



微波通信



内 容 简 介

本书主要讲述了微波多路中继通信的特点、频分制和时分制多路通信原理以及微波中继通信设备的工作原理等内容。对无线电通信的基本知识，现代卫星通信的工作原理和特点，通信卫星和地面站的组成，以及卫星通信的发展趋向，也作了简要介绍。可供有关专业技术人员、工人参考，也可作为中学生课外读物。

电子技术丛书

微波通信

李炳炎 编

山东科学技术出版社出版

山东省新华书店发行

山东新华印刷厂潍坊厂印刷

787×1092毫米32开本 8.125印张 167千字

1980年6月第1版 1980年6月第1次印刷

印数：1—1,199

书号 15195·62 定价 0.50元

出 版 说 明

电子技术是目前应用最广泛的先进技术之一，是衡量一个国家现代化水平的标志。为了普及电子技术知识，提高电子技术水平，早日实现四个现代化，我社决定编辑出版这套《电子技术丛书》。

这套丛书由山东大学《电子技术丛书》编委会主编。本丛书包括通讯、电视、微波技术、信息处理、电子器件及计算机等方面的内容，将分专题陆续编辑出版。本丛书力求做到理论联系实际、文字通俗易懂、内容简明扼要、切合实用，尽量方便广大读者阅读。

本丛书可供从事电子工业生产、科研的有关人员，高等院校、中专电子学专业师生及业余爱好者参考。

山东科学技术出版社

一九七九年六月

前 言

微波技术是二十世纪三十年代发展起来的尖端科学技术之一，它和原子能的利用、电子计算机技术、空间科学技术等新兴学科一样，对国民经济的高速度发展起着越来越大的推动作用。

微波通信是微波技术实际应用的一个重要方面，主要有地面微波中继通信和卫星通信两种方式，除用来传递电话、电报外，还可以用作数据传输、广播、电视、传真等。微波通信具有容量大、话路多、通信稳定、抗干扰性强、建设投资少等优点。研究和利用这种崭新的通信技术，对实现我国通信技术的现代化，赶超世界先进水平，都有着十分重要的意义。为了普及微波通信的基本知识，以满足广大读者的需要，编写了《微波通信》这本小册子。

本书在编写过程中，尽量避免较深的数学推导，力求深入浅出，通俗易懂。可供有关专业技术人员、工人参考，也可作为中学生课外读物。

编 者

一九七九年十月

目 录

第一章 无线电通信的基本知识	1
第一节 无线电波	1
一、从水波谈起	1
二、最简单的电磁波——平面波	2
三、电磁波谱和频谱	5
第二节 无线电波的传播	7
一、地波传播	7
二、天波传播	9
三、空间波传播	19
四、各波段无线电波的传播	24
第三节 调制与解调	27
一、调制	27
二、解调	30
三、调幅波及其频谱	30
第四节 无线电通信的基本原理	35
一、无线电发射机	35
二、无线电接收机	39
三、天线的基本知识	46
第二章 微波多路中继通信	53
第一节 微波通信的特点和波段	53
一、微波通信的特点	54

二、微波多路中继通信系统的组成	56
三、微波通信使用的波段	59
第二节 频分制多路通信原理	60
一、频带搬移和频率分割	61
二、单边带传输	63
三、多级变频和群变频	67
四、频分制多路通信的实现	71
第三节 时分制多路通信原理	74
一、取样定理	74
二、时分多路原理	76
三、多路脉冲调制	80
四、脉码调制(PCM)通信	88
第四节 微波通信的设备	92
一、微波电子管	92
二、天线设备	110
三、发射设备	114
四、接收设备	119
五、中继站	128
第五节 电视信号的微波传输	133
一、电视信号的特点	133
二、电视信号的传输	136
第三章 卫星通信	138
第一节 卫星通信的基本原理	138
一、什么是卫星通信	138
二、卫星通信线路的组成	140
三、卫星通信的特点	143

第二节 通信卫星	146
一、通信卫星是怎样发射的	146
二、通信卫星的组成	150
第三节 卫星通信地面站	158
一、天线系统	160
二、发射系统	164
三、接收系统	167
四、终端系统	176
五、辅助系统	179
第四节 卫星通信的发展	181
一、星体技术的新发展	181
二、地面站技术的发展	183
三、开辟新的波段	185
四、向数字化进军	186

第一章 无线电通信的基本知识

人耳能听到声音（语言或音乐）是因为声音可以在空气中传播。但是声音在空气中传播的速度很慢，而且衰减很快，所以传播的距离不远。如果把声音通过话筒变成音频电信号，这种电信号就可以通过扩大器、增音器等由电线传到很远的地方，这就是有线广播或有线电话。有线广播或有线电话必须由电线传输，如果不用电线，就必须利用无线电波来传播。无线电通信就是利用无线电波传送声音、文字、图象或其他信息的一种通信方式。本章简略地介绍了无线电通信的基本知识。

第一节 无线电波

一、从水波谈起

一提起波，人们常常会想起水波。但是，大自然还赋予人类许多看不见的波，如地震学家们所研究的地震波、在空气中传播的声波、收音机和电视机所接收到的电磁波。

当我们把一块石头投到平静的湖水中时，以石头击水的地方为中心，水面上会激起许多逐渐扩大的圆环，但是浮在水面上的小木块却只是在原来位置上下运动。这表明，水波

中的每一个水点都在原来位置作上下振动；而且，它能把振源发出的能量由近及远地以波动的方式传递出去。由此可见，振动在媒质中的传播就产生波，波是物质的一种运动形态。

每个波的最高处叫做波峰；波的最低处叫做波谷；两个相邻的波峰或波谷之间的距离叫做波长，如图 1-1 所示。波长的长短是由产生波动的振源振动的快慢来决定的，在一秒钟内振动的次数叫做频率。若用波长乘以频率就是波传播的速度，叫做波速。

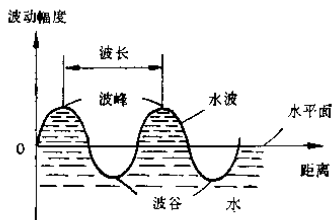


图 1-1 水波

波又分为纵波和横波两类：媒质微粒的振动方向与波的传播方向一致，这样的波叫纵波（如声波）；媒质微粒的振动方向与波的传播方向垂直，这样的波叫横波（如水波）。

二、最简单的电磁波——平面波

当强大的高频电流通过天线（如广播电台的发射天线）时，天线周围就会产生与高频电流频率相同的交变电场和磁场。交变电场在其周围空间产生交变的磁场，交变磁场在其周围空间产生交变的电场。交变电场与磁场互相激发的过程，

就是一个振荡过程。这种电磁振荡不断传入新的空间，把天线上高频电流的能量由近及远地向外传播，从而形成电磁波。图 1-2 为交变电磁场在某一直线上传播过程的示意图。图中实线表示交变电场的电力线，虚线表示交变磁场的磁力线，它们之间象链条那样互相垂直地一环套一环。由此可见，电磁波就是在空间传播的交变电磁场。

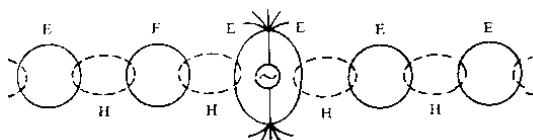


图 1-2 电磁波的产生

由于天线处在空间里，它所激发的电磁波是向四面八方传播的。在以天线为中心的某个球面上，各点的电场和磁场

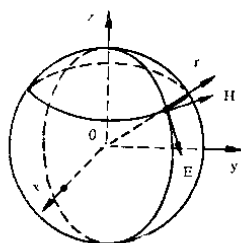


图 1-3 球面波

是天线在某一时刻同时激发的，其电磁振荡状态完全相同，所以电磁波是球面波。在球面波的每个球面上，各点的电力线和磁力线均与球面相切，而波是径向传播的，如图 1-3 所示。球面波的电场强度 E 、磁场强度 H 与传播方向 r

(径向) 互相垂直，所以电磁波也是一种横波。

在距离天线相当远的地方，球面的半径很大，如果只取

出球面的一小部分，就可把它近似看成平面，这一小部分波即可近似看作平面波。在与平面波传播方向垂直的每一个平面上，电场和磁场都是相当远处的天线在同一时刻激发的，这每一个平面叫做波阵面。电力线和磁力线互相垂直并且都在波阵面上。由于通常馈送给天线的是按正弦规律变化的高频电流，所以它产生的交变电磁场也是按正弦规律变化的。平面波在某一瞬间的波形如图 1-1 所示。由图中看出，电场强度为零的地方，磁场强度也为零；电场强度最大的地方，磁场强度也最大。两者的变化完全一致。平面波的电场、磁场和传播方向互相垂直，三者构成右手螺旋规则。

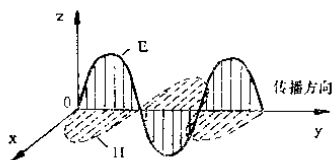


图 1-4 平面波的波形

电磁波是客观存在的一种特殊物质，它具有一定的能量和动量。电磁波一经产生，就可以脱离最初产生它的天线，在空间继续运动。电磁波不是由分子、原子构成的，而且许多电磁波可以同时占据同一空间，因此它的运动不依赖于任何媒质，可在真空中传播。理论和实验证明，电磁波在真空中传播的速度与光在真空中传播的速度是相同的，均为 3×10^8 米/秒。这表明，光在本质上也是一种电磁波。电磁波的基本粒子叫光子。光子的能量 (ϵ_ϕ)、动量 (p_ϕ) 和质量 (m_ϕ) 依

次可表示为:

$$\varepsilon_{\phi} = h \cdot f$$

$$p_{\phi} = h \cdot f / c$$

$$m_{\phi} = \varepsilon_{\phi} / c^2 = h \cdot f / c^2$$

式中: h 为普朗克常数 ($h = 6.6252 \times 10^{-34}$ 焦耳·秒);
 f 为频率; c 为光速。

三、电磁波谱和频谱

不仅无线电波和可见光是电磁波, 而且红外线、紫外线、 x 射线和 γ 射线等都是电磁波。这些电磁波在本质上完全相同, 只是波长不同而已。如果我们按照它们在真空中波长的顺序, 把这些电磁波排列起来, 就得到电磁波谱。由于电磁波在真空中的波长 (λ)、频率 (f) 和光速 (c) 有如下关系:

$$\lambda \cdot f = c = 3 \times 10^8 \text{ 米/秒}$$

所以
$$f = \frac{c}{\lambda} = \frac{3 \times 10^8}{\lambda} \quad (1-1)$$

这样我们也可以按照频率的顺序把这些电磁波排列起来, 得到电磁频谱。图 1-5 是用对数标度按波长和频率的大小绘制的电磁波谱和频谱。

由图中看出, 光波是波长极短的电磁波, 一般以埃(1 埃 = 10^{-8} 厘米) 为单位来度量。无线电波的波长较长, 它的短边界(亚毫米波) 与光波的长边界(红外线) 相连接。根据无线电波传播的特性, 又可分为超长波、长波、中波、短波、超短波(米波) 及微波等几个波段。微波就是指波长为 0.001 ~ 1 米的无线电波。其中, 波长为 0.1 ~ 1 米的波称为分米

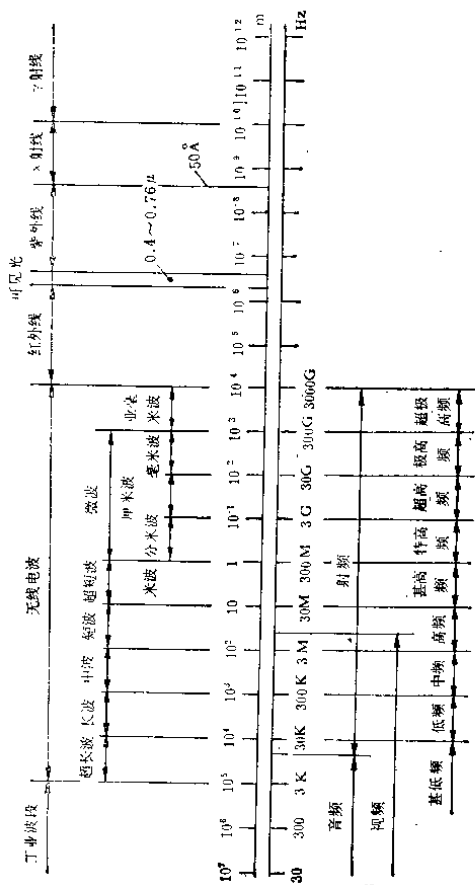


图 1-5 电磁波谱和频谱

波；波长为 $0.01\sim 0.1$ 米的波称为厘米波；波长为 $0.001\sim 0.01$ 米的波称为毫米波。波长小于 0.001 米的亚毫米波是否属于微波的范围，还没有一致的意见；也有人称这个波段为超微波。

第二节 无线电波的传播

无线电通信方式和无线电波的传播方式有很大关系，因为某一种传播方式往往对某一段频率的电波特别有利，所以不同波段适用于不同的通信业务。无线电波主要有地波、天波、空间波三种传播方式，其他还有散射、绕射等。一个天线辐射出的无线电波的传播方式常常是多种形式的，例如既有地波、天波，也有空间波等，但是总有一种传播方式是主要的。

一、地波传播

地球表面附近的无线电波，可以沿着地球表面传播，即随着地球表面的弯曲而改变传播方向，如图 1-6 所示，这种传播方式称为地波（或表面波）传播。



图 1-6 地波传播

地波传播与地面有密切的联系，地的性质不同，传播的情况也不同。这是因为不同地质（如海洋、陆地、沙漠、干地、湿地等）电性质是不同的。地形对电波传播也有很大的影响，平地和山地对地波传播的影响是不同的。

地波传播时有以下的现象和特点：

1. 有地面吸收

当地波沿地面传播时，它在地内要产生感应电流。由于地不是理想导体，所以感应电流在地内流动要消耗能量，这个能量是由无线电波的能量供给的。这样，无线电波在传播过程中就要损耗一部分能量。地面的吸收大小与下列因素有关：

(1) 地的导电性能越好，吸收越小。例如，海水的导电率 σ 为 $4 \text{ 姆} \cdot \text{米}^{-1}$ ，湿土约为 $0.01 \text{ 姆} \cdot \text{米}^{-1}$ ，干土约为 $0.001 \text{ 姆} \cdot \text{米}^{-1}$ 。所以无线电波在海洋表面上的衰减比陆地小，在湿土上的衰减比干土小。

(2) 无线电波的频率越低（波长越长），吸收越小；频率越高，吸收越大。这是因为地的电阻与电波频率有关。频率越高，感应的地电流由于趋肤效应更趋于地表面流动，使流过电流的有效面积减小，地电阻增大，地的吸收增大。频率大于 1600 千赫的无线电波，除非通信距离很短（几十公里以内），一般不用地波的形式来传播。而长波却可以借助地波传播 2500~3000 公里的距离。

2. 有绕射损失

无线电波在传播过程中，有绕过障碍物的能力，这种现象叫做绕射。地波是沿地球表面传播的，地面上的障碍物对其有一定的阻碍作用。要想用地波传播完成通信任务，无线电波就必须有一定的绕射能力。

绕射能力与地形的起伏和波长的长短有关。波长越长，绕

射能力越强；障碍物越高，绕射能力越弱。障碍物对无线电波传播的影响，要看它与波长的比值而定。对长波来说，较高的山也不能算障碍；对微波来说，海面上的波浪或田间的草木也可能形成严重的障碍。在地波传播中，长波的绕射能力最强，中波次之，短波较小，超短波和微波最弱。

3. 传播比较稳定

因为地面的电性质在短时间内不会随时间而改变，而且基本上也不受气候条件的影响，所以地波传播比较稳定，这是它的主要优点。

4. 有“起飞”和“着陆”效应

地波传播虽然与整个传播路程地面的电性质有关，但邻近发射天线和接收天线的地区，地面的吸收作用，对地波的传播起着决定性的作用。因此，地波的传播过程与飞机的飞行很相似，即无线电波从发射天线的地区起飞，在距离地面一定高度上向接收天线的方向飞行，然后在接收天线的区域降落，这种情况称为地波的“起飞”和“着陆”效应。为了提高无线电波的传播效率，在选择收发地点时要考虑到地面的导电情况，尽量选海边或湿土地方，必要时可采取改良地面的措施，如埋设地网等。

二、天波传播

天波传播是指无线电波通过电离层反射的传播。也就是说，当无线电波以天波的形式传播时，其传播的特点主要决定于反射它的电离层。所以必须了解电离层的形成、结构以及无线电波在电离层中的传播规律。

1. 电离层的形成和结构

在大气层中，大约直到 100 公里高处，大气的化学成分几乎同地面附近的一样：干燥的大气包含 78% 分子氮 (N_2)，21% 分子氧 (O_2)，只有约 1% 的轻气体（氦、氖等）。这是因为在此高度以内经常发生的上升气流和下降气流使大气混合得很好。90 公里以上，对流现象很小，在具有很高能量的太阳光线作用下，氧分子和氮分子离解为原子。因此，在大气层里除了分子氧、分子氮以外，还有原子氧和原子氮。除此而外，大气层还分为若干层，较重的气体（如氧），处在较低

的层里；较轻的气体（如氮），处在较高的层里，如图 1-7 所示。每一层气体的分布是上疏下密的。从大气层对无线电波传播的影响来看，可分为对流层、同温层和电离层，如图 1-8 所示。

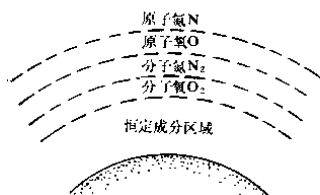


图 1-7 大气层的化学成分

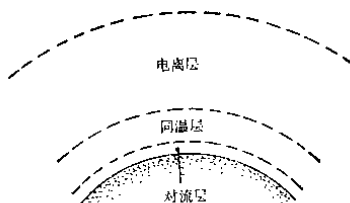


图 1-8 大气层的结构