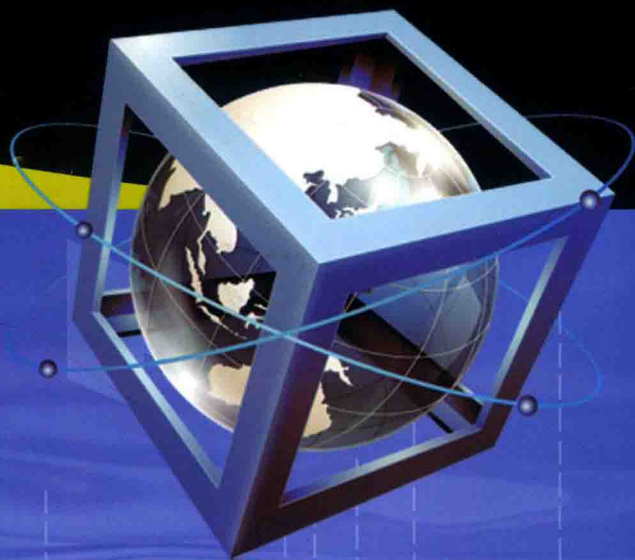


无线电技术

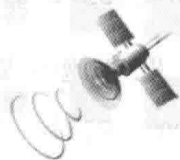


鲍祖尚 著

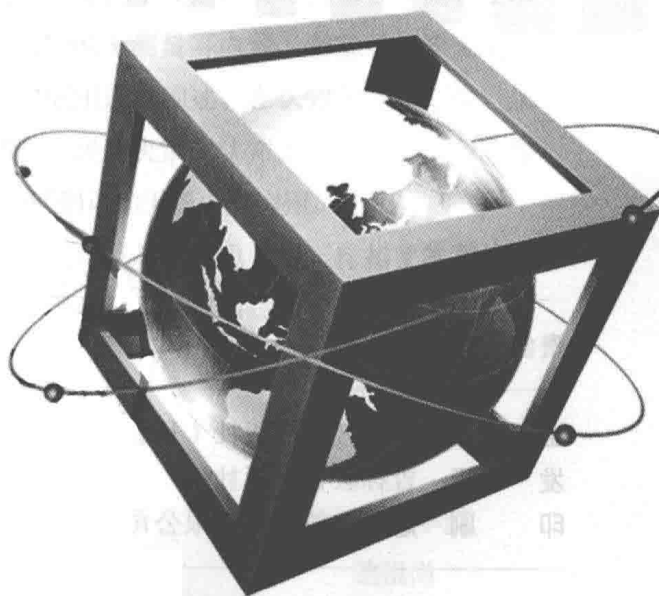


吉林教育出版社

无线电 技术



鲍祖尚 著



吉林教育出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

无线电技术 / 鲍祖尚著. — 长春 : 吉林教育出版社, 2019.3

ISBN 978-7-5553-6947-9

I. ①无… II. ①鲍… III. ①无线电技术 IV.
①TN014

中国版本图书馆CIP数据核字(2019)第051951号

无线电技术

鲍祖尚 著

责任编辑 韩颖

封面设计 优盛文化

出版 吉林教育出版社 (长春市同志街 1991 号 邮编 130021)
发行 吉林教育出版社
印刷 定州启航印刷有限公司

开本 710 毫米 × 1000 毫米 1/16
印张 14
字数 251 千字
版次 2019 年 3 月第 1 版
印次 2019 年 3 月第 1 次印刷
书号 ISBN 978-7-5553-6947-9
定价 65.00 元

前 言

无线电波或射频波是指在自由空间传播的电磁波，其频率 300GHz 以下，其原理在于导体中电流强弱的改变会产生无线电波。在 1861 ~ 1865 年间，麦克斯韦最早在他递交给英国皇家学会的论文《电磁场的动力理论》中阐明了电磁波传播的理论基础。1906 年圣诞前夜，范信达（Reginald Fessenden）在美国马萨诸塞州采用外差法实现了历史上首次无线电广播。1922 年，位于英格兰切尔姆斯福德的马可尼研究中心，开播世界上第一个定期播出的无线电广播娱乐节目。

无线电最早应用于航海中，使用摩尔斯电报在船与陆地间传递信息。现在，无线电有着多种应用形式，包括无线数据网，各种移动通信以及无线电广播等。

本书主要从无线电技术的概述讲起，先介绍了无线电技术的基础、调频技术及应用、无线电频谱的管理模式、无线电的电子测量等内容，着重对认知无线电的概述、认知无线电技术和认知无线电的应用进行阐述。在认知无线电领域，从相关标准组织进展情况的介绍到频谱感知、频谱决策、认知无线电的安全问题和认知无线电的实现，在军事及商业模式下谈到认知无线电的应用。

本书的撰写，期望对从事无线电技术工作及与无线电技术工作相关的科技领域的科技人员，起到一定的参考与借鉴作用。在本书撰写过程中，参阅了许多专家的著作和论文，在此一并表示感谢。

长沙师范学院

鲍祖尚

2018 年 10 月

目 录

- 第一章 无线电技术的概述 / 001
 - 第一节 无线电技术的发展简史 / 001
 - 第二节 无线电信号的调制 / 004
 - 第三节 无线电信号的传输 / 006
 - 第四节 无线电信号的接收 / 009
- 第二章 无线电技术的基础 / 013
 - 第一节 信号的频谱 / 013
 - 第二节 谐振回路 / 017
 - 第三节 传输线与天线 / 023
 - 第四节 滤波器 / 031
 - 第五节 选频放大电路 / 041
 - 第六节 锁相电路 / 047
 - 第七节 无线电电路中的噪声及干扰 / 055
 - 第八节 无线电测量的技术和设备 / 061
- 第三章 调频技术及应用 / 072
 - 第一节 调频信号的分析 / 072
 - 第二节 常用调频电路 / 074
 - 第三节 常用的鉴频电路 / 077
 - 第四节 调频收音机 / 083
 - 第五节 调频收音、对讲机的装配与调试 / 092
- 第四章 无线电频谱的管理模式 / 095
 - 第一节 无线电管理的目标 / 095
 - 第二节 无线电管理的手段 / 097
 - 第三节 无线频谱管理的主要内容 / 100

第四节	无线电频谱管理的技术基础	/ 118
第五节	其他国家的频谱管理模式	/ 120
第五章	无线电的电子测量	/ 122
第一节	电子测量的主要内容	/ 122
第二节	测量误差与数据处理	/ 123
第三节	常用测量仪器以及注意事项	/ 125
第四节	电子测量的基本技能	/ 129
第六章	认知无线电的概述	/ 156
第一节	认知无线电的概念	/ 158
第二节	认知无线电的基本特征	/ 161
第三节	传统无线电、软件无线电与认知无线电的关系	/ 162
第四节	认知无线电在国内外的技术发展现状	/ 164
第五节	相关标准组织进展情况的介绍	/ 165
第七章	认知无线电技术	/ 177
第一节	频谱感知	/ 177
第二节	频谱决策	/ 186
第三节	认知无线电的安全问题	/ 196
第四节	认知无线电的实现	/ 198
第八章	认知无线电的应用	/ 205
第一节	在军事通信中的应用	/ 205
第二节	在应急通信中的应用	/ 209
第三节	在公众网络中的应用	/ 210
参考文献		/ 215

第一章 无线电技术的概述

第一节 无线电技术的发展简史

一、电生磁、磁生电（1820 ~ 1855 年）

1820 年，丹麦的奥斯特以《论磁针的电流撞击实验》这篇简短的论文，正式向学术界宣告了电流磁效应之存在。至此，电与磁的秘密关系通过实验的方法被揭示出来，使得欧洲物理学界产生了极大的震动，导致了大批实验成果的出现，由此开辟了物理学的新领域——电磁学。

1831 年，法拉第完成了“磁电感应”实验，实现了“磁生电”的夙愿，宣告了电气时代的到来。法拉第便是电磁场学说的创始人。

二、电磁波问世（1855 ~ 1888 年）

1855 ~ 1864 年，英国的麦克斯韦发表了关于电磁场理论的三篇论文，将电磁场理论用简洁、对称、完美的数学形式表示出来，又经过后人的整理和改写后，成为经典电动力学的主要基础——麦克斯韦方程组。据此，1865 年他预言了电磁波的存在，并且计算出了电磁波的传播速度等于光速。

1888 年，德国的赫兹通过实验验证了电磁波的存在，从而全面验证了麦克斯韦的电磁理论的正确性，这轰动了全世界的科学界。由法拉第开创、麦克斯韦总结的电磁理论，至此算是取得了决定性的胜利。

三、无线电的启航（1889 ~ 1910 年）

1896 年，俄国科学家波波夫在彼得堡大学两幢相距 250m 的大楼之间，表演

了传递莫尔斯电码的无线电通信。此后，波波夫将无线电投入到了军事应用当中。

1896年，意大利的马可尼在英国伦敦用电磁波进行了约14.4km距离的无线电通信实验。一年之后，以其姓名命名的“马可尼无线电电报与信号有限公司”成立。

1900年，马可尼正式取得由线圈与可变电容组成的调谐回路专利权。1901年，马可尼完成了横跨大西洋3600km的无线电远距离通信。1909年，马可尼获得了诺贝尔物理学奖。

四、无线电的大发展（1910 ~ 1950年）

1906年，美国的德福雷斯特发明了真空晶体管。晶体管相当于无线电通信器材的“心脏”，能够放大微弱的无线电信号。

1912年，美国的阿姆斯特朗发明了超外差接收方式，它能使因为无线电信号直接接收与放大而引起的一系列困难得到解决。此后，无线电广播事业出现了一派兴旺景象。

1914年，第一次世界大战爆发，无线电使战地部队之间能够快速通信，从而加快了战事移动速度，掌握了主动权。

1920年8月，美国底特律建立了一家试验性电台，播送州长竞选新闻，被称为首次广播新闻。

1920年11月，美国的康拉德建造了世界上第一座广播电台。此后，法国、英国、德国、意大利与日本，相继在1921 ~ 1925年间成立了自己的广播电台。

1925年，英国的贝尔德展示了一种非常实用的电视装置，成为现代电视机的雏形。

1939年，在美国诞生了第一台黑白电视机。

1935年，英国的瓦特发明了世界上第一部雷达。在第二次世界大战当中，防空雷达起到了重要的作用。

1947年，美国的巴丁、肖克莱与拉克发明了半导体晶体管，这一成果立刻轰动了电子学界，巴丁等人被称为电子技术革命的杰出代表。

五、移动通信闪亮登场（1950 ~ 1980年）

20世纪70年代中期到80年代中期，是移动通信蓬勃发展的最好时期。1978年年底，美国贝尔实验室研制成功了先进移动电话系统，建成了蜂窝状移动通信网，其他的工业化国家也相继开发出了蜂窝式公用移动通信网，无线电移动通信系统真正地进入了个人领域。具有代表性的有美国的AMPS系统、北欧的NMT

系统、英国的 TACS 系统、日本的 NAMTS 系统等。

移动通信大发展主要应归功于三方面的技术进展：首先，微电子技术在这一时期得到了长足的发展，这使得通信设备的小型化、微型化有了可能；其次，贝尔实验室提出了蜂窝网的概念，蜂窝网即所谓的小区制，由于实现了频率再用，大大地提高了系统容量；再次是大规模的集成电路、微处理器技术、计算机技术的迅猛发展，从而为大型通信网的管理与控制，提供了相关的技术手段。

六、无线电数字化革命（1980 ~ 2010 年）

以 AMPS、TACS 与 TACS 及 NAMTS 为代表的第一代蜂窝移动通信网是模拟系统。模拟式蜂窝电话在迅速发展的同时，也开始显现出了它的缺点，特别是在人口密集的大城市中，由于模拟式蜂窝电话采用的频分多址技术造成了频率资源严重不足，同时模拟式蜂窝电话容易被窃听，造成对于用户利益的危害。解决上述问题的方法，是开发新一代数字蜂窝移动通信系统。

1982 年，欧洲成立了移动通信特别组（GSM），之后制定出了数字蜂窝移动通信系统，并且用该研究小组名字的缩写“GSM”命名。GSM 移动电话系统频谱的利用率高、容量大，同时可以自动漫游和自动切换，具有通信质量好、业务种类多、易于加密、抗干扰能力强、用户设备小、成本低等一系列优点，使得移动通信进入到了一个新的里程中。在 GSM 技术推出不久，摩托罗拉公司也开发出了一种更加先进的 CDMA 数字蜂窝移动通信技术。

数字化无线电通信在其他领域中也施展着自己的才华，比如广播、交通及文化领域中，无不因为数字革命带来的新空气而以前所未有的速度向前跨越着。

七、无线电技术在中国的应用

近年来，随着我国社会经济的持续增长，我国无线电事业得到了快速发展，无线电技术业务已经渗透到了通信、广播、定位、遥测、遥控等国民经济的多个领域中。目前，国际电信联盟《无线电规则》划分的 42 种无线电业务在我国已得到了全面的应用。

在公众通信领域中，我国的移动电话网络规模和用户规模，都位居世界第一位。移动通信发展对于提升社会信息化水平、拉动国民经济的发展都发挥了重要作用。在广播领域中，我国拥有先进的无线电声音广播和卫星电视播送网络。到目前为止，声音广播的国内覆盖率已经占据总人口的 94%，电视广播的国内覆盖率已经占总人口的 95%。在空间通信和航天领域，我国是世界上少数拥有独立制造通信卫星、广播卫星、气象卫星、地球资源勘察卫星等不同应用系列航天器能

力的国家之一。

除了在全球范围内通信外，我国的无线电技术能力还能够满足我国外空间高科技活动的需要，是我国航天技术的一个重要组成部分。此外，无线电技术在国防军事、渔业生产、水上交通、铁道运输、航空导航、气象预报、地震预报以及探测外空间天体的射电天文等专业部门中，都得到了普遍的应用，是我国国防建设的一项重要保障手段，为我国社会经济的持续发展提供了有效的支撑。

第二节 无线电信号的调制

一、调制的作用

在变化的电场周围会产生变化的磁场，变化的磁场周围又会产生变化的电场，如此循环往复，便会使交变的电磁场由近及远地辐射传播出去，就像是水池中的水波纹一样表现出“波”的特性，这便是电磁波。波峰之间的距离称为波长，单位时间内通过某一点的波峰数就称为频率。电磁波的传播速度为光速，频率在3000GHz以下的电磁波称为无线电波。

根据电磁波知识，信号波长 λ 与频率 f 的关系为

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (1-1)$$

式中： c 为光速（ $3 \times 10^8 \text{m/s}$ ）。此式表明，波长与频率是成反比的。

由声音、文字及图像等转换而成的电信号，都属于低频信号，这些信号若是要借助于天线以无线电波的形式来传输，则会因信号的波长太长而难以实现。因为不管是信号的发射还是接收，只有当天线尺寸与信号波长接近之时，效果才会好。所以，声音、文字及图像等转换成的电信号的无线传输，必须要经过调制处理。调制可以提高频率，缩短波长，便于发射。其次，是用不同的载波频率将各路信号的频谱分开，以避免各路信号之间在同一信道的传输中相互干扰。

二、调幅、调频与调相

调制就是一个信号（比如光、高频电磁波等）的某些参数（比如振幅、频率、相位等）按照另一个欲传输的信号（比如声音、图像等转换成的电信号）的特点变化的过程，即将要传送的信号“载”到高频振荡信号上去。

高频振荡信号就是携带信息的“运载”工具，所以称为载波；而所要传送的

信号便称为调制信号。按照被调制的高频振荡信号参数不同,调制的方式也不相同。设高频载波信号表示为 $u_c(t) = U_{cm} \cos(\omega_c t + \varphi)$,若是用待传输的低频信号去控制高频载波的振幅 U_{cm} ,使其振幅随着低频信号的变化而发生变化,则称其为振幅调制(Amplitude Modulation),简称为调幅,用AM进行表示,如图1-1所示;若是用低频信号去改变高频信号的频率 ω_c ,使其频率随着低频信号的变化而发生变化,则称其为频率调制(Frequency Modulation),简称为调频,用FM进行表示,如图1-2所示;若是用低频信号去改变高频信号的相位 φ ,使其相位随着低频信号的变化而发生变化,则称其为相位调制(Phase Modulation),简称为调相,用PM进行表示。

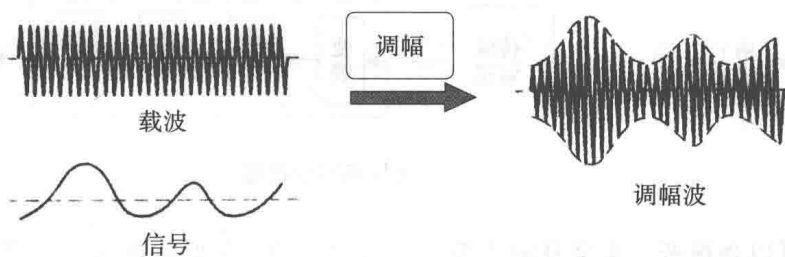


图 1-1 调幅过程

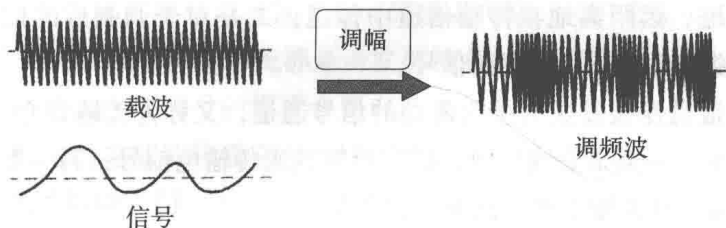


图 1-2 调频过程

调制方式的选择,是根据传输要求与各种调制的特点,全面综合地进行考虑的。例如:调幅制由于其所需要接收的设备简单,因而适用于各种中、短波及超短波段的无线电广播,但是其抗干扰的能力差;调频制抗干扰的能力强,但是由于占用的频带宽,因而适用于超短波的波段,比如电视伴音、移动通信等;调相制主要是应用于数字通信或间接调频的系统中。

解调是调制的逆过程,也就是将低频调制信号从高频已调制信号中还原出来的过程。调幅波的解调过程称为检波,调频波的解调过程称为鉴频,调相波的解调过程称为鉴相。

第三节 无线电信号的传输

一、信号传输系统

大多数信号传输系统的框图，如图 1-3 所示，它包括信号源、发送设备、传输信道、接收设备与终端设备。



图 1-3 信号传输系统的框图

信息可以是声音、文字及图像等。在传输之前，先要将声音、文字及图像等信息转换为电信号，这个电信号就是信号源。

发送设备主要有两大任务：一是将信号调制在高频载波上，以便通过天线或馈线高效率地、远距离地在传输信道中传送；二是对于调制后的信号进行放大，以便于输出功率足够的高频调制信号。

传输信道是连接发送与接收两端的信号通道，又称为传输媒介。传输信道可以分为两大类：一类是有线信道，即利用馈线来传输电信号；另一类是无线信道，即以无线电波（或光波）的形式来传输信号。

接收设备的任务，是对信道传送过来的高频调制信号进行变频、放大与解调处理，以恢复成为与发送端相互一致的原始电信号。由于信道中存在着许多干扰信号，因而接收设备还必须要具有从众多信号中选择有用信号、滤除干扰信号的能力。

终端设备将电信号变换成为原来的信息，比如声音、文字及图像等，以供用户使用。常见的终端设备有扬声器与显示屏等。

二、无线电波的波段划分

无线电波的波段划分，如表 1-1 所示。根据需要，可以选择合适的波段进行通信、广播、电、导航与探测等，但是不同波段电波的传播特性有很大的差别。

表1-1 无线电波的波段划分

波段名称	波长范围 /m	频段名称	频率范围 /Hz	
超长波	100000 ~ 10000	甚低频 (VLF)	3k ~ 30k	
长波	10000 ~ 1000	低频 (LF)	30k ~ 300k	
中波	1000 ~ 100	中频 (MF)	300k ~ 3000k	
短波	100 ~ 10	高频 (HF)	3M ~ 30M	
超短波 (米波)	10 ~ 1	甚高频 (VHF)	30M ~ 300M	
微波	分米波	1 ~ 0.1	特高频 (UHF)	300M ~ 3000M
	厘米波	0.1 ~ 0.01	超高频 (SHF)	3G ~ 30G
	毫米波	0.01 ~ 0.001	极高频 (EHF)	30G ~ 300G

三、电波的主要传播方式

电波的传播不是依靠电线传播，也不像是声波那样，必须要依靠空气媒介传播，有些电波能够在地球的表面传播，有些电波能够在空间直线地传播，也能够从大气层上空反射传播，有些电波甚至能够穿透大气层，飞向遥远的宇宙空间。

任何一种无线电信号传播系统都是由发射部分、接收部分与传输媒质这三部分所组成的。传播无线电信号的媒质主要有地表与电离层等，这些媒质的电特性对于不同波段的无线电波的传播有着不同的影响。根据媒质及不同媒质分界面对电波传播产生的影响不同，可以将电波的传播方式分为以下几种。

(一) 地波传播

沿着地球表面空间传播的无线电波，称为地波，如图 1-4 所示。由于地面上有高低不平的坡与房屋等障碍物，只有能绕过这些障碍物的无线电波，才能被各处的接收机所收到。当波长大于或相当于障碍物的尺寸时，就可以绕过障碍物到达它们的后面，地面上的障碍物一般都不大，长波可以相当容易地绕过它们，小波和中短波也能较好地绕过去，短波与微波由于波长较短，就很难绕过它们。由于地球是一个大导体，地球表面会因为地波的传播引起感应电流，因此地波在传播过程中，会损失一些能量，频率越高则损失的能量也越多。地波传播的特点是信号比较稳定，适用于长波、中波的波段。

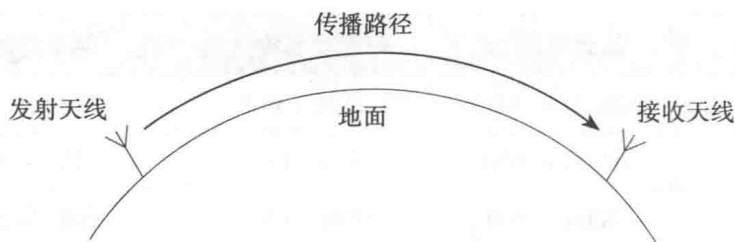


图 1-4 地波的传播

(二) 天波传播

声音碰到墙壁或高山就会反射回来，形成回声。光线射到镜面上也会形成反射。无线电波也能够发生反射。在大气层中，从几十千米至几百千米的高空中，有几层“电离层”，形成了一种天然的反射体，就像是一只悬空的金属盖，电波射到“电离层”时就会被反射回来，经由这一路径的电波被称为天波或反射波，如图 1-5 所示。在电波中，具有这种特性的主要是短波。

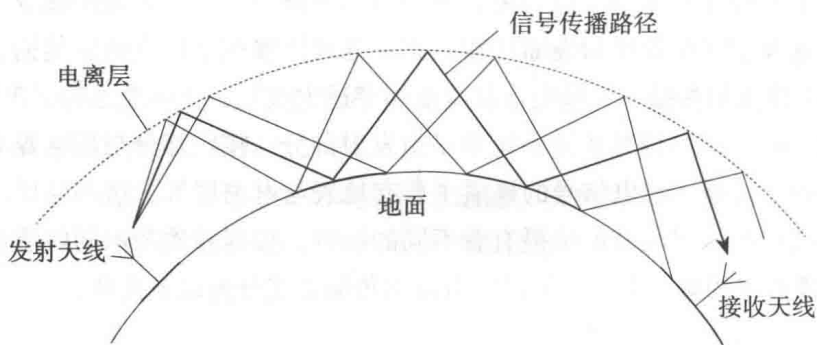


图 1-5 天波的传播

当大气层受到阳光的照射时，会产生电离。电离层一方面能反射电波，另一方面也要吸收电波。电离层对于电波的反射和吸收与频率（波长）有关。频率越低，吸收就越多；频率越高，吸收就越少。但是若频率太高，就不能够反射了，电波将会穿越电离层。所以，短波的天波，可以用作远距离通信。此外，反射和吸收与白天还是黑夜也有关系。在白天，电离层可以将中波几乎全部吸收掉，收音机只能收听当地的电台，而在夜里却能够收到远距离的中波电台。对于短波，电离层吸收得比较少，所以短波收音机无论是白天还是黑夜，都能够收到远距离的电台。不过，电离层是变动的，反射的天波会时强时弱，所以，通过收音机听

到的声音会忽大忽小，并且不稳定。

(三) 空间波传播

电波直接从发射天线传到接收天线，以直线传播的波，称为空间波或直射波，这种传播方式仅限于视线距离以内。目前，广泛使用的超短波（微波）通信和卫星通信的电波传播，都属于这种传播方式。

超短波的传播特性比较特殊，它既不能绕射，也不能被电离层所反射，而只能是以直线的方式传播，如图 1-6 所示。由于空间波不会拐弯，因此它的传播距离就受到限制。发射天线架得越高，空间波传得就会越远。所以，电视发射天线和电视接收天线，应当尽量架得高一些。尽管如此，传播距离仍然会受到地球拱形表面的阻挡，实际只有 50km 左右。

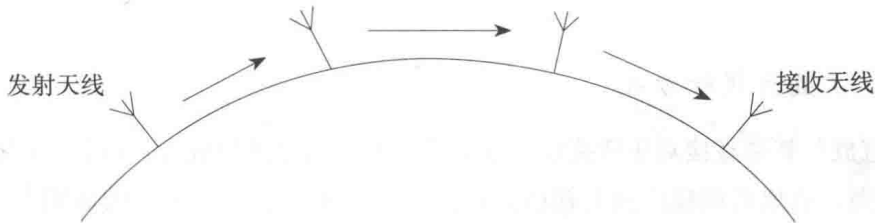


图 1-6 空间波的传播

超短波（微波）不能被电离层所反射，但是能穿透电离层，所以在地球的上空就不会受到阻隔。这样一来，我们就可以利用空间波与遥远太空中的宇宙飞船、人造卫星等取得联系。此外，卫星中继通信、卫星电视转播等也主要是利用空间波作为传播途径。

第四节 无线电信号的接收

一、直放接收方式

(一) 最简单的接收方式

以调幅广播信号接收为例，最简单的调幅广播接收方式，如图 1-7 所示，它主要由接收天线、输入电路、解调器及耳机所组成。接收天线的的作用，是将无线电波转换为电信号；输入电路的作用，是从众多的广播电台信号中选择一个

需要收听的电台；解调器就是检波器，其作用是从调幅信号中解调出音频信号；耳机的作用是将音频信号转换成为声波。由于信号没有经过放大，所以只能采用耳机来收听。

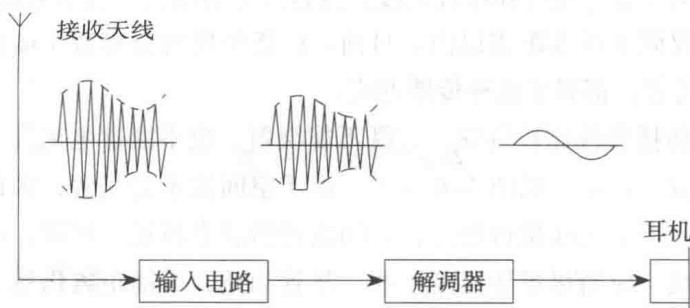


图 1-7 最简单的调幅广播接收方式

（二）直放接收方式

“直放”就是直接对于所接收到的无线电高频信号进行放大。以调幅广播信号接收为例，直放式调幅广播的接收，如图 1-8 所示，它与图 1-7 的区别在于增加了放大环节，包括高频放大与低频（音频）放大。高频信号在检波之前被直接放大，可以提高检波效率；对于检波后的音频信号再进行放大，可以使信号幅度达到所需要收听的幅度。

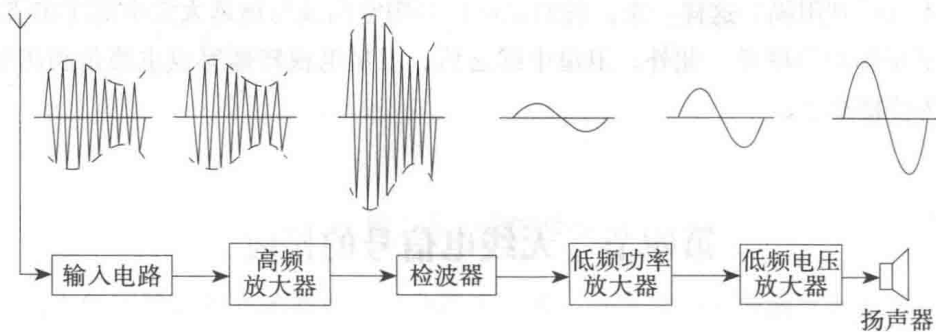


图 1-8 直放式调幅广播的接收

直放式接收机虽然电路简单，但是对于不同载波频率的广播电台信号接收会不均匀、灵敏度低、选择性差，因而已经被超外差接收方式所取代。

二、超外差接收方式

1912 年，美国的阿姆斯特朗发明了超外差接收方式，它能使因为无线电信号

直接接收与放大而引起的一系列困难得到解决。利用超外差接收的方法，能够使接收机电路大大地简化，接收机的性能与灵敏度也得到提高。从此以后，无线电广播事业出现了一片兴旺的景象。

(一) 超外差接收框图

无线电信号的接收通常是采用超外差接收方式，超外差接收框图如图 1-9 所示。所谓的超外差接收，就是将天线接收到的高频信号变换成为中频信号，然后再放大到检波所需要的幅度，最后通过检波以获得低频信号。

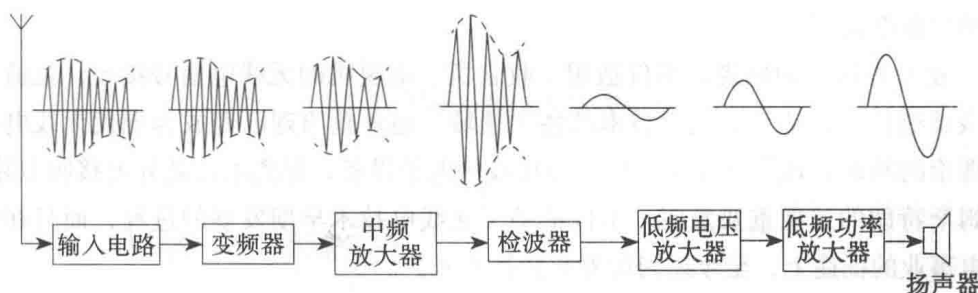


图 1-9 超外差接收的框图

在变频的过程中，首先，是由本机振荡电路产生比外来高频信号超出一个中频频率（电视机为 38MHz，调幅收音机为 465kHz，调频收音机为 10.7MHz）的正弦波本振信号，然后将所接收的外来高频信号与本振信号送入混频器进行混频，混频之后有差频（中频 38MHz、465kHz、10.7MHz）、和频及其他频率成分产生，再利用中频放大电路选出所需要的中频信号进行放大。

(二) 超外差接收的优点

1. 接收均匀

因为广播电台不同，载波频率也不同，则放大电路的增益也会有所不同。现在不管接收到什么广播电台的信号，一律先变换成中频信号后再放大，显然各广播电台信号的增益几乎是一致的。

2. 选择性好

选择性是指接收所需的电台、抑制其他电台信号的能力，选择性取决于电路的选频特性。以接收电视 3 频道为例，其图像载频为 65.75MHz、伴音载频为