

微波信息 传输技术

宁平治 闵德芬 编

上海科学技术出版社

微波信息传输技术

宁平治 闵德芬 编

上海科学技术出版社

微波信息传输技术

宁平治 闵德芬 编

上海科学技术出版社出版

(上海瑞金二路450号)

总发行所上海发行所发行 上海东方印刷厂印刷

开本 787×1092 1/16 印张 26 字数 625,000

1985年9月第1版 1985年9月第1次印刷

印数: 1—6,200

统一书号: 15119·2378 定价: 5.30元

前 言

本书是为理科大学与微波有关专业编写的教学参考书,对内容适当选择亦可做为工科大学与微波有关专业的教学参考书,同时照顾到工程技术人员的需要。

本书的编写原则是,第一、重视系统阐述基本原理,对书中大部分公式和定理做适当推导和证明;第二、兼顾工程应用实践的需要,在阐明原理后大多给出有用的数据和图表,以及设计公式或设计知识;第三、适当反映微波科学的新发展。

本书选材侧重微波传输,重点为波导、传输线、不均匀性、谐振器及无源器件,这些内容构成本书的核心部分(第三章至第七章)。此外,第一章绪论介绍了微波的基本特点和应用现状,第二章复习了电磁波的一些基本性质,作为学习以后章节的准备,第八章对微波电真空器件和微波半导体器件做了定性介绍。

承蒙郑大钊同志为本书第三章撰写了许多精采而新颖的内容,包括椭圆波导、脊形波导、过模波导、H形波导和槽形波导等,其中既有必要的理论,也有适于工程应用的资料。

本书前身是编者所写微波讲义,当时谢一冈同志参加了有关铁氧体器件的编写工作。原讲义重印前曾由朱遐教授审阅修改并补充了有关无源器件的若干内容。正式出版前编者又进行了较大幅度的增删修改,以便加强基础理论和适当反映微波科学的新发展。

陈尔励同志对本书的修改工作提出过有价值的书面建议,并就微带阻抗计算等问题与编者进行过有益的讨论。编者对在编写工作中提供过各种形式的支持和帮助的同志表示衷心的感谢。

编者热诚欢迎读者对本书提出各种批评和建议,以便日后改进。

编 者

目 录

前 言

第一章 绪论

§ 1-1 微波波段的划分	1
§ 1-2 微波的某些特点	1
§ 1-3 微波的应用	6

第二章 电磁波

§ 2-1 麦克斯韦方程	10
§ 2-2 波动方程	13
§ 2-3 平面电磁波	16
§ 2-4 能量关系	20
§ 2-5 边界条件	23
§ 2-6 表面电流	25
§ 2-7 极化	27
§ 2-8 反射和折射	29
§ 2-9 辐射	35
§ 2-10 互易定理	37
§ 2-11 速度	38

第三章 波导

§ 3-1 一般讨论	42
§ 3-2 矩形波导中的场分布	47
§ 3-3 矩形波导的传输特性	52
§ 3-4 圆波导波动方程的解	64
§ 3-5 圆波导的损耗和远距离传输问题	68
§ 3-6 椭圆波导传输特性的理论分析	74
§ 3-7 椭圆波导的结构设计与应用	87
§ 3-8 波导波型的正交性	93
§ 3-9 波导中简并波型的耦合	98
§ 3-10 脊形与过模矩形波导	103
§ 3-11 表面波导	110

第四章 传输线

§ 4-1 一般讨论	123
§ 4-2 同轴线	128
§ 4-3 计算传输线特性阻抗的保角变换法	133
§ 4-4 对称带状线	140
§ 4-5 不对称带状线	147
§ 4-6 微带	151
§ 4-7 传输线上波的传播	159
§ 4-8 阻抗圆图	165

第五章 波导和传输线的不均匀性

§ 5-1 等效电路	170
§ 5-2 微波网络参量(四端网络)	174
§ 5-3 矩形波导的不均匀性	181
§ 5-4 矩形波导不均匀性的场分析举例	189
§ 5-5 微带的不均匀性	193
§ 5-6 多口网络参量	197
§ 5-7 波导分支	202
§ 5-8 对称Y形分支与本征值问题	212
§ 5-9 波导的耦合探针	219
§ 5-10 波导的耦合孔	223

第六章 谐振器

§ 6-1 集中参数谐振回路	231
§ 6-2 谐振传输线	236
§ 6-3 同轴线谐振器	244
§ 6-4 矩形波导谐振器	248
§ 6-5 圆柱波导谐振器	252
§ 6-6 环形谐振器	258
§ 6-7 其他谐振器	264
§ 6-8 空腔谐振器的微调	271
§ 6-9 空腔谐振器与外电路的连接	274
§ 6-10 空腔谐振器的耦合元件	277

第七章 无源器件

§ 7-1 支节阻抗变换器	283
§ 7-2 单节传输线阻抗变换器	289
§ 7-3 阶梯式阻抗变换器	292
§ 7-4 渐变线阻抗变换器	305
§ 7-5 低通滤波器	307
§ 7-6 高通和带通滤波器	316
§ 7-7 定向耦合器	327
§ 7-8 衰减器和移相器	336
§ 7-9 微波铁氧体的主要性质	340
§ 7-10 微波铁氧体器件	350

第八章 有源器件

§ 8-1 微波电真空器件	360
§ 8-2 反射速调管	363
§ 8-3 磁控管	376
§ 8-4 行波管	382
§ 8-5 正交场放大管	386
§ 8-6 微波电真空器件的发展	389
§ 8-7 微波半导体器件概述	390
§ 8-8 变容管	392
§ 8-9 肖特基势垒二极管	399
§ 8-10 体效应二极管	404

第一章 绪 论

§ 1-1 微波波段的划分

微波通常指频率约为 $10^9 \sim 10^{12}$ Hz 范围的电磁波, 相应的波长约为 30 厘米到 0.3 毫米, 比一般的无线电波的波长(如几十米)要短得多。微波所占的频带很宽, 比频率低于它的长波、中波、短波等波段的频带之和($0 \sim 10^9$ Hz)还要宽 1000 倍。按照波长可将微波波段粗略划分为分米波、厘米波、毫米波和亚毫米波。在微波工程中为方便把微波波段划分得很细, 用不同的拉丁字母作为各个“分波段”的代号。表 1-1 是国际上常用的微波波段划分方法。

§ 1-2 微波的某些特点

首先让我们通过两位同志的对话来说明微波的某些特点。甲同志是熟悉低频无线电但没有机会接触微波的同志, 有一次他来到微波实验室, 下面是他与该室负责人乙同志的谈话:

甲: 我们实验室暂时缺少某型号的导线, 请借给一些。

乙: 对不起, 实在不能满足您的要求, 因为我们实验室很少用导线。

甲: 奇怪, 你们构制电路不用导线用什么?

乙: 请看, 我们构制微波电路主要就是用这些不同形状的空金属管, 我们叫波导管。

甲: 使我产生疑问的是, 这样的空金属管, 加上电压不就短路了吗。

乙: 我们当然不会做那种事。而且我们在工作中很少用到电压一类的概念, 我们感兴趣的是如何控制电磁波在波导管中的传输, 它的波长如何, 功率如何, 有没有波的反射等等。

甲: 那么象电阻器、电容器和电感线圈等无源元件安装在哪里呢?

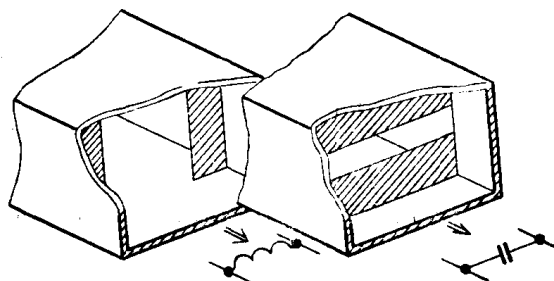
乙: 这些低频电路元件在微波电路中是无法使用的。在微波电路中如果非要找到电感和电容的话, 请看, 固定在波导管里的这种金属膜片就是电感性的, 另一种膜片则是电容性的(图 1-1)。

甲: 不用电感线圈和电容器怎样实现一个最基本的 LC 谐振回路呢?

乙: 请看这些封闭的空金属盒, 它们每一个便是一个谐振回路, 称为空腔谐振器。

甲: 怎样确定这些谐振回路的三个基本量 R 、 L 和 C 呢?

乙: 表示一个低频谐振回路的特性, 用 R 、 L 和 C 三个基本量的确是充分和必要的。谐振



(a) 电感性膜片 (b) 电容性膜片

图 1-1 矩形波导管中的膜片

表 1-1 微波波段划分

波段 代号	下 标	波 长 (cm)	频 率 (GHz)	波段 代号	下 标	波 长 (cm)	频 率 (GHz)	波段 代号	下 标	波 长 (cm)	频 率 (GHz)
P		133.2	0.225		A	9.67 8.82	3.100 3.400		C	2.10 1.95	14.25 15.35
		76.9	0.390		W	8.82 8.10	3.400 3.700		U	1.95 1.74	15.35 17.25
L	P	76.9 64.5	0.390 0.465		H	8.10 7.69	3.700 3.900	K1	T	1.74 1.46	17.25 20.50
	C	64.5 58.8	0.465 0.510		Z	7.69 7.14	3.900 4.200		Q	1.46 1.22	20.50 24.50
	L	58.8 41.4	0.510 0.725		D	7.14 5.77	4.200 5.200	K	R	1.22 1.13	24.50 26.50
	Y	41.4 38.4	0.725 0.780		A	5.77 5.45	5.200 5.500		M	1.13 1.05	26.50 28.50
	T	38.4 33.3	0.780 0.900		G	5.45 5.21	5.500 5.750		N	1.05 0.977	28.50 30.70
	S	33.3 31.6	0.900 0.950		Y	5.21 4.84	5.750 6.200		L	0.977 0.909	30.70 33.00
	X	31.6 26.1	0.950 1.150		D	4.84 4.80	6.200 6.250		A	0.909 0.833	33.00 36.00
	K	26.1 22.2	1.150 1.350		B	4.80 4.35	6.250 6.900		A	0.833 0.789	36.00 38.00
	F	22.2 20.7	1.350 1.450		R	4.35 4.28	6.900 7.000		B	0.789 0.750	38.00 40.00
	Z	20.7 19.3	1.450 1.550		C	4.28 3.53	7.000 8.500		C	0.750 0.714	40.00 42.00
	E	19.3 18.2	1.550 1.650		L	3.53 3.33	8.500 9.000		D	0.714 0.681	42.00 44.00
	F	18.2 16.2	1.650 1.850		S	3.33 3.12	9.000 9.600		E	0.681 0.652	44.00 46.00
		16.2 15.0	1.850 2.000		X	3.12 3.00	9.600 10.00		A	0.652 0.625	46.00 48.00
	C	15.0 12.5	2.000 2.400		F	3.00 2.93	10.00 10.25	V	B	0.625 0.600	48.00 50.00
S	Q	12.5 11.5	2.400 2.600		K	2.93 2.75	10.25 10.90		C	0.600 0.577	50.00 52.00
	Y	11.5 11.1	2.600 2.700		P	2.75 2.45	10.90 12.25		D	0.577 0.555	52.00 54.00
	G	11.1 10.3	2.700 2.900		S	2.45 2.26	12.25 13.25		E	0.555 0.525	54.00 56.00
	S	10.3 9.67	2.900 3.100		E	2.26 2.10	13.25 14.25				

回路的其他参数,如等效阻抗、谐振频率、损耗因数、品质因数、通频带等都可由 R 、 L 和 C 导出.但是在微波波段,我们并不企图对空腔谐振器确定 R 、 L 和 C 三个基本量,而是选用另外三个基本量,即谐振波长、品质因数和损耗电导,它们可以方便地由实验测定。

甲：这样说来，担任振荡和放大等作用的真空管和晶体管也一定和低频无线电所使用的不同了。

乙：是的。在微波电路中不能使用低频有源器件。微波电真空器件(如速调管、磁控管、行波管等)和微波半导体器件(如体效应管、雪崩管、隧道管、肖特基管等)在微波的产生和放大等作用的机理方面与低频器件十分不同。另外一个特点是微波有源器件与电路的关系极为密切，甚至一些微波电真空器件的内部就包含有谐振腔一类的微波电路。

甲：低频有源器件与电路的关系可并不如此密切。搞低频电路的人可以不关心真空管或晶体管内部电子的运动特性；而研制低频真空管或晶体管的人也可以不大过问电路的形式和安排。当然，集成电路的发展改变着这种情况。

乙：同意您的说法。

甲：看来，无线电从低频到微波，仅仅是频率的增加，竟然带来这么大的区别。

乙：区别是很大。这是否也可说是量变引起部分质变这一客观规律的反映。不过刚刚我们谈到的还只是外部现象的差别，电磁特性等内部过程的差别恐怕还要深刻呢。

甲：低频电路的内部过程基本上由克希霍夫定律即可确定。

乙：微波电路的内部过程必须由电磁场的普遍运动规律——麦克斯韦方程来描述。因为不论在波导管或空腔谐振器中，交变电磁场的空间分布都是很复杂的，导体表面交变电流的分布同样是复杂的，而电压则失去确切含意。研究微波电路内部电磁过程的特性，原则上应该求解一定边界条件下的电磁场方程。

甲：为什么在微波电路中电压失去确切含意呢？譬如说“金属导体处处是等电位的”总该是对的吧。

乙：说良导体是一个等位体，这对静电场是完全对的，对低频交变电磁场也差不多是对的，但在微波频率下就有问题了。以矩形波导管为例，当电磁波在其中传输时，某个截面电力线的瞬时分布通常如图 1-2 所示，宽壁中央瞬时电场最强，两端电场为零。波导管内表面各点电位显然不相等。如果按通常的规定把上下两宽壁间电场强度的积分作为电压，则宽壁中央电压最大，宽壁两端电压为零。在同一个截面上不同点间将得到不同的电压。到底应该取哪点的电压作为该截面处的电压成为不确定的。而对于低频传输线，某一截面处的线间电压是完全确定的。

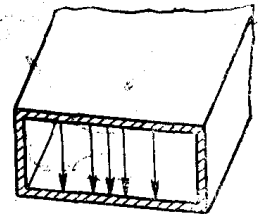


图 1-2 波导管截面瞬时电场分布

甲：那么低频传输线到底为什么不能在微波波段使用呢？在我们的工作中，当频率增高时，例如大于 50MHz，只要慎重考虑分布电容、分布电感等因素的影响，利用普通导线进行传输，尚不会出现太大问题。

乙：您知道，交流电有趋肤效应，电流趋向于沿着导线表面的薄层流动。趋肤效应在较低频段不显著，但在微波波段却影响很大，趋肤深度几乎趋于零(例如，在 5GHz 时铜的趋肤深度约为千分之一毫米)，导线呈现的电阻非常大。所以用普通导线传输微波出现的问题之一是功率损耗太大。

甲：在微波设备中只把普通导线当作短的接线行不行？

乙：您知道，一根导线的长度如果与其中高频电流的波长可相比拟，它将显著地向空间辐射电磁能量，如同一根天线，这种辐射效应亦称天线效应。在微波波段，例如 10GHz 频率

下(波长为 3 cm),如果使用一段 3 cm 长的短接线,由于长度与波长相当,使得辐射损耗极其严重。

甲:看来,天线效应和趋肤效应决定了普通导线不能用在微波波段。

乙:是的。在微波波段采用空心金属管来传输电磁能量就解决了天线效应和趋肤效应带来的问题。

甲:这些效应恐怕也是低频用的那些电感线圈、电容器、电阻器不能应用在微波波段的原因吧。因为这些元件的尺寸与譬如说厘米波的波长相近,一个个元件都成了辐射电磁能量的小天线,元件之间的相互影响、相互耦合恐怕严重得不堪设想。

乙:您说得有道理。低频无源元件之所以叫做集中参数元件,是因为每个元件都有一个固定的数值,即电流、电压在一个元件的各个部位(甚至在整个电路中)几乎同时建立,相位近于常数。到了微波波段,一个元件各个部位的相位不再是常数,元件性能已不能仅用一个数值即集中参数来表示,元件本身也改变了形式,由集中参数元件过渡到分布参数元件。这个过渡频段大约在 500 到 1000 MHz 范围。

甲:在低频,要提高谐振回路的谐振频率,只要根据 $f = (2\pi\sqrt{LC})^{-1}$ 设法减小电感 L 和电容 C 即可,这到微波频率下恐怕也成问题了。

乙:如果在微波波段还用这样的谐振回路,除了元件本身的问题以外,要想频率足够高,势必要求 L 和 C 非常非常小,小到比引线电感和极间电容还小,即使制作出来也不成其为原来设计的谐振回路。何况制作这样小(比如说 1 mm)的电感器和电容在工艺上也是极困难的(现在情况有所改变,下面将谈到)。因此,要由集中参数谐振回路过渡到空腔谐振器(图 1-3),其过渡过程可设想为先用单根导线代替电感线圈并加粗导线以减小电感,再用多根导线并联以进一步减小电感,不断增加并联导线数目,最后就得到空金属盒式的谐振器。

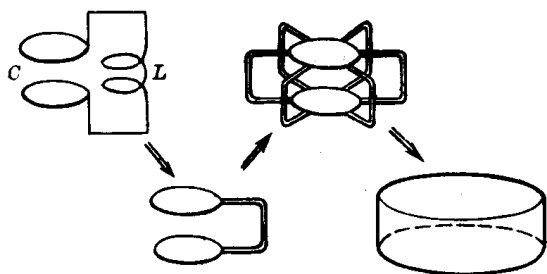


图 1-3 由集中参数谐振回路过渡到空腔谐振器

甲:低频用的真空管和晶体管为什么到微波波段也不适用了呢?

乙:原因也是多方面的。最重要的一点是所谓渡越时间效应。渡越时间是指真空管里电子从阴极渡越到阳极的时间或晶体管里载流子渡越基区的时间,这个时间一般很短,约 10^{-9} s,与频率为几 MHz 的振荡周期相比可以忽略不计。但是到了微波波段,电子渡越时间可以等于或大于微波振荡周期,以至低频真空管和晶体管根本无法工作在微波频率下。因此在微波波段要采用原理上全新的器件,在这些器件中有效地利用了电子的渡越时间。

甲:看来,低频用的传输线和元件在微波波段确实是无用武之地。那么低频电路的研究方法到微波波段也要改变了吧。

乙:是的。前已提到,在微波电路中不能象低频电路那样研究电流和电压,而应该把电磁场作为主要研究对象,研究波导管内或空腔谐振器内空间各点电场和磁场的分布和由电磁场分布决定的各种基本物理量,如功率、波长、阻抗等。

甲:阻抗不也是表示低频电路特性的物理量吗?

乙:微波技术中使用的阻抗概念是从低频推广而来的,但是意义有很大变化,它是空间某点

电场强度与磁场强度的比值,称为波阻抗。不仅是阻抗,而且为方便还在一定条件下把“电流”和“电压”等物理概念借用到微波技术中来。

甲:这是为什么?

乙:这是由于在许多微波问题中对电磁场进行严格分析是困难的,在一定条件下可以把微波电路中复杂的电磁场问题用类似于低频集中参数电路那样的简单方法去处理,称为等效电路方法。在这种方法中首先就要建立适当的等效电压和等效电流的概念。在使用从低频电路借用来的上述概念时,应该注意这些概念是如何与场和波联系起来的。

甲:您的介绍使我知道了一些微波的特点,有助于进一步学习微波知识,谢谢。

上面俩同志的谈话着重谈了微波与较低频率之间的某些区别。实际上,从零频率(直流)到市电频率(50Hz),从市电频率到广播频率,从广播频率到微波频率,从微波频率到光频,随着频率的增加,在每一阶段都带来性质上或大或小的变化。一定的频段总有其区别于其他频段的特殊性质。然而它们却又都是统一的电磁本质的表现,只不过在低频认为是次要的甚至可忽略的东西到微波则变成主要的、不可忽略的东西(如天线效应、趋肤效应、渡越时间效应等),在低频视为准确的东西到了微波则变为不准确的近似的東西(如克希霍夫定律在低频是很完备的,但在微波观点看来,它不过是麦克斯韦方程在长波极限下的近似)。因此,在了解电磁波谱不同部分性质的差异时也不应忽视它们之间的联系。我们站在微波这样高的频段上鸟瞰整个较低频段时就会发现这些统一的方面,联系的方面。例如电磁场方程就是适用于整个频谱的。在低频,计算电容和电感时也要与电场和磁场打交道,但在大多数场合不必考虑电场和磁场,用简便的电路概念就足够了,而在微波系统中几乎所有问题都要涉及电磁场。在微波系统中使用的波导管在较低频段原则上也不是说不能用,但是,不用说太长的波长,即使是0.5m波长,所需要的波导管截面尺寸已经是 $38 \times 19\text{cm}$ (参看第三章表3-1),这对于实用来说已显得太庞大而不经济了。反过来,低频用的集中参数电路元件也不是绝对不能用在微波波段。实际上,由于微电子学特别是光刻技术的发展,解决了制造小尺寸元件(如1mm大小的电感器和电容器)的工艺问题,七十年代以来,已在X波段实现集中参数元件的微波集成电路(如在一块约 5cm^2 的基片上可制作72个无源网络)。

波长比微波更短的电磁波就是光波了。六十年代激光器的出现使微波和光学这两门学科的关系变得更加密切,甚至已经无法截然划分这两门学科的界限。不但许多光学方法早已用于微波技术中(如抛物面天线、各种准光元件等),而且不少微波技术和理论也被用于光学问题(如激光谐振腔、光导管等)。

光波波长远小于地球上一般物体的尺寸,普通无线电波的波长远大于地球上一般物体的尺寸,微波波长介于上述二者之间,但仍小于一般物体的尺寸。这一特点使微波遇到物体时发生明显的反射现象,因为对电磁波反射的研究证明,反射体的尺寸等于或大于波长时反射现象最显著,这一特性是微波雷达的基本原理。此外,微波在空间传播时也有一些特点,例如,微波波段的许多部分可以穿透电离层,不同波长的微波在大气中传播时受到的衰减也不相同。

最后,由物理学知道,分子、原子和原子核在外加电磁场的周期力作用下会发生各种共振现象,其中许多共振的频率落在微波波段。因此,微波为研究物质内部结构特性提供一个强有力的实验手段(微波波谱学),同时,根据上述原理又可构成一系列微波器件,如微波铁氧体器件(见第七章)以及微波量子放大器和振荡器(量子电子学)等。

§ 1-3 微波的应用

上面讨论了微波在研究对象和研究方法方面的某些特点。各种科学技术研究的目的都与应用有着密切关系。微波技术就是在第二次世界大战期间由于军用雷达的需要而发展起来的。目前微波技术在世界上已经得到广泛的应用,遍及工业、农业、科学研究、国防甚至日常生活等各个领域。下面列举一些典型的应用。

由于微波具有频率高、频带宽的特点,所以适于用作大容量通信的载波,传输多路电报、电话、数据和图象信号。现代化大容量通信系统主要有以下四种,即同轴电缆和海底电缆通信系统、对流层散射和微波接力通信系统、波导或光导通信系统以及卫星通信系统。这些通信系统几乎都与微波技术有关。上述四种通信系统的配合使用构成地区性或全球性的立体通信网。其中地下和水下的电缆通信及地面上的微波接力通信发展较早,较成熟。微波接力通信属于无线电通信,它是由相距很远的两地之间每隔一定距离设置的一系列接力站构成的,



图 1-4 微波接力通信

每个接力站都有微波收发设备和微波定向天线,其任务是把从上一站收到的微波信号加以放大继续向下一站传播(图 1-4)。站间距离由天线视距决定,对于 30m 高的天线,站间距离约为 40 至 50km (即从 30m 高的天线顶上视线所能达到的距离)。

微波接力通信一般采用厘米波,大多是单边带调制系统,也有采用数字调制系统的。接力通信如果采用毫米波显然会得到更大的通信容量。但因频率高于 15GHz 时,大气中的氧和水蒸汽对毫米波有强烈的吸收作用,暴雨和浓雾对毫米波的衰减也很大,所以通常只能用于短距离或临时通信的情况,不宜用于长距离通信网中。不过近来国外采用数字调制传输系统,把接力站间距离缩短到 1/10 以下,已经在 20GHz 频段成功地实现了长距离大容量通信。并且正在克服具体技术问题向 30 GHz 以上频段的接力通信努力。

波导通信系统通常指圆波导 TE_{01} 波型传输系统,因为理论上可以证明(见第三章),这种电磁波波型在圆波导管内传输时损耗极小,并且波长越短,损耗越小,所以采用毫米波进行长距离波导通信。通信线路是由许多根圆波导管连接起来构成的,属于有线电通信。这种通信系统具有频带宽(数十 GHz),容量大(数十万路电话)和保密性强、可靠性好等优点。波导通信和电缆通信都需要隔一定距离设增幅机。同轴电缆通信每隔几公里就要设一个增幅机,波导通信却可每隔 20 至 40 km 设一个增幅机,这也是波导通信系统的优点。长距离波导通信都采用数字调制传输系统,因为数字调制具有抗干扰性强和能够再生等优点。目前不少工业先进国家正在进行十几 km 或几十 km 长的实用化试验,有的已将波导通信系统投入商用。七十年代毫米波固态源和各种毫米波半导体器件的发展,为波导通信的实现铺平了道路。一般认为将来可把波导通信作为干线通信,把微波接力和电缆作为支线。不过近年来光导纤维通信技术的突然崛起向毫米波波导通信提出了挑战,目前这两种通信系统正在平行地发展。光导纤维的制造工艺正在取得突飞猛进的成绩,现在已可稳定地制造出衰减为 10~15 分贝/公里,最高水平已达 1 分贝/公里左右,而在几年前还只能达到每公里几百分贝。但目前的半导体激光器寿命短是一个有待解决的大问题,各种光技术元件器件以及光集成技术都有待研究,不少理论和实际问题摆在光通信专家面前。到底波导通信和光导通

信将来哪个处于优先地位尚难预测。

自从六十年代末世界上第一颗通信卫星发射以来,卫星通信取得了长足的进展。现已有七颗通信卫星在三大洋上空覆盖全球,六十四个国家的 110 多个地面站通过这些卫星建立了通信联系。各国还在建立国内通信卫星和区域性通信卫星。目前卫星通信主要使用 10GHz 以下的微波波段。为了扩大通信容量,正在开拓 10GHz 以上的新波段。前面提到,毫米波不宜用于大气中的长距接力通信,但用于卫星通信却是很有前途的。因为对于卫星通信,毫米波只需穿过几公里厚的浓密大气层就到达没有大气的外层空间,所以毫米波在传播过程中只受到有限度的衰减。卫星通信系统的出现也为建立灵活可靠的全覆盖电视广播提供了理想的手段。卫星系统出现以前,电视传输主要靠微波接力系统,这样,要想覆盖一个拥有 960 万平方公里面积的伟大国家,至少需要 2400 座电视发射台和 4800 个接力站才能构成一个有机的电视广播网,这是极其庞大和困难的任务。通过卫星进行电视广播则避免了这些困难。目前,通过卫星地面站将卫星系统与微波接力系统配合使用。为使用户自己可以直接接收卫星播出的电视节目,正在研究通信卫星直播电视微波系统。

第一批雷达样机是在第二次世界大战前夕诞生的,在那些年代,微波工程与雷达工程几乎是同义语。为了提前发现敌机和敌舰,要求雷达具有较高的分辨能力,这大大刺激了微波技术的发展。至今各类现代雷达(如导弹跟踪雷达、炮瞄雷达、导弹制导雷达、气象雷达、空中交通管制雷达等等)大多仍工作在微波波段。这主要是由于对雷达天线发出的电磁波波束要求有较好的方向性,即电波比较集中地向一个方向传播,如同探照灯的光束一样。天线波束的大小和形状通常与天线的类型和尺寸以及工作波长有关。例如,抛物面天线的波束宽度(主瓣)约为 $2\theta \approx 70^\circ \lambda_0/D$, 其中 D 是抛物面反射镜(口径面)的直径, λ_0 是工作波长。对于直径 D 为 70 厘米的天线,若工作波长为 3 厘米即 10GHz 频率,则可得到约 3° 的波束宽度,这对于确定雷达观测目标的方位可以给出一个合理的精度。如果工作频率改为 100MHz,要得到同样精度就要求反射镜直径为 70 米,这样庞大的天线已无法安装在飞行器或舰船上。鉴于微波雷达具有测量精度高、设备体积小、使用较为灵活轻便等优点,它一出现便立即取代了早期的短波雷达(例如 1938 年英国警戒德国轰炸机所使用的雷达工作在 22~28 MHz 的短波波段)。由于毫米波存在大气衰减问题,所以雷达大多工作在厘米波段。但近几年来由于毫米波发射管的研制取得巨大进展,毫米波雷达的研究受到高度重视。一种基于自由电子受激辐射原理的新型电真空器件——回旋管的潜在峰值功率达数吉瓦,其工作波段为毫米波和亚毫米波,现已取得几十千瓦的连续波功率和兆瓦级以上的脉冲功率,预计大功率毫米波雷达将突破大气衰减造成的限制而得到广泛应用。由于航空与空间技术的迅速发展,超音速飞机、导弹、人造卫星和宇宙飞船都采用雷达作为探测和控制的重要手段,特别是反导弹系统的研制,对现代雷达提出高精度、远距离、高分辨能力和多目标等极严格的要求。雷达的作用距离已从几百公里提高到几千公里以上。如果飞行目标上带有信标,用单脉冲雷达跟踪,其作用距离可达数十万公里以上。采用大功率发射机、大口径天线、低噪声器件以及信号集累技术等,已从水星、火星和太阳收到了雷达回波。现代雷达测定目标的精度也比过去有很大提高,例如精密跟踪雷达的测角精度达 0.01° 以下。现代雷达还朝着获取较多信息的方向发展,即一方面要求测定一个或一组目标的各种信息(如距离、速度、加速度、角坐标、角加速度,导弹的弹道及弹着点,目标的大小、数目和真假等),另一方面还要求同时测定规定空域中的所有目标的各种信息。为此,研究了不少雷达新体制,如三度空间雷达体

制、单脉冲跟踪雷达体制和边搜索边跟踪雷达体制等,每一种雷达体制还可用不同的工作制来实现,常见的工作制是普通脉冲雷达工作制和连续波雷达工作制,较新的工作制有频率分集制、脉冲压缩工作制和脉冲多普勒工作制等。随着新体制和新工作制的采用,出现了一系列雷达新技术。例如,与边搜索边跟踪雷达体制配合,发展了相控阵天线技术,它是一个大型天线阵,各单元天线的相位可以控制,各单元天线配有自己的发射机和接收机(采用微波固态源和微波集成电路)。相控阵天线能够在空间形成几个或几十个强有力的波束,有搜索波束和目标跟踪波束,它们各自独立地工作。这种相控阵雷达可以同时跟踪几十个或更多的目标。相控阵天线以及其他各种雷达新技术的发展,不断推动微波理论和技术的发展。反过来,微波技术的新成果也大大促进雷达事业的发展。例如,微波集成电路使雷达小型化得以实现。小型化雷达不仅用于军事、工业、科研等方面,而且也在与日常生活有密切关系的民用方面日益扩大其用途。安置在汽车上的防撞雷达、装在门上或保险柜上的防盗雷达、公安人员携带的侦察检测雷达、放在盲人衣袋内的防撞雷达等等小巧新颖的微波设备正如雨后春笋般地出现在各种应用场合。最后值得指出,现代雷达的另一重要特点是与电子计算机的结合,以便对大量数据进行快速处理,从信号中提取更多信息,从噪声中提取微弱信号,以及进行程序控制等。实际上,电子计算机已成为雷达不可分割的一部分。旧式雷达需要由人用眼睛观测荧光屏上的信号,从中选出有用的信息,因此人不但起着观测员和操纵员的作用,而且还起着处理机的作用,旧式雷达本身只起一个传感器作用。现代自动化雷达则不但起传感器作用还起处理机的作用,人则只起观测员和操纵员的作用。现代自动化雷达与旧式雷达的比较如图 1-5 所示。

上面介绍了微波在通信、广播和雷达方面的应用情况。下面再简略提一下微波在国计民生其他方面的应用。在天文学方面,利用大功率微波发射机和高灵敏度微波接收机,不断发现新天体,并可对天体的某些物理性质进行分析研究。天文学家甚至发现来自宇宙的微波背景辐射,成为六十年代天体物理学四大发现之一。不过,产生微波背景辐射的原因至今尚未得到满意解释。

在原子核物理学和高能物理学方面,不少类型的带电粒子加速器(直线加速器、回旋加速器、同步加速器)都可看作是象微波电子管那样的微波系统,但是它们内部发生的物理过程是相反的。通常的微波电子管是把电子动能转换为微波的电磁能量,而高能电子加速器则是把微波能量转换为电子动能。当然,二者之间在结构、原理等方面存在一系列重要差别。这里仅指出一点,即在通常的微波管中,由于电子的速度几乎总是小于光速,可以不考虑相对论效应。但是加速器中的带电粒子却几乎总是被加速到接近光速,因而必须考虑相对论效应。在电子直线加速器中,直接利用微波功率管来激发电子加速腔体。例如,美国斯坦福电子直线加速器中心的三公里长、250 京电子伏的电子直线加速器(是迄今世界上能量最高的电子加速器)一共要用 245 个微波大功率速调管,每个管子输出的微波脉冲功率为 25 兆瓦。

微波有明显的生物学效应。实验已经证明,植物种子经小功率微波照射后可以提高发芽率并能刺激生长。用微波与 γ 射线复合照射育种效果更佳。利用大功率微波辐射可进行田间除草灭虫,以避免农药污染。长时间较大剂量的微波辐射能够伤害人体。目前国际上关于微波辐射安全剂量有两类标准,欧美主要根据微波对人体的热效应引起的伤害订出安全标准为 10 毫瓦/厘米²,而苏联及东欧各国以临床调查和一些实验结果为依据规定安全剂量为 10 微瓦/厘米²,二者竟相差 1000 倍。利用短时间剂量不大的微波辐射(最大极限值为

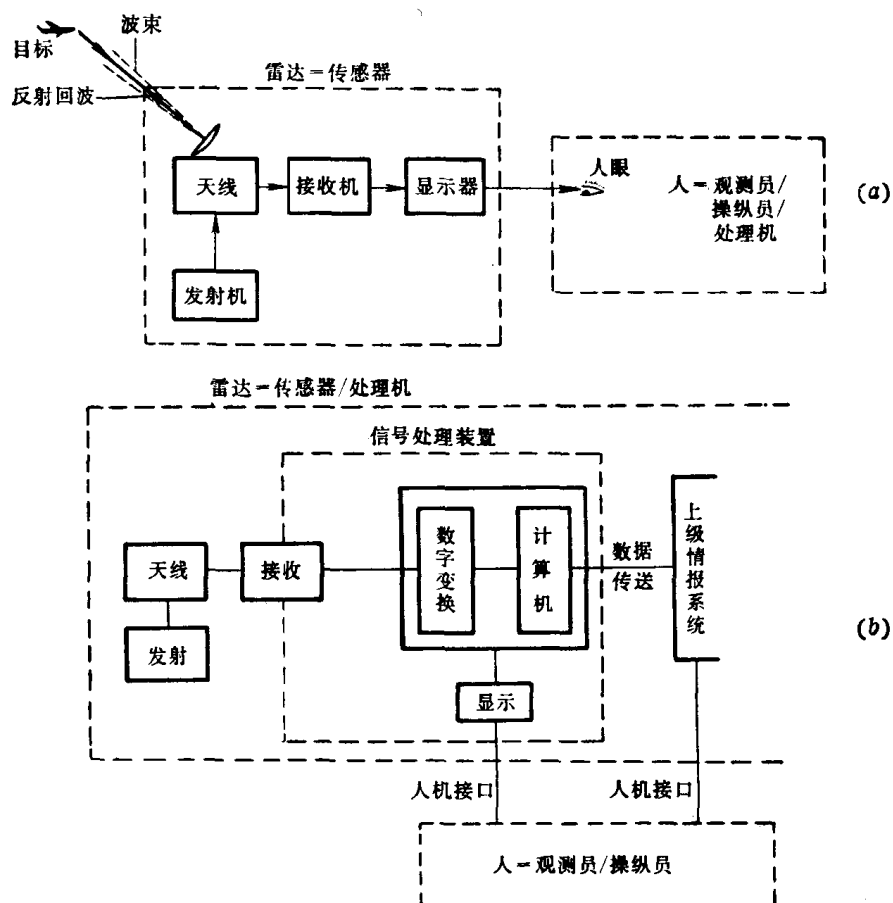


图 1-5 旧式雷达(a)和现代自动化雷达(b)

0.4 瓦/厘米²)可以深入人体内部消灭病菌,使受照射部位机体组织温度上升,使血管和微血管扩张,加快新陈代谢过程,改善局部营养,增强组织修复与再生能力。医学上利用微波对人体的各种刺激作用治疗多种疾病已取得显著疗效。不过,目前对微波生物学效应的机理尚未深刻了解,只有一些粗糙的宏观解释。微波对生物体作用的严格理论恐怕有待于量子生物学的成熟。

在工业上,可以利用微波检验金属加工表面以及利用微波辐射的热效应制成微波炉对材料内部均匀加热以便进行木制器件或塑料制品的快速胶合,织物或烟草的快速烘干。食品工业利用微波照射消毒,可使食品保存期延长数倍。冷冻食物利用微波快速解冻可保持原有鲜味和营养。家用微波炉烹煮食物具有快速、干净等优点。

由于微波能穿过不透光的非金属介质,公安人员可以利用微波全息照相的透视特性来发现隐藏在手提包内的手枪。根据同样的道理,美国阿波罗宇宙飞船拍摄了月球表面浮土下的地层情况,金星探测器拍摄了由不透光大气包围着的金星表面照片。若从卫星上对地球作全天候微波全息照相,可以及时掌握火山、冰川的活动情况以及农作物生长情况,并由后者大致估计出农作物收获量。根据照相资料还可预报病虫害和森林火灾。

最后,微波遥感技术已经广泛用于人造地球卫星上。由于微波传播不受黑夜和云层的限制,故优于可见光或红外线探测器。微波遥感技术可用来测量大气、海洋、土壤的成分和温度分布等。

在祖国现代化建设中,微波技术正在起着越来越大的作用。

第二章 电 磁 波

§ 2-1 麦克斯韦方程

在电磁学中,电磁场的运动规律由麦克斯韦方程完整地表示出来。麦克斯韦方程有积分和微分两种形式,前者描述电磁场中某一区域内场量之间的关系,后者描述电磁场中每一点上场量之间的关系。

1. 麦克斯韦方程的积分形式

积分形式的麦克斯韦方程概括了电磁学的基本实验定律,即

$$\oint \mathbf{E} \cdot d\mathbf{L} = - \int \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \cdot d\mathbf{S} \quad (\text{法拉第定律}), \quad (2-1a)$$

$$\oint \mathbf{H} \cdot d\mathbf{L} = \int \mathbf{J} \cdot d\mathbf{S} + \int \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \cdot d\mathbf{S} \quad (\text{推广的环路定律}), \quad (2-1b)$$

$$\oint \mathbf{D} \cdot d\mathbf{S} = \int \rho dV \quad (\text{高斯定律}), \quad (2-1c)$$

$$\oint \mathbf{B} \cdot d\mathbf{S} = 0 \quad (\text{磁流定律}). \quad (2-1d)$$

在这四个方程中共出现六个物理量: $\mathbf{E}$ 和 $\mathbf{B}$ 分别是电场强度矢量和磁感应强度矢量; $\mathbf{D}$ 和 $\mathbf{H}$ 分别是电位移矢量和磁场强度矢量; $\mathbf{J}$ 和 ρ 分别是(传导)电流密度矢量和电荷密度。

方程(2-1)揭示出电场与磁场、电磁场与电荷源和电流源之间的普遍联系。尽管具有这种普遍性,用这些方程来直接计算电磁场并不太方便(除非电荷源和电流源为已知且具有很规则的分布),因为这些方程中出现的积分牵涉到某一体积内或某一曲面上或某一曲线上每一点的电场或磁场、电荷密度或电流密度。稍后我们将看到,利用麦克斯韦方程的积分形式来确定不同媒质的分界面上场量之间的关系是十分方便的。

2. 麦克斯韦方程的微分形式

在研究电磁现象时更重要的是要知道场中各点的场量,这样就需要把麦克斯韦方程的积分形式化为微分形式。利用矢量分析中的高斯定理和斯托克斯定理,

$$\int \nabla \cdot \mathbf{A} dV = \oint \mathbf{A} \cdot d\mathbf{S},$$

$$\int (\nabla \times \mathbf{A}) \cdot d\mathbf{S} = \oint \mathbf{A} \cdot d\mathbf{L},$$

很容易由方程(2-1)导出麦克斯韦方程的微分形式:

$$\nabla \times \mathbf{E} = - \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}, \quad (2-2a)$$

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t}, \quad (2-2b)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{D} = \rho, \quad (2-2c)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0. \quad (2-2d)$$

方程(2-2)全面地描述了媒质中任意一点电磁场的变化规律以及电荷与电流对电磁场的作用。给定电荷和电流,就可以根据具体的初始条件和边界条件完全确定电磁场的变化规律。电荷和电流之间的关系则由熟知的连续性方程

$$\nabla \cdot \mathbf{J} = -\frac{\partial \rho}{\partial t} \quad (2-3)$$

联系起来。在方程(2-2)所包含的四个方程中,两个旋度方程(2-2a)和(2-2b)对于描述电磁场的变化规律是最重要的。实际上,两个散度方程(2-2c)和(2-2d)可以看成是由前两个旋度方程导出的。例如,对(2-2a)两端取散度得

$$\nabla \cdot \nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial}{\partial t} (\nabla \cdot \mathbf{B}),$$

但上式左端恒等于零,故对于随时间变化的场上式右端括号内的项应为零,即 $\nabla \cdot \mathbf{B} = 0$,这正是(2-2d)。同样地,对(2-2b)两端取散度得

$$\nabla \cdot \nabla \times \mathbf{H} = \nabla \cdot \mathbf{J} + \frac{\partial}{\partial t} (\nabla \cdot \mathbf{D}),$$

利用连续性方程(2-3)立即得到(2-2c)。两个旋度方程把电场和磁场联系起来,变化的电场可以产生变化的磁场,变化的磁场又可以产生变化的电场,这种过程反复进行下去,电磁场的交替转化就以电磁波的形式传播开去。下一节将导出电场和磁场所满足的波动方程。

3. 结构方程

在用麦克斯韦方程或波动方程解决具体问题,还常用到以下三个辅助关系式:

$$\mathbf{D} = \epsilon \mathbf{E}, \quad (2-4a)$$

$$\mathbf{B} = \mu \mathbf{H}, \quad (2-4b)$$

$$\mathbf{J} = \sigma \mathbf{E}. \quad (2-4c)$$

这三个关系式都与媒质的性质有关,也称为结构方程,它们的正确性可由电磁学实验来证实。(2-3a)式表示在各向同性的均匀媒质中电位移矢量 $\mathbf{D}$ 与电场强度 $\mathbf{E}$ 成正比,比例系数是介电常数 ϵ 。自由空间的介电常数为

$$\begin{aligned} \epsilon_0 &= 8.85418 \times 10^{-12} \text{ A} \cdot \text{s/V} \cdot \text{m} \\ &\approx \frac{1}{36\pi} \times 10^{-9} \text{ A} \cdot \text{s/V} \cdot \text{m} \end{aligned}$$

其他均匀媒质的介电常数 ϵ 与 ϵ_0 之比 $\epsilon_r = \epsilon/\epsilon_0$ 称为这种媒质的相对介电常数。对于各向异性的媒质,不同方向的 ϵ 是不同的, $\mathbf{D}$ 与 $\mathbf{E}$ 之间的关系要比(2-4a)式复杂。(2-4b)式表示在各向同性的非铁磁性媒质中磁感应强度 $\mathbf{B}$ 与磁场强度 $\mathbf{H}$ 成正比,比例系数是导磁率 μ 。自由空间的导磁率为

$$\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ V} \cdot \text{s/A} \cdot \text{m},$$

其他非铁磁性媒质的导磁率 μ 与 μ_0 之比 $\mu_r = \mu/\mu_0$ 称为这种媒质的相对导磁率。对于铁氧体之类的铁磁物质, $\mathbf{B}$ 与 $\mathbf{H}$ 不存在简单的正比关系。(2-4c)式表示在各向同性的均匀导电媒质中传导电流密度 $\mathbf{J}$ 与电场强度 $\mathbf{E}$ 成正比,比例系数是电导率 σ 。这个关系式实际上就是欧姆定律。在微波工程中所遇到的媒质大多是均匀的各向同性的,所以 ϵ 、 μ 和 σ 都可视为常数,即它们不随位置或时间而变化,但它们却与电磁波的频率有关。

利用结构方程(2-4)可将麦克斯韦方程(2-2)表示成仅包含电场强度 $\mathbf{E}$ 和磁场强度 $\mathbf{H}$ 的形式: