波),然后是高频(短波). 到 30 年代,微波点对点通信、横跨英吉利海峡的微波中继接力通信试验与实现标志着微波应用的兴起. 在 30 年代,Karl G. Jansky 构筑了一个很大的天线并用它接收到从遥远星球来的射电噪声,这是射电天文学的开始. 第二次世界大战期间,雷达技术同时在几个国家发展起来,微波磁控管问世后,微波雷达成为雷达的主要形式. 因为频率越高,雷达的角分辨率也越高.

卫星通信的概念早在 1945 年就提出了,50 年代火箭技术的进步为卫星通信打下了基础,到 60 年代卫星通信成为微波的又一应用热点.

雷达、简易卫星通信、微波中继接力通信成为 70 年代微波的三大应用领域. 自此,微波应用以更快的速度扩展到其他领域,如微波遥感、微波加热. 到 80 年代,尤其是进入 90 年代后,移动通信成为微波应用的最热门课题. 目前微波和光波的应用系统大体包括通信、雷达、无线电导航、遥感、加热和能量传输、记录与控制等系统.

1.2.2 通信系统

所谓微波与光波通信系统就是在信息的源头和宿主之间借助微波与光波实现信息传递

的系统。根据应用要求、工作频率、传输媒体等方面的差别,通信系统大体分为光纤通信、微波中继接力通信、卫星通信、移动通信和广播五大类。

光纤通信概念在 60 年代提出后,近 30 多年得到飞速发展,这得益于低损耗光纤与固态器件的技术进步。通信网的干线 90% 以上采用光纤。尽管光纤损耗已降低到每千米小于 1 dB,在长距离光纤通信系统中,信号传输一定距离后,被衰减的信号要给予再放大;如果信号有某种程度畸变,还要加以纠正。因此,信号经光纤传输一定距离后要接一中继器。中继器实际上是背靠背连在一起的接收机和发送机。接收机把接收的光信号转变成电信号并加以放大,发送机又把电信号转变成光信号发送出去。近来光纤放大器技术的成熟,中继器对光信号的放大不必再经过光-电、电-光变换过程,可直接对光纤传送来的信号加以放大,使光纤通信系统又上了一个台阶。

微波通信用的频率一般在 1~20 GHz 之间。微波通过大气传输的特性与光波不同,大气对微波传输衰减很小,所以陆上长距离微波通信常用大气作传输媒体。但是,微波的视距传播特性使它不能直接传播到地球表面很远的地方,所以,要进行陆上点到点的微波通信,中间要设置若干中继站,站与站之间距离不超过视距,一般为 50 km。微波中继站接收天线接收前一站发射来的信号并作放大、均衡等处理,又从另一发射天线定向发送到下一中继站,如此实现长距离微波中继接力通信。

第一个通信卫星是 1962 年发射升空的。卫星通信就是把微波通信中继站设置在人造地球卫星上,这样通信距离和广播的服务半径就很大了。赤道上空距地面 36 000 km 的同步轨道上安置 3 颗同步卫星就可覆盖地球的大部分面积(南北极除外)。

移动通信是近年来通信发展最快的一个领域。移动通信是指一个固定基站和众多移动站之间的通信。基站可以固定在地面上也可以设置在卫星上。移动站小的可以由人携带,也可设在移动的汽车、火车、飞机和舰船上,它们既能接收又能发送电磁信号。

广播与一般通信的差别在于它的通信是单向的,一个发射站向众多的接收机发送信息。发射机向接收机发射的信号必须足够强,以便接收机用很小的天线就能检测到。所有陆上广播系统用频率都低于微波,但卫星广播用的下行频率约 12 GHz,属于微波,这种广播简称 DBS(direct broadcast satellites)。从技术角度看,卫星广播与一般卫星通信的区别在于卫星广播使用指定的频率,且卫星上要安装较高功率转发器以便接收机用较小的天线就可接收。

1.2.3 雷达系统

雷达是利用电磁波来发现并探测目标坐标位置的。雷达技术的产生与发展首先来自军方的需要。目前,雷达不仅在军事上,而且在民用上也得到广泛应用。雷达发射机发射一个很窄的电磁波束,当它遇到可反射电磁波的目标(障碍物)后,此目标将向各个方向辐射电磁波,其中很小一部分又返回雷达发射站。接收天线(多数情况下与发射机共用一个天线)接收目标反射回来的微弱信号并送至接收机。接收机具有很高的灵敏度,可检测微弱信号的存在。通过测量目标反射回来的信号相对于初始发射信号的时间延迟,可决定目标与雷达发射站之间的距离。目标的角向位置精度取决于雷达发射波束的定向性,如果目标与雷达发射站有相对运动,通过测量多普勒频移可确定目标的移动速度。

1.2.4 无线电导航

无线电导航对于确定船舶和空中飞行器的位置十分重要。用于船舶和空中飞行器的无线电导航系统通过接收陆上基站或卫星传来的信号确定它们的位置。已有多套无线电导航系统应用,最重要的是全球定位卫星(GPS)系统,整个系统有 18 颗绕地卫星,每一个卫星载有高稳定铯和氢激光钟。用户接收一组卫星的信号(一般为 4 个),通过测量其时间差决定用户所在位置。GPS 给出的位置信息是三维的,陆地、海上、空中均可用。定位精度一般在几米,最高已达厘米量级。

1.2.5 遥感系统

遥感系统用来检测自然物体辐射的能量或者从太阳甚至更远的星球辐射来的能量。这些能量具有噪声特性,一是不相关,二是覆盖整个电磁波谱。遥感系统主要由天线及高灵敏度接收机组成。传输媒体不是大气就是深空。接收到的能量极为微弱,需要一种叫做射电望远镜的特殊的集成接收机,这种接收机可以把一个时间周期内的能量积累起来。

红外热检测与成像则是光学遥感新近的应用。微波遥感是 20 世纪后半叶发展起来的,最著名的应用是射电天文学。星载微波遥感、光学遥感装置联合起来可很好地观测大地、海洋、冰层的状况。微波、毫米波气象学利用氧、水蒸汽及其他气体的共振吸收谱线测量大气较低层的构成。

1.2.6 加热和能量传输

微波和光波也是一种能量。利用材料对微波、光波的吸收效应,可对材料进行加热。高功率微波和光波的应用系统有微波加热和干燥、家用微波炉、等离子体和气体的诊断、医学理疗、激光切割、激光手术、太阳能卫星等。微波加热可从材料内部热起来,具有热效率高、透热深度大、加热迅速等一系列优点。为了防止高能微波对人体的影响,微波能被严格限制在对微波密封的腔体里面。微波治癌则要小心地将微波束对准癌变组织加热而杀死癌细胞,对周围正常组织的加热控制在容许值以内,从而达到治癌的目的。

高功率微波也用于研究等离子体和气体的特性。有很多气体谐振谱线位于毫米波段,它们与高功率微波的相互作用可作为有效的诊断工具。

激光的运用范围很广,从金属材料的切割到白内障切除手术,其主要优点是光束的形状、能量、运动轨迹可精确控制。

最丰富的光能是太阳能,晴天地球赤道附近太阳光功率密度约为 1.4 kW/m^2 。考虑大气层对光的吸收,大气外层光功率密度还要高。如何使大气外层光能为人类利用是人们长期努力追求的目标。一种方案是建造太阳能卫星,由卫星接收太阳能并将太阳能转变成微波能,再通过卫星与地球上的巨大天线,将微波能传送到地球上。

1.2.7 控制和记录

光波和红外在控制和记录方面的应用日益重要。红外遥控器已深入到千家万户。遥控器中发光二极管发出一束编码的红外光为电视机上的红外接收器接收从而决定电视机的工作模式。光学条形码译码器接收从条形码反射回来的光信号,此信号经过透镜系统为光敏二

极管检测,从而完成译码。

光存储记录系统近年来发展甚为迅速,最早发展的是数字音响系统用的光盘(compact disc, CD),后来是记录视频图像的光盘。一张普通盘片可存储 70 min 压缩后的电视信息。光盘只读存储器、可擦存储器在计算机中得到广泛应用。

复印机通过透镜系统将一张纸上的图像拷贝到另一张纸上。激光打印在复印的概念上又进了一步,利用编码的激光束和光学传输系统将计算机数据拷贝到纸上。

照相机、摄像机用来记录可视图像。照相机对图像的记录基于材料的光敏化学特性,摄像机则用电子的方法将图像记录在电荷耦合器件阵列上。

从以上列举的微波和光波应用系统可见,微波和光波的应用已渗透到现代生活的各个方面。所列举的应用还不全面,今后还会有新的应用问世。在这些应用系统中,信号的产生、传输、处理、检测都是不可或缺的。本课程侧重于微波和光波的传输,对于掌握并进一步发展这些应用系统十分必要。

1.3 本课程的结构安排

第 1 章是绪论,第 2 章为传输线基本理论与圆图。本书以后分析中尽量将各类波导等效为传输线。掌握传输线基本理论对于学好本课程十分重要。圆图在微波发展史上起到里程碑的作用,是掌握微波十分有效的工具。第 3 章是关于麦克斯韦方程及波导结构的传输线模型。麦克斯韦方程是分析各类波导的出发点。该章从麦克斯韦方程出发证明从微波到光波的各类波导都可用传输线等效。第 4~6 章分别分析了微波波段的柱形金属波导,光波段的介质波导以及用于微波、毫米波的金属-介质波导,包括微带、鳍线与共面波导。第 7 章为周期结构,第 8 章为谐振器,基本分析方法则是第 4~6 章波导分析方法的延伸。前面几章,电磁波都限制在波导、谐振器这类特定的结构中。最后两章讲述各类波导器件的等效网络表示及网络参数的数值模拟。

以微波与光波导为基础的各类波导器件都与特定的波导结构有关。相关的波导器件及其应用分别放在柱形金属波导,介质光波导,微带、鳍线与共面波导三章后面,作为波导应用的例子给出。这样安排既节省篇幅又利于理论结合实际。

微波与光导波技术在现代集成电路与集成光路中有重要作用。随着数字电路速度的提高,脉冲宽度越来越窄,其频谱的主要分量逐渐提高并已进入微波甚至毫米波。集成电路芯片上互连线,简单的金属连线概念已不适用,要把它看成是传输电信号的波导,要考虑波导的色散与损耗。因此,本课程关于波导的分析对与集成电路兼容的具有平面结构的波导给予了较多的关注。

为提高读者数值求解电磁问题的能力,本课程优先推荐读者应用工具软件 Matlab 求解本课程中遇到的电磁问题,使读者从枯燥的计算中解脱出来,把注意力集中在概念的掌握、计算方法与工具软件的应用上。

专题研究是本课程作业的重要内容,着眼于知识创新能力的培养。专题研究题目及数量可根据实际教学情况而定。

习 题 一

1. 就你所知,说明电磁波谱是一项极其宝贵的资源.
2. 举例说明:应用需求推动了微波、光导波技术的发展,反过来微波、光导波技术的发展又开拓了新的应用.
3. 你准备怎样学好微波与光导波技术这门课?