

高等学校教学参考书

电磁波的应用

时振栋 黎安尧 王晦光

高等教育出版社

电磁波的应用

时振栋 黎安尧 王晦光

高等教育出版社

高等学校教学参考书

电磁波的应用

时振栋 黎安尧 王晦光

*

高等教育出版社出版

新华书店北京发行所发行

北京第二新华印刷厂印刷

*

开本 850×1168 1/32 印张 9.25 字数 221,000

1990年7月第1版 1990年7月第1次印刷

印数: 0001—2 060

ISBN 7-04-000947-1/TH·112

定价 2.95 元

序

“电磁波”，这个在本世纪初还是鲜为人知的技术用语，今天已不再使人迷惑不解了。无线电技术的迅速发展，使电磁波深入人们生活的每个角落。我们可以毫不夸张地说，从现代社会的生产、流通，到人们的精神与物质生活的广泛领域都离不开电磁波。

目前已有许多著作专论电磁波的理论，但以更有趣味的电磁波应用为主要题材的书籍还不多见。本书通过大量实例介绍电磁波在各方面现有的或颇有前途的应用，试图以此弥补这一不足。然而要在有限的篇幅内涉及电磁波应用的全部内容是不可能的，也是不可取的。因此，本书只选择若干主要的方面奉献给读者。

本书将电磁波的应用归纳成两大类：一、信息类应用，就是把电磁波作为信息的载体，用来传送数据、图像、语音，以及探测或检测物体。通信、雷达、遥感和非电参量的测量就属于这一类。二、能量类应用，这就是将电磁波当作特殊的能源，用于材料的加热、加工，进行医学诊断与治疗以及开发新能源等等。这两类应用分别在前四章和后三章中介绍。书中还从“激光的本质是电磁波”的基点出发，简略地提及了激光的有关应用。

本书作为高等学校的教学参考书，尽可能先说明基本原理，然后介绍有关的实际应用。编者希望这些内容能给学习《电磁场理论》和《电磁场与电磁波》课程的读者增加实际应用的有关专业知识，提高学习电磁波理论的兴趣。同时也希望本书对有关的工程技术人员和其他读者能够有所助益。北京工业学院的卢荣章副教授审阅了全书，并提出了许多宝贵意见，在此表示衷心的感谢。

鉴于编者水平不高，涉猎的参考资料有限，书中的不妥之处在所难免，恳请读者批评指正。

编者 1987.10

目 录

绪 论	1
第一章 利用电磁波传递信息	15
§ 1.1 概述	15
§ 1.2 普通无线电通信、无线电广播	24
§ 1.3 图像通信 传真与电视	29
§ 1.4 微波——现代无线电通信的生力军	37
§ 1.5 激光通信的特点 光纤通信	50
主要参考文献	57
第二章 利用电磁波探测、跟踪和控制目标	58
§ 2.1 概述	60
§ 2.2 雷达的几种工作方式	74
§ 2.3 雷达的应用	88
§ 2.4 制导	87
§ 2.5 雷达对抗	91
§ 2.6 激光雷达及其应用	97
§ 2.7 无线电导航	101
主要参考文献	109
第三章 利用电磁波进行勘测和探索自然奥秘	111
§ 3.1 遥感技术概述	111
§ 3.2 遥感系统和应用	119
§ 3.3 无线电遥测和遥控	126
§ 3.4 利用电磁波研究物质结构	131
主要参考文献	138
第四章 电磁波在非电参量的电测和无损伤检测方	

面的应用	140
§ 4.1 概述	140
§ 4.2 微波检测的原理和方法	146
§ 4.3 速度、位移和振动的微波检测	152
§ 4.4 距离、料位和长度、厚度的微波检测	165
§ 4.5 物料参数变化和缺陷的微波检测	180
§ 4.6 物体温度的微波检测	188
主要参考文献	190
第五章 电磁波加热与加工	191
§ 5.1 概述	191
§ 5.2 高频加热与微波加热	193
§ 5.3 微波化学处理	222
§ 5.4 激光材料加工	235
主要参考文献	244
第六章 电磁波在能源开发中的应用前景	245
§ 6.1 概述	245
§ 6.2 卫星太阳发电站	245
§ 6.3 裂变燃料 ^{235}U 的激光浓缩	248
§ 6.4 核聚变等离子体的射频电磁波加热	250
§ 6.5 激光核聚变	258
主要参考文献	262
第七章 电磁波在医疗和农业中的某些应用	263
§ 7.1 概述	263
§ 7.2 电磁场的生物效应	263
§ 7.3 电磁波用于医疗	270
§ 7.4 杀虫、除草、灭菌和育种	282
主要参考文献	289

绪 论

一、无线电发展简史

社会的需要是推动科学技术发展的强大动力,这是几千年来,特别是近代科学技术的发展已经证明的事实。其中,无线电的发现和广泛应用就是一个突出的例子。人们的生产和生活都离不开信息的传递和交换,生产的发展迫切需要与之相适应的、快速可靠的通信手段,无线电技术正是由于通信的需要开始发展起来的。

在公元十八世纪,由于摩擦能产生静电,利用长长的金属导线带上静电以后,可以吸引带有字符的纸片,用几根这样的导线就可以实现简单的通信。此后,又有不少人研究了用静电实现通信的其它方法。1800年伏打电池问世,产生了比静电稳定、且有用得多的电流。有了稳定的电流就可以用开关来控制信号的传递,从此开始了用直流电进行通信的试验。

1832年,美国画家莫尔斯乘船从欧洲返回美国途中,听到了一位年青医生关于电磁现象的精彩演讲,回国后便致力于这方面的研究。1837年他研制成功了用电码传送信息的装置,这种电码就是一系列以点、划表示的电流脉冲,以后他把这种装置称为电报机。1845年,莫尔斯电码进入实用阶段,其后在欧洲各大陆很快建立了电报线路。1851年,英国正式开通横跨英吉利海峡的国际商用海缆电报。1858年,美国开通了第一条横跨大西洋的海底电缆。1875年,贝尔发明的有线电话又给当时的有线通信事业增添了新的活力。

生产和通信都迫切需要电,这从客观上促进了十九世纪在电

磁学方面的一系列重大发现,因而在有线电通信发展的同时,当时对无线电的研究也获得了惊人的进展。把人们引导到无线电波大门口的是学徒出身的英国人法拉第。1831年,他用实验证实了由磁可以产生电。

打开电磁波理论大门的是英国理论物理学家麦克斯韦。他在已发现的许多电磁现象的基础上,主要是总结了法拉第和安培等人的成果,应用数学推理,证明了所有电磁现象都可归结为媒质中的电磁应力和运动,进而预言了电磁波的存在。1873年,麦克斯韦建立了完整的电磁理论,并证明了电磁场随时间变化时能产生波,以及电磁波的传播速度等于光速。麦克斯韦的光辉预言震动了当时的整个科学界,许多人争先恐后地想从实验来验证电磁波的存在。著名的德国科学家赫姆霍兹就是其中的一个,他的年仅20岁的学生赫芝也废寝忘食、潜心钻研。赫芝前后用了五年时间,终于制成非常巧妙的、能发出和感知无线电波的装置。1888年,他又用实验证实了电磁波的存在。同时还发现,无线电波也和光波一样具有折射、反射和绕射等现象。这就直接验证了麦克斯韦的理论。后来人们把赫芝发明的能发射和接收电磁波的装置,叫作赫芝振子。年青的赫芝在电磁学方面作出了重要的贡献,可惜他年仅37岁就过早地离开了人间。伟大的电磁理论科学家麦克斯韦也没有能亲眼看到他的预言变为现实,在他47岁时就被病魔夺去了生命。

电磁波被发现以后,人们首先想到的是利用它来实现无线电通信,当时摆在人们面前的首要课题是发明能更灵敏地感知电磁波的仪器。1895年,波波夫用他制造的粉末检波器收到了雷电产生的无线电波。次年他又用莫尔斯电码进行了250米通信表演。与此同时,受到赫芝实验鼓舞的意大利青年马可尼也进行了成功的无线电通报试验,并于1897年获得专利。这些试验揭开了应用

电磁波的历史,从此电磁波开始进入人类的精神生活和物质生活,为造福于人类开创了新天地。

马可尼在他的无线电报通信试验的基础上,又于1901年用通信机实现了横跨大西洋的越洋通信。此后西方各国为了商业的需要纷纷建立起无线电通信线路,这就使全球规模的通信网迅速地建立了起来。

但是事物总是不断地向前发展的,人们对事物的认识也在生产实践中不断地提高。虽然当时已开始应用电磁波,但对电磁波的特性还不十分了解,只知道波长越长,电磁波沿地面传播的距离越远,因此纷纷选用长波来实现远距离通信,而把频率高于1.5MHz的电磁波划给业余无线电爱好者使用。所以从1901年到1924年的20多年时间里,是频率低于300 kHz的低频和甚低频独霸的时代。

可是低频使通信频带受到严重的限制,它远远满足不了当时对通信路数的要求。人们对无线电通信的渴求仍然如望梅止渴、杯水车薪。然而电磁波是无私的,它的大门一旦被敲开,就随时准备着把其无尽的资源奉献给勤劳智慧的人们。1921年,业余无线电爱好者意外地发现用小功率高频发射机竟能实现横跨大西洋的通信。不久,物理学家阿普顿对此用电离层对电磁波的反射进行了解释,并于1924年第一次制成了频率可连续变化的短波通信机。由于这项突出贡献,他于1947年获得了诺贝尔奖。

随着无线电通信频率的逐步提高,无线电技术水平也在不断向前发展。当时马可尼发明的检波器不能够用于放大信号,以后美国工程师李德、福雷斯特发明了真空三极管,完成了无线电信号的整流、放大、振荡、调制和检波等项任务。它为完善通信设备、提高通信能力创造了条件,从此高频无线电通信事业进入了顺利发展的新时代。与此同时,无线电广播、电视、无线电探测等新应

用也象雨后春笋般地破土而出,二十世纪三十年代后期,雷达的出现又使电磁波的应用开辟了新天地。

但是电磁波的各项新奇应用,立刻使开始时显得宽敞的超短波变得十分拥挤,为此,人们必须为开辟新频段作更大的努力。

第二次世界大战给电磁波的应用带来了新的活力。军事专家们发现,无线电技术与军事装备的结合,使他们在改进部队间的联络,改善兵器的性能,以及提高指挥的效果等方面都获得了很大的好处。特别是微波电子管的出现,使微波雷达在空战中发挥了巨大的威力。原先普通电子管的频率极限被突破了,已经用于电视和通信上的电子技术也用到雷达上来,这就使电磁波向更高频率——微波的应用展开了新的一页。

微波雷达在二次世界大战中大显身手,直至今天它仍是利用电磁波进行导航和遥测、遥控的主力。

第二次世界大战结束以来,电磁波应用的发展并没有停止脚步。各国科学家们进行着新的、甚至更加激烈的竞争。无线电侦察、无线电制导、无线电寻的、无线电干扰……一切的一切都在无声地、然而紧张地进行着。人们清楚地认识到,只有真正掌握电磁波,才能在未来的战争中取得主动。

五十年代初,微波取代了超短波担负起无线电通信主力的重要使命。通过微波中继、微波散射和海底电缆等各种方式,电磁波为人们日益繁忙的通信业务不遗余力地贡献自己的一切。人造地球卫星上天,无线电技术与空间技术的结合更使现代通信事业如虎添翼,宇宙通信的新应用又使电磁波为帮助人类进入宇宙空间建立了新的功绩。

激光技术的出现和毫米波的开发利用,是当今电磁波应用的新标志。随着现代科学技术的突飞猛进,激光和毫米波作为电磁波谱的重要成员已脱颖而出。它们的发展是电磁波谱向更高频段

发展的必然结果，它们为电磁波的应用开拓了一个既高又宽的新波段，也为无线电技术的应用开创了新局面。

二、电磁波谱

纵观电磁波发展的历史可以看出，电磁波是大自然的宝贵资源，它已经并正在为人类新的生活作出贡献。那么，在电磁波谱大家庭中究竟有哪些成员呢？在整个电磁波谱中，除了无线电波和可见光以外，它还包括更高频率的X射线和 γ 射线等(表0-1)。在电磁波谱这个大家庭里，由于频率的不同，各频段电磁波的性质也有差别，因而它们有各自的主要应用方面。其中，无线电波是已经取得很大成就的波段，它们按频率或波长的不同还可以细分为如表0-2所示的各个无线电频段或波段。

表 0-1 电磁波谱的划分

名 称	波长范围(μm)	频率范围(GHz)
无线电波	长于1mm	小于300
红 外 线	1000~0.78	300~ 3.84×10^5
可 见 光	0.78~0.39	$3.84 \times 10^5 \sim 7.7 \times 10^5$
紫 外 线	0.39~0.01	$7.7 \times 10^5 \sim 3 \times 10^7$
X 射 线	0.01~ 10^{-5}	$3 \times 10^7 \sim 3 \times 10^{10}$
γ 射 线	$10^{-5} \sim 10^{-9}$	$3 \times 10^{10} \sim 3 \times 10^{14}$

三、各波段的主要应用

从发现电磁波以来，经过一百多年的研究和发掘，人们对无线电波已有相当的了解。下面仅就无线电波各波段的主要特性和它们的应用作个概略介绍。

极长波 因为电磁波在地下和海水等有耗媒质中的衰减很大,且频率愈高衰减愈大,因而为实现与水下台站的通信(例如与潜艇的通信)不得不采用极长波。但是这种通信方式的缺点是天线尺寸与波长相比较时,比例太小,辐射效率极低,通信频带也窄,相互干扰严重。

超长波 因频率很低,可用于远距离通信。但仍有设备笨重、天线庞大、辐射效率低、通信容量小的弱点。目前这个波段主要用于收听核爆炸和雷电发出的电波,还用于全球导航,研究外层空间以及海底潜艇通信等。

表 0-2 无线电波段划分

波段名称		频段名称	波长范围	频率范围
微波	毫米波	极高频(EHF)	10~1mm	30~300GHz
	厘米波	超高频(SHF)	10~1cm	3~30GHz
	分米波	特高频(UHF)	10~1dm	0.3~3GHz
超短波		甚高频(VHF)	10~1m	30~300MHz
短波		高频(HF)	100~10m	3~30MHz
中波		中频(MF)	1000~100m	0.3~3MHz
长波		低频(LF)	10~1km	30~300KHz
超长波		甚低频(VLF)	100~10km	3~30KHz
极长波		极低频(ELF)	10 ⁵ ~100km	3Hz~3KHz
		超低频(ULF)	>10 ⁵ km	<3Hz

超长波的频带宽度为 27 KHz,虽比极长波宽几倍,但用作通信时仍只能通低速电报。目前主要用于军事目的,如地下指挥部和导弹发射井的通信等。

长波 它也是开发最早的波段,主要用于点与点间军事通信、无线电导航及广播。

导航的任务是在各种复杂环境下,引导舰船和飞机沿预定路线航行。最著名的长波导航系统是建于六十年代末期的美国军用的罗兰-D系统,工作频率为 90~110 KHz,它是用测量舰船(或飞机)至三个固定发射台的距离差来定位的,用这样两个距离差可以画出二条双曲线,它们的交点就是舰船的位置。

长波的另一个重要应用是报时。现代的科学技術部门要求精确的时间标准,这就需要通过无线电波及时把这种时间标准传递出去。长波报时具有传输衰减小,干扰弱,信号稳定的优点,因而是精确报时的理想手段。

中波 国际电信联盟规定 550~1600 KHz 专供无线电广播使用。为了获得好的音质,并使相邻广播台不致相互干扰,频率间隔至少必须 20 KHz。我国每个大中城市都有广播台。中波白天沿地面只能传播几百公里,因而相互间不会干扰。但在夜间,中波通过电离层的E层反射可传播至二千多公里,因而时常出现台站间的干扰现象。

除广播频段外,中波的其余频段还用于导航及通信。中波沿地面只能传播几百公里,故可用于近程导航。利用磁性天线的方向性,可测出发射台的位置。这种测向导航,由于设备简单方便,已广泛地用于飞机等移动物上。此外,在近距离的移动式点间通信中也常采用。

短波 在短波波段可以选择合适的频率,只用较小的功率和简单的天线,便使电磁波经电离层反射后传至几千公里以外,因此经电离层和地面间的多次反射能实现电话、电报和传真等洲际通信。但是对传送电视图像来说,频带宽度仍嫌太窄。短波通信的优点是设备简单、造价低廉、重量轻、体积小、机动性强,适用于移

动点间通信，所以短波通信在第二次世界大战中曾大显身手。但短波通信的缺点是电波经电离层反射后有双折射现象，信号回到地面时会产生严重失真。由于电波经电离层反射后散布在很宽的区域，因而短波通信的保密性也较差。

因为短波广播不需保密，可靠性的要求也不高，加之设备简单，需要的功率小，故被广泛采用。目前全世界有数以千计的强功率广播电台，短波广播波段已显得十分拥挤。

短波通信的另一个重要缺点是信号的衰落比较严重，声音常常忽大忽小地不断变化，这是由电离层的电子浓度和高度等不规则变化造成的。通常在接收系统中，可用自动增益控制电路和分集接收等办法来尽量减弱信号衰落的影响。

除通信和广播以外，短波还可用于超视距探测。电波经电离层反射至前方几千公里远的地面，若地面是粗糙不平的，一部分电波产生漫反射后返回发射点。这部分电波受地面或海面起伏不平的影响，信号中含有反射点的信息，故可利用它探测几千公里外的海情、舰船或飞机。

超短波 在这个波段的电磁波，由于波长只有几米，大部分情况下电离层已不能反射。同时，超短波沿地面的传播衰减也很大，所以它基本上是直射传播，即视线范围内的传播。

超短波的频率较高，它足以传输频带宽度为几兆赫的电视信号。电视广播技术的出现，使人们的文化生活发生了巨大的变化，它用独特的声、光、电变换手段，把各种图像和声音信息传递给远处的电视设备。所以，电视屏幕不仅是人们学习、娱乐的重要工具，也已成为大家认识和了解世界的窗口。此外，电视的足迹还遍布于科研、生产、教育、医学和国防等各个领域。人们在车间、工段和主要生产部位装上电视摄像机，管理人员可以随时通过电视观察到各处生产情况，及时指挥生产。这种工业电视不畏严寒酷暑

等恶劣生产条件，特别适用于在高温、粉尘、辐射和噪声等环境下工作。水下、地下和机器内部等人们难于到达的场合，更是电视摄像机合适的用武之地。电视与计算机配合可进行生产的自动控制。微光电视能在月光下拍摄出清晰的图像，因此广泛地用于宇宙飞船、深水探测和国防侦察等领域。医生们用红外线电视检查人体上微小的温度差来诊断皮肤癌和乳腺癌。电视广播教育更是国家普及文化的重要手段，它已为成千上万的劳动人们提供了充分的学习机会。

除电视以外，超短波还用于调频广播。超短波中继通信也曾是通信的重要方式。每一条中继线路可以同时传送几百甚至上千路电话。由于这种通信技术和设备都很简单，所以目前仍广泛采用。

此外，超短波的某些频率也常被用于遥测遥控或导航的目的。

微波 微波是比超短波波长更短的无线电波。它沿地面传播的衰减很大，且电离层的电子浓度也不足以使它反射回地面，所以用微波进行通信时主要是直视距离的传播。为了实现微波沿地面的长距离通信，必须采用中继方式。中央电视台的节目就是这样一站接一站地传送到祖国各地的。微波通信的主要优点是频带宽，通信容量大，因此采用微波通信可以在一定程度上缓解当前日益增长的对通信容量的需要。此外，由于微波通信是在视距范围内进行的定向通信，其保密性也比短波通信高得多。在微波波段中，分米波的信道容量较小，毫米波则易受雨、雪、云雾等气象因素的影响，因此目前的微波通信大多数工作在厘米波段。

微波中继通信的最大弱点是相邻台站间的距离不能太大，较宽的海峡或沙漠就成为不可逾越的障碍。利用对流层和电离层的不均匀性；或流星余迹实现的微波散射通信是另一种重要的微波

通信方式。10 km 以下大气层的散射传播，通信距离可远达 700 km 左右。利用 100 km 高度上电离层 E 层的不均匀性，也可实现超短波散射通信，最大距离可达 2000 km。现在，散射通信是地面远距离超视距通信的一种广泛采用的方式，许多战略通信网也大量采用散射通信。但微波散射通信要用大功率发射机、高增益天线和高灵敏度接收机，因而成本较高，也不易隐蔽。

卫星通信是当前远距离通信及国际通信中一种先进的通信手段。国际上使用的通信卫星大多数是同步卫星，也叫静止卫星。利用这种卫星作为中继站来转发电波信号，可以实现地面上的远距离通信。所以通信卫星实际上就是设在太空的无人值守的微波中继站。

卫星通信使用的频率多为 1 至 10 GHz 的微波频率，有的更高些。由于频带很宽，通信容量较大。现已实现 5 千个话路的双向通信，也可用来传输 12 路彩色电视机节目。卫星通信还具有传输距离远、传递迅速、使用灵活、可靠性高的特点。它的主要弱点是卫星本身和发射卫星的火箭造价较高，电源和元器件的寿命有限。目前一般只能使用 7 至 8 年。同时，卫星地面站的设备庞大，技术也比较复杂。

由于微波通信使用频率高、频带宽、容量大，自从把微波用作通信以来，几年间就一跃而成为远距离无线电通信的主力。可以预料，在最近几年内它仍将是通信事业发展的方向。

除用于通信外，微波的另一个传统应用是雷达。因为微波的波长短，可以使用较小的天线而获得窄的波束，从而能进行准确的空间定位。使用微波波段中波长最短的毫米波制成的毫米波雷达，不仅能测得目标的位置和距离，还可获得被测目标的形状、数量、大小等信息。现代的制导武器实际上就是载有毫米波雷达、数据处理装置和控制装置的火箭，使用这种制导武器已成为现代战

争的主要特征。

微波作为电磁能量的一种，最近几年已广泛应用于加热和测量等工农业生产部门。微波加热具有速度快，物料受热均匀，能量转换效率高，便于控制和工作环境清洁等优点。在生物医学方面，微波也有广泛的应用潜力。微波诊断、微波理疗、微波针灸等新应用也正在不断涌现。

光波 在电磁波谱中，光波的频率比微波高几万倍，所以人们称它是最大的和最后的电磁波资源。

这里所说的光波主要是指激光，它是由物质受激而产生的，因而与普通光（如太阳光、电灯光等）不同，它的频谱纯、亮度高、相干性好、方向性强。

激光的频谱很纯。或者按光学的说法，它的单色性好。例如氦氖激光的谱线宽度只有一千万分之一埃，比目前国际上所采用的单色光标准氪灯还要纯几个数量级。激光的这种高度单色性常常被用来做干涉仪，或用于其它精密的距离或长度测量。由于激光是物质的受激辐射，各辐射源发出光的频率是单一的，相位一致，方向也相同，所以它们具有很强的相干性，叠加起来能得到很高的亮度。利用这种相干性可精确地检查物体表面的粗糙度，对物体形变进行无损检查，并由此开辟了一种崭新的图像记录和重现的新技术——全息照相术。由于激光的亮度高，目前已用于精密加工、医疗手术、提高武器性能和控制核聚变等。

从电子学的角度来看，使我们感兴趣的莫过于激光的高频特性和相干性了。激光的出现是相干电磁频谱向高频段发展的必然结果。它不仅是光学领域的一项重大成就，也使电子学的发展开创了崭新的局面。利用激光的相干性可进行特大容量的光纤通信、空间通信和 underwater 通信。利用相干性、单色性和波长可调的激光雷达，可进行资源勘查、公害监控和大地测量。借助于光-电转换