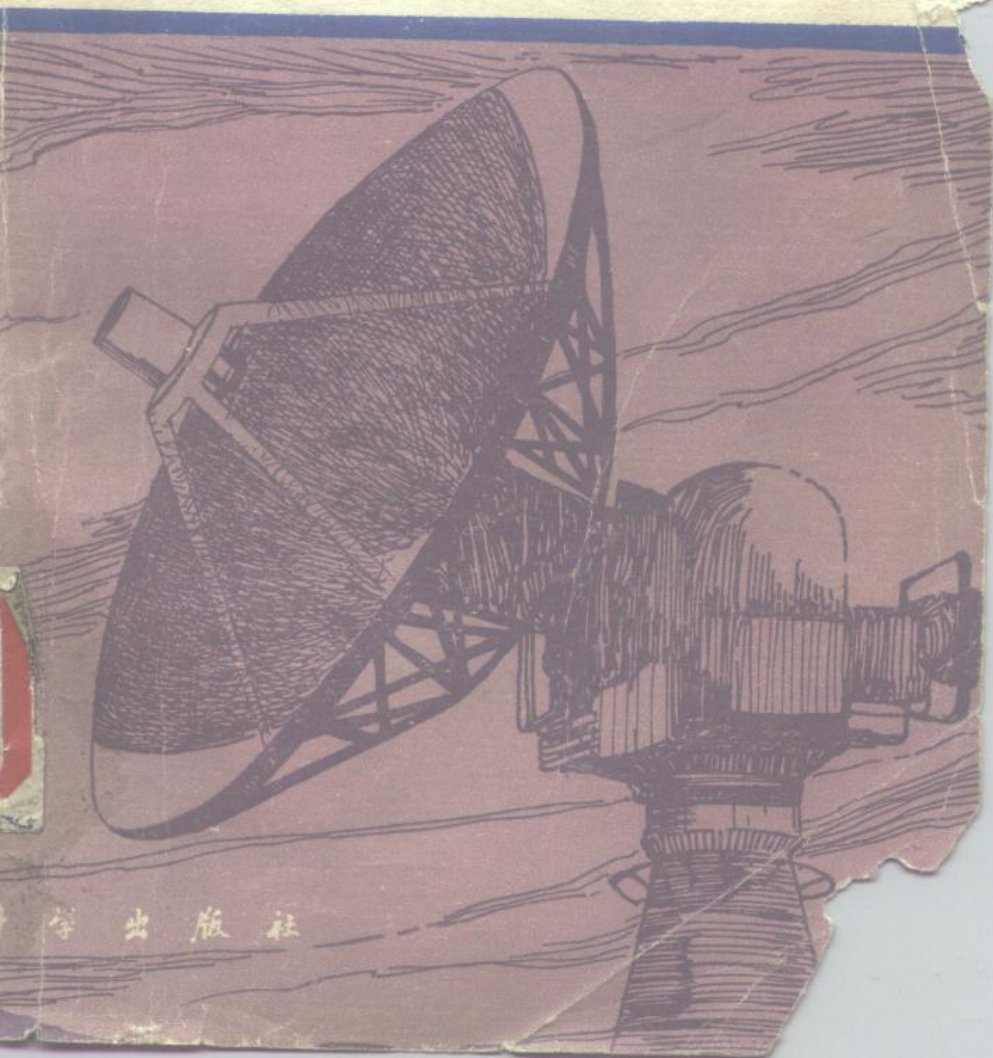


电子学基础知识丛书

微波及其应用

甘仲民 著



学出版社

72.45
155

电子学基础知识丛书

微波及其应用

甘仲民 著



科学出版社

1987

8710458

内 容 简 介

本书是《电子学基础知识丛书》之一，书中通俗地介绍了微波的基础知识及其应用。本书不仅概念清楚，使人读后会对微波的基础知识有深刻的印象，而且文字生动流畅，使人在流连于微波知识的同时，又能领略文学风趣。本书可供具有中学文化程度以上的广大读者阅读。

电子学基础知识丛书

微波及其应用

甘仲民 著

责任编辑 隋启水

科 学 出 版 社 出 版

北京朝阳门内大街137号

中国科学院印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

1987年1月第 一 版 开本：787×1092 1/32

1987年1月第一次印刷 印张：7

印数：0001—3,100 字数：157,000

统一书号：15031·766

本社书号：4602·15—7

定价：1.30元

前 言

电子科学技术是一门发展迅速、应用广泛的近代科学技术。电子技术水准是现代化的重要标志。为了尽快地普及电子科学技术知识，中国电子学会和出版部门聘请有关专家、学者组成编委会，组织编写三套有不同特点的、较系统的电子学普及丛书。本丛书是《电子学基础知识丛书》，由科学出版社出版；其余两套是《无线电爱好者丛书》，由人民邮电出版社出版；《电子应用技术丛书》，由科学普及出版社出版。

《电子学基础知识丛书》侧重于系统地介绍电子学各专业学科的基础知识。以定性说透物理意义为主，少用数学推导。在文字上尽量做到严格准确、深入浅出。读者通过阅读本丛书，可以为更深入地学习、掌握和应用电子科学技术知识打下一定的基础。本丛书适于具有高中和大学低年级文化程度的广大读者阅读。

我们希望广大读者和电子科学技术工作者，对这套丛书的编辑出版提出宝贵意见，热情给以帮助，使之不断充实和完善。

中国电子学会科普编委会

序 言

这是一本通俗地介绍微波及其应用的科普读物，谨献给有兴趣的广大读者。

在本书编写的过程中，得到了我的老师、中国科学院学部委员毕德显教授的大力支持和指导，这充分地反映了老一代科学家、教育家对科学普及工作的热情关怀，对此特表示深切的谢意！

甘 仲 民

1984年5月

目 录

第一章	一项巨大的财富资源	(1)
1.1	你想知道微波吗	(1)
1.2	波与频率	(2)
1.3	从电磁频谱说起	(4)
1.4	电磁频谱中的一个“黄金区”	(7)
1.5	对本书主角——微波的评价	(9)
第二章	麦克斯韦的功绩	(15)
2.1	发明家的苦恼	(15)
2.2	麦克斯韦的贡献	(16)
2.3	电波与信息	(20)
2.4	常青的理论之树	(22)
第三章	电磁场初探	(25)
3.1	电磁场——特殊的物质	(25)
3.2	交变电磁场与电磁波	(35)
第四章	巧夺天工的微波技术	(42)
4.1	需要合适的“河道”——微波的传输	(43)
4.2	各显神通的微波无源器件	(58)
4.3	微波的泉源	(77)
4.4	从涓涓细流到浩浩荡荡——微波的放大	(91)
4.5	何去何从——微波的定向辐射和接收	(103)
4.6	不共戴天——与噪声作斗争	(114)
第五章	大有作为的广阔天地	(129)
5.1	科学的千里眼——雷达和微波遥感	(129)

5.2	微波通信的两颗明珠——微波接力通信和卫星通信	(169)
5.3	微波的其他应用	(208)
5.4	未来的展望	(214)

第一章 一项巨大的财富资源

1.1 你想知道微波吗

你想知道微波吗？——它是我们这本小册子的主人公。这里描写的，不是曲折离奇的故事，不是花前月下的抒情，而是无线电电子学卷中，千万人智慧结晶和劳动奇迹的风毛麟角。这里，作为人类征服和驾驭自然片断点滴的纪录，不但使人增长知识，同时也是激动人心的啊！

生活在二十世纪八十年代的今天，对我们来说，“微波”，不再是、也不应是陌生的字眼了！

如果说，我们的无线电爱好者在二、三十年代能够摆弄的，只是一架小小而简陋的矿石机，五、六十年代“兴奋点”转向中、短波无线电收、发讯机，六、七十年代以安装超短波电视接收机为乐趣，那么，今天他们已经开始在微波领域里大显身手了——一、两年前，国内还曾经召开过业余爱好者制作微波卫星直播电视接收机的经验交流会呢！更多的读者可能没有参加过诸如此类的活动，但绝不等于说他们与微波毫不相干：当你在电视机屏幕前注视着从首都北京播出的重要新闻、欣赏着从大洋彼岸传来我国体育健儿在国际比赛中龙腾虎跃的身影时，当你从报纸和画报上看到宇宙飞船“旅行者2号”在飞出太阳系的漫长旅途中拍回的土星绚丽多姿的照片时……，请注意，其中靠了微波通道的传送！人们是在分享微波的成果！朋友，你是否意识到这一点呢？

在现代化的一个舞台上，微波扮演着各种各样的角色

8710458

· 1 ·

——无论是生气盎然的白天，还是万籁俱寂的夜晚，茫茫的太空之上，苍穹之下，微波来往穿梭，络绎不绝，它是和平福音的“信使鸽”，也是“电子战争”的主要参加者；它是消灭人体寄生恶瘤的白衣战士，也是使小麦增产的“魔法师”，它是探测宇宙的千里眼，也是深入生物断层的侦察兵……总之，微波同现代化的社会息息相关。微波是什么？怎样让它为四个现代化服务？这一切，当然会激发我们的求知渴望，燃起我们的探索热情！

在广阔的微波领域里，我们的先辈倾注了心血和汗水。如今，正满园秋色，硕果累累。当我们作为后来者分享着那丰收的喜悦的时候，不仅要饮水思源，更要继往开来。关心祖国的微波工程吧！有志于此的青年朋友们，到这里来安营扎寨，干一翻事业吧！微波的今天是美好的，微波的明天将更加美好！

1.2 波与频率

在很多关于无线电的科普读物中，为了使读者便于理解，都用水波来说明波与频率的概念。

一石投水，激起千层波，波浪到达处，水面起伏。从一个波峰行进到下一个波峰所需要的时间 T ，就叫做波的周期。每秒钟所经过的波峰（或波谷）数称为波的频率，用 f 表示。换句话说，频率是波从最小值到最大值的变化次数，这样，就不难理解 f 与 T 之间的关系是

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

相邻两个波峰（或波谷）之间的距离，叫做波长，一般用希腊字母 λ 表示。

f 、 T 和 λ 都是从某一角度来描写波的特征的。它们之间当然不是孤立无关的，除了上面讲到的 f 与 T 的关系外， λ 和 T 、 f 之间，有什么内在的联系呢？观察水波可以发现，波是以某一个速度 v 传播的，而两个波峰相隔的时间是 T ，距离是 λ ，它是波以速度 v 在时间 T 内行进的结果，即

$$\lambda = vT = \frac{v}{f}$$

后面我们将会看到，光波和无线电波在大气和真空中的传播速度是

$$v = c = 3 \times 10^8 \text{ 公里/秒}$$

$$= 3 \times 10^8 \text{ 米/秒}$$

波的形状很多，其中最常见而有用的一种称为简谐波，或正弦波。在日常生活中，人们对交流电是比较熟悉的。如果将电源插座中的交流电接到示波器中去，就会在荧光屏上发现图1.1所画的正弦波形，它是随着时间而平滑起伏的，可以用下面的一个简单的数学公式来描述：

$$u = A \sin (2 \pi f t + \varphi)$$

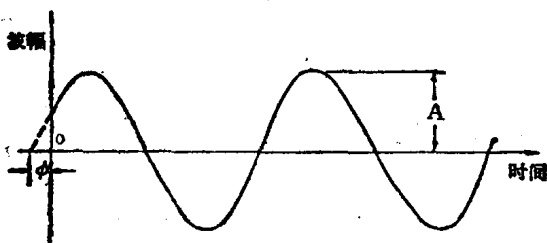


图1.1 从示波器上观察到的交流电正弦波形

从0到波峰数值的大小 A 称为振幅， $(2 \pi f t + \varphi)$ 称为相位，它表示在某一时刻 t 对应于正弦波中的某个状态。例如 $(2 \pi f t_1 + \varphi) = 0$ ，表示正弦波在 t_1 时刻为零值； $(2 \pi f t_2 + \varphi) = \pi/2$ ，表示正弦波在 t_2 时刻为波峰等。在上面的数

学式中, φ 叫做初相, 它表示 $t = 0$ 时刻正弦波取值为 $A \sin \varphi$ 的状态。

在无线电技术中, 还常常用到相速的概念, 它是指相位所确定的状态运动的速度。在真空或大气中的无线电波, 它的相速就等于光速。

交流市电仅仅是正弦波的一个例子。在无线电领域中, 正弦波也是我们常遇到的。当然, 也有很多电信号的波形很复杂, 但我们可以用许多不同的正弦波叠加起来, 代表这个复杂的变化, 这点, 以后我们还要谈到。

水波在水平面上是向四面八方传播的; 电波则遍及立体空间, 因此, 只用频率、波长、周期等概念, 还不足以勾画出波的全貌, 需要再增加一些概念。

波的泉源称为波源。能传播波的物质称为媒质。波动从波源出发, 在媒质中向四面八方传播, 在某一时刻, 将它们到达的各点联成的面, 叫做波前或波阵面。而相位相同的点联成的面, 则叫做同相面或波面。波阵面为平面的波, 叫做平面波, 波阵面为球面的波, 称为球面波。这些概念, 在下面的有关章节中是要遇到的, 因此, 在这里有必要提一下。

1.3 从电磁频谱说起

要“胸中有数”。这是掌握自然科学的一种基本方法。

研究声学是从声谱入手, 研究光学是从光谱入手。通过声波波长、光波波长的范围划分, 帮助我们建立了声波和光波某些数量上的概念。在无线电电子学中, 有没有这样的“谱”? 有, 这就是科学家们命名的电磁频谱。

电磁场理论告诉我们, 随时间变化的电磁扰动, 是以有限速度传播的, 我们称它为电磁波动, 或称电磁波。将电磁波按

表1.1 无线电信号频率表

[illegible]

照频率的高低排列起来，便得到完整的电磁频谱的图象，这就是表1.1。如果自低至高，将每一频率间隔编上号码，很容易发现图表中具有下面的规律：

$$0.3 (10^N) \text{ 赫} < \text{第} N \text{ 频段} \leq 3 (10^N) \text{ 赫}$$

例如，对于超高频（SHF）频段， $N=10$ ，它的下边界频率是 $0.3 (10^{10}) = 3 \times 10^9$ 赫（3千兆赫），上边界频率是 $3 (10^{10}) = 3 \times 10^{10}$ 赫（30千兆赫）。

这些数字往往使人感到枯燥无味，可是，它却是我们学习无线电理论与技术的一把钥匙哩！

从电磁频谱表中可以发现，微波是指波长从1米到1毫米（即频率从300兆赫到300千兆赫）这个范围内的电磁波，它的低频端与超短波接壤，而高频端与红外线毗邻。

如果把上述的微波频段比作疆域的话，则它可以称得上是幅员广大！为了便于“管辖”和开发，人们进一步将它划分为分米波〔在频域称为特高频（UHF）〕、厘米波〔超高频（SHF）〕和毫米波〔极高频（EHF）〕几个波段。从10分米到1分米（频率为300—3000兆赫）的波属于分米波。从10厘米到1厘米（3千兆赫—30千兆赫）的波属于厘米波。从1厘米到1毫米（30千兆赫—300千兆赫）的波属于毫米波。

在国内外的技术刊物和微波“行家”的口中，还常常提到L波段、C波段、X波段、Ku波段等等，这是对超高频和极高频的再进一步细分，并且用拉丁字母加以标记（参见表1.2）。

人类对电磁频谱的探索、开发和利用，是从较低频率向较高频率逐步扩展的。1895年已经发明了长波无线电通信，而厘米波雷达是第二次世界大战末期（四十年代末）出现的，到了七十年代，才有30—40千兆赫的卫星星际通信和91

表1.2 超高频和极高频的具体划分

频 段 名 称	频 带 (千兆赫)
L	1.0— 2.0
S	2.0— 4.0
C	4.0— 8.0
X	8.0— 12.5
Ku	12.5— 18.0
K	18.0— 26.5
R	26.5— 40.0
F	40.0— 60.0
E	60.0— 90.0
V	90.0—140.0

千兆赫的微波遥感以及波长更短的光通信。这个历史进程，是与社会发展需要和科学技术水平相适应的必然结果。

1.4 电磁频谱中的一个“黄金区”

1979年9—12月，美丽如画的瑞士日内瓦的一幢大厦里，来自世界30多个国家的1900多名代表，在这里展开了一场唇枪舌剑的激战，吵闹声冲破了这座名城的宁静。发生了什么事情？原来，人们在为某些无线电频谱的使用和分配问题而发生争论。发达国家和发展中国家双方对峙，各持己见。为了避免分裂，有些问题，直到会议闭幕，仍没有作出决议，只好决定推迟到1984年、1986年再议。

我们不想、也没有必要细谈这次会议的具体情节，只是以

此向读者表明：无线电频率的分配和使用，涉及每个国家的重大利益。毫不夸张地说，电磁频谱，是一项巨大的财富资源！

从对人类能够提供的使用价值来看，如果说，电磁频谱是无线电疆域的宝藏，那末，微波频段就是其中的一带“金矿区”了。

请看看事实——

在无线电通信中，只有借助于微波（以及它的延伸——光波），才能解决大容量、高速率的信息传输，满足人们对通信不断增长的需要；

在雷达中，只有借助于微波，才能形成尖锐的无线电波束，对目标进行精确的定位和测量；

在电子计算机中，只有借助于微波技术，才能向更高的运算速度飞跃；

在外层空间的航天活动中，只有借助于微波，才能克服电离层等等的屏障，保证地面对航天器的遥测、遥控和通信联络；

在地球资源勘察、气象探测、天文学、医学、生物学、工农业生产中，微波创造了、并且继续创造着一连串的奇迹。

微波广泛的用途，微波重大的价值，吸引了各行各业（首先是从事无线电电子学）的人们，象当年的淘金者涌向黄金海岸一样，到这个广阔的频段上竞相开发。自本世纪四十年代至今，这个资源不但没有被挖掘枯竭，而且越发兴旺！于是，从地面到空中，从西方到东方，从北极到南极，到处都有微波，不少地方，甚至酿成相互干扰之“灾”，以致不得不通过一个世界性的无线电管理委员会，进行频段的分配，规定各种干扰指标……，虽然为此纠缠不休，每次开会不免

了吵得面红耳赤，而且科学家和工程技术人员在发展和完善微波理论与技术的进程中，遇到了一个又一个令人头痛的问题……，但是谁都没有叫苦，没有退缩。为了使微波进一步造福于人类，人们思考着，工作着，创造着，构成了一尊尊可敬可叹的“淘金者”的形象！

1.5 对本书主角——微波的评价

读者可能要问：为什么微波具有这样广泛的用途？凭什么使它身价百倍？现在就让我们来效法那些一丝不苟的地质学家，对摆在我们面前的研究对象——微波的物理特性作一番考察，写出答案来。

上面说过，与无线电长、中、短波一样，微波也是一种电磁波。顾名思义，“微波”是波长极短（也就是频率很高）的电磁波。当然，波长的长与短、频率的高与低都是相对的，但是，量变积累到一定程度，便要产生质变，形成自己独特的风格和本领。对于微波来说，它的特点是什么呢？

第一、类似于光波的特性。微波的“微”，具有两重含义：首先，它的波长很短，这一基本特征，是与长、中、短波波长相比较而得出的。为了使大家建立深刻的印象，让我们从表1.1的电磁频谱中，取其一、二进行比较。微波频段的高端，与光波频段相毗邻，这虽在表1.3中没有示出，但却是值得十分注意的。其次，微波的波长很短还意味着，它比地球上和宇宙空间中许多物体（例如高山、森林、楼房、飞机、舰船、流星等等）的尺寸小得很多，或相差无几。这点，也是与光波相类似的。因此，我们就不难理解：

光波在空间是直线传播的，微波在空间也是直线传播的，遇到障碍物，传播便要受阻，不象中、长波那样会“拐

表1.3 微波与市电、中波的比较

	频 率 (每秒周数)	波 长
市 电	50 赫	60,000,000米(60,000公里)
无线电中波广播	300—3,000千赫	1000—100米
微 波	300—300,000兆赫	1—0.001米(1米—1毫米)

弯抹角”。

光波可以通过尺寸甚小的透镜、抛物面反射镜等的聚集作用，形成很强的定向照射；仿此，利用几何光学原理，构成各种天线，微波也可以形成很强的定向辐射。从理论上讲，中、短波也可以形成定向辐射，但是可以证明，为了将电磁能量集中在很小的角度内辐射（这个角度与波长对天线尺寸比值成正比），它们所需要的天线尺寸将大到难以（甚至无法）实现的程度！

第二、穿越电离层的透射特性。地球的外围，有对流层、同温层、电离层和外层大气等，图1.2画出了它们在白昼的配置图。这些宇宙环境，对地球有着密切的影响。就无线电波的传播来说，位于大气上层的电离层的作用是举足轻重的。这些电离层，是稀薄空气在太阳光和宇宙射线的作用下发生电离而形成的，它对波长较长的电磁波产生强烈的折射和吸收，电离的程度越强，波长越长，这种作用越大。到了微波频段，其作用则可以忽略不计。于是，我们得出了图1.3所画的不同无线电波长的传播途径。它表明，微波具有穿越电离层的透射特性。

如果只考虑电离层的影响，光波的透射能力要更强些。实际上，在微波和光波频段，对流层、同温层的影响是不容